МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.391

Б.В. Коваль, М.О. Селюченко, Г.В. Мельник, А.В. Ковальчук
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра телекомунікацій

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛОЩИНИ УПРАВЛІННЯ ПРОГРАМНО-КЕРОВАНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ФУНКЦІЙ ВІРТУАЛІЗАЦІЇ

Запропоновано рішення для удосконалення площини управління програмно-керованих мереж, збільшення ефективності, швидкості реакції, надійності та масштабованості таких мереж. Удосконалення площини управління полягає у створенні розподіленої системи функцій віртуалізації (РСФВ), яка дає змогу вирішити основні проблеми, що виникають у разі використання принципів централізованого програмного керування в транспортних мережах операторського класу та загалом підвищити гнучкість у керуванні та адаптивність мережі до випадкових подій. На основі РСФВ розроблено метод динамічного моніторингу для ефективного управління ресурсами мережі та зменшення кількості службової інформації. Запропоновано функцію децентралізованого управління, яка створює резервну площину керування та забезпечує надійність мережі. Розроблено метод кешування записів таблиці потоків, що дає змогу без запитів на контролер швидко й економно відновлювати потоки з погляду службової інформації. Запропоновано функцію паралельного програмування таблиць потоків комутаторів для збільшення швидкості реконфігурації мережі. Всі рішення перевірено за допомогою розробленої імітаційної моделі, яка підтвердила ефективність та доцільність їхнього використання на реальній транспортній мережі.

Ключові слова: ПКМ, площина керування, OpenFlow, розподілена система функцій віртуалізації.

B.V. Koval, M.O. Seliuchenko, H.V. Melnyk, A.V. Kovalchuk
Lviv Polytechnic National University,
Department of telecommunications

INVESTIGATION OF CONTROL PLANE IN SOFTWARE-DEFINED NETWORKS BASED ON DISTRIBUTED SYSTEM OF VIRTUALIZATION FUNCTIONS

In this paper are proposed the number of solutions for improvement of control plane in software-defined networks. One of the main problems that arise when designing and implementing new network is the problem of developing efficient and optimal network control system. SDN technology has control plane and data forwarding plane separated from each

other. Decreasing of time of network adaptation is a major index of efficiency of software controlling system as it impacts on flexibility that is a main characteristic and advantage of SDN. Improvement of control plane lies in creation of distributed system of virtualization functions (DSVF) which allows resolving major problems that arise when applying principles of centralized software control in carrier transport networks and increase control flexibility and network adaptability to unexpected events.

In order to manage network controller must have up-to-date information about all devices and their state and configuration in the network. Intensive exchange by monitoring messages impacts on the amount of signaling information that is transferred on the network. Moreover existing method of monitoring may cause delays in reaction of the control plane to extraordinary events that require immediate handling. Based on DSVF the method of dynamic monitoring for efficient management of network resources and decrease in signaling information amounts has been developed. It allows dynamically change monitoring frequency according to level of utilization of specific segment of the network. One of the main tasks of centralized architecture of SDN is ensuring of reliability and availability of controller. The function of decentralized management that forms reserved control plane and ensures network reliability has been proposed. When programming flow tables sequentially network reconfiguration duration can significantly vary depending on the number of switches to be reconfigured, number of flow tables on each switch and number of flows to be modified in each flow table. Function of parallel programming of switch flow tables for increasing of network reconfiguration speed has been proposed. Key novelty of DSVF lies in the fact that management processes on each independent switch are partly performed by applications that are installed on each switch. Each application executes one specific function from the set of functions that have been created for a specific case in the network and in general this applications form distributed system of virtualization functions. All solutions have been tested based on the developed imitation model. The results of its work confirm efficiency and practical value when applying proposed solutions on a real transport network.

Key words: SDN, control plane, OpenFlow, distributed system of virtualization functions.

Вступ. Стрімке зростання трафіку, віртуалізація серверів та поширення хмаркових технологій змушують змінювати основний підхід до побудови мереж. Складнощі у впровадженні нових рішень полягають в неможливості відразу ввести їх на глобальні мережі, оскільки це потребує значних витрат фінансових ресурсів на програмне та апаратне забезпечення, а крім того, пов’язане з можливими ризиками, що завжди виникають під час впровадження не перевірених часом технологій. Саме тому донедавна SDN-рішення стосувалися тільки локальних мереж, і лише після впровадження цих рішень в глобальну мережу компанії Google цією концепцією почали цікавитися власники транспортних мереж.

У статті “Experience with a Global-Deployed Software Defined WAN” [1] запропоновано виділення пропускних здатностей для кожного додатка окремо або для мультиплексованої суміші додатків. На основі цього забезпечується “fair scale” – справедлива шкала пропускних здатностей, смуги пропускання в якій залежать від домовленості між власником мережі та його клієнтами.

У “Composing Software-Defined Networks” [2] розглянуто розділення роботи додатків за допомогою використання гіпервайзера, що допомагає розділити ресурси мережі на частини у разі використання кількох контролерів.

Група вчених у “Towards Secure and Dependable Software-Defined Networks” [3] пропонує безпечну та надійну платформу управління, що забезпечується за допомогою реплікації контролерів, динамічної асоціації комутатора з кількома контролерами, а також різноманітні засоби пошуку помилок та несправностей в мережі.

Розширення площини управління у програмно-керованих мережах. Сучасні рішення передбачають використання технології SDN переважно для локальних мереж, де основними мережевими елементами є маршрутизатори та комутатори з низькими швидкостями операційних

обчислень. Для цих мереж контролер забезпечує високу швидкість управління комутаторами, а також динамічну побудову топології мережі загалом та шляху для кожного потоку окремо.

