

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПАНЧЕНКО ОЛЕКСІЙ МИХАЙЛОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

**АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ТА ЯКІСТЮ
ОБСЛУГОВУВАННЯ У ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ СЕРВІСНО-
ОРІЄНТОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ**

172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва спеціальності)

17 «Електроніка та телекомунікації»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ / Панченко Олексій Михайлович /

Науковий керівник

Демидов Іван Васильович д.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

ЛЬВІВ – 2021

АНОТАЦІЯ

Панченко О.М. Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

Використання технології програмно-конфігурованих мереж забезпечує високу гнучкість в процесі управління телекомунікаційною інфраструктурою і спрощує віртуалізацію мережних ресурсів. Динамічна конфігурація мережі за допомогою контролера без зміни апаратного і програмного забезпечення мережеских пристроїв привела до того, що сьогодні більшість операторів телекомунікаційних мереж частково впроваджують цю технологію, але при цьому алгоритми управління трафіком і методи передавання даних залишаються практично незмінними. У зв'язку з цим питання якості управління та обслуговування трафіку відповідно до замовлених вимог користувачів і ефективності використання мережеских ресурсів не втрачає актуальності і сьогодні.

В дисертаційній роботі розв'язано науково-практичне завдання забезпечення замовленої якості обслуговування в умовах обмеженості мережеских ресурсів шляхом розроблення нової моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування, яка базується на удосконалених методах та алгоритмах адаптивного встановлення пріоритетів послуг, вибору сервера обслуговування та маршруту передавання даних.

Метою представленої дисертаційної роботи є забезпечення замовленого рівня якості сприйняття сервісу шляхом розроблення адаптивних моделей та

методів управління трафіком в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.

Об'єктом дослідження є процес передавання та адаптивного управління інформаційними потоками в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритми адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.

В процесі досліджень використано методи теорії систем масового обслуговування, оптимізації, імітаційного моделювання, математичної статистики та експертних оцінок. Для підтвердження теоретичних результатів застосовано експериментальні методи дослідження.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У першому розділі **«Аналіз методів побудови та функціонування програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж»** розглянуто основні принципи побудови, архітектури та процеси функціонування традиційних та програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж. Проведено аналіз основних вимог щодо якості надання послуг в сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах. Встановлено, що існуючі телекомунікаційні технології та застосовані у них методи управління трафіком не здатні задовольнити вимоги щодо замовленої якості обслуговування в умовах зростаючих обсягах циркулюючої інформації. Аналіз основних факторів, які впливають на управління розподілом трафіку, показав необхідність використання технології програмно-конфігурованих мереж, яка орієнтована на централізоване управління мережними ресурсами, спрощення обслуговування та модернізації мереж з метою підвищення якості обслуговування користувачів.

Динамічна конфігурація мережі за допомогою контролера мережі без зміни апаратного і програмного забезпечення мережевих пристроїв привела до того, що сьогодні більшість операторів телекомунікаційних мереж частково впроваджують цю технологію, але при цьому алгоритми управління трафіком і методи передавання даних залишаються практично незмінними. У зв'язку з цим питання якості управління та обслуговування трафіку відповідно до замовлених вимог користувачів і ефективності використання мережевих ресурсів не втрачає актуальності і сьогодні.

У другому розділі **«Моделі та методи адаптивного управління процесом обслуговування потоків даних у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах»** запропоновано концептуальну модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування. Встановлено, що запропонована модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі дає змогу гарантувати замовлений рівень якості надання сервісу, аналізуючи QoE (Quality of Experience) оцінки користувачів згідно договору SLA (Service-Level Agreement), шляхом адаптивного виставлення пріоритетів послуг, розподілу каналних ресурсів у мережевих вузлах, балансування навантаження на серверах та реалізації нових протоколів маршрутизації.

Удосконалено метод вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах, використання на практиці якого, дало змогу в процесі моніторингу підвищити до 70% точність оцінки стану каналу між комутаторами за критерієм затримки для низько пріоритетних потоків. А це, в свою чергу, дало можливість забезпечити правильність вибору оптимального шляху в процесі реалізації адаптивної маршрутизації, метрика, якої базується на багатокритеріальному аналізі стану каналу, одним і з яких є поточна затримка каналу.

Розроблено адаптивний алгоритм пріоритезації інформаційних потоків, який за рахунок автоматизації управління на рівні SDN (Software-Defined

Networking) контролера дає змогу динамічно змінювати пріоритети мережних потоків у випадку погіршення параметрів якості обслуговування трафіку в процесі передавання крізь мережу для підтримки замовленої якості обслуговування конкретних користувачів.

Розроблено метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах, який використовує адаптивну інтегральну метрику окремо для кожного класу інформаційних потоків. Дана метрика базується на вимірних параметрах QoS (Quality of Service), що характеризують кожну гілку топології мережі в процесі її функціонування та необхідних вимог до якості надання сервісів згідно укладеного договору SLA. Перевагою запропонованого підходу до управління механізмами маршрутизації є його можливість розгортання, як в поточних програмно-конфігурованих мережах, так і в рамках окремо взятої сукупності вузлів зв'язку, об'єднаних єдиною логікою організації мережевих ресурсів. Доведено, що розроблений метод маршрутизації дає необхідний інструмент для спрощення управління системою зв'язку, шляхом маніпуляції ваговими коефіцієнтами інтегральної метрики, тим самим зводячи завдання забезпечення необхідної якості надання сервісів до підбору їх «найкращих» значень адаптуючись під потреби користувачів. Прийняття рішень з перерахунку первинних параметрів мережі і безпосереднє коригування значень вагових коефіцієнтів метрики — основне завдання контролера програмно-конфігурованих мереж. Для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації пошуку оптимального шляху передавання даних в SDN вибрано та автоматизовано на контролері метод з використанням узагальненого адитивного критерію оптимальності.

Запропоновано алгоритм розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію. Згідно даного алгоритму для розв'язання цієї задачі будується функція корисності, яка дає змогу

визначити показник ефективності рішення і процес надання переваги зводиться до порівняння чисел-значень. При цьому SDN контролер, що приймає рішення, враховує, що один набір значень локальних критеріїв володіє перевагою над іншими, якщо йому відповідає більше значення функції переваги. У випадку погіршення якості обслуговування SDN контролер проводить корекцію вагових коефіцієнтів для адаптації серверної площини до забезпечення необхідного рівня якості обслуговування шляхом узгодженості із рівнем QoS, що забезпечується мережною площиною.

У третьому розділі **«Моделювання та дослідження методів адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах»** проведено моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої телекомунікаційної мережі. Доведено, що комплексне використання запропонованого методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних, дало змогу забезпечити високий рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу в умовах перевантаження окремих елементів мереж. Зокрема, встановлено, що в процесі використання традиційних механізмів управління трафіком, а саме динамічної маршрутизації на основі метрики протоколу OSPF (Open Shortest Path First) та алгоритму обслуговування черг PQ (Priority Queuing), рівень отриманої якості становив QoE – 1.8, а з використанням методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних рівень якості сприйняття відеосервісу становив QoE – 4.2.

Проведено верифікацію запропонованої адаптивної маршрутизації у порівнянні із існуючими алгоритмами маршрутизації OSPF та EIRGP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol) шляхом імітаційного моделювання. Встановлено, що з використанням адаптивної маршрутизації забезпечується

необхідний рівень якості обслуговування для конкретного типу трафіку, маніпулюючи ваговими коефіцієнтами метрики маршруту.

У четвертому розділі **«Практична реалізація програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування»** розроблено прототип SDN мережі шляхом програмного розгортання віртуального багаторівневого мережевого комутатора з відкритим кодом Open vSwitch на апаратній платформі Raspberry Pi 3 Model B та контролера Floodlight на платформі Orange Pi Prime. Основною перевагою розробленого прототипу SDN мережі є низька собівартість та доступність реалізації, що є важливим для підготовки фахівців у сфері програмно-конфігурованих мереж в процесі проведення навчальних, тренувальних та дослідницьких цілей. Зокрема у роботі на базі розробленого прототипу мережі проведено дослідження впливу технічних параметрів якості обслуговування в процесі передавання відеопотоків реального часу на рівень якості сприйняття сервісу кінцевим користувачем, визначеного шляхом використання методу експертного оцінювання за 5-бальною шкалою. Що дало змогу з наукової точки зору знайти кореляцію між параметрами якості обслуговування та якістю сприйняття сервісу користувачами формалізовану у вигляді математичної моделі.

Досліджено ефективність застосування пріоритетного обслуговування на якість сприйняття відеосервісу реального часу в умовах обмеженості каналних ресурсів на базі розробленого прототипу мережі.

Висновки до дисертації включають узагальнені результати дослідження та рекомендації щодо їх практичного застосування. Теоретичне значення роботи полягає в тому, що її результати дають змогу забезпечити необхідну якість обслуговування користувачів в умовах обмеженості мережевих ресурсів шляхом розроблення нової моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема для студентів спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» в курсі лекцій з дисципліни «Технології інформаційно-комунікаційних мереж», а також у держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних роботах кафедри телекомунікацій.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних корпоративних мережах ТОВ ВТФ «Контех», ТОВ «Телекомунікаційна компанія», що підтверджено актами впровадження.

Ключові слова: програмно-конфігурована мережа, сервісно-орієнтована мережа, якість обслуговування, якість сприйняття послуг, протоколи маршрутизації, пріоритезація, угода про рівень послуг.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. I. Demydov, N. Baydoun, M. Beshley, M. Klymash, and O. Panchenko, “Development of Basic Concept of ICT Platforms Deployment Strategy for Social Media Marketing Considering Tectonic Theory,” *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 0, no. 1, pp. 18-33, Jan. 2020. (Scopus)
2. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Prislupskiy, H. Beshley, O. Panchenko, “Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT,” *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications*, Vol. 3, Issue 1, pp. 22-23. May 2018.
3. V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk, “Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing,” *Technology audit and production reserves*, №3/2(41), pp. 46-55, 2018.

4. М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко, “Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах,” *Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба*, 5(142), с. 114-123, 2016.

5. М.М. Климаш, М.І. Бешлей, Ю.Д. Дещинський, О.М. Панченко, “Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP,” *Комп’ютерні технології друкарства*, № 2, с. 146-155, 2015.

6. М.М. Климаш, В.І. Романчук, О.М. Панченко, М.І. Бешлей, А.В. Поліщук, “Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. *Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 885, с. 22-30, 2017.

7. В.І. Романчук, М.І. Бешлей, О.М. Панченко, А.В. Поліщук, “Метод узгодженого розв’язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережевих пристроїв,” *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку*, №2(50), с. 48-57, 2018.

8. І.О. Кагало, М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, “Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi,” *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с. 24-38, 2019.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and M. Seliuchenko, "Dynamic Switch Migration Method Based on QoE-Aware Priority Marking for Intent-Based Networking," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 864-868.

10. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 1167-1170.
11. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and H. Beshley, "SDN/Cloud Solutions for Intent-Based Networking," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 22-25.
12. A. Pryslupskyi, O. Panchenko, M. Beshley and M. Seliuchenko, "Improvement of Multiprotocol Label Switching Network Performance using Software-defined Controller," *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 106-109.
13. H. Beshley, O. Panchenko and M. Kyryk, "Investigation and Implementation of Methods for Controlling the Intensity of Flow of Information Protocols," *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-5.
14. H. Beshley, M. Kyryk, M. Beshley and O. Panchenko, "Method of Information Flows Engineering and Resource Distribution in 4G/5G Heterogeneous Network for M2M Service Provisioning," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Lviv, 2018, pp. 229-233.
15. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 282-286.

16. O. Panchenko, A. Polishuk, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Method for adaptive client-oriented management of quality of service in integrated SDN/CLOUD networks," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 452-455.

17. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, 2017, pp. 1-5.

18. V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and P. Arthur, "Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes," *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, 2017, pp. 295-298.

19. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko and A. Polishuk, "Adaptive flow routing model in SDN," *2017 14th International Conference the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, 2017, pp. 298-302.

20. M. Seliuchenko, M. Beshley, O. Panchenko and M. Klymash, "Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in software-defined networks," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 2016, pp. 667-670.

21. M. Seliuchenko, O. Lavriv, O. Panchenko and V. Pashkevych, "Enhanced multi-commodity flow model for QoS-aware routing in SDN," *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Kiev, 2016, pp. 1-3.

22. М.І. Бешлей, О.М. Панченко, І.В. Демидов, М.О Селюченко, "Метод динамічного управління якістю послуг в інтегрованій SDN/CLOUD мережі,"

Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернівці, 2016 р., с. 74-75.

23. М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, “Розроблення системи моніторингу та аналізу трафіку інформаційно телекомунікаційної мережі для виявлення аномалії і запобігання атак,” *I міжнародна науково-практична конференція “Проблеми кібербезпеки інформаційно телекомунікаційних систем”*, м. Київ, 2018 р., с. 201- 203.

24. М.М. Климаш, М.О Селюченко, О.М. Панченко, “Система моніторингу пакетної затримки в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах,” *X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції*, м. Київ, 2016 р., с. 140-142.

ABSTRACT

Panchenko O.M. Adaptive resource and quality of service management in service-oriented software-defined telecommunications networks. – Qualification research paper as a manuscript.

The thesis for the Doctor of Philosophy Degree in the specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2021.

The use of software-defined network technology provides high flexibility in the process of telecommunications infrastructure management and simplifies the virtualization of network resources. Dynamic network configuration using a controller without changing the hardware and software of network devices has led to the fact that today most telecom network operators partially implement this technology, but the traffic management algorithms and data transmission methods remain practically unchanged. In this regard, the subject of the quality of service and traffic management in accordance with the ordered requirements of users and the efficiency of network resources is still relevant today.

The thesis solves the scientific and practical task for ensuring the ordered quality of service in conditions of limited network resources by developing a new model of service-oriented software-defined network with adaptive resource management and quality of service, based on advanced methods and algorithms for adaptive prioritization of services, choice of service server and data transmission route.

The purpose of this thesis is to ensure the ordered level of quality of experience by developing adaptive models and methods of traffic management in service-oriented software-defined networks.

The object of research is the process of transmission and adaptive management of information flows in service-oriented software-defined networks.

The subject of research is models, methods and algorithms of adaptive management of resources and quality of service in service-oriented software-defined networks.

In the process of research the methods of the queuing theory, optimization, simulation, mathematical statistics and expert estimations are used. Experimental research methods were used to confirm the theoretical results.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the thesis work, formulates the purpose and objectives of the research, the scientific novelty and practical significance of the results. The information about the implementation of the results of the work, its approbation, publications and personal contribution of the applicant is given.

In the first chapter "**Analysis of methods of construction and functioning of software-defined telecommunication networks**" the basic principles of construction, architecture and functioning processes of traditional and software-defined telecommunication networks are considered. The analysis of basic requirements to the quality of service in service-oriented telecommunication networks is performed. It was found that the existing telecommunications technologies and the methods of traffic management used in them are not able to meet the requirements of the ordered quality of service in a growing volume of

circulating information. Analysis of the main factors affecting the management of traffic distribution showed the need to use the technology of software-defined networks, focused on centralized management of network resources, simplifying maintenance and modernization of networks to improve the quality of service to users. Dynamic network configuration using the network controller without changing the hardware and software of network devices has led to the fact that today most telecom network operators partially implement this technology, but the algorithms of traffic management and data transmission methods remain practically unchanged. In this regard, the problem of the quality of traffic management and maintenance in accordance with the customized requirements of users and the efficient use of network resources is now more relevant than ever.

