DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-61-04

УДК (UDC) 004.12, 004.057.4

Зац Олександр Дмитрович *аспірант факультету комп'ютерних наук*
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: zats2021ki51@student.karazin.ua
https://orcid.org/0000-0002-7623-9187

Стрілець Вікторія Євгенівна *к.т.н., доцент кафедри теоретичної та прикладної системотехніки*
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: viktoria.strilets@karazin.ua
https://orcid.org/0000-0002-2475-1496

Шматков Сергій Ігорович *д.т.н., проф., завідувач кафедри теоретичної та прикладної системотехніки*
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: s.shmatkov@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0002-0298-7174

Ющенко Владислав Сергійович *студент факультету комп'ютерних наук*
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022
e-mail: vladyan.yuschenko@gmail.com;
https://orcid.org/0009-0003-8124-4022

Віртуалізація мереж – підхід до оптимізації комп'ютерних мереж

Мета роботи полягає в дослідженні існуючих методів оптимізації комп'ютерних мереж і аналізі підходу віртуалізації мереж як засобу оптимізації. Об'єктом роботи є процес оптимізації комп'ютерних мереж, а предметом – моделі, методи та інформаційні технології, які застосовуються для оптимізації мереж.
Методи дослідження: методи імітаційного і математичного моделювання, методи оптимізації, методи управління, нейромережеві методи.
У **результаті** роботи проведений аналіз підходів і методів оптимізації комп'ютерних мереж. Серед них виділені методи оптимізації топології мереж, методи нелінійної оптимізації параметрів і функціональних залежностей, які описують поведінку і стан мережі. Зазначено, що перспективним є впровадження методів машинного навчання у моделі оптимізації комп'ютерних мереж через їх здатність до узагальнення, класифікації та прогнозування можливих зміни в структурі мережі для покращення її ефективності. Основна увага приділена підходу віртуалізації, який дозволяє абстрагуватися від топології мережі, оптимізувати використання ресурсів, покращити безпеку, спростити керування та забезпечити високий рівень доступності. Такі моделі можуть бути адаптовані до конкретних вимог та обмежень. Серед існуючих напрямків віртуалізації детально розглянуті віртуалізація функцій мереж, побудова програмно-конфігурованих мереж і мережі, визначені знаннями.
Висновки: запропоновано поєднати підхід віртуалізації з методами машинного навчання, а саме побудувати модель оптимізації мережі, яка визначається знаннями, на основі графових нейронних мереж. Такий підхід дасть можливість поєднати складний взаємозв'язок між топологією, маршрутизацією та вхідним трафіком мережі і отримувати точні оцінки розподілу затримок і втрат у мережі.

Ключові слова: *комп'ютерні мережі, оптимізація мереж, управління мережами, віртуалізація, графові нейронні мережі.*

Як цитувати: Зац О. Д., Стрілець В. Є., Шматков С. І., Ющенко В. С. Віртуалізація мереж – підхід до оптимізації комп'ютерних мереж. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2024.вип. 61. С.33-43. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-61-04

How to quote: Zats O.D., Strilets V.Y., Shmatkov S.I., Yuschenko V.S. "Networks virtualization as an approach to optimization of computer networks." *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 61, pp. 33-43, 2024. [In Ukrainian] https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-61-04

1 Вступ

Комп'ютерні мережі стали невід'ємною частиною сучасного світу. Вони використовуються для передачі даних, спільної роботи, комунікації та забезпечення доступу до інтернету. Швидкий

© Зац О. Д., Стрілець В. Є., Шматков С. І., Ющенко В. С., 2024
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

розвиток технологій і зростання обсягів даних, збільшення випадків небажаних втручань призводять до того, що оптимізація комп'ютерних мереж стає більш актуальною та важливою задачею.

Оптимізація відіграє вирішальну роль у точному налаштуванні продуктивності мережі, зменшенні відмов і захисті від кіберзагроз. Оптимізація в комп'ютерних мережах напрямлена на покращення загальної продуктивності, надійності та використання мережевих ресурсів. Це передбачає збалансування різних факторів, таких як пропускна здатність, затримка, пропускна здатність і час відгуку, щоб забезпечити безперебійну передачу даних і взаємодію з користувачем.

Оптимізація комп'ютерних мереж виконується через поєднання оновлень апаратного забезпечення, удосконалення програмного забезпечення та ефективного проектування мереж [1].

Одним із підходів до оптимізації й управління мережами передачі даних є віртуалізація. Сам термін «віртуалізація» означає можливість абстрагування від серверів реальних фізичних компонентів (апаратного забезпечення), і зробити їх придатними для використання у формі віртуальних ресурсів (програмного забезпечення) [2]. Віртуалізація дозволяє обмежити кількість апаратних ресурсів, що значно скорочує витрати на експлуатацію та обслуговування. Повністю відтворюючи фізичну мережу, віртуалізація мережі дозволяє запускати програми у віртуальній мережі, аналогічній фізичній мережі, але з більшими експлуатаційними перевагами та всіма перевагами незалежності від типового апаратного забезпечення віртуалізації [2].

Мета роботи полягає в дослідженні існуючих методів оптимізації комп'ютерних мереж і аналізі сучасного підходу віртуалізації мереж як засобу оптимізації. Об'єктом роботи є процес оптимізації комп'ютерних мереж, а предметом – моделі, методи та інформаційні технології, які застосовуються для оптимізації мереж.

2 Аналіз підходів до оптимізації комп'ютерних мереж

Оптимізація локальної комп'ютерної мережі може включати в себе різні аспекти, включаючи архітектурні, апаратні та програмні рішення.