Повністю відокремлений рівень управління доцільний лише для малих мереж, де перенаправлення трафіку відбувається згідно з таблицями комутації, які містять невелику кількість записів у таблицях потоків. Потоки встановлюються для забезпечення сеансу між двома користувачами або між користувачем та сервером. Оскільки такі мережі є невеликими, процеси управління ними (пошук шляхів передачі, встановлення потоків та реконфігурація комутаторів) є простими, бо не потребують потужних обчислювальних ресурсів, швидкі та надійні. Однією з основних переваг введення SDN-обладнання є суттєве здешевлення апаратної частини комутаторів. У зв'язку з цим у малих мережах достатньо використовувати найпростіші комутатори з найпростішою програмною логікою. На відміну від локальних мереж, у глобальних мережах та транспортних мережах операторського класу передавання інформації відбувається у формі високошвидкісного агрегованого потоку, який утворюється відповідно до конкретних вимог щодо якості обслуговування. Часові характеристики потоків, що надходять у транспортну мережу із систем доступу та формують агрегований потік, є незалежними. Відповідно, пропускна здатність, якої потребує той чи інший агрегований потік у конкретний момент часу, постійно змінюється. На основі цього можна виділити низку проблем, зокрема неефективне використання пропускних здатностей фізичних каналів чи втрату даних у зв'язку з неможливістю динамічного та своєчасного застосування методів перерозподілу трафіку. Сучасні SDN-рішення справляються з такими проблемами за рахунок введення динамічної системи моніторингу. Однак у разі зростання обсягів передачі інформації та підвищення динаміки використання ресурсів мережі збільшується кількість службової інформації та навантаження на централізований контролер, внаслідок чого збільшується і час реакції мережі на проблеми та події, що виникають у процесі роботи мережі. З метою усунення описаних вище недоліків для великих мереж транспортного рівня пропонуємо використовувати комплекс програмних засобів, встановлених на комутатори на основі віртуальних машин, – розподілену систему функцій віртуалізації, зображену на рис. 1.

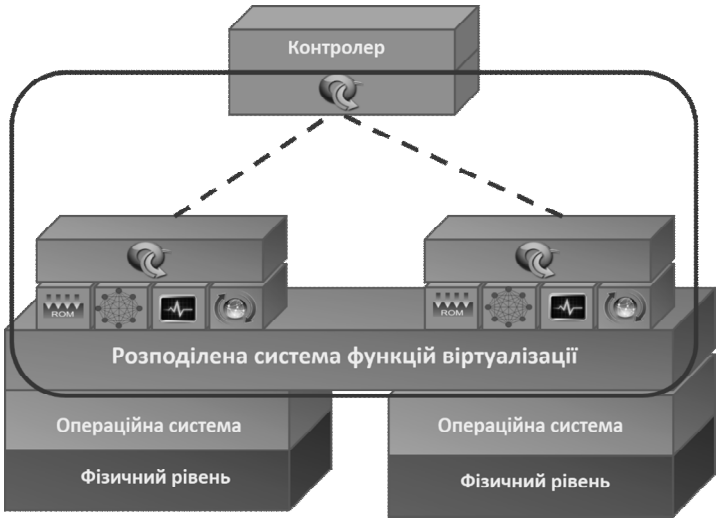


Рис. 1. Розподілена система функцій віртуалізації

Описана система слугує основою для розширеного рівня управління, забезпечує гнучкіше керування мережею та підвищення адаптивності мережі. Таку систему потрібно встановлювати поверх мережевої операційної системи комутатора, і вона є основою для ряду додатків. Діалог між контролером та додатками забезпечується на основі модифікованого агента OpenFlow, що відрізняється від стандартного розширеним набором команд для управління комутаторами. Поєднання такого агенту та розподіленої системи функцій віртуалізації дає можливість встановити множину додатків для підвищення ефективності управління мережею.

Додатки можна придбати у вендорів, незалежних розробників чи зробити самостійно або ж на замовлення з урахуванням індивідуальних потреб власника мережі. У цій статті пропонуємо декілька рішень, розроблених та реалізованих на основі РСФВ:

1) функція мультипотокового реконфігурування комутаторів;
2) функція децентралізованого управління;
3) метод динамічного моніторингу;
4) метод кешування потоків.

Функція мультипотокового реконфігурування комутаторів. Нині у рішеннях ПКМ використовують метод однопотокового реконфігурування комутаторів, відповідно до якого модифікація декількох таблиць потоків одного комутатора здійснюється послідовно одним програмним процесом. У разі послідовної модифікації таблиць потоків (рис. 2) час реконфігурації мережі може значно змінюватися залежно від кількості комутаторів, які потребують модифікації таблиць потоків, кількості таблиць потоків на кожному комутаторі та кількості записів у кожній таблиці комутації, які необхідно модифікувати. У результаті затримки можна обчислити за такими формулами:

$$t(n) = t_{12} + t_{\text{mod}} + t_{21} = 2 \cdot t_{пер} + \sum_{1}^{n} t_n,$$

$$t_{switch}(m) = 2 \cdot t_{12} + \sum_{1}^{m}\sum_{1}^{n} t_n, \qquad (1)$$

$$t_{network}(k) = \sum_{1}^{k}\left(2 \cdot t_{12} + \sum_{1}^{m}\sum_{1}^{n} t_n\right);$$

де t – тривалість модифікації n записів у одній таблиці потоків; t_{12} та t_{21} – тривалості передачі модифікованих таблиць потоків від контролера до комутатора та передавання відповіді про успішне закінчення модифікації від комутатора до контролера відповідно; t_{switch} – тривалість модифікації m таблиць потоків на одному комутаторі; $t_{network}$ – тривалість реконфігурації k комутаторів, що в результаті визначає закінчення реконфігурації всієї мережі.