In the second chapter "**Models and methods for adaptive management of the data flow service process in service-oriented software-defined networks**" the conceptual model of service-oriented software-defined network with adaptive management of resources and quality of service is proposed. It has been established that the proposed model of service-oriented software-defined network allows guaranteeing the ordered level of service quality by analyzing QoE (Quality of Experience) estimates of users under the SLA (Service-Level Agreement), through adaptive prioritization of services, channel resource allocation in network nodes, load balancing on servers and implementing new routing protocols.

The method of measuring data transmission delays in software-defined networks has been improved, and its use in practice allowed increasing the accuracy of estimating the channel state between the switches by the delay criterion for low-priority flows up to 70% in the process of monitoring. And this, in turn, made it possible to ensure the correct choice of the optimal path in the process of implementation of adaptive routing, a metric that is based on a multi-criteria analysis of the channel state, other and with which the current channel delay.

Developed an adaptive algorithm for prioritizing information flows, which by automating the control at the level of SDN (Software-Defined Networking) controller

allowed to dynamically change the priorities of network flows in the case of degradation of quality of service parameters of traffic during transmission through the network to support the ordered quality of service for specific users.

The method of adaptive multicriteria routing of data flows in s service-oriented software-defined networks, which uses an adaptive integral metric separately for each class of information flows, is developed. This metric is based on measured QoS (Quality of Service) parameters, characterizing each link of the network topology in the process of the network operation and the necessary requirements to the quality of service provision according to the concluded SLA contract. The advantage of the proposed approach to the management of routing mechanisms is that it can be deployed both in current programmatically configured networks and in a separate set of communication nodes, united by a single logic of organization of network resources. It is proved that the developed routing method provides a necessary tool to simplify the management of communication system, by the manipulation of the weight coefficients of integral metrics, thereby reducing the task of providing the required quality of service provision to the selection of their "best" values adapting to the needs of users. Decision-making on recalculation of primary network parameters and direct adjustment of metrics weighting coefficients values is the main task of the software-configurable network controller. To solve the multicriteria optimization problem of finding the optimal data transmission path in SDN, the method using generalized additive optimality criterion has been selected and automated on the controller.

An algorithm for solving the multicriteria optimization problem to determine the optimal data service server using the integral additive criterion is proposed. According to this algorithm to solve this problem a utility function is constructed to determine the performance measure of the solution and the preference process is reduced to a number-value comparison. In this case, the SDN controller, making a decision, takes into account that one set of local criterion values has an advantage over others, if it corresponds to a larger value of the preference function. In the case

of degradation of quality of service the SDN controller performs correction of weighting coefficients to adapt the server plane to provide the required level of quality of service by matching with the QoS level, which is provided by the network plane.

The algorithm for solving the multicriteria optimization problem to determine the optimal data service server using the integral additive criterion is proposed. According to this algorithm, to solve this task, a utility function is constructed, which provides a measure of the effectiveness of the solution and the process of preference is reduced to a comparison of number-values. In this case, the SDN controller, making a decision, takes into account that one set of local criterion values has an advantage over others, if it corresponds to a larger value of the preference function. In the case of degradation of the quality of service the SDN controller performs weighting correction to adapt the server plane to provide the necessary level of quality of service through consistency with the level of QoS, which is provided by the network plane.

In the third chapter "**Modeling and research of methods for adaptive resource management and service quality in service-oriented software-defined telecommunication networks**", the modeling and research of the effectiveness of the proposed solutions based on the developed simulation model of service-oriented software-defined telecommunication network are conducted. It was proved that the complex use of the proposed method of adaptive multicriteria routing and prioritization of data flows allowed to provide a high level of quality perception of real-time video service in conditions of overload of individual elements of networks. In particular, it has been established that while using traditional traffic control mechanisms, namely dynamic routing based on OSPF protocol metrics (Open Shortest Path First) and PQ (Priority Queuing) algorithm, the obtained quality level was QoE - 1.8, and using the adaptive multicriteria routing and prioritization of data flows method the quality level of video service perception was QoE - 4.2.

The verification of the proposed adaptive routing in comparison with the existing routing methods OSPF and EIRGP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol) has been carried out by simulation. It was found that using adaptive routing provides the necessary level of quality of service for a particular type of traffic by manipulating the weight coefficients of the route metric.

In the fourth chapter "**Practical implementation of service-oriented software-defined network with adaptive resource management and quality of service**" the prototype SDN network is developed by software deployment of virtual multilayer network switch with open source code Open vSwitch on the hardware platform Raspberry Pi 3 Model B and Floodlight controller on Orange Pi Prime platform. The main advantage of the developed prototype of SDN network is the low cost and availability of implementation, which is important for training specialists in the field of software-defined networks in the process of education, training and research purposes. In particular, based on the developed network prototype the research of influence of technical parameters of quality of service in the process of real-time video flows transmission on the level of quality of end-user's perception of service defined by using the method of expert evaluation on the 5-point scale was conducted. This allowed finding a correlation between the service quality parameters and the quality of service perception by users formalized as a mathematical model from the scientific point of view.

The efficiency of traffic prioritization on the quality of experience of real-time video service under the conditions of limited channel resources on the basis of the developed prototype network was investigated.

The conclusions of the thesis include generalized results of the research and recommendations for their practical implementation. The theoretical significance of the work lies in the fact that its results make it possible to provide the necessary quality of service to users in conditions of limited network resources by developing a new model of software-configurable service-oriented network with adaptive resource management and quality of service.

Scientific and practical results of the research performed are used in the educational process of the Department of Telecommunications of the Lviv Polytechnic National University, particularly for the students of specialty 126 "Information Systems and Technologies" in the course of lectures on the subject "Information and Communication Network Technologies", as well as in scientific research works of the Department of Telecommunications.

The main results of the thesis work were used and implemented to improve the quality of service parameters and flexibility of resource management in telecommunications corporate networks of "Conteh" and "Telecommunications Company", which is confirmed by acts of implementation.

Ключові слова: software-defined network, service-oriented network, quality of service, quality of experience, routing protocols, prioritization, service level agreement.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. I. Demydov, N. Baydoun, M. Beshley, M. Klymash, and O. Panchenko, "Development of Basic Concept of ICT Platforms Deployment Strategy for Social Media Marketing Considering Tectonic Theory," *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 0, no. 1, pp. 18-33, Jan. 2020. (Scopus)
2. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Prislupskiy, H. Beshley, O. Panchenko, "Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT," *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications*, Vol. 3, Issue 1, pp. 22-23. May 2018.
3. V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk, "Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing," *Technology audit and production reserves*, №3/2(41), pp. 46-55, 2018.

4. M.I. Beshley, V.V. Chervenets, I.V. Demydov, V.I. Romanchuk, O.M. Panchenko, "Development of real-time data transmission methods by improving streaming prioritization processes in routers," *Systems of Arms and Military Equipment: Sciences. magazine - Kharkiv: Khar. Univ. Air. Forces named after Ivan Kozhedub*, 5(142), pp. 114-123, 2016.

5. M.M Klymash, M.I Beshley, Yu.D. Deshchinsky, O.M Panchenko, "Development of a method of load balancing in SDN networks based on a modified STP protocol," *Computer printing technologies*, № 2, pp. 146-155, 2015.

6. M.M. Klymash, VI Romanchuk, O. M. Panchenko, M.I. Beshley, AV Polishchuk, "Development of software router with automatic deployment of virtual nodes," *Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications*, № 885, pp. 22-30, 2017.

7. V.I. Romanchuk, M.I. Beshey, O.M. Panchenko, A.V. Polishchuk, "Method of coordinated solving of balancing tasks of different priority load balancing between queues of network devices," *Scientific notes of the UNDIIZ*, №2(50), pp. 48-57, 2018.

8. I.O. Kahalo, M.I. Beshley, M.M. Klymash, O.M. Panchenko, H.V. Beshley, "Adaptive Formation of the Multilevel Radio Structure of LTE/Wi-Fi Integrated Networks," *Telecommunication and information technologies* № 3(64), pp.24–38, 2019.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

9. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and M. Seliuchenko, "Dynamic Switch Migration Method Based on QoE- Aware Priority Marking for Intent-Based Networking," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 864-868.

10. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on*

Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 1167-1170.

11. M. Beshley, A. Pryslupskiy, O. Panchenko and H. Beshley, "SDN/Cloud Solutions for Intent-Based Networking," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 22-25.

12. A. Pryslupskiy, O. Panchenko, M. Beshley and M. Seliuchenko, "Improvement of Multiprotocol Label Switching Network Performance using Software-defined Controller," *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 106-109.

13. H. Beshley, O. Panchenko and M. Kyryk, "Investigation and Implementation of Methods for Controlling the Intensity of Flow of Information Protocols," *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-5.

14. H. Beshley, M. Kyryk, M. Beshley and O. Panchenko, "Method of Information Flows Engineering and Resource Distribution in 4G/5G Heterogeneous Network for M2M Service Provisioning," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Lviv, 2018, pp. 229-233.

15. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 282-286.

16. O. Panchenko, A. Polishuk, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Method for adaptive client-oriented management of quality of service in integrated SDN/CLOUD networks," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of*

Infocommunications. Science and Technology (PICS&T), Kharkov, 2017, pp. 452-455.

17. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, 2017, pp. 1-5.

18. V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and P. Arthur, "Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes," *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, 2017, pp. 295-298.

19. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko and A. Polishuk, "Adaptive flow routing model in SDN," *2017 14th International Conference the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, 2017, pp. 298-302.

20. M. Seliuchenko, M. Beshley, O. Panchenko and M. Klymash, "Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in software-defined networks," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 2016, pp. 667-670.

21. M. Seliuchenko, O. Lavriv, O. Panchenko and V. Pashkevych, "Enhanced multi-commodity flow model for QoS-aware routing in SDN," *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Kiev, 2016, pp. 1-3.

22. M.I. Beshley, O.M. Panchenko, I.V Demydov, M.O Seliuchenko, "Dynamic service quality management method in an integrated SDN/CLOUD network," *V International Scientific Conference «Physical and technological problems of transfer, processing and storage information in infocommunication systems»*, Chernivtsi, 3-5 2016, pp. 74-75.

23. M.I. Beshley, M.M. Klymash, O.M. Panchenko, H.V. Beshley, “Development of monitoring and traffic analysis system of information telecommunication network for anomaly detection and attack prevention,” *I International Scientific and Practical Conference "Problems of cybersecurity of information and telecommunication systems". (PCSITS)*, Kiev, 2018, pp. 201-203.

24. М.М. Климаш, М.О Селюченко, О.М. Панченко, “System of packet delay monitoring in software-defined telecommunication networks,” *X International Scientific and Technical Conference "Problems of Telecommunications" PT-2016: collection of conference materials*, Kiev, 2016, p. 140-142.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	26
ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ.....	36
1.1 Обмеження сучасних мережевих технологій та необхідність нової інфраструктури.....	36
1.2 Організація програмно-конфігурованої мережі на базі протоколу Openflow.....	40
1.3 Аналіз завдань, покладених на мережі, що програмно- конфігуруються.....	52
1.4 Недоліки існуючих моделей управління якістю обслуговування в сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах.....	55
1.5 Аналіз теоретичних досліджень щодо управління трафіком та розподілу ресурсів в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.....	62
1.6 Постановка науково-практичного завдання дисертаційного дослідження.....	70
Висновки до 1-го розділу.....	71
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОТОКІВ ДАНИХ У ПРОГРАМНО- КОНФІГУРОВАНИХ СЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНИХ МЕРЕЖАХ.....	73
2.1 Концептуальна модель програмно-конфігурованої сервісно- орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування.....	73
2.2 Удосконалений метод вимірювання затримки передавання даних між будь-якою парою комутаторів та вздовж усього шляху в програмно-конфігурованій мережі.....	81
2.3 Алгоритм адаптивної пріоритезації сервісів телекомунікаційної мережі.....	88
2.4 Метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.....	95
2.4.1 Математична модель задачі багатокритеріальної оптимізації для адаптивної маршрутизації інформаційних потоків.....	95

2.4.2	Метод розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального шляху передавання даних в SDN з використанням інтегрального адитивного критерію.....	101
2.5	Алгоритм розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію	109
	Висновки до 2-го розділу.....	113
	РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ТА ЯКІСТЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ У ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ СЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ	116
3.1	Структурно-функціональна схема імітаційної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі.....	116
3.2	Аналіз та генерація трафіку інформаційно-телекомунікаційної мережі	117
3.3	Виявлення ділянок мережі, які спричиняють погану якість надання сервісу	121
3.4	Моделювання та дослідження пріоритетного обслуговування інформаційних потоків в телекомунікаційній мережі	123
3.5	Моделювання та дослідження ефективності застосування адаптивного алгоритму пріоритезації інформаційних потоків в умовах низьких значень QoE	128
3.6	Моделювання та дослідження методу адаптивної маршрутизації відеопотоків реального часу щодо забезпечення необхідного рівня QoE	132
	Висновки до 3-го розділу.....	139
	РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНОЇ СЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МЕРЕЖІ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ РЕСУРСАМИ ТА ЯКІСТЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ.....	141
4.1	Особливості використання віртуального комутатора Open vSwitch для побудови програмно-конфігурованої мережі на основі мікроконтролерних платформ	141
4.2	Конфігурація розробленого прототипу SDN комутатора розгорнутого на основі платформи Raspberry Pi 3 Model B.....	144

4.3 Експериментальна схема розробленої програмно-конфігурованої мережі для тестування пропускнуої здатності та затримки передавання даних	146
4.4 Дослідження впливу параметрів QoS на якість сприйняття відеопотоків реального часу з допомогою розробленого прототипу SDN мережі	150
4.5 Дослідження якості надання відео послуг на основі пріоритетного обслуговування в розробленій SDN мережі	163
Висновки до 4-го розділу	166
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ	167
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	171
Додаток А. Акти впровадження	190
Додаток Б. Програмний код для вимірювання затримки пакетів в SDN	194
Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	197

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

SOA – Service-Oriented Architecture, сервісно-орієнтована архітектура.

ACL – Access Control List, список контролю доступу.

VLAN – Virtual Local Area Network — віртуальна локальна комп'ютерна мережа.

QoS – Quality of Service, якість обслуговування

VM – Virtual Machine, віртуальні машини

IP – Internet Protocol, інтернет протокол, в мережах з комутацією пакетів.

SDN – Software-Defined Networking, програмно-конфігурована мережа.

IDS – Intrusion Detection System, система виявлення вторгнень.

IPS – Intrusion Prevention System, система запобігання вторгнень.

API – Application Programming Interface, формалізований набір визначень для взаємодії програмного забезпечення.

ПКМ – Програмно-конфігурована мережа.

TCP – Transmission Control Protocol, протокол керування передачею

UDP – User Datagram Protocol, протокол датаграм користувача

ISP – Internet Service Provider, провайдер інтернет мереж

CSP – Constrained Shortest Path Problem, розширення проблеми знаходження найкоротших шляхів, на які накладаються певні обмеження.

SLA – Service-Level Agreement, угода про рівень послуг.

QoE – Quality of Experience, оцінка досвіду використання користувачем певної послуги.

EIGRP – Enhanced Interior Gateway Routing Protocol, закритий протокол маршрутизації.

OSPF – Open Shortest Path First, протокол динамічної маршрутизації на основі стану каналу для знаходження найкоротшого шляху.