Одним із підходів є оптимізація топології комп'ютерних мереж [3, 4, 5]. Топологічна модель локальної комп'ютерної мережі (LAN) описує фізичне розташування та з'єднання пристроїв у мережі. Оптимізація топології LAN може включати в себе розгляд різних факторів, таких як продуктивність, надійність, масштабованість та безпека. Вибір оптимальної топології повинен бути підтриманий відповідними налаштуваннями, апаратними рішеннями та методами безпеки.

У роботі [3] для вирішення завдань з оптимізації топології, визначення оптимальних маршрутів, і тому подібне, топологія мережі представлена у вигляді графу G=(V,E), де множина вершин V відповідає вузлам мережі, а множина ребер E – каналам. Застосування теорії графів надає можливість провести детальне дослідження мережі, охоплюючи характеристики ребер графу, за допомогою яких можна аналізувати та впливати на такі поняття як: пропускна здатність, завантаженість, чи затримки. Як тільки граф буде відповідати топології комп'ютерної мережі, використовують метод аналізу ієрархій, для дослідження ефективності фізичної структури, і чи здатна вона забезпечувати задовільний рівень якості надання послуг.

Іншим підходом до оптимізації LAN є створення і дослідження математичних моделей LAN [4, 6]. Математична модель оптимізації локальної комп'ютерної мережі може бути досить складною і залежить від конкретних цілей та обмежень. Основна мета такої моделі – мінімізувати певний параметр чи функцію, такі як: вартість, час затримки, або споживану енергію, з урахуванням різних змінних і обмежень мережі. У роботі [4] запропонована модель проектування оптимізації мережі, заснована на встановленні максимізації надійності мережі за заданих обмежень вартості. А у роботі [6] розглянута модель багатокритеріальної оптимізації на комбінаторній конфігурації вузлів, яка дає можливість оптимізувати характеристики роботи комп'ютерних мереж багаторівневої архітектури.

Підходи із використанням моделей машинного навчання для оптимізації LAN [7, 8] можуть бути корисними для автоматизації процесів моніторингу та управління мережею з метою підвищення її продуктивності та надійності. У роботі [7] узагальнені підходи і технології машинного навчання, які використовуються дослідниками для аналізу, управління, моніторингу і оптимізації мереж. У роботі [8] були розглянуті методи машинного навчання для підвищення продуктивності та масштабованості алгоритмів маршрутизації.

З аналізу літературних джерел випливає, що існують і використовуються різні підходи до управління і оптимізації комп'ютерних мереж, які вирішують різні задачі оптимізації: підвищення

ефективності мереж через удосконалення топології, оптимізація інфраструктури мереж, оптимізація маршрутизації та ін. Але ці підходи не мають можливості відтворити і дослідити фізичну модель мережі, тому пропонується розглянути підхід віртуалізації та його застосування до оптимізації мереж.

3 Поняття віртуалізації мереж

Віртуалізація локальної комп'ютерної мережі (LAN) [9] може бути важливим кроком для оптимізації та управління мережею у великих організаціях або компаніях, де важливо забезпечити високий рівень ефективності, безпеки та доступності. Віртуалізаційна модель LAN складається з:

– віртуалізації комутації (Network Virtualization). Використання віртуальних інтерфейсів на комутаторах, які можуть бути програмно налаштовані та управлятися. Це дозволяє легко масштабувати мережу та налаштовувати маршрутизацію для оптимізації трафіку. Розділення LAN на віртуальні мережі (VLAN) ізолює різні групи пристроїв та зменшить затори.

– віртуалізації ресурсів (Resource Virtualization). Використання віртуальних серверів та обчислювальних ресурсів для оптимізації використання обладнання. Впровадження віртуальних машин дозволяє ефективніше розподіляти обчислювальні завдання та зменшити витрати на обладнання.

– віртуалізації безпеки (Security Virtualization). Можна використовувати віртуальні файєрволи, IDS/IPS системи та інші засоби безпеки для захисту мережі та даних. При цьому доступ до ресурсів мережі може бути керованим та спостерігатися на рівні віртуальних мереж та сегментів.

– віртуалізації моніторингу (Monitoring Virtualization). Включає в себе використання засобів моніторингу мережі, які дозволяють відстежувати стан та продуктивність віртуальних ресурсів. Автоматизована система моніторингу дозволяє вчасно виявляти проблеми та вживати заходи для їх вирішення.

– віртуалізації керування (Management Virtualization). Використання централізованого програмного забезпечення для керування всією віртуальною LAN. При цьому забезпечується можливість автоматизованого розгортання, конфігурації та моніторингу віртуальних ресурсів.

Віртуалізація LAN дозволяє оптимізувати використання ресурсів, покращити безпеку, спростити керування та забезпечити високий рівень доступності. Така модель може бути адаптована до конкретних вимог та обставин вашої організації.

4 Методологія віртуалізації мереж

Віртуалізація мереж виконується у двох формах: зовнішня і внутрішня. Обидві форми відповідають їх розташуванню по відношенню до сервера. Зовнішня віртуалізація використовує комутатори, адаптери або мережі для об’єднання однієї чи кількох мереж у віртуальні одиниці. Внутрішня віртуалізація використовує мережеві функції в програмних контейнерах на одному мережевому сервері, що дозволяє віртуальним машинам обмінюватися даними на хості без використання зовнішньої мережі [9].

Вид віртуалізації мережі зазвичай визначається за їх використанням у різних сегментах мережі, таких як центр обробки даних, WAN або LAN. Програмно-визначена мережа (SDN) привела до еволюції віртуалізації мережі центрів обробки даних, а поява програмно-визначеної глобальної мережі (SD-WAN) зробила революцію у віртуалізації WAN. Тоді як віртуалізація локальної мережі LAN необхідна підприємствами, які впроваджують програмно визначену локальну мережу (SD-LAN) для покращення операцій.