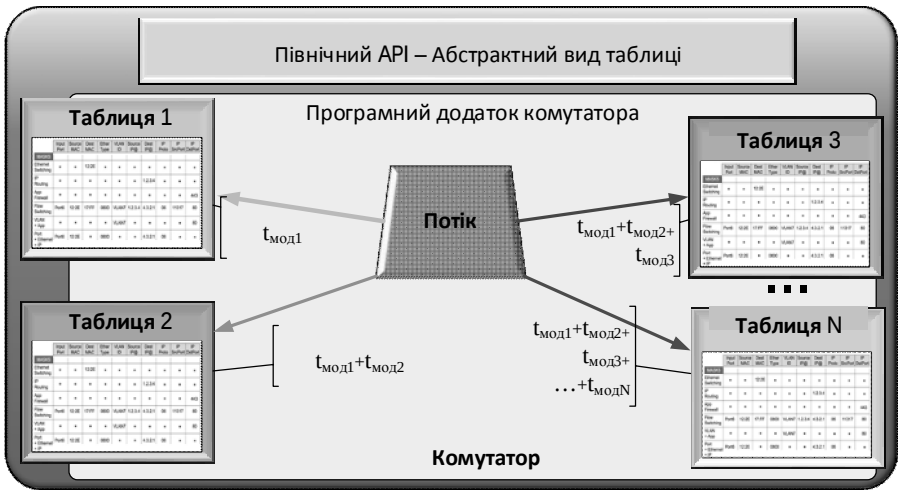


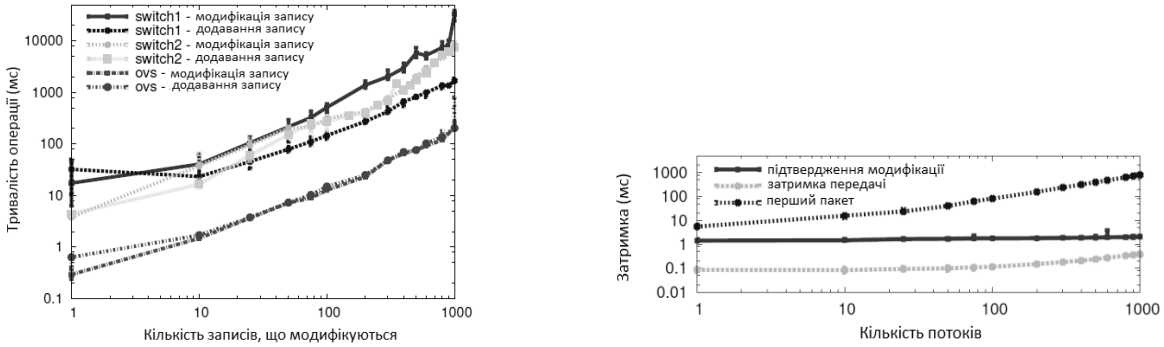
Рис. 2. Метод однопотокового реконфігурування комутатора

Тривалість встановлення/модифікації таблиць потоків на комутаторах різних типів вчені дослідили у роботі [4]. Результати дослідження відображено на рис. 3.

На рис. 3, а відображено залежність тривалості модифікації лише від кількості запитів, що модифікуються на комутаторі. На рис. 3, б відображено повну залежність затримки від реконфігурації, яка охоплює спілкування з контролером, модифікацію таблиць потоків та відправлення на контролер підтвердження про модифікацію.

Тривалість модифікації таблиць апаратного комутатора може досягати однієї секунди у разі великої кількості записів. У випадку послідовної модифікації всіх таблиць комутатора затримка

може сягати 10 секунд і більше. У транспортній мережі, де передаються потоки зі швидкістю 1 Гбіт/с та вище, реконфігурація таблиць потоків, тривалість яких становить 10 секунд, може призвести до значних затримок та втрат інформації, що недопустимо.



а б

Рис. 3. Характеристика тривалості модифікації таблиці потоків залежно від кількості потоків лише на комутаторі (а) та загалом у мережі (б)

З урахуванням зазначеного у роботі запропоновано використовувати метод мультипотокового реконфігурування комутатора (рис. 4), реалізованого як програмний додаток на основі РСВФ. Він дає можливість одночасно програмувати декілька апаратних таблиць комутації завдяки тому, що кожна таблиця реконфігурується окремим програмним процесом. Цей метод дає змогу створювати декілька процесів у оперативній пам'яті комутатора. Кожен з цих процесів відповідає за певну апаратну таблицю. У результаті значно збільшується швидкість конфігурації комутатора, що є важливим показником у разі динамічного оперативного управління потоками, особливо у ситуаціях, які чутливі до затримок.

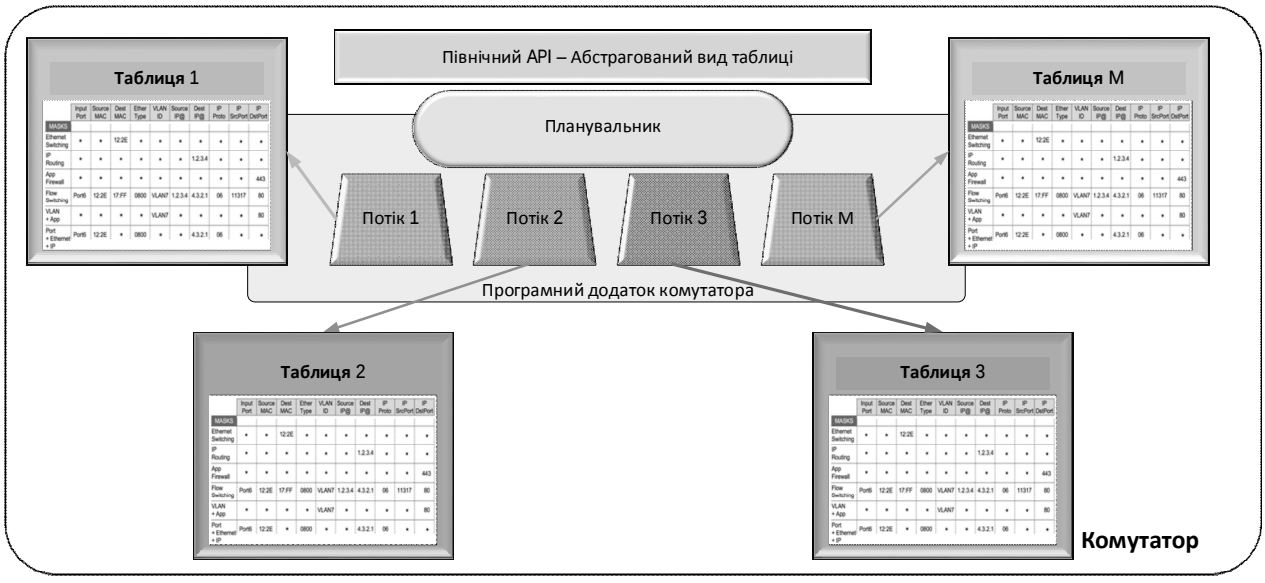


Рис. 4. Метод мультипотокового реконфігурування комутатора

Функція децентралізованого управління ПКМ. Однією з найважливіших задач централізованої архітектури програмно-керованих мереж є забезпечення надійності та доступності контролера. Це пов'язано з тим, що всі процеси управління мережею та її окремими елементами відбуваються лише за посередництва та відповідного рішення контролера. Транспортна мережа не може втратити рівень керування, оскільки це призведе до значних втрат коштів та тривалого процесу відновлення.