DASH – Dynamic Adaptive Streaming over HTTP, динамічний адаптивний стрімінг через HTTP

DSCP – Differentiated Services Code Point, поле коду диференційованої послуги.

PQ – Priority Queuing, алгоритм пріоритеного обслуговування черг.

ITU – International Telecommunication Union, Міжнародний союз телекомунікацій.

LLDP – Link Layer Discovery Protocol, протокол для обміну інформацією про конфігурацію між мережевими пристроями.

MAC – Media Access Control, адреса мережевої карти.

NFV – Network Functions Virtualization, віртуалізація мережних функцій.

ToS – Type of Service, Рівень пріоритету IP, вид послуги.

VoD – Video on Demand, відео на замовлення.

VoIP – Voice over IP, телефонія на основі протоколу IP.

RTT – Round-Trip Time, кругова затримка пересилання пакетів.

ВСТУП

Актуальність теми. Розподіл ресурсів та якість управління послугами в системах, що базуються на парадигмі сервісно-орієнтованої архітектури (SOA), є дуже важливими завданнями, що дають змогу максимізувати задоволеність клієнтів та прибуток постачальника послуг. У наші дні в системах SOA, які використовують Інтернет як комунікаційну шину, виникає технічна проблема стосовно гарантованої якості надання послуг за критеріями часу відгуку послуги. Оскільки загальний час відгуку на надання сервісу складається із тривалості обробки запитів на серверах додатків та мережної затримки, що вносяться комутаторами та маршрутизаторами, завдання доставки запитуваного часу відповіді послуги вимагає належного управління як комунікаційними, так і обчислювальними ресурсами. Забезпечення ефективного наскрізного управління ресурсами та управління якістю в таких складних гетерогенних сценаріях конвергентної мережі вимагає уніфікованих, адаптивних та масштабованих рішень для інтеграції та координації різноманітних механізмів якості надання послуг. Досягнення вимог клієнта з найменшими експлуатаційними витратами – суть створення та забезпечення функціонування майбутніх мереж. Зазвичай ця складна проблема ділиться на сукупність невирішених технічних завдань меншої деталізації. Одним із таких завдань є адаптивне управління ресурсами та інженерія трафіку в мережевих пристроях. Для вирішення даного завдання необхідні еластичні рішення, які ґрунтуються на оцінці стану мережних вузлів в залежності від обсягів вхідного навантаження з метою проведення правильного збалансування та ефективного розподілу ресурсів.

Дослідженням завдань адаптивного управління мережними ресурсами, трафіком та забезпечення якості обслуговування в сучасних телекомунікаційних мережах активно займаються, як фахівці України: Лемешко О.В., Одарченко Р.С., Єременко О.С., Ложковський А.Г., Соловська І.М., Беркман Л.Н., Безрук В.М., Глоба Л.С. так іноземних країн: М. Samuel, Р.

Rygielski , K. Phemius and L. Liao, зокрема, особливу увагу слід звернути на останні роботи спрямовані на дослідження програмно-конфігурованих мереж (SDN).

Використання технології програмно-конфігурованих мереж забезпечує високу гнучкість в процесі управління інфраструктурою і спрощує віртуалізацію мережних ресурсів. Динамічна конфігурація мережі за допомогою контролера без зміни апаратного і програмного забезпечення мережеских пристроїв привела до того, що сьогодні більшість операторів телекомунікаційних мереж частково впроваджують цю технологію, але при цьому алгоритми управління трафіком і методи передавання даних залишаються практично незмінними. У зв'язку з цим питання якості управління та обслуговування трафіку відповідно до замовлених вимог користувачів і ефективності використання мережеских ресурсів не втрачає актуальності і сьогодні.

Таким чином, неухильне зростання різноманітності та обсягів інформаційних потоків в телекомунікаційних мережах, спонукають до розв'язання науково-практичного завдання забезпечення замовленої якості обслуговування в умовах обмеженості мережеских ресурсів шляхом розроблення нової моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування, яка базується на удосконалених методах та алгоритмах адаптивного встановлення пріоритетів послуг, вибору сервера обслуговування та маршруту передавання даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційного дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі», в межах низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-

конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (№ держреєстрації 0117U004449, (2017–2018 рр.)); «Розробка методів та уніфікованих програмно-апаратних засобів для розгортання енергоефективних інтенційно - орієнтованих інфокомунікаційних мереж подвійного призначення» (№ держреєстрації 0120U102201, (2020-2022 рр.)). Окрім того, дисертація виконана в межах госпдоговірних робіт: «Розробка методів управління контентом в інформаційній системі підприємства з використанням технологій віртуалізації» (ГД №_741) ТОВ «ІнформКонсалт» (29.09.2017 р. – 31.10.2017 р.); «Розробка енергоефективної SDN платформи для надання сервісів IoT в корпоративних мережах » (ГД №0632) ТОВ «ІнформКонсалт» (1.10.2019 р. – 30.11.2019 р.).

Мета і завдання дослідження. Метою представленої дисертаційної роботи є забезпечення замовленого рівня якості сприйняття сервісу шляхом розроблення адаптивних моделей та методів управління трафіком в програмно-конфігурованих сервіс-орієнтованих мережах.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Аналіз існуючих методів управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.
2. Розроблення концептуальної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування.
3. Удосконалення методу вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах.
4. Розроблення алгоритму адаптивної пріоритезації сервісів телекомунікаційної мережі.
5. Розроблення методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.
6. Розроблення алгоритму розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію.

7. Моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі телекомунікаційної мережі .

8. Дослідження впливу параметрів QoS на якість сприйняття відеопотоків реального часу з допомогою розробленого експериментального зразка SDN мережі.

Об'єктом дослідження є процес передавання та адаптивного управління інформаційними потоками в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.

Предмет дослідження: моделі, методи та алгоритми адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.

Методи дослідження. В процесі досліджень використано методи теорії систем масового обслуговування, оптимізації, імітаційного моделювання, математичної статистики та експертних оцінок. Для підтвердження теоретичних результатів застосовано експериментальні методи дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої телекомунікаційної мережі, яка, на відміну від відомих, використовує централізоване адаптивне управління ресурсами як мережної, так і серверної площини шляхом проведення моніторингу та узгодження динамічного стану їх функціонування, що дає змогу забезпечити адаптивне управління якістю обслуговування користувачів.

2. Удосконалено метод вимірювання затримки передавання даних між будь-якою парою комутаторів та вздовж усього шляху в програмно-конфігурованій мережі, який відрізняється від відомих можливістю формування SDN контролером пробних пакетів з різними пріоритетами, призначених для моніторингу високонавантажених каналів зв'язку, в яких присутні потоки різного класу обслуговування, що дає змогу підвищити точність оцінки стану каналу за критерієм затримки.

3. Набув подальшого розвитку метод маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах, який, на відміну від відомих, для визначення оптимального маршруту передавання даних використовує метод розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації із застосуванням інтегрального адитивного критерію для розрахунку адаптивної метрики маршруту (для певного класу інформаційних потоків) в умовах динамічної зміни стану мережі на основі його багатокритерійного аналізу, що дало змогу врахувати якість обслуговування в каналах та вузлах.

4. Розвинуто математичну модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE з технічними параметрами QoS, які забезпечуються в мережі при перегляді відеопотоків реального часу, що відрізняється від відомих пошуком необхідного нормалізованого значення інтегрального адитивного критерію QoS при розв'язанні завдання забезпечення замовленого рівня QoE шляхом здійснення багатокритерійної адаптивної маршрутизації потоків даних, метрика якої базується на цьому ж інтегральному адитивному критерії.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Удосконалено метод вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах, що дало можливість у високонавантажених каналах для низько пріоритетних потоків покращити точність моніторингу до 70%.

2. Розроблено алгоритм адаптивної пріоритезації сервісів телекомунікаційної мережі, що дало змогу в умовах обмеженості мережних ресурсів підвищити рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу визначений на основі суб'єктивної п'ятибальної експертної оцінки QoE, згідно якої більше значення відповідає кращому рівню якості сприйняття. Зокрема, без використання алгоритму адаптивної пріоритезації, рівень отриманої якості становить QoE – 1.8, а з розробленим алгоритмом пріоритезації, рівень якості сприйняття відеосервісу становить QoE – 3.3.

3. Комплексне використання методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних дало змогу забезпечити високий рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу в умовах перевантаження окремих елементів мереж, зокрема без використання комплексного підходу рівень отриманої якості становив QoE – 1.8, а з використанням методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних рівень якості сприйняття відеосервісу становив QoE – 4.2.

4. Створено скрипт файл для конфігурації різного стану характеристик каналів зв'язку програмно-конфігурованої мережі шляхом штучного маніпулювання такими параметрами, як пропускна здатність каналу, затримка, втрати пакетів та розмір черги, що забезпечуватимуться в процесі функціонування мережі. Використання розробленого скрипт файлу дало змогу знайти кореляцію між параметрами якості обслуговування та якістю сприйняття сервісу кінцевими користувачами.

5. Розроблено прототип програмно-конфігурованої мережі на базі мікроконтролерних платформ, що дало змогу підтвердити на практиці ефективність запропонованих рішень та дослідити вплив технічних параметрів якості обслуговування в процесі передавання відеопотоків реального часу на рівень якості сприйняття сервісу, визначений методом експертного оцінювання за 5-бальною шкалою.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсу лекцій з дисципліни «Технології інформаційно-комунікаційних мереж».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних корпоративних мережах ТОВ ВТФ «Контех», ТОВ «Телекомунікаційна компанія», що підтверджено актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, внесок Панченка О.М. є вирішальним, зокрема авторові належать (*нумерація згідно Додатку В*: у роботах [1, 8, 10, 11, 16, 22] – розроблення концептуальної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування, [20, 24] – удосконалення методу вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах, [2, 4, 7] – розроблення алгоритму адаптивної пріоритезації сервісів телекомунікаційної мережі, [5, 14, 19, 21] – розроблення методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах, [19] – розроблення алгоритму розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію, [3, 6, 13, 23] – моделювання та дослідження методів адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування на основі розробленої імітаційної моделі телекомунікаційної мережі, [9, 15, 17, 18] – дослідження впливу параметрів QoS на якість сприйняття відеопотоків реального часу з допомогою розробленого експериментального зразка SDN мережі.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 16-ох міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп’ютерної інженерії» (м. Львів-Славське 2016, 2018, 2020 рр.); IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (м. Львів, 2019 р.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologie (м. Львів, 2017, 2019 рр.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2017, 2019 рр.); Міжнародних конференціях з інформаційно-

телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (м. Київ 2016р., м. Одеса, 2017, 2018 pp.); IEEE 4th International symposium on wireless systems within the international conferences on intelligent data acquisition and advanced computing systems (м. Львів, 2018р.); 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (м. Харків 2017); 5-й міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (2016 р., м. Чернівці); 1-й міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми кібербезпеки інформаційно телекомунікаційних систем” (2018 р., м. Київ); 10-й міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (2016 р., м. Київ). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 24 наукові праці, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України та 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав; 3 статті у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз; 16 публікацій у збірниках тез наукових конференцій (зокрема 13 – у виданнях, які входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science).

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 200 сторінок друкарського тексту, із них 8 сторінок вступу, 143 сторінки основного тексту, 83 рисунка, 6 таблиць, список використаних джерел із 150 найменувань, 3 додатки на 11 сторінках. Додатки містять обрані початкові коди, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

1.1 Обмеження сучасних мережевих технологій та необхідність нової інфраструктури

Сучасні вимоги до телекомунікаційного ринку практично неможливо задовольнити за допомогою сучасних мережевих архітектур. В умовах обмеженого бюджету, ІТ-відділи компаній намагаються витягнути все з поточних мереж, використовуючи інструменти мережевого управління на рівні окремих пристроїв або за допомогою виконання ручних процесів налаштування. Аналогічні проблеми стоять і перед постачальниками: зростає попит на мобільність і високу пропускну здатність, в той час як доходи знижуються зі збільшенням вартості обладнання і зниженням доходів [1].

Існуючі мережні архітектури не розраховані на нинішні вимоги користувачів, компаній, провайдерів, а проектувальники мереж обмежені недоліками сучасних мереж.

Ось деякі з них:

1. Складності налаштування та управління мережевою інфраструктурою.

На сьогоднішній день мережева технологія в основному складається з дискретних наборів протоколів, призначених для надійного з'єднання хостів. З метою задоволення технічних і бізнес-потреб, за останні кілька десятиліть телекомунікаційна індустрія розвивала мережеві протоколи для забезпечення більш високої продуктивності і надійності, широких каналів зв'язку, і більш суворої безпеки [2]. При цьому протоколи, як правило, визначаються ізольовано, і вирішують конкретну проблему без будь-якої фундаментальної абстракції. В результаті, це призвело до одного з основних обмежень сучасних мереж: складності. Наприклад, переміщення або додавання одного пристрою, з точки зору системного адміністрування, включає в собі налаштування кількох комутаторів, маршрутизаторів, брандмауерів, порталів веб-аутентифікації і т.д.,

а також оновлення ACL, VLAN, Quality of Service (QoS) і інших протокольних механізмів, які використовують інструменти управління на рівні пристрою. Крім того, повинні бути прийняті до уваги: топологія мережі, моделі комутатора постачальника і версії програмного забезпечення. У зв'язку із цими труднощами, мережі на сьогоднішній день є відносно статичними, оскільки адміністратори прагнуть звести до мінімуму ризик простою сервісу. Статичний характер мереж знаходиться в різкому контрасті з динамічним характером сучасного середовища серверів, де віртуалізація серверів значно збільшила кількість комп'ютерів, які потребують підключення до мережі, і докорінно змінили припущення про фізичне розташування вузлів.

До появи віртуалізації, додатки знаходилися на одному сервері і в основному обмінювалися трафіком з окремими клієнтами. Сьогодні, додатки розподілені між декількома віртуальними машинами (VM), які обмінюються трафіком один з одним. Віртуальні машини переміщуються для оптимізації і балансування навантаження серверів, що, з плином часу, часто призводить до зміни викликаючих фізичних кінцевих точок існуючих потоків. Переміщення віртуальних машин ставить під сумнів актуальність багатьох аспектів традиційних мереж, від адресної схеми і простору доменних імен до основних понять сегментованих, маршрутизованих мереж.

У зв'язку з появою технологій віртуалізації багато підприємств сьогодні використовують IP-мережі для передачі голосового, відео- та інформаційного трафіку, хоча існуючі мережі можуть надавати різні рівні сервісу для різних додатків, процес настройки для надання цих ресурсів є дуже трудомістким і ручним. Системним адміністраторам необхідно налаштувати обладнання кожного постачальника окремо, а також налаштувати такі параметри, як пропускна здатність мережі і QoS на рівні сесії, для кожної програми. Через свою статичну природу, мережа не може динамічно адаптуватися до мінливих вимог трафіку, додатків і користувачів.

2. Неузгоджені політики.

Для установки певної політики по всій мережі, системні адміністратори повинні налаштовувати сотні пристроїв і механізмів. Наприклад, кожен раз, коли нова віртуальна машина, чи мережевий пристрій підключається до мережі, настройка списків ACL по всій мережі може зайняти кілька годин, в деяких випадках днів [3]. Складність сучасних мереж ускладнює системним адміністраторам застосування узгодженого набору політик доступу, безпеки, QoS, а також інших політик все більш мобільним користувачам, що робить підприємства уразливими при порушеннях безпеки, недотримання правил та інших негативних наслідках.