Розглянемо різні напрямки віртуалізації, які можуть бути корисними для оптимізації мереж.

4.1 Віртуалізація функцій мережі

Віртуалізація функцій мережі [10] (network function virtualization – NFV) є концепцією мережевої архітектури, в якій за допомогою віртуалізації замінюються функції мережевих пристроїв. Технологія віртуалізації мережевих функцій поєднує функції таких мережевих пристроїв, як брандмауери, балансувальники навантаження і аналізатори трафіку, що працюють разом для підвищення продуктивності мережі.

Архітектура NFV складається з трьох частин:

– централізована інфраструктура віртуальної мережі (NFVI): інфраструктура NFV може базуватися або на платформі керування контейнером, або на гіпервізорі, який абстрагує сховище, обчислювальні, та мережеві ресурси.

– програмні додатки або функції віртуалізованої мережі (VNF): програмне забезпечення замінює апаратні компоненти традиційної мережевої архітектури для надання різних типів мережевих функцій (віртуалізованих мережевих функцій).

– фреймворк (часто відомий як MANO – управління, автоматизація та мережева оркестровка) необхідний для керування інфраструктурою та надання мережевих функцій.

Переваги NFV:

– дозволяє гнучко та динамічно надавати нові послуги, скоротивши при цьому капітальні та операційні витрати;

– заміна обладнання на стандартизовані сервери та мережеві компоненти не прив’язує операторів до постачальників обладнання;

– знижує операційні витрати за рахунок спрощення моніторингу та адміністрування операцій (всі мережеві функції переносяться в єдину віртуалізовану інфраструктуру);

– швидке підключення нових користувачів до мережі;

– окупає інфраструктуру телекомунікаційних компаній.

На рис. 1 зображено порівняння традиційної мережі із NFV мережею.

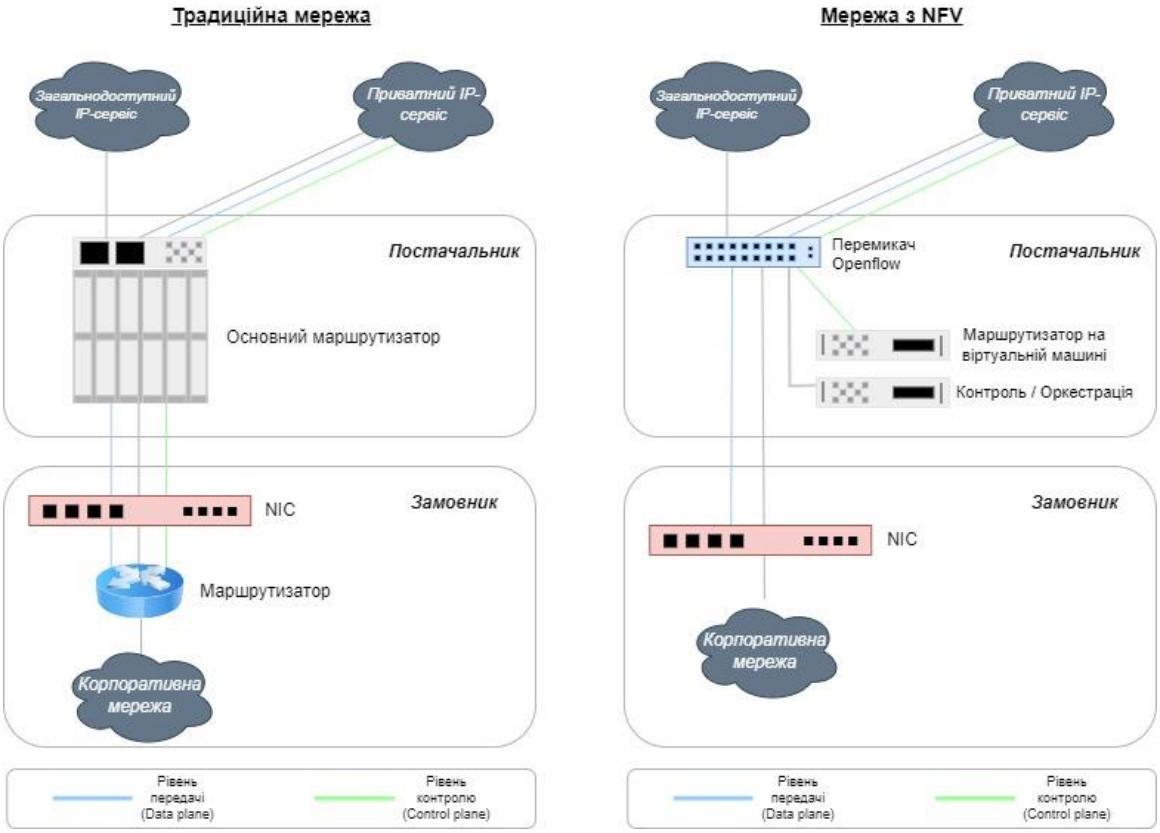


Рисунок 1. Порівняння традиційної мережі із NFV мережею

Основна відмінність мережі NFV полягає в тому, що на стороні сервіс провайдеру, знаходиться не один маршрутизатор, а віртуальні та фізичні пристрої, які можуть динамічно визначати шлях призначення пакету, тому на стороні користувача відсутні маршрутизатори, адже пакети надходять напряму до кінцевих пристроїв.