Сьогодні контролери великих мереж встановлюють в центрах обробки даних, які забезпечують надійність за допомогою методів резервування та реплікації. Проте в окремих випадках можуть виникнути питання доступності контролера, що може бути пов'язано з пошкодженням каналу зв'язку з центром обробки даних чи виходом з ладу інших систем забезпечення роботи ЦОДу.

Одним зі шляхів забезпечення безвідмовності площини управління мережею є її резервування. Тому пропонуємо використовувати резервну площину управління на основі децентралізованих протоколів традиційних мереж. Такими протоколами є OSPF, BGP, IS-IS та інші.

Протоколи маршрутизації та децентралізованого керування реалізуються за допомогою відповідних програмних додатків на кожному комутаторі. Такі додатки можуть підтримувати широкий набір алгоритмів та методів відновлення мережі на основі децентралізованої взаємодії комутаторів мережі між собою (рис. 5). Зрозуміло, що таке управління не забезпечить необхідних вимог до гнучкості мережі, проте дасть змогу продовжити роботу мережі у випадку втрати комутаторами зв'язку з контролером до моменту, коли зв'язок буде відновлено. Алгоритм функціонування такого додатка відображено на рис. 6.

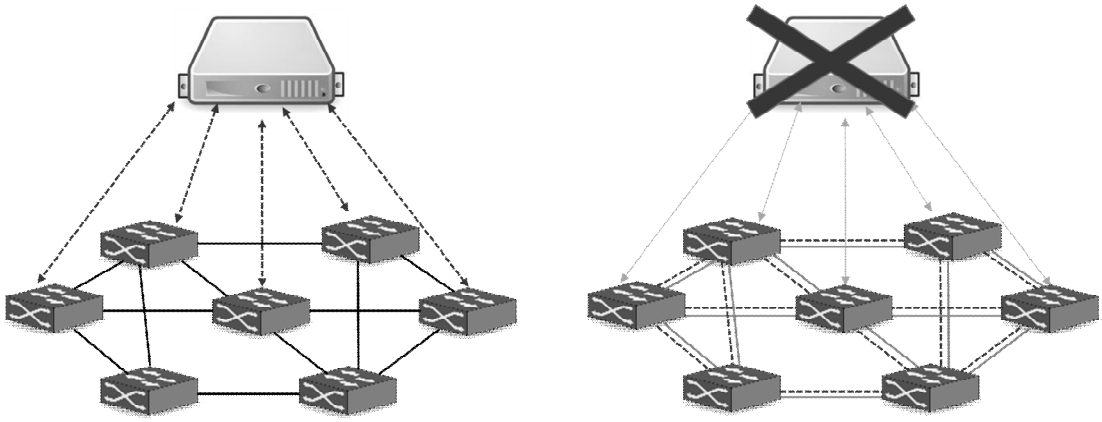


Рис. 5. Перехід від централізованої архітектури управління до децентралізованої

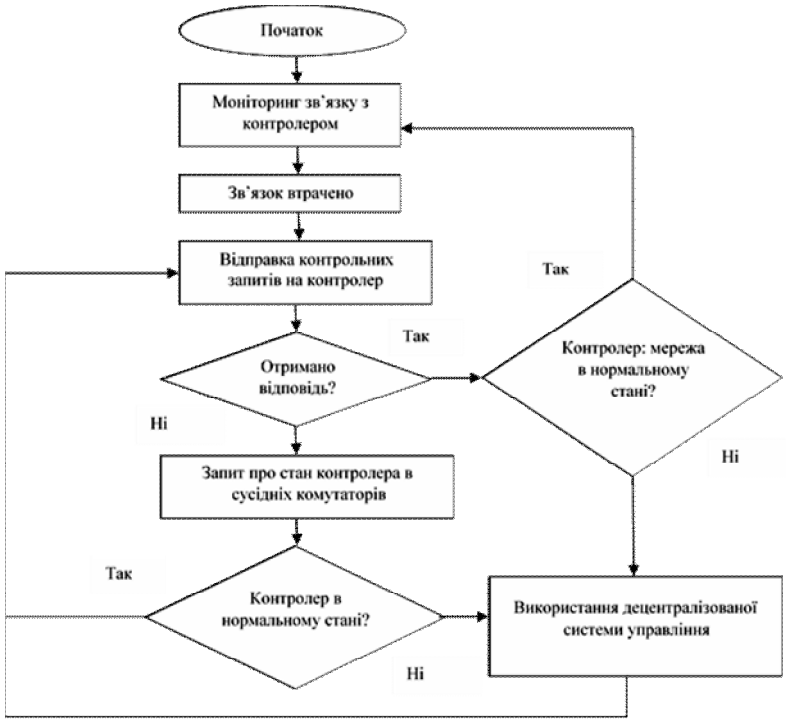


Рис. 6. Алгоритм забезпечення надійності площини управління

Однією з основних переваг такого підходу є можливість забезпечити плавний перехід до використання технології ПКМ у мережі, яка потребує постійного функціонування. Якщо замінити частину традиційних комутаторів на OpenFlow-комутатори, нові комутатори зможуть без проблем взаємодіяти з традиційними комутаторами за допомогою децентралізованих протоколів. Завдяки цьому робота мережі не порушиться, що дає змогу здійснювати поступове впровадження ПКМ.