3. Неможливість масштабування:

Оскільки вимоги до центрів обробки даних ростуть швидко, відповідно повинні рости і вимоги до мереж, що їх об'єднують. Проте мережа стає значно складнішою з додаванням сотень або тисяч мережевих пристроїв, які повинні налаштовуватися і управлятися [4]. Системні адміністратори також намагаються розрахувати ресурси, які закладаються в мережу як запас, з метою масштабування мережі, на основі передбачуваних моделей трафіку, проте в сьогоднішніх віртуалізованих центрах обробки даних, трафік характеризується сплесковістю та випадковістю, що не дає змогу передбачити погіршення QoS в умовах достатності мережних ресурсів. Провідні оператори, такі як Google, і Facebook, стикаються з ще більш серйозними проблемами масштабованості. Ці постачальники послуг використовують великомасштабні паралельні алгоритми обробки і пов'язану з ними передачу даних по всьому пулу обчислювальних систем. Із зростаючою кількістю клієнтських додатків, число обчислювальних елементів різко збільшується і об'єм даних при обміні між обчислювальними вузлами може досягати петабайт. Відповідно провідні компанії потребують так званих гіпермасштабних мереж, які можуть забезпечити високу продуктивність, низьку вартість з'єднання між сотнями тисяч і потенційно мільйонів - фізичних серверів. Таке масштабування не може бути реалізовано

ручною конфігурацією. Щоб залишатися конкурентоспроможними, провайдери повинні надавати все більш цінні, більш диференційовані послуги для клієнтів.

Використання масштабованих мереж ще більше ускладнюють їх завдання, тому що мережа повинна обслуговувати групи користувачів з різними додатками і різними потребами продуктивності. Основні операції, які можуть здаватися відносно простими, такі як управління клієнтських потоків для надання контролю якості або надання послуги на вимогу, важко здійсненні за існуючих мереж, особливо в масштабах провайдера. Вони вимагають спеціалізованих пристроїв на кордонах мережі, тим самим збільшуючи капітальні та експлуатаційні витрати, а також час для впровадження нових послуг.

4. Залежність від виробника.

Провайдери і підприємства прагнуть впроваджувати нові можливості і сервіси, реагуючи на швидко мінливі потреби бізнесу і вимоги користувачів. Тим не менш, їх здатності реагувати заважає так званий цикл продуктів обладнання постачальників, який може варіюватися від трьох років або більше. Відсутність стандартних, відкритих інтерфейсів обмежує можливість мережевих операторів адаптувати мережу для індивідуальних умов [5]. Ця невідповідність між вимогами ринку і можливостями мережі привела ІТ індустрію до переломного моменту. У відповідь телекомунікаційна індустрія створила архітектуру програмно-конфігурованих мереж (SDN). SDN це гнучка мережева архітектура, яка допомагає організаціям справлятися з динамічною природою сучасних додатків. Програмно-конфігуровані мережі відокремлюють управління мережею від базової мережевої інфраструктури, дозволяючи адміністраторам динамічно управляти мережевим трафіком та QoS відповідно до мінливих потреб користувачів. SDN дає змогу адміністраторам управляти мережею, змінювати параметри конфігурації, формувати ресурси і підвищувати обсяг мережевих ресурсів за допомогою централізованого призначеного для користувача інтерфейсу і без додаткового обладнання.

1.2 Організація програмно-конфігурованої мережі на базі протоколу Openflow

Концепція «Програмно-конфігурованої мережі/Software Defined Networking (ПКМ/SDN)» народилася в стінах університетів Стенфорда і Берклі. Основна ідея концепції - перейти від управління окремими екземплярами мережевих елементів до управління мережею в цілому, реалізувати можливість програмування мережі і автоматизації. Базовим для SDN вважається документ, опублікований організацією Open Networking Foundation (ONF) [6], що займається стандартизацією протоколу OpenFlow як одного з ключових технологічних основ SDN.

У традиційних мережах зв'язку рівні управління і передачі даних об'єднані в одному вузлі. У мережах концепції SDN було запропоновано реалізувати функції управління вузлом окремо від рівня передачі даних. Це дозволяє здійснювати безпосереднє і динамічне застосування бізнес-логіки за допомогою надання можливості контролювати поведінку всієї мережі як єдиного цілого, а не по кожному елементу, один за іншим. Адміністратори мережі можуть управляти мережевим трафіком і наданням ресурсів без необхідності вручну налаштовувати фізичні комутатори. SDN заснована на відкритих стандартах і багато виробників зараз випускають обладнання з підтримкою SDN. SDN дає змогу компаніям реагувати в режимі реального часу на постійно мінливі потреби бізнесу, що робить її по-справжньому трансформаційною технологією

Основними принципами концепції SDN є:

- поділ процесів передачі та управління даними;
- уніфікований інтерфейс між рівнем управління і рівнем передачі даних;
- централізоване управління мережею, здійснюване за допомогою спеціалізованого контролера SDN;
- віртуалізація фізичних ресурсів мережі.

Мережеві пристрої традиційної мережі і SDN показані на рис.1.1.

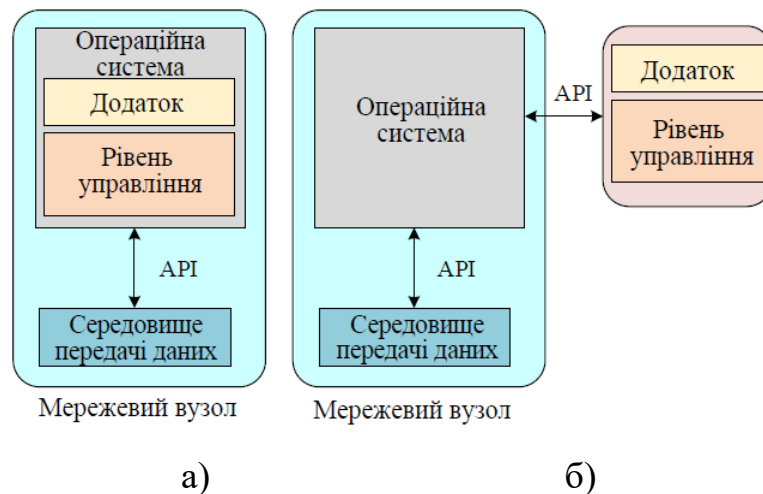


Рис.1.1 Мережеві вузли: а) вузол класичної мережі; б) вузол мережі SDN

Архітектура SDN (рис. 1.2) складається з трьох рівнів: рівня додатків (application layer), контрольного рівня (control layer) і рівня мережевої інфраструктури (infrastructure layer) [7].

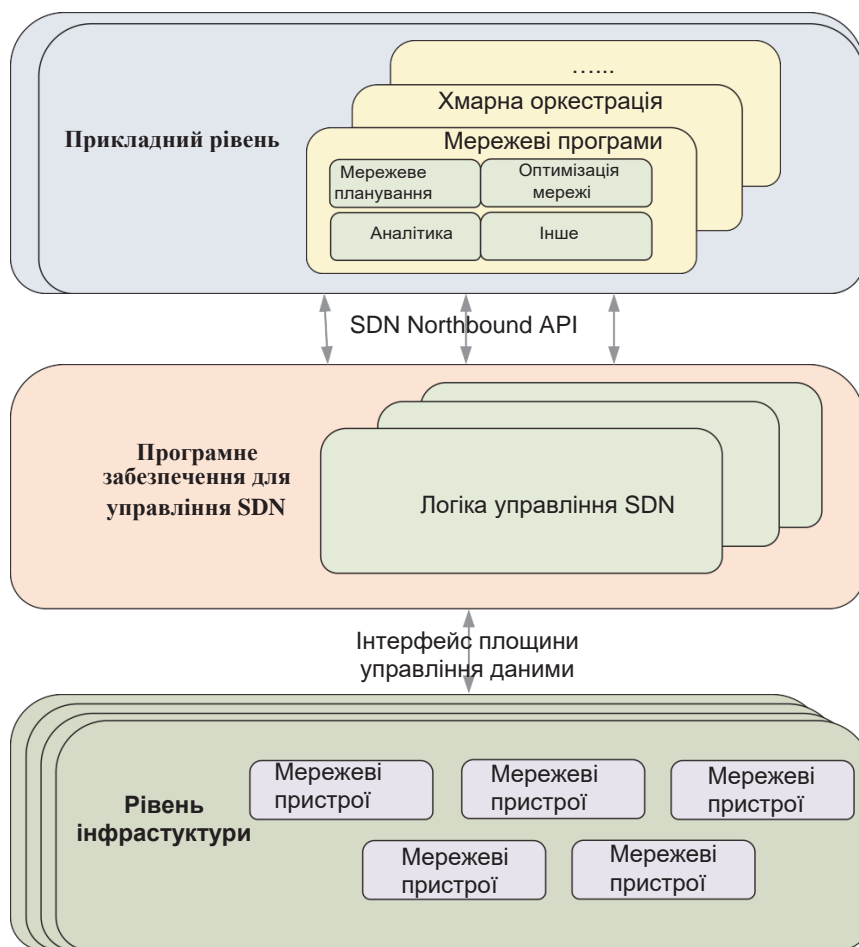


Рис.1.2 Архітектура мереж SDN

Як показано на рис. 1.2, архітектура SDN складається із трьох основних рівнів.

1. Рівень додатків. На верхньому рівні, званому рівнем додатків або прикладним рівнем, реалізуються різні служби, такі як системи виявлення та запобігання вторгнень (IDS/IPS), функція забезпечення якості обслуговування (QoS), управління доступом, проксі-сервер і інші, які визначають поведінку мережі.

2. Рівень управління. Рівень управління абстрагує топологію мережі для рівня додатків за допомогою northbound API (північного API-інтерфейсу). На цьому рівні основним елементом є ПКМ-контролер, який відповідає за координацію одного або декількох мережевих пристроїв, що знаходяться на рівні інфраструктури. Контролер формує правила обробки даних для цих пристроїв, відстежує їх стан і здійснює збір мережевої інформації через southbound API (південний API-інтерфейс). Протокол OpenFlow є прикладом реалізації такого API. На цьому рівні також присутні такі елементи, як eastbound і westbound API (східний і західний API-інтерфейси), які забезпечують зв'язок між об'єктами управління – контролерами.

3. Рівень інфраструктури. Нижній рівень, який відомий як рівень інфраструктури або рівень передачі даних, забезпечує обробку і пересилку пакетів на підставі отриманих інструкцій від рівня управління. На цьому рівні знаходяться мережеві пристрої, керовані контролером, наприклад, такі, як комутатори.

Northbound interfaces. Північні API-інтерфейси представляють собою програмований віртуальний мережевий інтерфейс для додатків і систему управління поверх стека ПКМ. Саме ці інтерфейси найбільш важливі API-інтерфейси архітектури ПКМ, так як вони дозволяють додаткам використовувати мережеві сервіси та динамічно налаштувати мережу. Мережеві сервіси, які можуть бути розгорнуті і оптимізовані за допомогою

північних API-інтерфейсів, включають сервіси безпеки, балансування навантаження, управління трафіком, якістю обслуговування і т. п.

Southbound interfaces. Південні API-інтерфейси забезпечують ефективне управління мережею і дозволяють контролеру динамічно організовувати мережеві ресурси відповідно до вимог та потреб в реальному часі. Південні API-інтерфейси на відміну від північних взаємодіють з мережевими пристроями (комутатор, маршрутизатор). З різних протоколів південних API-інтерфейсів найбільш використовуваний - OpenFlow.

East/West interfaces. Східний/Західний API-інтерфейси забезпечують зв'язок між об'єктами управління - контролерами і дають змогу їм обмінюватися інформацією, що відноситься до оброблення трафіку на рівні інфраструктури.

Контролер є найбільш важливим компонентом архітектури ПКМ, вузлом, який централізує мережеві функції і відстежує глобальний стан мережі. Контролер програмно-конфігурованих мереж може бути представлений як апаратно-програмне рішення, так і в якості програмної реалізації [8]. На даний момент, контролери на ринку частіше представлені в програмній реалізації. Витягуючи рівень управління з мережевого обладнання та запускаючи його як програмне забезпечення, контролер спрощує автоматичне керування мережею, а також інтеграцію і адміністрування бізнес-додатків. Перші версії архітектури ПКМ представляють план управління, що складається з одного централізованого контролера.

Серед основних характеристик контролера програмно-конфігурованих мереж виділяють наступні [9-12]:

1. продуктивність - число потоків, оброблюваних контролером в одиницю часу [потоків/с];
2. час обробки - кількість часу, що витрачається контролером на обробку запиту від комутатора [с];
3. надійність - число відмов при заданому профілі навантаження;

4. ресурсомісткість-утилізація контролером оперативної пам'яті фізичного сервера, і навантаження на ядра процесора;

5. масштабованість - підтримка контролером багатопотоковості.

SDN контролер зазвичай містить набір «підключаючих» модулів, які можуть виконувати різні мережеві завдання [13-16]. Основні модулі включають в себе:

- модуль виявлення каналів;
- модуль топології;
- модуль пам'яті;
- модуль вироблення стратегії;
- модуль таблиці потоків;
- модуль управління даними.

Також можуть впроваджуватися інші модулі, які підтримують більш складні функції. За надання послуги маршрутизації відповідають два модулі: модуль топології і модуль виявлення каналів. Модуль виявлення каналів відповідає за виявлення і підтримку статусу фізичних з'єднань в мережі. Процедура запускається контролером, коли який-небудь невідомий тип трафіку потрапляє в домен OpenFlow. Таким чином, інформація, зібрана модулем виявлення каналів, використовується для створення бази даних сусідів на контролері. З цієї БД модуль топології будує, і після, підтримує оновлення інформації про топології і обчислює маршрути в мережі.

На сьогоднішній день, існує чимала кількість контролерів, більшість з яких з відкритим вихідним кодом та з підтримкою протоколу OpenFlow. Ці контролери розрізняються мовами програмування, підтримуваною версією OpenFlow та продуктивністю.

Протокол OpenFlow є відкритим стандартом, що був запропонований ONF для стандартизації взаємодії контролера з мережевими пристроями в архітектурі ПКМ [17]. Дотримуючись еволюційного шляху розвитку мереж зв'язку, протокол OpenFlow, на даному етапі розвитку і практичної реалізації

концепції ПКМ, впроваджується у вигляді програмного модуля в апаратні реалізації Ethernet комутаторів, маршрутизаторів і безпроводних вузлів доступів, як розширення можливостей і їх застосування в якості пристроїв ПКМ.

OpenFlow заснований на комутаційному пристрої з внутрішньою таблицею потоків і забезпечує відкриту, програмовану, віртуалізовану комутаційну платформу для управління комутаційним обладнанням за допомогою програмного забезпечення [18].

База даних таблиці потоків, подібна до традиційної таблиці переадресації, розміщена на комутаторі з увімкненим OpenFlow [19], який містить записи потоку, що допомагають виконувати пошук та прийняття рішень щодо пересилання пакетів. Комутатор із підтримкою OpenFlow підключений до контролера через захищений канал, по якому між комутатором і контролером відбувається обмін повідомленнями OpenFlow для виконання завдань конфігурації та управління, як показано на рис.1.3 нижче.