4.2 Програмно-конфігурована мережа

Програмно-конфігурована мережа (Software-defined Networking – SDN) – це підхід до мереж, який використовує програмні контролери, що можуть керуватися інтерфейсами прикладного програмування (API) для зв’язку з апаратною інфраструктурою для спрямування мережевого

трафіку. Використовуючи програмне забезпечення, можна створити та керувати низкою віртуальних накладених мереж, які працюють у поєднанні з фізичною базовою мережею. Мережі SDN пропонують потенціал для доставки середовищ програмних застосунків у вигляді коду та мінімізації практичного часу, необхідного для керування мережею [12].

У SDN програмне забезпечення відокремлено від апаратного забезпечення. Мережа SDN складається із двох площин: площини керування та площини даних. Площина керування визначає куди надсилати трафік програмному забезпеченню, в той час коли площина даних фактично пересилає трафік в апаратне забезпечення. Це дозволяє мережевим адміністраторам програмувати та керувати всіє мережею з однієї точки, а не від пристрою до пристрою.

Типова архітектура SDN (рис. 2) складається із трьох частин, які можуть бути розташовані в різних фізичних місцях, та двох інтерфейсів.

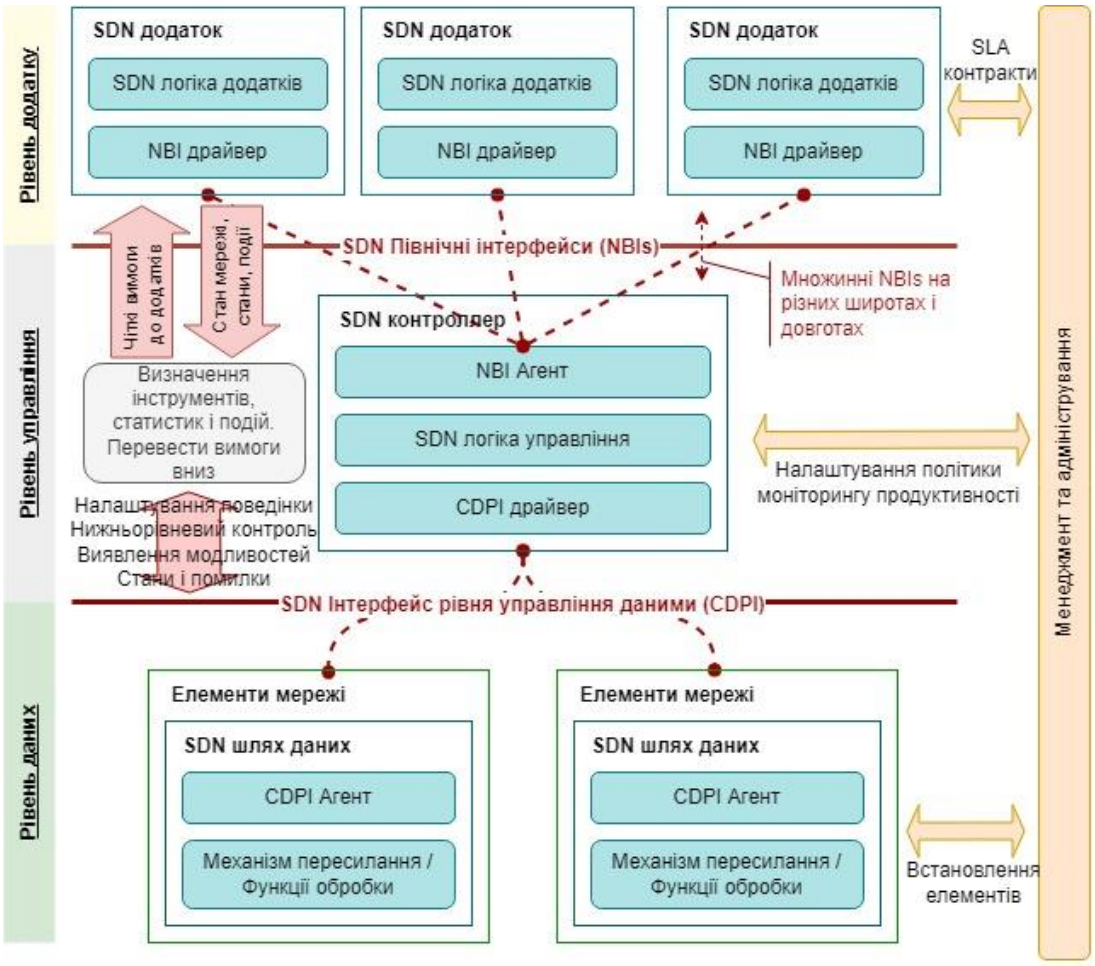


Рисунок 2. Загальна архітектура SDN

Програми SDN – це програми, які явно, прямо та програмно передають свої вимоги до мережі та бажаної мережевої поведінки контролеру SDN через північний інтерфейс (NBI). Крім того, вони можуть використовувати абстрактне уявлення про мережу для своїх внутрішніх цілей прийняття рішень. Програма SDN складається з однієї логіки програми SDN і одного або кількох драйверів NBI. Програми SDN можуть самі надавати інший рівень абстрактного мережевого контролю, таким чином пропонуючи один або більше NBI вищого рівня через відповідних агентів NBI.

Контролер SDN – це логічно-централізований об’єкт, який відповідає за переклад вимог із прикладного рівня SDN до шляхів даних SDN і надання додаткам SDN абстрактного представлення мережі (яке може включати статистику та події) . Контролер SDN складається з одного або кількох агентів NBI, логіки керування SDN і драйвера інтерфейсу керування до площини даних (CDPI). Хоча визначення, як логічно-централізованого об’єкта не передбачає і не виключає таких деталей реалізації як: об’єднання кількох контролерів; ієрархічне з’єднання

контролерів; інтерфейси зв'язку між контролерами, а також віртуалізація чи нарізка мережевих ресурсів.