Метод динамічного моніторингу. Для забезпечення процесів управління мережею, побудованою за основними принципами технології SDN, необхідно здійснити модернізацію механізмів моніторингу стану її ресурсів, оскільки у разі використання стандартного механізму значно збільшується надлишкова службова інформація. Цей факт може негативно впливати на ефективність роботи мережі загалом через завантаженість каналів. У зв'язку з цим пропонуємо використовувати інтелектуальний додаток моніторингу, розроблений на основі розподіленої системи функцій віртуалізації. Суть цього механізму полягає у динамічній зміні інтенсивності здійснення моніторингу стану мережевого елемента залежно від його поточної завантаженості. Інтелектуальний моніторинг на мережі реалізується встановленням головного додатка моніторингу на контролер та відповідних підконтрольних йому агентів на кожен комутатор.

Процес моніторингу ґрунтується на двох основних підходах:

перший – зміна інтенсивності моніторингу залежно від попередньо накопиченої статистичної інформації про стан завантаженості у пам'яті керуючого пристрою. За допомогою аналізу зібраної інформації можна визначати характеристики трафіку в певний період часу та змінювати інтенсивність відповідно до визначених потреб. Наприклад, у години пікового навантаження, як правило, під час ранкового робочого періоду, треба збільшувати інтенсивність моніторингу, а вночі можна її зменшити;

другий – динамічна зміна інтенсивності моніторингу залежно від завантаженості елемента мережі на основі зібраних у режимі реального часу даних стану елемента мережі. У випадку наближення завантаженості до критичного значення відбувається збільшення частоти опитування мережевих вузлів, тобто здійснюється перехід у стан пильного моніторингу відповідного елемента мережі.

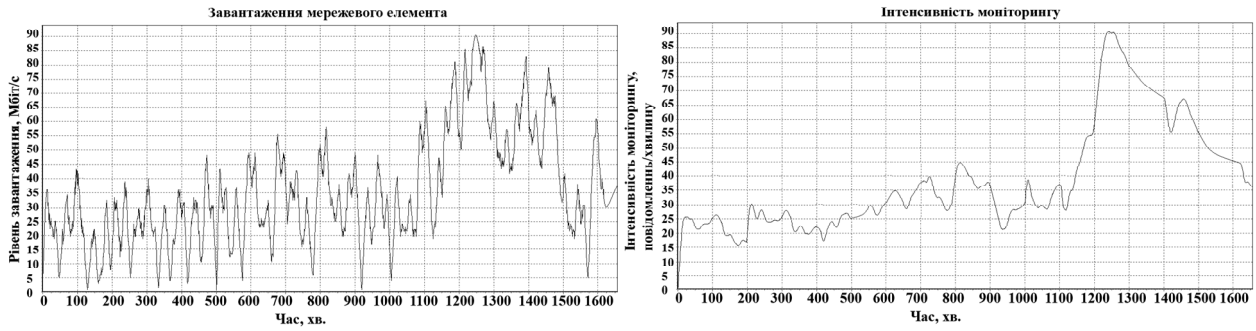
Проведення аналізу моніторингу виконує додаток, встановлений на контролері, а підконтрольні йому агенти виконують функції збору інформації, її модифікації та відправлення на контролер. Диференціація інтенсивності моніторингу окремих сегментів мережі дає можливість усунути надлишкові процеси моніторингу та обробки даних, забезпечуючи необхідну інтенсивність лише на тих вузлах, де це необхідно. На основі диференціації інтенсивності моніторингу можна збільшити гнучкість управління елементами мережі, і, як наслідок, ефективніше використовувати обчислювальні ресурси пристроїв рівня управління. Також, володіючи актуальною службовою інформацією, можна здійснювати оптимальний розподіл навантаження на мережі, запобігаючи негативним явищам перевантаження мережевих вузлів. Окрім того, можна переводити елементи, що простоюють, в режим очікування, зберігаючи при цьому можливість надійного і швидкого їх відновлення до нормального режиму роботи. Це значно зменшує витрати на електроенергію та збільшує час "життя" мережевих пристроїв. Повністю відключати обладнання не завжди доцільно, оскільки його ввімкнення потребує певного часу, який необхідний для відновлення таблиць комутації, запуску всіх апаратних та програмних процесів комутатора, що загалом впливає на час на перебудови топології мережі та спричиняє стрибок службової інформації між контролером та комутатором.

Формула (2) описує принцип зміни частоти моніторингу:

$$z(Y) \to 0.9 \cup z''(Y) > 0,\ f \cong f + \Delta z(Y), \qquad (2)$$

де Y – нормоване навантаження; z(Y) – функція зміни навантаження; f – інтенсивність моніторингу; x – інтервал "завантаження контролера".

На рис. 7 показано адаптацію частоти моніторингу до завантаженості мережевого елемента.



а *б*

Рис. 7. Завантаженість мережевого елемента (а) та зміна інтенсивності моніторингу відповідно до завантаженості (б)

Особливістю розглянутого механізму є зміна інтенсивності моніторингу лише конкретного мережевого вузла, який цього потребує, і це не впливає на інтенсивність моніторингу інших вузлів. Завдяки використанню інтелектуального додатка моніторингу можна позбутися надлишкових процесів моніторингу, уникаючи при цьому негативних явищ перевантажень, та зменшити кількість службової інформації, що циркулює у мережі. Так розвантажуються фізичні канали зв'язку, що дає змогу підвищити загальну продуктивність роботи мережі. Пропонований механізм адаптований до сучасного динамічного трафіку та забезпечує хорошу базу для подальшого процесу балансування навантаження.

Метод кешування потоків. Згідно із сучасною концепцією SDN, кожен перший пакет потоку відсилається на контролер для створення нового запису, що формуватиме віртуальний канал – тунель між точкою відправлення та точкою призначення. Тому потрібний певний час на обробку пакета контролером. Такий пакет потрапляє в буфер комутатора і очікує, поки з контролера надійдуть інструкції щодо його обробки. Після передавання всіх пакетів цього потоку він автоматично закривається та видаляється з таблиці потоків комутаторів через деякий час.

Видалення потоків ґрунтується на такому параметрі потоку, як час життя (Time To Live – TTL), який у обчислювальній техніці та комп'ютерних мережах визначає максимальний період часу або кількість ітерацій чи переходів, за яких набір даних (пакет) може існувати до свого зникнення.