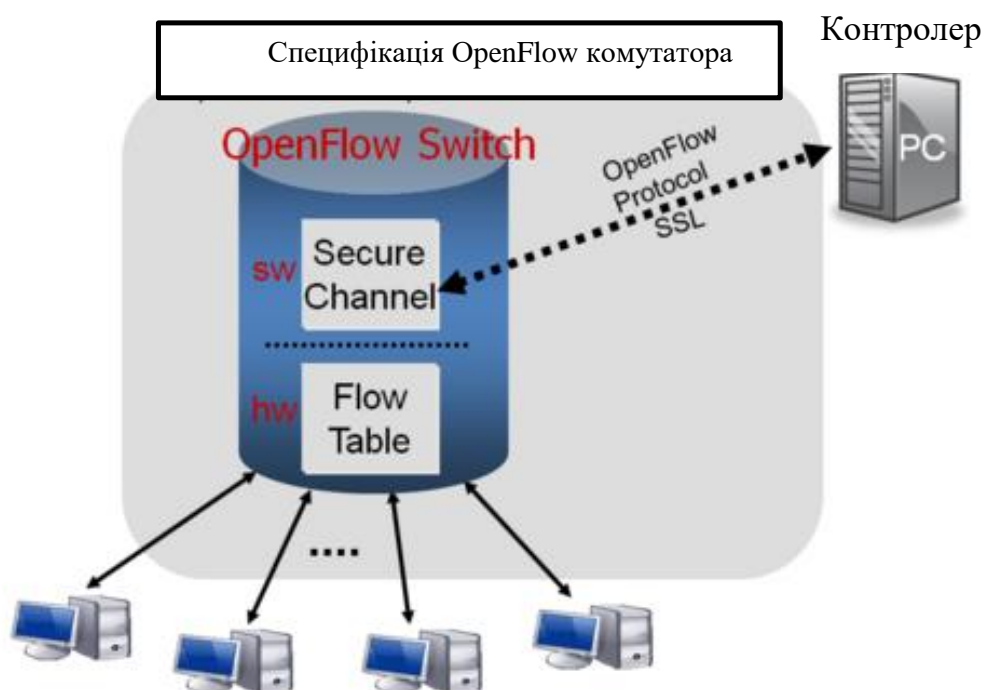


Рис.1.3 Взаємодія SDN контролера з мережевою інфраструктурою

Стандарт OpenFlow в даний час прийнятий більшістю виробників мережевого устаткування. На телекомунікаційному ринку доступні комутатори з підтримкою OpenFlow таких виробників як Cisco, Juniper, Brocade, Huawei, Zelaх, В4N і ін. [20].

Повідомлення типу контролер–комутатор ініціюються контролером і використовуються для управління і контролю стану комутатора. Повідомлення цього типу можуть використовуватися контролером для встановлення і запиту параметрів конфігурації OpenFlow комутатора, для збору статистичних даних з комутаторів, для додавання, видалення і модифікації записів в таблицях потоків [21].

Повідомлення протоколу OpenFlow прийнято ділити на три типи (рис.1.4):

1. Повідомлення контролер-комутатор – використовується для управління комутатором і контролем за подіями, що відбуваються на ньому. До даного типу повідомлень відносяться такі повідомлення:

– *Features*: Дане повідомлення служить для запиту контролером можливостей комутатора. Комутатор в свою чергу відповідає на такий запит відповіддю *features*, в якому позначає свої можливості. Такий процес відбувається при відкритті OpenFlow каналу;

– *Configuration*: Даним повідомленням контролер запитує і встановлює параметри налаштування комутатора;

– *Modify-State*: Ці повідомлення надсилаються мережевою операційною системою для управління станом комутаторів. Завдання повідомлень додавання, видалення правил і зміна OpenFlow таблиць, настройка портів комутатора;

– *Read-State*: Дані повідомлення відповідають за збір статистики SDN комутаторів;

– *Packet-out*: Повідомлення *Packet-out* використовуються контролером для відправлення пакетів з певного порту на комутаторі і пересилання пакетів, отриманих за допомогою повідомлення *Packet-in*, які містять цілий пакет або

ідентифікатор ID буфера, що посилається на пакет, завантажений в комутатор. Повідомлення повинно містити список дій, які використовуються в зазначеному порядку: якщо список дій порожній, то пакет скидається;

- *Barrier*: Повідомлення Barrier забезпечують встановлення залежностей між повідомленнями або оповіщення про завершені операції. Використовуються при необхідності обробки повідомлень в певному порядку;

- *Role-Request*: Даний запит служить для зміни пріоритету контролера на комутаторі (для підвищення ролі зі Slave до Master);

- *Asynchronous-Configuration*: За допомогою даного повідомлення контролер встановлює фільтр на асинхронні повідомлення від комутаторів.

2. Другим типом повідомлень є асинхронні повідомлення, які не започатковано OpenFlow-комутаторами, призначені для сповіщення контролера про події на мережі, наприклад, збої, помилки, зміни стану. До даного типу повідомлень відносяться такі повідомлення:

- *Packet-in*: Дане повідомлення комутатор ініціює і відсилає контролеру в разі, якщо пакет, що прийшов не має потрібного правила в таблиці комутації. Для всіх пакетів, що пересилаються в віртуальний порт, повідомлення Packet-in відправляється на контролер;

- *Flow-Removed*: Повідомлення для видалення правил, які не використовуються і неактивні;

- *Port-status*: Генеруються комутатором на контролері в разі зміни налаштувань порту;

- *Error*: Цим повідомленням контролер сповіщає, що відбулися на ньому певні помилки або збої.

3. Третім типом повідомлень є симетричні повідомлення, які розсилаються як комутаторами, так і контролером. До даного типу повідомлень відносяться такі повідомлення:

- *Hello*: Повідомлення, обмін якими між комутатором і контролером відбувається при встановленні з'єднання;

– *Echo*: Повідомлення виду запит/відповідь можуть ініціюватися і контролером, і комутатором, за умови, що обов'язково буде отримана відповідь. Також можуть служити для виміру затримок або пропускної здатності з'єднання контролер-комутатор, а також перевірки ефективності встановленого каналу;

– *Experimenter (Vendor)*: Повідомлення Experimenter призначені для забезпечення додаткової функціональності, при проведенні експериментів в просторі типів повідомлень OpenFlow.

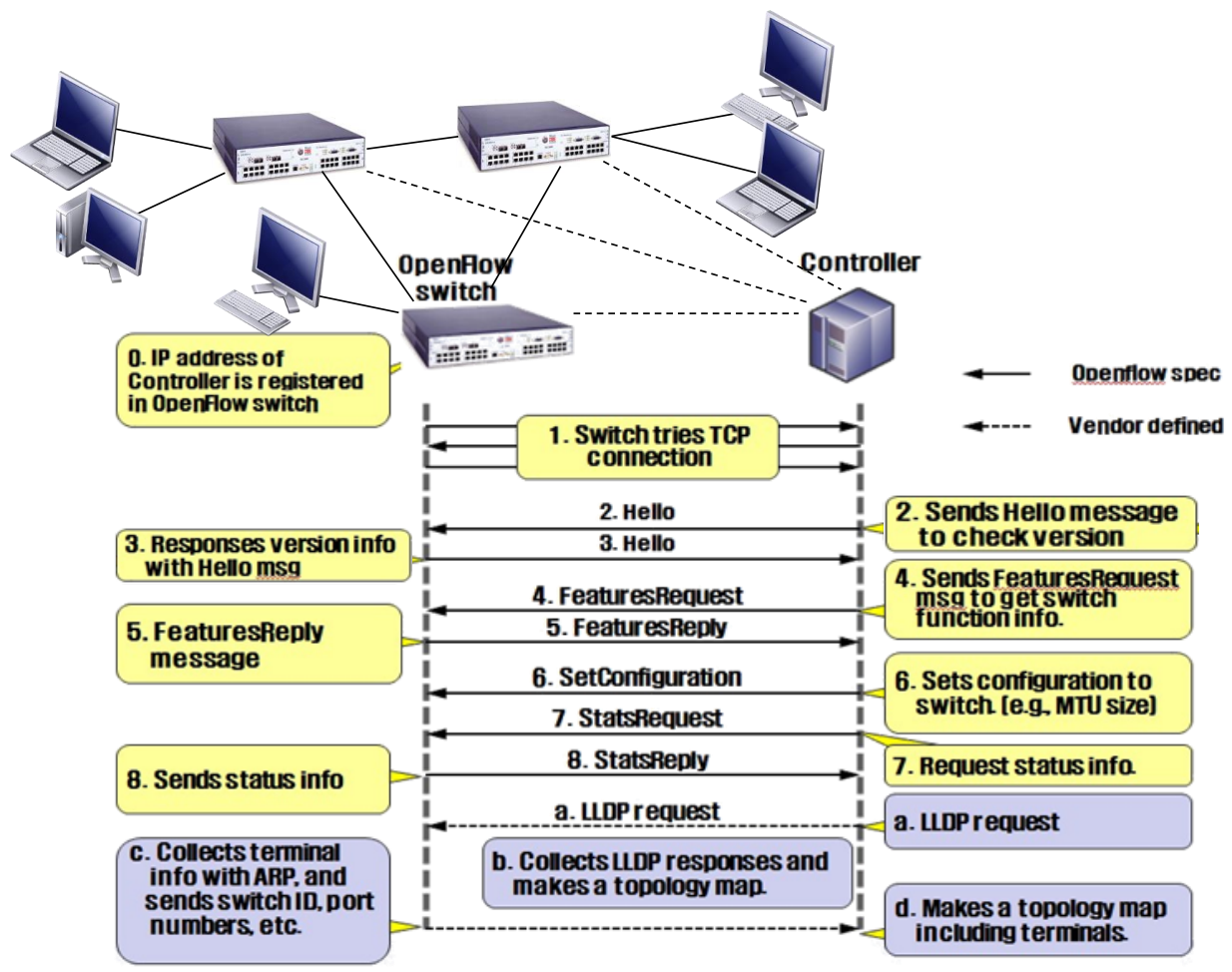


Рис.1.4 Види повідомлення для комунікації в мережах SDN

Пакети OpenFlow приймаються на вхідний порт і обробляються конвеєром, який може перенаправити їх на вихідний порт, використовуючи вихідні дії, які визначають: як пакет повертатиметься назад в мережу. Порти OpenFlow є

мережевими інтерфейсами для передачі пакетів між обробкою OpenFlow і іншою частиною мережі.

Комутатор OpenFlow повинен підтримувати три типи портів: фізичні, логічні і зарезервовані:

1. фізичні порти - порти, відповідні апаратним інтерфейсам комутатора;
2. логічні порти - порти, які не відповідають безпосередньо апаратним інтерфейсам комутатора. Обробка, виконувана логічним портом, залежить від реалізації і повинна бути прозорою для обробки OpenFlow;
3. зарезервовані порти - порти, що визначають загальні дії пересилання, такі як відправка контролера, розсилка чи пересилання з використанням методів, відмінних від OpenFlow. Включають в себе обов'язкові порти: ALL, CONTROLLER, TABLE, IN_PORT, ANY, UNSET і опціональні: LOCAL, NORMAL, FLOOD.

Канал OpenFlow використовується для обміну повідомленнями між комутатором OpenFlow і контролером OpenFlow. Контролер може керувати кількома каналами, кожен з яких призначений для різних комутаторів. У свою чергу, комутатор також може мати канали для кількох контролерів.

Канал OpenFlow зазвичай створюється як одне мережеве з'єднання між комутатором і контролером, використовуючи протокол TLS або звичайний TCP, що гарантує підтримку з'єднань OpenFlow в широкому діапазоні мереж і умов. Однак, канал може складатися з декількох допоміжних мережевих з'єднань на основі протоколів TLS, TCP і UDP.

Кожне з'єднання підтримується окремо, якщо з'єднання з певним контролером або комутатором перервано, це не призводить до завершення з'єднання з іншими контролерами або комутаторами. Незважаючи на це, якщо основне з'єднання завершено або перервано, всі відповідні йому допоміжні з'єднання також завершуються.

При перериванні з'єднання через мережеві умов або таймаут, комутатор або контролер, в залежності від того, хто був ініціатором з'єднання, робить

спроби підключення до іншої сторони до тих пір, поки не буде встановлено нове з'єднання або його повного видалення з конфігурації. У разі, коли комутатор втрачає зв'язок з одним або декількома контролерами, він також відправляє повідомлення Controller-Status (статус контролера) решті підключеним контролерам і при відновленні з'єднання, відправляє їм оновлене повідомлення статусу контролера [22].

У разі, коли комутатор втрачає зв'язок з усіма контролерами, він повинен негайно ввести або «fail secure mode» (пакети і повідомлення, призначені для контролера, видаляються), або «fail standalone mode» (обробляє всі пакети, використовуючи зарезервованій порт, діє як звичайний Ethernet-комутатор), в залежності від реалізації і конфігурації комутатора [23-24].

У мережах з використанням протоколу OpenFlow, у випадку коли комутатор отримує вхідний пакет ним проводиться аналіз поля заголовка і перевірка його з правилами у таблиці потоків. В умовах фіксації збігу враховується дія, наведена у таблиці потоків (рис.1.5).

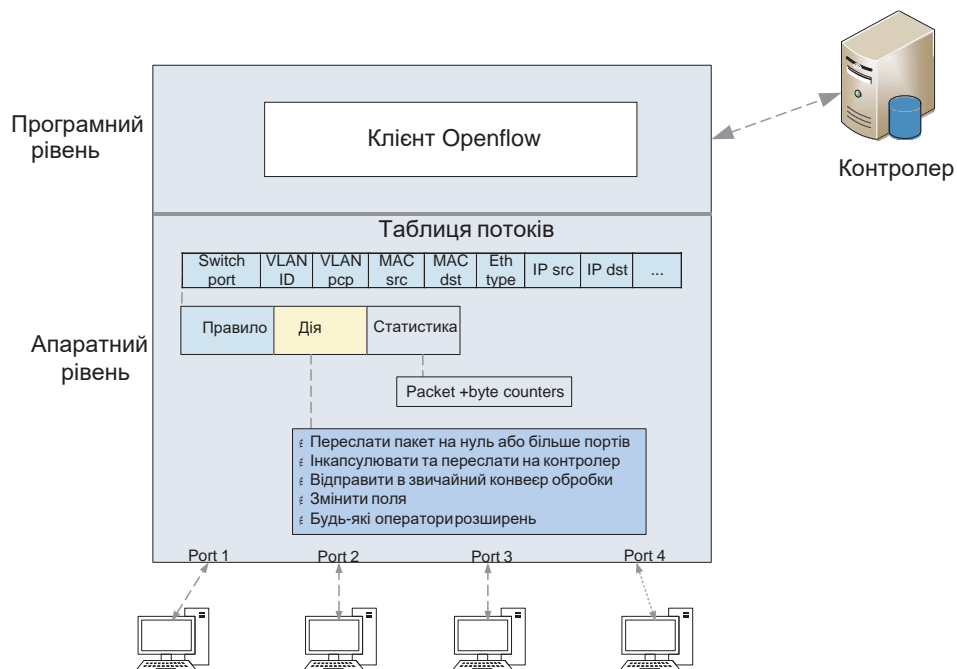


Рис.1.5 Структура таблиці потоків в мережах SDN

У випадку коли знайдено декілька співпадіннь, пакети зіставляються з певним входом потоку, що базуються на пріоритетності, тобто вибирається вхідний потік з найвищим пріоритетом. Після чого комутатор SDN оновлює лічильник цього запису у таблиці потоку. Та відбувається наступна дія, а саме комутатор перенаправляє пакет у порт. Якщо вхідний пакет не співпадає ні з одним із записів потоку таблиці потоків, комутатор перенаправить пакет на SDN контролер, щоб визначити, яка логіка повинна матися на увазі для цього пакета і подібних йому пакетів у майбутньому.