Мережеві пристрої отримують інформацію від контролерів про те, куди перемістити дані.

Інтерфейс Control to Data-Plane Interface (CDPI) – це інтерфейс, визначений між контролером і мережевими пристроями, який забезпечує: програмне керування всіма операціями пересилання, оголошення про можливості, статистичні звіти та повідомлення про події.

Північний інтерфейс (NBI) – це інтерфейс, визначений між додатками і контролерами, які зазвичай надають абстрактні мережеві представлення та забезпечують пряме вираження мережевої поведінки та вимог.

Фізичні або віртуальні мережеві пристрої фактично переміщують дані через мережу. У деяких випадках віртуальні комутатори, які можуть бути вбудовані в програмне або апаратне забезпечення, беруть на себе обов'язки фізичних комутаторів і об'єднують їхні функції в єдиний інтелектуальний комутатор. Комутатор перевіряє цілісність як пакетів даних, так і місць призначення віртуальної машини та переміщує пакети.

Існують різні моделі SDN:

– Open SDN: мережеві адміністратори використовують такий протокол, як OpenFlow, щоб керувати поведінкою віртуальних і фізичних комутаторів на рівні даних.

– SDN через API: Замість використання відкритого протоколу інтерфейси прикладного програмування контролюють, як дані переміщуються через мережу на кожному пристрої.

– Модель SDN Overlay. Інший тип програмно визначеної мережі запускає віртуальну мережу поверх існуючої апаратної інфраструктури, створюючи динамічні тунелі до різних локальних і віддалених центрів обробки даних. Віртуальна мережа розподіляє пропускну здатність для різних каналів і призначає пристрої для кожного каналу, залишаючи фізичну мережу недоторканою.

– Hybrid SDN: ця модель поєднує програмно визначену мережу з традиційними мережевими протоколами в одному середовищі для підтримки різних функцій у мережі. Стандартні мережеві протоколи продовжують спрямовувати частину трафіку, тоді як SDN бере на себе відповідальність за інший трафік, дозволяючи мережевим адміністраторам поетапно вводити SDN у застаріле середовище.

Ключова відмінність між SDN і традиційною мережею полягає в інфраструктурі: SDN базується на програмному забезпеченні, тоді як традиційна мережа базується на апаратному забезпеченні. Оскільки площина керування базується на програмному забезпеченні, SDN є набагато гнучкішим, ніж традиційна мережа. Це дозволяє адміністраторам контролювати мережу, змінювати параметри конфігурації, надавати ресурси та збільшувати пропускну здатність мережі – і все це через централізований інтерфейс користувача без додавання додаткового обладнання.

Існують також відмінності в безпеці між SDN і традиційними мережами. Завдяки більшій видимості та можливості визначати безпечні шляхи, SDN пропонує кращу безпеку багатьма способами. Однак, оскільки програмно визначені мережі використовують централізований контролер, безпека контролера має вирішальне значення для підтримки безпечної мережі, і це єдиний вузол що представляє потенційну вразливість SDN.

4.3 Мережа, визначена знаннями

Мережа, визначена знаннями (Knowledge-Defined Networking – KDN) [13] – це розширена версія SDN, яка робить крок вперед, відокремлюючи площину керування від логіки керування та вводячи нову площину, яка називається площиною знань, відокремленою від логіки керування для генерування знань на основі даних, зібраних із мережі.

Мережа, визначена знаннями (KDN) – це концепція використання інформації для генерування знань за допомогою моделей машинного навчання або моделей на основі правил, і відповідно до цих знань приймаються мережеві рішення.

KDN складається із п'яти основних площин. Блок-схема високого рівня архітектури показана на рис. 3.

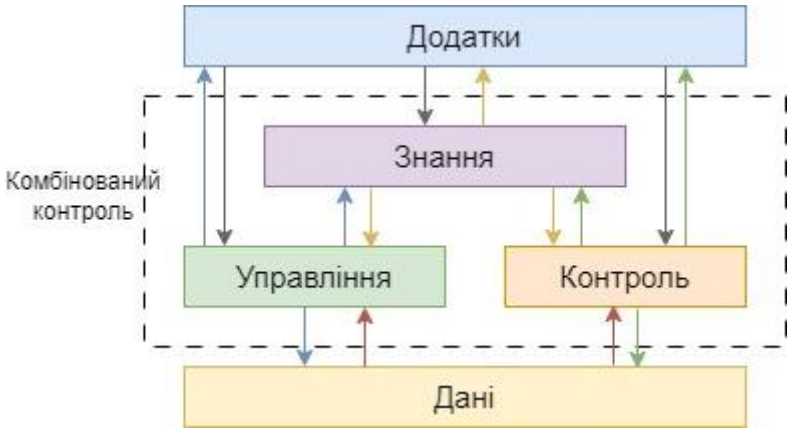


Рисунок 3. Схема високого рівня архітектури KDN

Площина знань складається з трьох підрівнів:

– площина генерації знань – генерує знання з використанням даних/інформації за допомогою методів на основі евристичної моделі або методів машинного навчання;

– площина композиції знань – компонує згенеровані знання та універсальні знання, за допомогою редактора онтології, для створення складених знань, які можна використовувати для створення правил шляхом узгодження з намірами користувача;

– площина розподілу та управління знаннями – зберігає знання та правила з використанням бази знань.

Площина управління працює паралельно з контролером KDN і відповідає за: збір процесів і даних/інформації з мережевих пристроїв, моніторинг стану мережевого пристрою та налаштування мережевого пристрою.

Площина даних складається з пристроїв пересилання, які можуть зберігати, пересилати або обробляти дані відповідно до правил потоку, надісланих площиною керування. У KDN площина даних потрібна для надсилання даних, запитуваних площинами управління та контролю.