Тривалість існування більшості потоків у мережі не можна передбачити, тому застосовується спосіб видалення тунелю, коли час очікування нового пакета перевищує певне значення. Лише після цього потік видаляється з таблиць потоків комутатора. Проте існують ще службові потоки, механізми прогнозування яких існують та впроваджені в мережі. Такі потоки закриваються після того, як лічильник бітів перетне певну межу. Видалення потоків з таблиці комутації комутатора потрібне, щоб зменшити кількість неактуальної інформації та, як наслідок, зменшити час пошуку відповідностей потоків у таблиці комутатора. Крім того, кожен комутатор може містити обмежену кількість записів у таблиці потоків. У випадку надходження пакета, що належить до потоку, який був видалений, комутатори сприймають його як зовсім новий потік, оскільки останній безповоротно видалений з таблиці комутації.

Пропонуємо використовувати кеш для відновлення потоків з характеристиками, що раніше існували в мережі. Це дає можливість замінити звернення комутатора до контролера на пошук потрібного потоку в кеш-таблиці. За наявності великого навантаження в мережі збільшується навантаження на вхідний буфер контролера, відповідно до цього зростає час встановлення нових потоків. Метод кешування не тільки зменшує кількість службової інформації, що потрібна для встановлення потоків, а й пришвидшує пошук та встановлення потоків, які вже раніше існували.

Алгоритми методу кешування потоків показано на рис. 8–9.

Відповідно до методу кешування потоків процес встановлення потоку складається з декількох кроків. У разі надходження пакета з відповідним заголовком на крайовий вузол він передається на програмний рівень, де спеціальний програмний додаток, створений на основі РСФВ,

перевіряє, чи існував уже такий тунель і чи є про нього інформація в кеш-пам'яті комутатора. Якщо так, тоді програмний додаток відправляє цей пакет на наступний комутатор, який бере участь у створенні потоку, а сам здійснює модифікацію власних таблиць потоків, після чого відправляє інформацію про встановлення потоку на контролер. Наступний комутатор виконує такі самі дії. У результаті пакет пройде через мережу і прокладе тунель для всіх наступних пакетів.

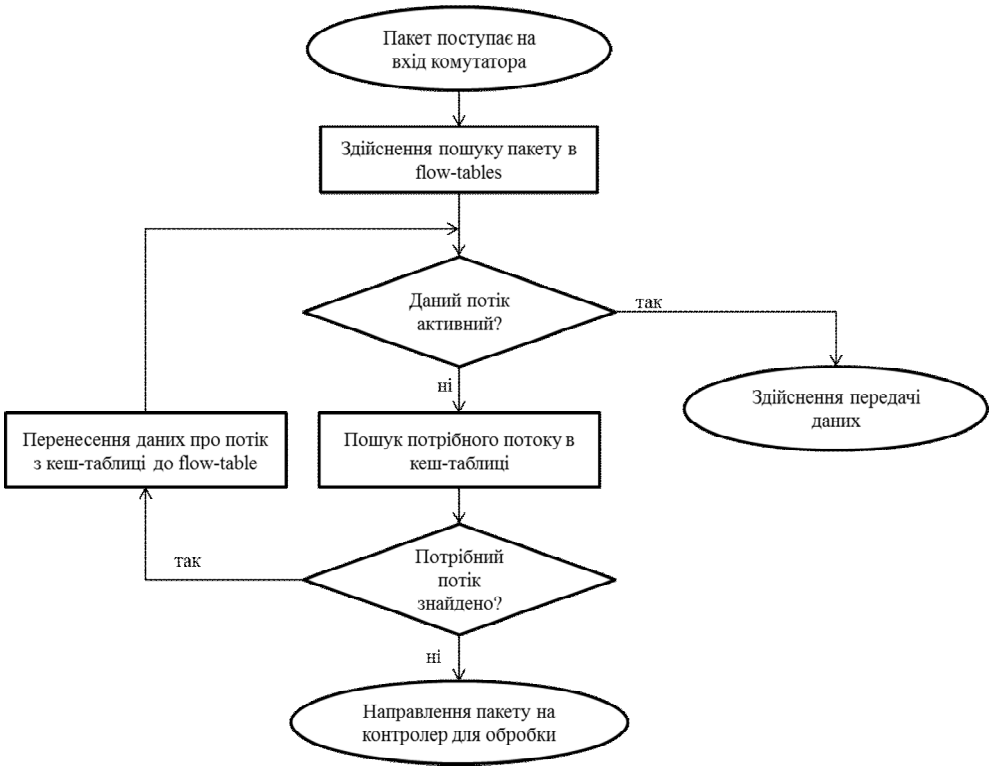


Рис. 8. Алгоритм відновлення тунелів

Перевага такого прокладання тунелю полягає у тому, що мережа не очікує на взаємодію з контролером, а таблиці потоків починають модифікуватися одразу після відправлення пакета на наступний комутатор. Отже, на всіх комутаторах таблиці потоків модифікуються майже одночасно, що значно зменшує затримку прокладення тунелю.

З рис. 8 бачимо, що відправлення потоку на обробку контролеру відбувається лише у випадку, якщо його не знайдено ні в таблиці потоків, ні в записах кеш-таблиці комутатора.

Ефективність використання методу кешування відповідно до часу затримки можна визначити за формулою:

$$E_T = \frac{2 \cdot (\sum_{i=1}^{n} T_{i.обр} + \sum_{i=1}^{2\cdot(n-1)} T_{i.буф} + \sum_{i=1}^{n-1} T_{i.шляху})}{\sum_{j=1}^{k} (T_{j.обр} + T_{j.пошуку})} \quad (3)$$

Ефективність використання методу кешування згідно із службовою інформацією обчислюють так:

$$E_P = \frac{P_{комут-контр} + \sum_{j=1}^{k} P_{j.контр-комут}}{P_{внутр.}} \quad (4)$$

де n – кількість пристроїв, що здійснюють обробку на шляху службової інформації; k – кількість комутаторів, через які пролягає створений тунель; $P_{внутр}$ – інформація, яка використовується для пошуку в кеш-таблицях.