Алгоритм роботи механізму пакетної переадресації показано на рис.1.6 у вигляді алгоритму [25].

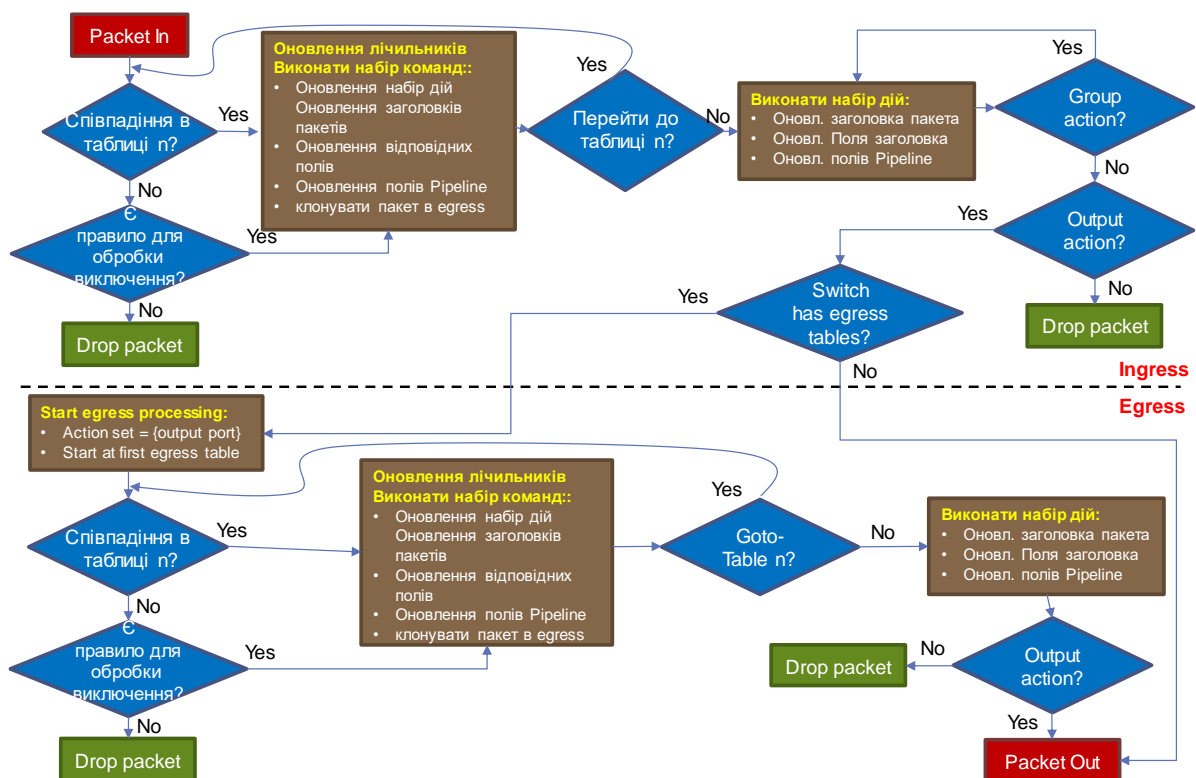


Рис.1.6 Блок-схема алгоритму оброблення пакета в SDN комутаторі

У сучасних мережах зв'язку одночасно передається інформація різних видів (відео та аудіоінформації, а також дані, менш чутливі до затримок) з різними показниками якості обслуговування, на її роботу істотно впливають методи управління трафіком, які легко можна реалізувати в SDN мережах.

1.3 Аналіз завдань, покладених на мережі, що програмно-конфігуруються

SDN це нова мережева архітектура, в якій управління мережею не має прямого відношення до передачі даних і є безпосередньо програмованим. Така міграція контролю, раніше тісно пов'язана з окремими мережевими пристроями дозволяє мережевим додаткам і службам розглядати базову інфраструктуру як єдине абстрактне ціле і розглядати мережу як логічне або віртуальне ціле [26]. Логіка мережі централізована в програмних контролерах SDN, які підтримують загальне уявлення про мережу. За допомогою SDN рішень підприємства і провайдери отримують незалежний від постачальників контроль над всією мережею з однієї логічної точки, що значно спрощує проектування і експлуатацію мережі [27]. SDN також значно спрощує роботу самих мережеских пристроїв, оскільки їм більше не потрібно розуміти і обробляти тисячі протоколів, а просто отримувати інструкції від контролерів SDN.

Можливо, найбільш важливим є те, що оператори і мережеві адміністратори можуть програмувати цю спрощену мережеву абстракцію замість того, щоб вручну налаштовувати десятки тисяч конфігураційних рядків, розкиданих по тисячам пристроїв. Крім того, використовуючи централізовану логіку SDN контролера, IT-адміністратори можуть змінювати поведінку мережі в режимі реального часу і розгортати нові мережеві додатки і послуги протягом годин або днів, а не тижнів або місяців, як це потрібно сьогодні. Завдяки централізації стану мережі на рівні управління SDN надає мережевим адміністраторам гнучкість в налаштуванні, управлінні, захисту і оптимізації мережеских ресурсів за допомогою динамічних, автоматизованих SDN програм [27-32].

Крім того, можна створювати власні програми у вигляді додаткових модулів управління, замість очікування впровадження певної функції в пропріетарні і закриті програмні середовища в традиційних мережах. На додаток до абстрагування мережі, SDN архітектури підтримують набір API-інтерфейсів, які дозволяють здійснювати загальне обслуговування мережі,

включаючи маршрутизацію, безпеку, контроль доступу, управління пропускнуою здатністю, управління трафіком, якість обслуговування, оптимізацію процесора і зберігання даних, ефективне використання енергії, і всі форми управління політиками, виготовлені за індивідуальним замовленням для задоволення бізнес-цілей [33-36]. Наприклад, SDN архітектура дає змогу легко визначати і застосовувати узгоджену політику по провідному і безпроводному зв'язку на території кампуса. Аналогічним чином, SDN дає змогу управляти всією мережею за допомогою розумної оркестровки і систем попередньої підготовки.

Однаково для підприємств і провайдерів, SDN дає змогу мережі бути перевагою, а не тільки неминучим джерелом витрат. SDN технології на основі OpenFlow дозволяють ІТ адміністраторам вирішити проблеми високої пропускнуої здатності, динамічного характеру сучасних додатків, адаптувати мережу до постійно мінливих потреб бізнесу, і значно скоротити складності функціонування та управління. Переваги, які підприємства і провайдери можуть досягти за допомогою SDN архітектури на основі Openflow включають в себе:

1. Централізоване управління в мультивендорному середовищі.

Програмне забезпечення управління SDN може керувати будь-яким мережевим пристроєм з підтримкою OpenFlow від будь-якого постачальника, в тому числі комутаторами, маршрутизаторами і віртуальними комутаторами [37]. Замість того, щоб управляти групами пристроїв від окремих постачальників, ІТ адміністратори можуть використовувати інструменти управління на основі SDN для швидкої експлуатації, налаштування та оновлення пристроїв по всій мережі [38-40].

2. Спрощення за рахунок автоматизації.

SDN на основі OpenFlow пропонує гнучку структуру автоматизації мережі і управління, яка дає змогу розробити інструменти, що автоматизують багато завдань управління, які на сьогоднішній день здійснюються вручну. Ці засоби

автоматизації приведуть до скорочення операційних витрат, зменшення нестабільності мережі з помилки оператора, а також підтримують нові моделі, такі як "ІТ-як-послуга" і модель "самообслуговування" [41-42]. Крім того, за допомогою SDN, хмарними додатками можна управляти за допомогою інтелектуальної оркестровки і системи планування, знижуючи операційні витрати при одночасному підвищенні гнучкості бізнесу [43-45].

3. Велика можливість для інновацій.

Впровадження SDN прискорює бізнес інновації, дозволяючи мережевим операторам мережі буквально програмувати і перепрограмувати мережі в реальному часі для задоволення конкретних потреб бізнесу і вимог користувачів в міру їх виникнення [46]. Віртуалізуючи мережеву інфраструктуру і абстрагуючись її від окремих мережевих сервісів, SDN та OpenFlow дає системним адміністраторам, і можливо, навіть користувачам, можливість налаштовувати поведінку мережі і впровадження нових послуг і можливостей мережі протягом декількох годин [47-48].

4. Підвищення надійності і безпеки мережі.

SDN дає змогу ІТ адміністраторам визначити конфігурацію і політики на програмному рівні, які потім переносяться на інфраструктуру через протокол OpenFlow. SDN архітектура на основі Openflow позбавляє від необхідності індивідуальної настройки мережевих пристроїв кожен раз, коли додається або переміщається будь-який кінцевий користувач, служба або додаток, або змінюється політика, що знижує ймовірність збоїв в мережі через конфігурації або невідповідності політик. Так як SDN контролери забезпечують повну прозорість і контроль над мережею, вони можуть забезпечити застосування стабільного контролю доступу, управління трафіком, якості обслуговування, безпеки та інші заходи з усіх провідних і безпроводних мережевих інфраструктур, в тому числі у віддалених філіях, кампусах і дата центрах [49]. Підприємства і провайдери отримують вигоду від зниження експлуатаційних

витрат, більш динамічних можливостей конфігурації, меншої кількості помилок, і стабільної конфігурації і застосування політик [50].

5. Більш детальне управління мережею.

Модель управління на основі потоків в OpenFlow дає змогу IT адміністраторам застосовувати політики на дуже детальному рівні, в тому числі на рівні сесії користувача, пристрою і додатка, надзвичайно абстрактним, автоматизованим способом [51]. Цей елемент управління дає змогу операторам хмарних мереж підтримувати мультикористування при збереженні ізоляції трафіку, безпеки і гнучкого управління ресурсами, коли клієнти використовують одну і ту ж саму інфраструктуру [52-53].

6. Покращений сервіс для користувачів.

За рахунок централізації управління мережею і передавання інформації про стан системи, інфраструктура SDN може краще адаптуватися до динамічно мінливих потреб користувачів. Наприклад, оператор телекомунікаційних мереж може надавати відеосервіс на вимогу, що в кінцевому для користувача забезпечить максимальну якість сприйняття [54-55]. На сьогоднішній день, користувачі повинні спеціально вибирати тип налаштування мережі для реалізації цієї угоди, яка можливо не в змозі підтримувати певні конфігурації мережі, що внаслідок призводить до затримок і втрат, які погіршують сприйняття сервісу призначеного для користувача [56-58]. З SDN на основі OpenFlow, мережа дасть змогу визначити необхідну пропускну здатність для відеопотоку в режимі реального часу і відповідно автоматично регулювати якість перегляду відео [59].

1.4 Недоліки існуючих моделей управління якістю обслуговування в сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах

Сучасне суспільство живе в епоху стрімкого розвитку обчислювальної техніки. За прогнозами аналітиків, телекомунікаційна галузь в недалекому майбутньому поступово перейде до концепції об'єднання всіх пристроїв

планети в єдину обчислювальну мережу зв'язку, основне завдання якої - якісне надання сервісів будь-якого роду. Різні сервіси – це різні типи трафіку (реального/нереальну часу), якість передачі яких на даний момент регламентується в рекомендаціях сектора телекомунікацій International Telecommunication Union - Telecommunication sector (ITU-T) [59]. У зв'язку з цим постає питання про необхідність наявності єдиного механізму управління трафіком в об'єднаних мережах зв'язку, що надають різні типи сервісів.

Існуючі моделі управління трафіком базуються на стандартизованих механізмах управління якістю обслуговування. Якість обслуговування (QoS) мереж характеризується таким параметрами, як пропускна здатність, затримка передавання даних, втрата пакетів, джитер і т.д. [60]. На рівні користувача використовується поняття «Якість сприйняття» (QoE) сервісу і до його основних показників відносять час відгуку та втрати даних. Оскільки технічні показники якості обслуговування мережі не враховують суб'єктивної оцінки якості сприйняття клієнтами і не гарантують їх належного рівня, то це вважається основним недоліком існуючих моделей управління QoS у традиційних сервісно-орієнтованих мережах.

Для управління мережевими ресурсами і забезпечення належної якості обслуговування застосовуються різноманітні технологічні рішення. Існують дві фундаментальні архітектури якості обслуговування QoS: Integrated Services (Intserv) і Differentiated services (Diffserv). Ці моделі містять різні типи механізмів, які забезпечують певні рішення для мережевого трафіку [61-65]. Метою Diffserv є пріоритезація трафіку за класами та оброблення різних класів трафіку в мережних пристроях по-різному. У моделі DiffServ для визначення та управління мережним трафіком використовується класифікація послуг, «клас» може бути позначений безпосередньо в заголовках пакетів, на відміну від моделі IntServ, де потрібно використовувати спеціальний сигналізаційний протокол резервування RSVP, щоб повідомити маршрутизаторів, які потоки пакетів вимагають гарантованого обслуговування.

Стимулом створення моделі архітектури IntServ для телекомунікаційних мереж стала потреба в сервісах реального часу, таких як потокове відео, відеоконференцзв'язок, IPTV і віртуальна реальність. Модель IntServ використовує механізми резервування ресурсів і контролю доступу в якості ключових блоків для створення і підтримки QoS в режимах одноадресної і багатоадресної передачі інформації. Запити на резервування пропускну здатності, відбуваються для окремих важливих сервісів, що вимагають певного рівня обслуговування. Відповідно до цієї моделі, кожен маршрутизатор в мережі повинен впроваджувати IntServ, і кожен сервіс, що вимагає гарантії обслуговування, має зробити замовлення на виділення необхідного мережного ресурсу. Коли пропускна здатність зарезервована для певного сервісу, її не можна перепризначити для інших сервісів. Маршрутизатори між відправником і отримувачем визначають, чи можуть вони підтримувати резервування, зроблене запитом на надання конкретного сервісу. Якщо вони не можуть його підтримувати, маршрутизатори повинні повідомляти одержувача. Такий підхід вимагає зберігання в маршрутизаторах інформації про активні потоки. Більш того, кожен раз при зміні топології всі зарезервовані шляхи необхідно прокладати заново, а це значно збільшує сигнальне навантаження на маршрутизатори [66]. Intserv заснований на попередньому резервуванні мережеских ресурсів і забезпечують наскрізну (на всьому шляху проходження трафіку) якість обслуговування, гарантуючи необхідну пропускну здатність.

Архітектурна модель Differentiated Services (DiffServ) [67] забезпечує найкращий можливий рівень обслуговування QoS в існуючому середовищі шляхом диференціації трафіку. Наприклад, DiffServ зменшить затримку в трафіку, що містить голосове або потокове відео, забезпечуючи при цьому найкращий сервіс для трафіку, що містить передачу файлів. Для диференціації використовуються такі параметри, як пріоритет користувача (відносні пріоритети одних протоколів по відношенню до інших), вимоги до сервісів (наприклад, пропускна здатність, величина затримки і рівень втрати пакетів) .

Пакети маркуються пристроями DiffServ на кордонах мережі інформацією про необхідний рівень обслуговування. Інші вузли мережі зчитують цю інформацію і відповідно проводять пріоритетне обслуговування для забезпечення необхідного рівня QoS. DiffServ модель базується на розбитті трафіку по класах, для кожного з яких визначаються свої вимоги по QoS. Дана модель сама по собі не передбачає забезпечення гарантій, що надаються. При такому підході відправник і одержувач обмінюються вимогами до якості обслуговування (на відміну від RSVP), що збільшує швидкість реакції і скорочує надлишковий сигнальний трафік.