Площина контролю складається з одного або декількох контролерів SDN на основі архітектури та відповідає за надсилання правил потоку, правил контролю доступу, правил пріоритизації трафіку на основі QoS тощо до площини даних.

Площина додатків забезпечує платформу для мережевих додатків для передачі вимог базовій мережевій інфраструктурі. Це також дозволяє мережевим адміністраторам централізовано визначати мережеві політики, специфічні для додатків, і визначати політики конфігурації мережі, які більш узгоджені з бізнес-потребами та цілями високого рівня, де логіка програми відокремлена від апаратного забезпечення.

5 Оптимізація мережі з використанням віртуалізації

Розглянемо підхід до оптимізації комп’ютерної мережі в контексті парадигми мережі, визначеною знаннями (KDN). У такому випадку припускається, що площина керування отримує постійні оновлення стану мережі (наприклад, дані трафіку, показники затримки). Показники стану мережі можна формувати за допомогою «звичайних» методів вимірювання на основі SDN. У площині знань є оптимізатор, який визначається заданою цільовою функцією (політикою) (рис. 4). Ця політика, відповідно до мереж на основі знань, може бути визначена декларативною мовою, наприклад NEMO [14], і представлена у вигляді багатоцільової задачі оптимізації мережі.

Точна мережева модель може мати головну роль під час оптимізації. Використовують її для ініціалізації алгоритмів, які ітеративно визначають ефективність побудованих рішень, щоб знайти найкращу конфігурацію мережу. За межами архітектури мережі, визначеної знаннями, навмисно залишають етап навчання. В таких випадках мережева модель повинна відповідати двом основним вимогам: забезпечувати точність результатів та мати низьку обчислювальну складність, що дозволить оптимізаторам мережі знаходити рішення за короткі проміжки часу. Крім того, оптимізаторам важливо мати достатню гнучкість для моделювання сценаріїв «якщо-то», які можуть враховувати різні схеми маршрутизації, зміни в топології та варіації в даних трафіку.

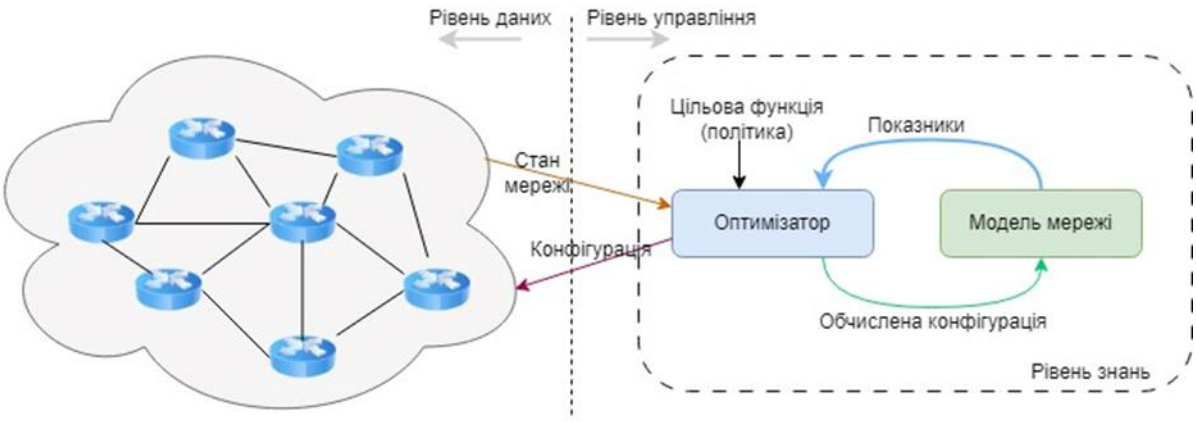


Рисунок 4. Модель оптимізація мережі на основі KDN

У таких випадках для створення моделей мереж, визначених знаннями, звертаються до машинного навчання, а саме використовують графові нейронні мережі (Graph Neural Network, GNN) [15]. Моделі GNN здатні ефективно працювати та узагальнювати середовища, представлені у вигляді графів.

У роботі [16] представлена графова нейронна мережа RouteNet, побудована на основі нейронних мереж передачі повідомлень, здатна поширювати будь-яку схему маршрутизації по топології мережі та абстрагувати значущу інформацію про поточний стан мережі. На рис. 5 показано схематичне зображення моделі нейронної мережі RouteNet.

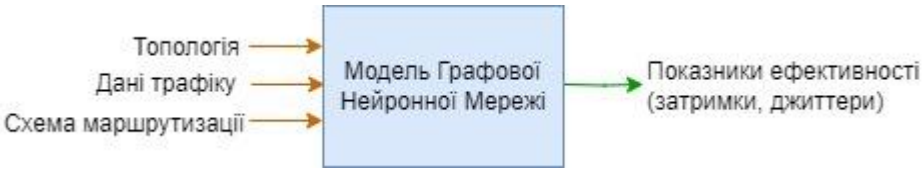


Рисунок 5. Схема RouteNet

RouteNet приймає як вхідні дані задану топологію, схему маршрутизації, джерело-призначення (тобто зв'язки між кінцевими точками, шляхами та посиланнями) і матрицю трафіку (визначену як пропускна здатність між кожною парою вузлів у мережі). І на виході надає показники продуктивності відповідно до поточного стану мережі (наприклад, затримки на шлях або тремтіння сигналу). Для цього RouteNet використовує вектори з фіксованою розмірністю, які кодують стани шляхів і посилань і передають інформацію між ними відповідно до схеми маршрутизації.