На рис. 9 показано алгоритм кешування, відповідно до якого відбувається перенесення даних з таблиці потоків після закриття тунелю до кеш-таблиці, яка представлена спеціальним кеш-додатком, встановленим на операційну систему мережевого пристрою.

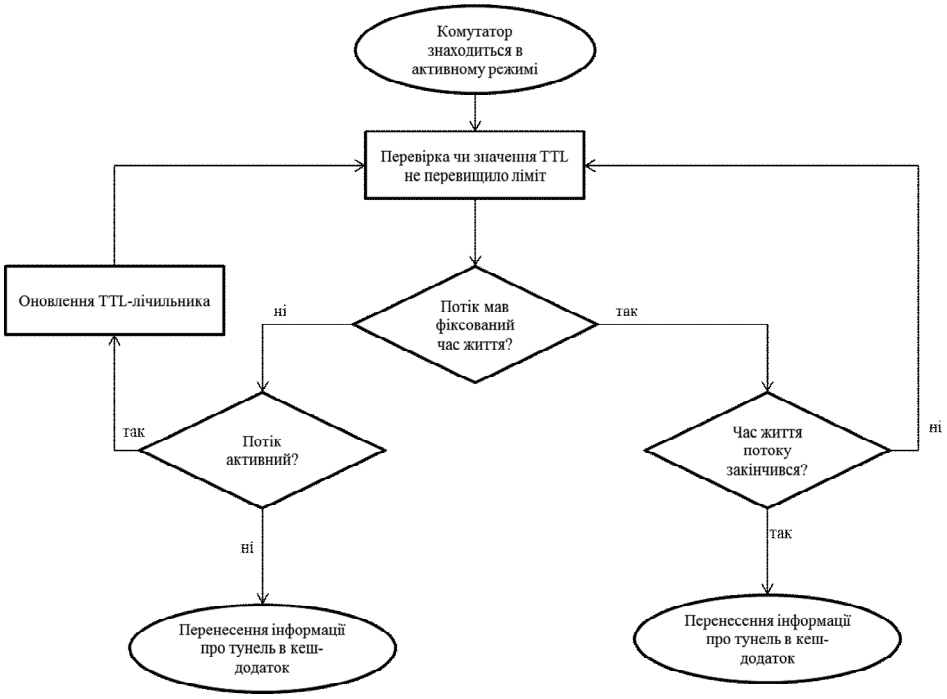


Рис. 9. Перенесення інформації про тунель в кеш-додаток

Аналіз результатів дослідження. З метою перевірки працездатності та ефективності запропонованих вище рішень створено імітаційну модель на базі центру мережевих технологій лабораторії Національного університету “Львівська політехніка”, що моделює як звичайну ПКМ, так і мережу з модифікованою площиною управління на підставі РСФВ. За основу потоків, що циркулюють цією мережею, беруться потоки, що генеруються на основі даних про реальний трафік, знятий у центрі мережевих технологій Національного університету “Львівська політехніка”.

За результатами роботи моделі отримано такі дані. Проведено порівняння тривалості встановлення потоків за допомогою стандартного методу створення потоків та методу кешування. На графіку, наведеному на рис. 10, різними кривими відображено зміну часу встановлення тунелів у процесі роботи мережі стандартним методом (верхня крива) та методом кешування (нижня крива) відповідно. Великий розкид значень тривалостей встановлення тунелів у разі використання стандартного методу пов’язаний зі складністю встановлення, тобто кількістю вузлів, що будуть задіяні, їхньою завантаженістю та іншими параметрами, які характеризують завантаженість мережі. Можна спостерігати, що тривалість коливається в межах від 10 до понад 500 мс для різних тунелів у різні моменти часу.

Для методу кешування можна спостерігати виграш, у 5–10 разів більший порівняно зі стандартним методом. Це пов’язано з тим, що звернення до контролера, моніторинг та обчислення маршруту не відбуваються, а це суттєво економить час.

На рис. 11 відображено принцип дії методу динамічного моніторингу. Двома кривими показано інтенсивність, з якою відбувається моніторинг двох сегментів мережі.