Якість обслуговування базується на вимірюванні різних мережевих показників, таких як втрата пакетів, затримка, джитер, пропускна здатність, щоб зрозуміти поточну ситуацію і порівняти її з цільовою вимогою. Традиційні рішення QoS реалізуються статично, вимагають ручного налаштування і засновані на необхідності формування трафіку і резервування пропускної здатності для потенційного використання. Це створює ряд недоліків, з яких найбільш очевидними є те, що:

- зарезервована пропускна здатність втрачається, коли вона не використовується;
- зарезервована пропускна здатність має фіксований розмір і в разі її недостатності в каналах зв'язку, призводить до погіршення якості послуг;
- традиційні моделі QoS вимагають, щоб все обладнання було налаштоване ідентично з використанням однієї і тієї ж схеми QoS і, проте інтернет-провайдер (ISP) використовує власну конфігурацію QoS для розподілу пріоритету в ядрі ISP;
- отримання QoS від інтернет-провайдера зазвичай є дорогим сервісом, і гарантує QoS тільки в ядрі ISP. Якщо користувач знаходиться за межами ядра ISP, вимоги QoS не зберігаються, хоча і оплачуються.

– кожен провайдер послуг має різні реалізації своїх функцій і можливостей QoS і іноді може мати різні уявлення про поняття, таких показників як QoE, що вносить корективи у існуючі методи забезпечення QoS.

Особлива увага щодо забезпечення заданого рівня якості обслуговування у межах мережного управління приділяється засобам маршрутизації та розподілу потоків в умовах високого навантаження [68]. На сьогоднішній день створено велику кількість динамічних протоколів маршрутизації трафіку в мережах зв'язку. Наприклад динамічні протоколи маршрутизації RIP, EIGRP і OSPF, встановлені майже на всіх сучасних мережевих маршрутизаторах [69]. Всі вони забезпечують оптимальну маршрутизацію трафіку, покладаючись на конкретний набір базових робочих характеристик, що описують канали між вузлами зв'язку. Але жоден з них не володіє гнучким механізмом управління маршрутами, спираючись на поточні потреби всієї системи зв'язку в цілому та вимог QoS різнорідного трафіку. Наприклад, протоколи EIGRP і OSPF, в свою чергу, прийнято вважати універсальними при вирішенні задач передачі трафіку будь-якого виду, однак при створенні таблиць маршрутизації вони використовують простий за сьогоднішніми мірками набір первинних статичних робочих характеристик (статичні значення, прийняті для каналів різного типу, тобто не обчислюються динамічно), що описують канали зв'язку. Тим не менш, це спеціалізовані протоколи, що створювалися для роботи на спеціалізованих мережевих пристроях [70].

Метрики є способом для вимірювання або порівняння. Протоколи маршрутизації використовують метрику, щоб визначити, який маршрут є найкращим шляхом. Метрика є значення, пов'язане з певними маршрутами, оцінюючи їх від найкращого до найменш пріоритетного [71].

Параметри, які використовуються для визначення метрики відрізняються для різних протоколів маршрутизації. Шлях з найменшою метрикою вибирається в якості оптимального шляху і встановлюється в таблиці маршрутизації.

Бувають випадки, коли протокол маршрутизації дізнається більше одного маршруту до одного пункту призначення. Для того, щоб вибрати найкращий шлях, протокол маршрутизації повинен мати можливість оцінювати і диференціювати серед доступних шляхів. Для цієї мети використовується метрика.

Кожен протокол маршрутизації обчислює його метрику різним способом. Два різні протоколи маршрутизації можуть вибрати різні шляхи до одного місця призначення через використання різних метрик [72].

Метрики, що використовуються в протоколах маршрутизації IP включають в себе наступні параметри:

- Кількість переходів: проста метрика, яка підраховує кількість маршрутизаторів, які пакет повинен пройти.
- Пропускна здатність: впливає на вибір шляху, вважаючи за краще шлях з найвищою пропускнуою спроможністю.
- Навантаження: враховує коефіцієнт використання каналів зв'язку.
- Затримка: враховує час, який потрібен пакету, щоб пройти шлях.
- Надійність: оцінює ймовірність відмови каналу, розраховану за кількістю помилок інтерфейсу або попередніх відмов каналів.
- Вартість: значення визначається IOS або мережевим адміністратором, щоб вказати перевагу маршруту. Вартість може являти собою метрику, поєднання метрик або політики.

Метрики для кожного протоколу маршрутизації

- RIP (кількості переходів): кращим шляхом вибирається маршрут з найменшим числом переходів.
- IGRP і EIGRP (пропускна здатність, затримка, надійність і навантаження): кращий шлях - це маршрут з найменшим значенням композиційного показника розрахованого з цих кількох параметрів. За замовчуванням використовуються тільки пропускна здатність і затримка.

– OSPF (вартість) : кращий шлях вибирається маршрут з найменшими витратами. Реалізація OSPF в Cisco використовує пропускну здатність для вибору шляху.

Протоколи маршрутизації використовують метрики, щоб визначити, який маршрут є найкращим шляхом, як уже пояснено вище. Але коли два або більше маршрутів до одного місця призначення мають однакові значення метрики, маршрутизатор не вибирає тільки один маршрут.

Замість цього маршрутизатор розподіляє навантаження (балансує навантаження) між цими шляхами однакової вартості метрики маршруту. Пакети передаються з використанням всіх шляхів, які дорівнюють вартості. Механізм працює для всіх стандартних протоколів маршрутизації за винятком BGP, в якому по-замовчуванню використовується тільки один маршрут.

Таким чином, поруч з перевагами сучасних протоколів динамічної маршрутизації, що використовуються в телекомунікаційних мережах, потрібно врахувати, що всі вони базуються на пошуку одного найкращого шляху передавання даних з мінімальною метрикою. Відповідно відомі протоколи маршрутизації, що використовуються в мережевих пристроях є одношляховими, або проводять балансування навантаження між декількома маршрутами у мережі у яких однакова метрика, що у свою чергу призводить до максимального використання знайденого найкращого або альтернативного маршруту та його перевантаження, в той час як інші мережеві вузли чи каналні ресурси не будуть задіяні в процесі передавання трафіку. Використання такого підходу не дає змоги досягти стану повноцінної рівноваги між каналами, та забезпечення балансованого розподілу навантаження між усіма альтернативними маршрутами. Компанія Cisco в протоколі EIGRP передбачила механізм реалізації багатошляхової маршрутизації завдяки балансуванню навантаження між маршрутами з різною вартістю (unequal cost load balancing), однак він дуже рідко використовується на практиці, оскільки ускладнює процес конфігурування та вимагає спеціальних навичок

адміністраторів. Крім цього в процесі визначення метрики в EIGRP за замовчуванням не враховуються такі динамічні параметри каналу як надійність і завантаженість, тому що їх врахування призводить до постійних змін метрик і як наслідок перебудов шляхів пересилання [73].

Таким чином, виправити ситуацію через впровадження змін до конкретного протоколу є недоцільним, тому що дана проблематика стосується усіх протоколів динамічної маршрутизації, відповідно ефективнішим рішенням буде саме удосконалення процесу маршрутизації без внесення змін в конкретний протокол маршрутизації. Такий відхід впливу дасть змогу універсально для всіх протоколів динамічної маршрутизації зменшити затримку передавання трафіку, ефективно збалансувати навантаження на мережу та забезпечити необхідну якість обслуговування.

1.5 Аналіз теоретичних досліджень щодо управління трафіком та розподілу ресурсів в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах

Програмне конфігурування телекомунікаційної мережі можна назвати технологією майбутнього. Сучасна тенденція розвитку систем зв'язку постійно підтверджує цей факт. Однак на сьогоднішній день застосування цієї технології в її теперішньому вигляді виправдано лише у великих мережах технологічних гігантів і операторів зв'язку. Але, запозичивши основні принципи роботи програмно конфігурованих мереж (централізоване управління, віртуалізація мережевих функцій і т.д.) і спроектувавши їх на обмежену кількість самостійних пристроїв, з єдиною політикою маршрутизації трафіку, можна домогтися гнучкості в наданні сервісів різного роду [74].

Більшість наукових робіт зосереджуються на проблемі управління мережею, моніторингу та контролю для поліпшення параметрів QoS, лише деякі пропонують рішення для вимірювання продуктивності мережі, наприклад, затримки, пропускну здатності та втрати пакетів. Автори [75-77]

впроваджують OpenNetMon для контролю затримки, пропускної здатності та втрати пакетів у мережах OpenFlow. OpenNetMon - це POX OpenFlow модуль контролера, який відстежує показник QoS за потоком. Пропонована у роботі програма OpenNetMon дає змогу визначати в режимі реального часу функціонування, чи задовольняють кінцеві параметри QoS для певних потоків. Для цього програма надсилає дані щодо пропускної здатності, затримки та втрати пакетів контролерам для проведення трафіку інжинірингу (TE). Пропускна здатність і втрати пакетів отримуються від комутаторів джерела потоку та призначення комутаторів. OpenNetMon регулярно надсилає опитувальні повідомлення комутаторам для отримання статистики потоку. Після чого отримується інформація про кількість відправлених байтів і тривалість кожного з'єднання, з якого можна виміряти пропускну здатність. Опитування проводиться для кожного шляху між кожною парою вузлів, що підлягають моніторингу. Крім того, опитування змінюється адаптивно на основі нових надходжень та змін потоків. Втрати пакетних потоків обчислюються шляхом віднімання кількості переданих пакетів з інтерфейсу комутатора призначеного для джерела відправника від кількості пакетів отриманих на інтерфейсі комутатора підключеного до вузла призначення. Вимірювання отримується шляхом введення пробних пакетів контролером у площину даних комутатора вздовж шляху пересилання пакетів. Після чого контролер вимірює затримку, обчисливши різницю між часом відправлення та прибуття пакетів, віднімаючи з розрахунковим значенням RTT (Round-Trip Time) між комутатором та контролером (час туди і назад), використовуючи наступну формулу:

$$T_{delay} = t_{arrival} - t_{sent} - \frac{1}{2}(RTT_{s1} + RTT_{s2}) \quad (1.1)$$

Основним недоліком є те, що автори не припускають, як контролер може знайти нові шляхи на основі даних у реальному часі, а також не проведено оцінювання затримки в каналі при обслуговуванні різнопріоритетного трафіку в

умовах високого навантаження, що не дає змоги стверджувати про точність вимірювання затримки.

Іншим способом вимірювання параметрів мережі є використання аналітичних моделей. У роботі [78] представлено модель для оцінки швидкості пересилання та ймовірності блокування мережі OpenFlow. Модель заснована на теорії черги, а потім тестується на комутаторі OpenFlow.

OpenFlow можна розглядати як модель системи, що орієнтується на зворотний зв'язок, діленням на дві системи. Перша - система черги переадресації типу M/G1/1 з марковським сервером M/M/1. У той час як друга - система черги зворотного зв'язку типу втрати затримки M/G1/1-S з сервером M/M/1-S. Потім контролер моделюється як система черги M/M/1-S зворотного зв'язку. На рис. 1.7 показано аналітичну модель систем SDN.

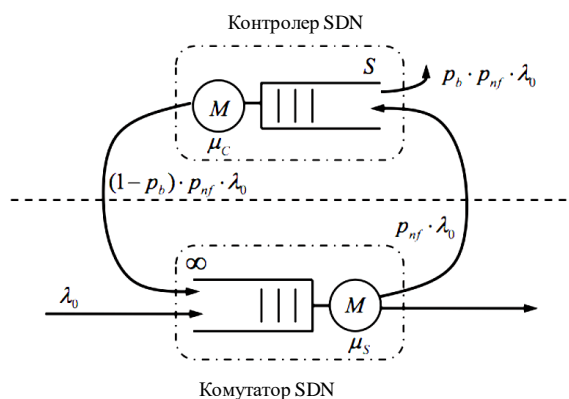


Рис.1.7 Схема аналітичної моделі SDN

У даній роботі під параметрами QoS розуміється загальний час перебування пакета в системі та ймовірність відмови пакету. Результати показують, що час перебування пакету залежить від швидкості оброблення контролера. Таким чином, можна зробити висновок, що продуктивність контролера обмежує встановлення нових потоків у мережі. Основна перевага використання аналітичної моделі полягає в тому, що вона може забезпечити прогнозовані результати QoS за менший час, ніж використання імітаційного моделювання. Однак це не підтверджує факту, що вимірювання можуть бути

використані для поліпшення якості QoS, оскільки при такій аналітичній оцінці затримки, присутня досить велика похибка вимірювання у порівняння із затримкою вимірювання проведеного на реальному обладнанні SDN. Оскільки один із найважливіших показників в оцінці мережі - це затримка в мережі. У роботі [79] пропонується спосіб вимірювання затримки в каналі зв'язку з контролером OpenFlow. Ідея полягає в тому, щоб надіслати спеціальний пакет по шляху від контролера і назад та виміряти кількість часу, необхідного для передавання тестового пакету. На рис.1.8 зображена функціональна архітектура моніторингу затримок. Для цього контролер надсилає запит на комутатор s1 для пересилання через певний порт. Другий комутатор s2 повертає пакет назад до контролера. Тоді, з отриманого часу та відліку часу, можна визначити, скільки часу пакету потрібно було, щоб передати даний пакет. Нарешті, слід відняти час, витрачений у каналах між контролером і комутатором та затрачений між комутаторами.

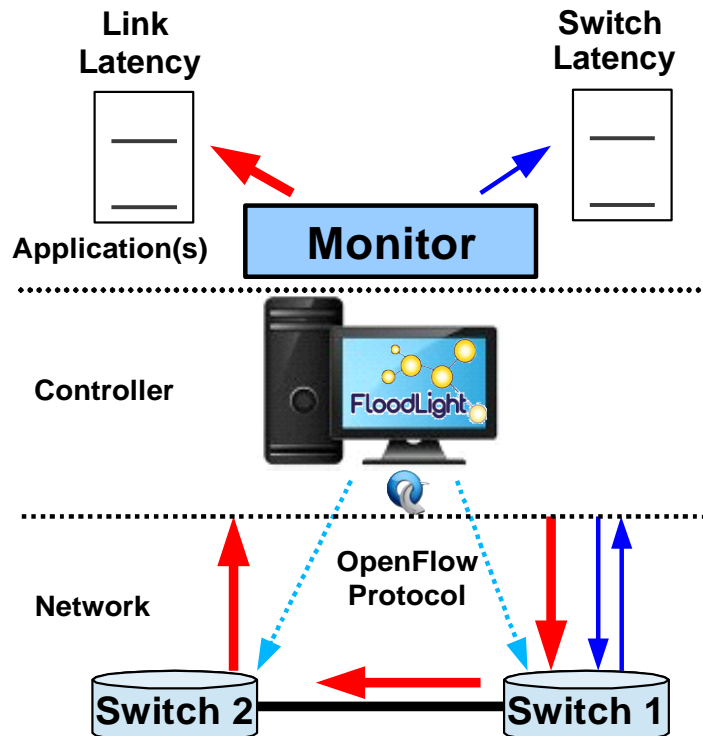


Рис.1.8 Функціональна архітектура програми моніторингу затримки [79]

Це рішення реалізовано на тестовій схемі SDN та порівняно із затримкою команди Ping, в результаті чого автори *K. Phemius* та *M. Bouet*, підтвердили адекватність та ефективність запропонованого рішення. На жаль оцінка затримки при передаванні потоків різного пріоритету в каналах зв'язку не проводилось.