Таким чином, для подальших досліджень і побудови моделей оптимізації комп'ютерних мереж були обрані графові нейронні мережі, які здатні розуміти складний взаємозв'язок між топологією, маршрутизацією та вхідним трафіком мережі і отримувати точні оцінки розподілу затримок і втрат для кожного джерела/адресата.

6 Висновки

Розглянувши підходи віртуалізації мереж можна зробити висновок, що NFV, SDN та KDN є важливими інноваціями, які значно підвищують ефективність мережевих інфраструктур порівняно з традиційними методами.

Традиційна мережа є найстарішим підходом до роботи в мережі та передбачає ручне налаштування та керування пристроями. Цей метод мережевих зв'язків був поширеним із самого початку створення мереж і досі переважає в сучасних мережах зв'язку.

SDN — це новітній підхід, який відокремлює площину керування від площини даних і забезпечує більшу гнучкість у проектуванні мережі. Площина керування переміщується в централізоване розташування, а мережеві адміністратори використовують програмне забезпечення для керування мережею. Ця парадигма дозволяє мережевим адміністраторам легше та швидше керувати мережами завдяки підвищеній гнучкості та можливості програмування.

KDN створює мережу, що самонавчається, самооптимізується та самовідновлюється, інтегруючи технології AI та ML. Аналіз даних — це інструмент, який використовується системами KDN для автоматичного покращення продуктивності мережі, адаптації до мінливих мережевих обставин, а також виявлення та вирішення потенційних мережевих проблем до того, як вони стануть серйознішими.

NFV, SDN та KDN мають перевагу над традиційними методами в гнучкості, масштабованості, в швидкості запровадженні змін, в економії ресурсів, легке керування та можливість автоматизації.

А поєднання методів віртуалізації та нейронних мереж створює потужний інструментарій для оптимізації локальної комп'ютерної мережі. Це дозволить досягти балансу між гнучкістю управління та точністю прогнозування значень параметрів мережі, що в свою чергу призводить до підвищення продуктивності та ефективності використання ресурсів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bashar, Mesfer. Optimization in Computer Networks and Cybersecurity: Ensuring Efficiency and Safety. *Global J Technol Optim*, 14 (2023): 333. DOI: 10.37421/2229-8711.2023.14.333.
2. Network Virtualization: Optimization and Reliability: website. URL: https://www.tnsolutions.it/en/network-virtualization-optimization-and-reliability (дата звернення 1.06.2024)
3. Б. А. Бугиль, О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, В. В. Червенець Методи оптимізації фізичної та логічної структур телекомунікаційних мереж. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2013. № 766. С. 78-83. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/5107/12bugillavrivbeshleychervenec.pdf (дата звернення: 01.06.2024)
4. Ai, Hua, Fan, Yuhong, Zhang, Jilei and Ghafoor, Kayhan Zrar. Topology optimization of computer communication network based on improved genetic algorithm. *Journal of Intelligent Systems*, vol. 31, no. 1, 2022, pp. 651-659. https://doi.org/10.1515/jisys-2022-0050
5. Hadi Rezazad. Computer network optimization. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2011. 3(1), pp. 34 – 46. DOI: 10.1002/wics.135
6. Л.М. Колєчкіна, А.М. Нагірна. Математична модель багатокритеріальної оптимізації на множині сполучень при побудові комп'ютерних мереж. *Математичні машини і системи*. 2016. № 4. С. 68-75.
7. Haitham Afifi, Sabrina Pochaba, Andreas Boltres, Dominic Laniewski and others. Machine Learning with Computer Networks: Techniques, Datasets and Models. *IEEE Access*, 2024. 52 p. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3384460.
8. Ke Liang, Mitchel Myers. Machine Learning Application in the Routing in Computer Networks. *ArXiv abs/2104.01946*, 2021. URL: https://arxiv.org/pdf/2104.01946 (дата звернення: 25.05.2024)
9. What is network virtualization? Everything you need to know: website. URL: https://www.techtarget.com/searchnetworking/What-is-network-virtualization-Everything-you-need-to-know (дата звернення: 25.05.2024)
10. Network Functions Virtualization – Introductory White Paper. *SDN and OpenFlow World Congress*, 2012. URL: https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf (дата звернення: 25.05.2024)
11. В.В. Палагін, І.О. Євтушенко, О.О. Гожий. Віртуалізаця як середовище реалізації мережевих функцій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2021. №2. С. 31-38. DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.234703.
12. What is Software-Defined Networking? IBM : website. URL: https://www.ibm.com/topics/sdn (дата звернення: 10.05.2024).
13. Comprehensive Survey on Knowledge-Defined Networking. MDPI : website. URL: https://www.mdpi.com/2673-4001/4/3/25 (дата звернення: 10.05.2024).
14. NeMo: an application's interface to intent-based networks : website. URL: http://nemo-project.net/ (дата звернення: 15.05.2024).

15. Krzysztof Rusek, José Suárez-Varela, Albert Mestres, Pere Barlet-Ros, and Albert Cabellos-Aparicio. Unveiling the potential of Graph Neural Networks for network modeling and optimization in SDN. *In Proceedings of the 2019 ACM Symposium on SDN Research (SOSR '19)*. Association for Computing Machinery, New York, USA, 2019. Pp. 140–151. DOI: https://doi.org/10.1145/3314148.3314357
16. K. Rusek, J. Suárez-Varela, P. Almasan, P. Barlet-Ros and A. Cabellos-Aparicio. RouteNet: Leveraging Graph Neural Networks for Network Modeling and Optimization in SDN. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020. V. 38, № 10. P. 2260–2270. DOI: https://doi.org/10.1109/jsac.2020.3000405.