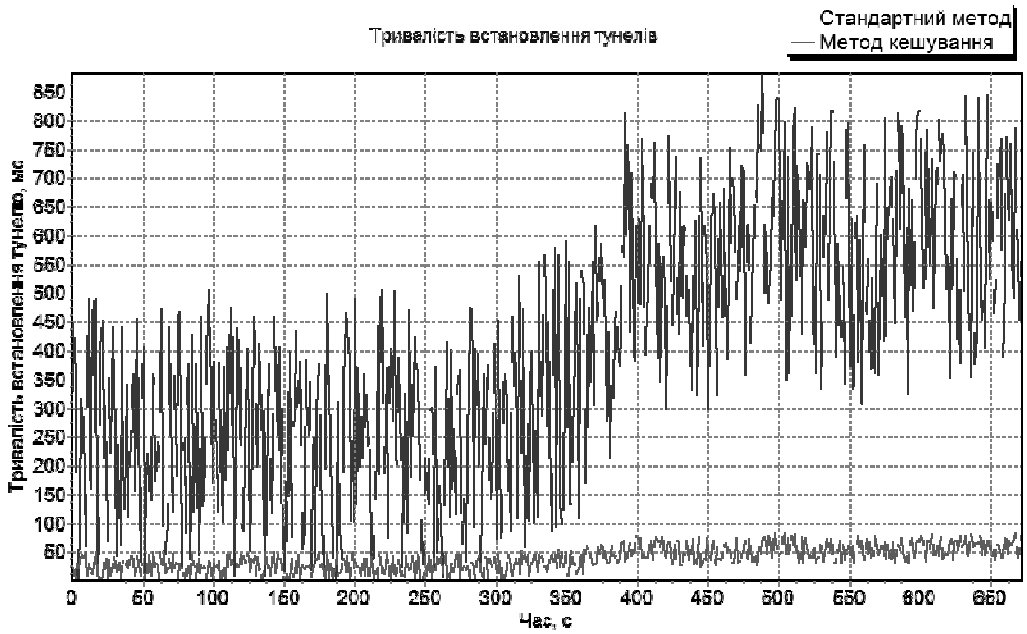


Рис. 10. Результати моделювання для методу кешування тунелів

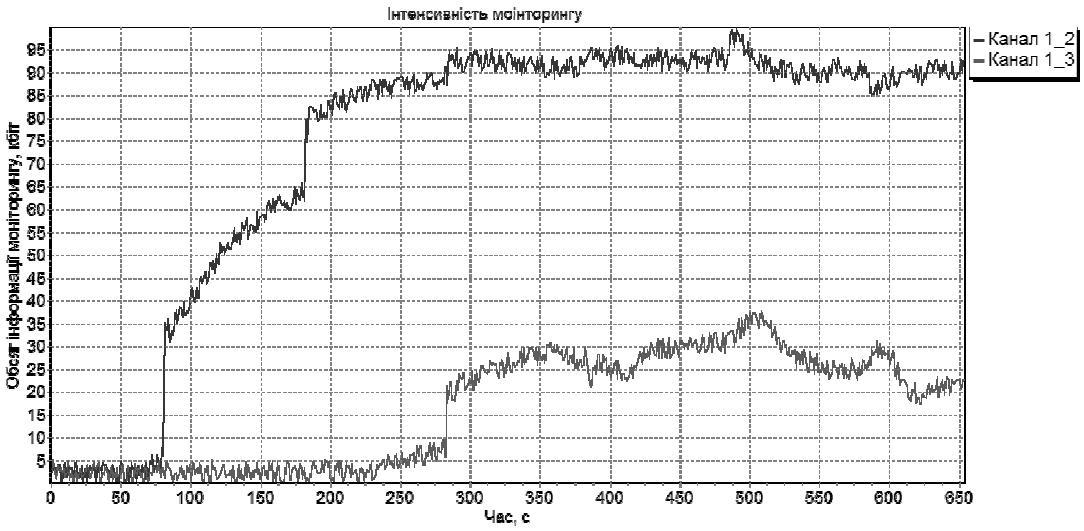


Рис. 11. Результати моделювання для методу динамічного моніторингу

Для сегмента 1–2 інтенсивність моніторингу пропорційна до його завантаження. Інтенсивні стрибки пов'язані з встановленням нових тунелів, які пролягають через цей сегмент, що збільшує його завантаженість. У той самий час для каналу 1-3, менш завантаженого, кількість службової інформації моніторингу буде зниженою пропорційно до його завантаженості. Метод динамічного моніторингу дає низку істотних переваг, а саме: можливість запобігти перевантаженню, змінюючи інтенсивність моніторингу; у випадку низького навантаження на сегмент мережі можна добитися ефективного використання службових каналів, зменшивши кількість службової інформації моніторингу.

Висновок. У статті запропоновано розширити функції площини керування програмно-керованої мережі з використанням розподіленої системи функцій віртуалізації, що побудована на основі паралельно встановлених програмних додатків на операційну систему комутаторів транспортної мережі, кожен з яких реалізує окрему функцію управління. Життєвий цикл таких додатків дає змогу оператору мережі здійснювати модернізацію та розширення набору функцій, встановлених на комутаторі залежно від функціональних потреб оператора. З метою спрощення

адаптації розширеного рівня управління до наявних SDN-рішень запропоновано модифікований OpenFlow агент. Використання такого агента дає можливість контролеру спілкуватися з додатками, які встановлені на комутатори. На основі розподіленої системи віртуалізованих функцій у роботі:

• підвищено швидкість програмування апаратної частини OpenFlow комутаторів, зокрема, модифікації великої кількості записів у таблицях потоків на основі принципу мультипотоковості програмних додатків;

• створено резервну децентралізовану площину управління на основі програмних додатків, які встановлені на кожному комутаторі, що забезпечить спілкування між комутаторами за допомогою традиційних децентралізованих протоколів обміну. Така площина дає змогу здійснювати поступовий перехід до повністю програмно-керованої транспортної мережі завдяки можливості взаємодії модернізованих елементів мережі з немодернізованими за допомогою децентралізованих протоколів. Крім того, така площина забезпечить відновлення централізованої площини керування, а відповідно і мережі загалом, у випадку відмови контролера на основі запропонованого алгоритму забезпечення відмовостійкості мережі;

• розроблено метод кешування тунелів на основі алгоритму послідовного прокладання тунелю, який забезпечує набагато менший час встановлення тунелів з коротким життєвим циклом, що загалом зменшує тривалість реакції мережі, кількість службової інформації та завантаження контролера;

• досягнути зменшення обсягів службової інформації та підвищення ефективності процесів моніторингу на основі оптимізованого алгоритму динамічного керування інтенсивністю обміну даними моніторингу, який ґрунтується на аналізі інтенсивності виникнення критичних подій в мережі;

• підвищено захищеність службових каналів у SDN на основі потокового шифрування повідомлень OpenFlow.

Для дослідження ефективності запропонованих технічних рішень розроблено імітаційну модель за допомогою засобів мови C++ на базі центру мережевих технологій лабораторії Національного університету “Львівська політехніка” та програмних моделей компонентів ПКМ. Результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність та доцільність упровадження запропонованих технічних рішень на транспортних мережах операторського класу.

1. Sushant Jain, Alok Kumar, Subhasree Mandal, Joon Ong, Leon Poutievski, Arjun Singh, Subbaiah Venkata, Jim Wanderer, Junlan Zhou, Min Zhu, Jonathan Zolla, Urs Hölzle, Stephen Stuart and Amin Vahdat, Experience with Globaly-Deployed Software Defined WAN, Google, Inc., 2013. 2. Christopher Monsanto, Joshua Reich, Nate Foster, Jennifer Rexford, David Walker. Composing Software-Defined Networks, pdf, 2013. 3. Diego Kreutz, Fernando M. V. Ramos and Paulo Verissimo, Towards Secure and Dependable Software-Defined Networks, EC, 2012. 4. Charalampos Rotsos, Nadi Sarrar, Steve Uhlig, Rob Sherwood, and Andrew W. Moore: OFLOPS: An Open Framework for OpenFlow Switch Evaluation - University of Cambridge / TU Berlin / T-Labs Big Switch Networks.