REFERENCES

1. Bashar, Mesfer. Optimization in Computer Networks and Cybersecurity: Ensuring Efficiency and Safety. *Global J Technol Optim*, 14 (2023): 333. DOI: 10.37421/2229-8711.2023.14.333.
2. Network Virtualization: Optimization and Reliability: website. URL: https://www.tnsolutions.it/en/network-virtualization-optimization-and-reliability (дата звернення 1.06.2024)
3. Buhyl B.A., Lavriv O.A., Beshley M.I., Chervenets V.V. Optimization methods for telecommunications networks physical and logical structures. *Bulletin of Lviv Polytechnic. Series of Radio Electronics and Telecommunication. 2013. № 766. Pp. 78-83*. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/5107/12bugillavrivbeshleychervenec.pdf (дата звернення: 01.06.2024)
4. Ai, Hua, Fan, Yuhong, Zhang, Jilei and Ghafoor, Kayhan Zrar. Topology optimization of computer communication network based on improved genetic algorithm. *Journal of Intelligent Systems, vol. 31, no. 1, 2022, pp. 651-659*. https://doi.org/10.1515/jisys-2022-0050
5. Hadi Rezazad. Computer network optimization. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2011. 3(1), pp. 34 – 46*. DOI: 10.1002/wics.135
6. Koliechkina L.M., Nahirna A.M. A mathematical model of multi-criteria optimization on the set of combinations under the construction of computer networks. *Mathematical machines and systems. 2016. № 4. Pp. 68-75*.
7. Haitham Afifi, Sabrina Pochaba, Andreas Boltres, Dominic Laniewski and others. Machine Learning with Computer Networks: Techniques, Datasets and Models. *IEEE Access, 2024. 52 p*. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3384460.
8. Ke Liang, Mitchel Myers. Machine Learning Application in the Routing in Computer Networks. *ArXiv abs/2104.01946, 2021*. URL: https://arxiv.org/pdf/2104.01946 (дата звернення: 25.05.2024)
9. What is network virtualization? Everything you need to know: website. URL: https://www.techtarget.com/searchnetworking/What-is-network-virtualization-Everything-you-need-to-know (дата звернення: 25.05.2024)
10. Network Functions Virtualization – Introductory White Paper. *SDN and OpenFlow World Congress, 2012*. URL: https://portal.etsi.org/NFV/NFV_White_Paper.pdf (дата звернення: 25.05.2024)
11. Palahin V.V., Yevtushenko I.O., Hozhyi O.O. Virtualization as an environment of realization of network functions. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 2021. № 2. Pp. 31-38. DOI: 10.24025/2306-4412.2.2021.234703.
12. What is Software-Defined Networking? IBM : website. URL: https://www.ibm.com/topics/sdn (дата звернення: 10.05.2024).
13. Comprehensive Survey on Knowledge-Defined Networking. MDPI : website. URL: https://www.mdpi.com/2673-4001/4/3/25 (дата звернення: 10.05.2024).
14. NeMo: an application's interface to intent-based networks : website. URL: http://nemo-project.net/ (дата звернення: 15.05.2024).

15. Krzysztof Rusek, José Suárez-Varela, Albert Mestres, Pere Barlet-Ros, and Albert Cabellos-Aparicio. Unveiling the potential of Graph Neural Networks for network modeling and optimization in SDN. *In Proceedings of the 2019 ACM Symposium on SDN Research (SOSR '19). Association for Computing Machinery, New York, USA, 2019. Pp. 140–151*. DOI: https://doi.org/10.1145/3314148.3314357
16. K. Rusek, J. Suárez-Varela, P. Almasan, P. Barlet-Ros and A. Cabellos-Aparicio. RouteNet: Leveraging Graph Neural Networks for Network Modeling and Optimization in SDN. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2020. V. 38, № 10. P. 2260–2270*. DOI: https://doi.org/10.1109/jsac.2020.3000405.

Zats Oleksandr *PhD student of Computer Science Faculty;*
V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
Strilets Viktoriia *Ph.D, associate professor of the theoretical and applied system engineering department;*
V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
Shmatkov Serhiy *Doctor of Engineering Sciences, professor, Head of Theoretical and Applied Systems Engineering Department;*
V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
Yuschenko Vladyslav *student of Computer Science Faculty;*
V.N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

Networks virtualization as an approach to optimization of computer networks

The **purpose** of the work is to study the existing methods of optimizing computer networks and analyze the approach of virtualization of networks as a means of optimization. The object of the work is the process of optimizing computer networks, and the subject is models, methods and information technologies that are used to optimize networks.
Research methods: simulation and mathematical modeling methods, optimization methods, control methods, neural network methods.
As a **result** of the work, an analysis of computer network optimization approaches and methods was carried out. Among them, optimization methods of network topology, methods of nonlinear optimization of parameters and functional dependencies, which describe the behavior and state of the network, are highlighted. It is noted that the implementation of machine learning methods in the optimization model of computer networks is promising due to their ability to generalize, classify and predict possible changes in the network structure to improve its efficiency. The focus is on a virtualization approach that allows you to abstract from network topology, optimize resource usage, improve security, simplify management, and ensure high availability. Such models can be adapted to specific requirements and constraints. Among the existing directions of virtualization, the virtualization of network functions, the construction of software-configured networks and knowledge-defined networks are considered in detail.
Conclusions: it is proposed to combine the virtualization approach with machine learning methods, namely to build a knowledge-based network optimization model based on graph neural networks. This approach will make it possible to combine the complex relationship between topology, routing and incoming network traffic and obtain accurate estimates of the distribution of delays and losses in the network.

Keywords: *computer networks, network optimization, network management, virtualization, graph neural networks*.

Надійшла у першій редакції 02.03.2024, в останній - 11.04.2024.
The first version has been received on 02.03.2024, the final version - on 11.04.2024.