Досить цікавою є робота авторів [80], які запропонували систему моніторингу для збору даних про затримку, джитер, рівні втрат і використанні пропускних здатностей каналів. Перевагою даного рішення є те, що для реалізації системи моніторингу не потребується використання програмного агента sFlow всередині комутатора, незважаючи на використання тільки функцій, доступних в протоколі OpenFlow версії 1.3. Такий підхід сприяє використанню більш дешевого комутатора без необхідності налаштування. На основі проведеного моніторингу QoS параметрів автори запропонували маршрутизацію для потоків з різними вимогами QoS, метрика, якого базується на одному із цих критеріїв. В майбутньому автори стверджують, що хочуть удосконалити модель маршрутизації, з метою інтеграції вимірних параметрів QoS, в тому що QoS маршрутизація в даний час розраховує тільки найкращий маршрут для одного параметра за один раз. Деякі додатки вимагають комбінації параметрів, таких як відео, яке вимагає низької затримки і високої пропускної здатності. Додатки, що вимагають низького джитера, часто також вимагають низької затримки. Йдеться про побудову адекватної функції вартості шляху об'єднання з окремих метрик QoS. Також автори стверджують, що перспективним підходом може бути використання більш ніж одного маршруту, коли він доступний, або визначення додаткового критерію для прийняття рішення між рівними за вартістю маршрутами, щоб реалізувати балансування навантаження.

У роботі [81] запропоновано потокову модель адаптивної маршрутизації для програмно-конфігурованих систем з балансуванням навантаження. Новизна моделі полягає в тому, що балансування навантажень здійснюється одночасно

за двома критеріями. У якості першого критерію, який вводиться в цільову функцію, використовується коефіцієнт максимального завантаження каналів мережі. У якості другого критерію, використано критерій затримки для адаптації процесу збалансування навантаження, виконання якого пов'язано для кожного трафіку в окремоті. Встановлено, що використання запропонованих моделей дає змогу покращити значення середньої затримки передавання даних від 10–19 до 35–48%. Автори стверджують, що дана модель маршрутизації є найбільш придатною для програмно-конфігурованих мережах, оскільки в таких мережах логіка управління маршрутизації може імплементуватись на SDN контролері програмним шляхом написання скрипта та нажаль практичних експериментів реалізації запропонованої моделі маршрутизації у роботі авторами не проведено.

У роботі [82] автори пропонують динамічну маршрутизацію QoS для забезпечення необхідної якості надання відеопотоків, тоді як інші потоки залишаються на своєму найкоротшому шляху. Результати показують, що рішення може гарантувати безперебійну доставку відео з невеликими або відсутніми втратами відео, які відчувають кінцеві користувачі. Більше того, автори стверджують, що послуга не має негативного впливу на інші види трафіку. Крім того, також розроблена архітектура QoS на основі OpenFlow, пропонуючи оптимізовану модель маршрутизації. Задача оптимізації ставиться як проблема обмеженого найкоротшого шляху (CSP) і потім вирішується відомими методами її розв'язання. Результати показують, що спостерігається значне поліпшення якості потокового відео.

Ще одна проблема оптимізації маршрутизації потоку QoS пропонується у роботі [83], де описана архітектура для підтримки потоків QoS у середовищі OpenFlow з централізованим контролером. Постановка проблеми забезпечення QoS маршрутизації, полягає у формуванні таблиці потоків маршрутів в SDN контролері для різнопріоритетного трафіку. Крім того, автори [84] налаштовують тестове середовище SDN контролера, щоб отримати необхідний

рівень QoS відеопотоків, шляхом налаштування комутаторів для передавання потоків QoS, зокрема проведенням моніторингу стану функціонування мережі та переключення на альтернативний маршрут в умовах перевантаженості або збою одного із каналів зв'язку встановленого маршруту. Тема QoE розглядається у багатьох наукових працях, проте у роботі [84], автори пропонують OpenFlow-assisted QoE Fairness Framework (QFF) для поліпшення QoE декількох клієнтів в умовах обмеженості каналних ресурсів. Використовуючи рішення SDN та функціонал протоколу OpenFlow, у роботі пропонується спосіб оптимізації QoE для всіх пристроїв потокової передачі відео в мережі, враховуючи також вимоги до типу кінцевого пристрою (смартфон, планшет, ноутбук) та мережі доступу. Основна характеристика QFF полягає в динамічній адаптації відеопотоку з метою гарантування справедливості QoE у мережі. QFF був реалізований та оцінений за допомогою MPEG-DASH та OpenFlow. Використовуючи OpenFlow, QFF відстежує стан усіх відео DASH додатків в мережі. Тоді QFF може відповідно приймати деякі рішення щодо розподілу мережевих ресурсів. Архітектура складається з модуля OpenFlow Module (OM), який працює на контролері OpenFlow мережі та відповідає за управління основними функціями QFF.

Мережевий інспектор та Media Presentation Description MPD Parser, MPD надають статус про стан мережі та кількість клієнтів до основного OM. Інспектор мережі відстежує пакети в мережі та інформує OM про кількість пристроїв у мережі, швидкість потокової передачі даних, яку кожен пристрій вимагає в даний час, та доступну пропускну здатність мережі. MPD-аналізатор перевіряє файли MPD, що запитуються користувачами, та інформує OM про особливості відеозапитів клієнтів, такі як тривалість та доступна швидкість передачі даних у біт-коді запитуваного відеофайлу, а також кількість та розмір його фрагментів. І інспектор мережі, і MPD використовують протокол OpenFlow для збору цієї інформації. Також є модуль функції оптимізації, який динамічно оптимізує справедливість забезпечення рівня QoE, взаємодіючи з

OM. QFF оцінюється за сценарієм домашніх мереж. Результати показують, що QFF забезпечує стабільність мережі та оптимізує її потокове відео QoE серед різних пристроїв у мережі. Основним недоліком такого підходу, як заявили автори, є те, що функція Utility залежить від характеристики джерела тестового відео. Функція Utility повинна бути більш гнучкою та адаптивною до різного відеовмісту, наприклад, для додавання можливості вимірювати деякі показники, пов'язані з поліпшенням QoE.

Автори F. Meng, R. Chai and C. Zhang, [85] розглянули рішення задачі узгодженого вибору шляху передавання та розподілення потоків в SDN мережах. З метою урахування чутливості потоків автори сформувавши оптимізаційну задачу за критерієм мінімімальної затримки з кінця в кінець за умови виконання обмежень щодо передачі потоку даних та вимог щодо QoS. Автори стверджують, що обираючи ітераційно шляхи для передавання потоків за критерієм мінімальної вартості в оновленій допоміжній мережі, можна отримати оптимальні рішення щодо маршрутизації та балансування потоків в SDN мережі.

Таким чином, ряд робіт інших українських вчених [86-99] відзначають, що математичні моделі, алгоритми та методи маршрутизації інформаційних потоків повинні бути максимально адаптовані під вимоги мережних концепцій шляхом реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації, забезпечення балансування навантаження між мережевими пристроями як з однаковою, так і різною метрикою, підтримку якості обслуговування в межах допустимих значень.

На жаль більшість вчених стверджують, що часто буває дорого і не просто налаштувати та протестувати розроблені нові математичні методи та моделі управління трафіком в реальному середовищі SDN, що складається з набору мережних пристроїв та контролера для перевірки ефективності запропонованих рішень щодо покращення QoS.

1.6 Постановка науково-практичного завдання дисертаційного дослідження

На основі проведеного аналізу робіт дотичних по тематиці дисертаційного дослідження встановлено, що більшість із наукових праць орієнтовані лише на забезпечення вимог щодо якості обслуговування конкретній групі інформаційних потоків. Також є роботи, які зосереджені на дослідженні процесу передавання потоків реального часу з метою гарантованого їх обслуговування, в інших наукових працях розглядаються методи підтримки якості обслуговування для потоків нереального часу в мержі. Загалом ці роботи доповнюють одна одну та розв'язують спільне науково-практичне завдання забезпечення вимог щодо якості обслуговування інформаційних потоків. Проте рішення, запропоновані в них, залишаються окремими підходами і не можуть гарантувати якісного обслуговування всіх потоків у SDN мережі. Крім того, практично жодна із наукових праць не розглядає потоки з точки зору клієнта. Класифікація потоків для забезпечення якості обслуговування залишається, в кращому випадку, на рівні відомих стандартизованих класів трафіку [100].

Таким чином, на теперішній час доведено, що використання технології SDN забезпечує високу гнучкість в процесі управління інфраструктурою. Зокрема, деякі провайдери частково впроваджують цю технологію, але при цьому алгоритми управління трафіком і методи передавання даних залишаються практично незмінними. У зв'язку з цим питання якості управління та обслуговування трафіку відповідно до замовлених вимог користувачів і ефективності використання мережевих ресурсів не втрачає актуальності і сьогодні.

На основі проведеного вище аналізу, виділено ряд недоліків існуючих моделей управління трафіком у програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах, зокрема:

- не враховують вимоги окремого клієнта, а диференціюють потоки лише за класами трафіку;

- не можуть автоматизовано справитися з перевантаженням елементів мережі, вузлів чи каналів у випадку погіршення QoS окремих потоків;
- на практиці проводять маршрутизацію потоків, не диференціюючи їх за критеріями якості обслуговування, а базуються на метриці OSPF чи EIRGP, відомі удосконаленні рішення щодо маршрутизації більшості випадків є теоретично чи аналітично обґрунтовані без підтвердженням їх ефективності використання на реальному мережевому обладнанні SDN;
- відсутність узгодженої, єдиної моделі системи моніторингу параметрів функціонування стану телекомунікаційної мережі, як серверної так і мережної частини;
- відсутність точних методів моніторингу параметрів якості обслуговування між вхідним та вихідним вузлом довільного потоку.

Таким чином, неухильне зростання різноманітності та обсягів інформаційних потоків в телекомунікаційних мережах, спонукають до розв'язання науково-практичного завдання забезпечення замовленої якості обслуговування в умовах обмеженості мережевих ресурсів шляхом розроблення нової моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування, яка базується на удосконалених методах та алгоритмах адаптивного встановлення пріоритетів послуг, вибору сервера обслуговування та маршруту передавання даних.

Висновки до 1-го розділу

Розглянуто основні принципи побудови, архітектури та процеси функціонування традиційних та програмно-конфігурованих мереж. В архітектурі SDN логіка управління та рівень передавання даних є розділеною між двома окремими фізичними пристроями. Завдяки північному та південному інтерфейсу SDN, контролер утворює мережеву операційну систему, на яку є можливість встановлювати різноманітні додатки для інтелектуального

управління мережею та забезпечення якісних параметрів мережі, зокрема таких як: якість обслуговування потоків; адаптивність; надійність; стійкість; доступність та ефективність. Визначено, що рівень забезпечення зазначених характеристик залежить від реалізації програмних додатків, встановлених на контролер, а також архітектури самого контролера.

Аналіз розроблених методів та моделей управління програмно-конфігурованими мережами показав, що проблема забезпечення якості обслуговування займає важливе місце в наукових працях закордонних та вітчизняних дослідників.

Встановлено, що постійно зростаючий попит на використання мультимедійних додатків в мережах телекомунікацій привів до посилення вимог щодо забезпечення якості обслуговування цих додатків. Серед таких вимог можна виділити наступні: висока пропускна здатність каналів зв'язку, мінімальний час відповіді кінцевих вузлів, мінімальне значення варіації часу відповіді кінцевих вузлів мережі, мінімальна кількість втрачених пакетів, а також підвищений рівень надійності. В результаті досліджень з'явилися архітектури, засновані на QoS, такі як архітектура інтегрованих послуг, архітектура диференційованих послуг, а також багатопрокольна комутація міток. При досягненні заданого рівня відмовостійкості функціонування елементів мережі телекомунікацій однією з головних проблем забезпечення гарантованої якості послуг, що надаються є визначення маршрутів, які задовольняли б QoS-вимогам. Однак обраний критерій оптимальності у вигляді знаходження найкоротшого шляху не завжди є оптимальним. На практиці набагато важливіше не стільки довжина телекомунікаційного шляху, скільки вибір такого з них, при якому забезпечувалися б задані вимоги до QoS при мінімальній вартості передачі одиниці потоку інформації.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОТОКІВ ДАНИХ У ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ СЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНИХ МЕРЕЖАХ

2.1 Концептуальна модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування

Основна ідея та новизна дисертаційної роботи полягає у тому, що вперше пропонується побудувати концептуальну модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі для адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування (рис. 2.1). На відміну від існуючих сервісно-орієнтованих архітектурних рішень, у яких політика управління ресурсами на рівні мережевих пристроїв та на рівні обчислювальних серверах відбувається не узгоджено, пропонується у роботі модель дає змогу централізувати цих два рівні шляхом введення SDN контролера для узгодженого адаптивного управління ресурсами та якістю надання послуг.

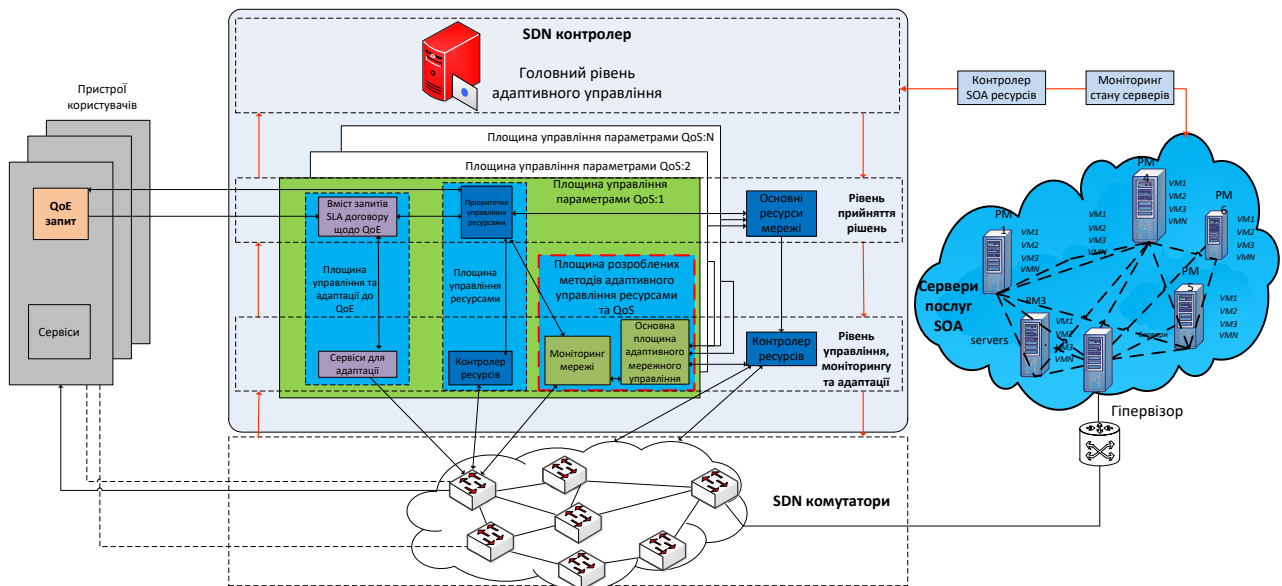


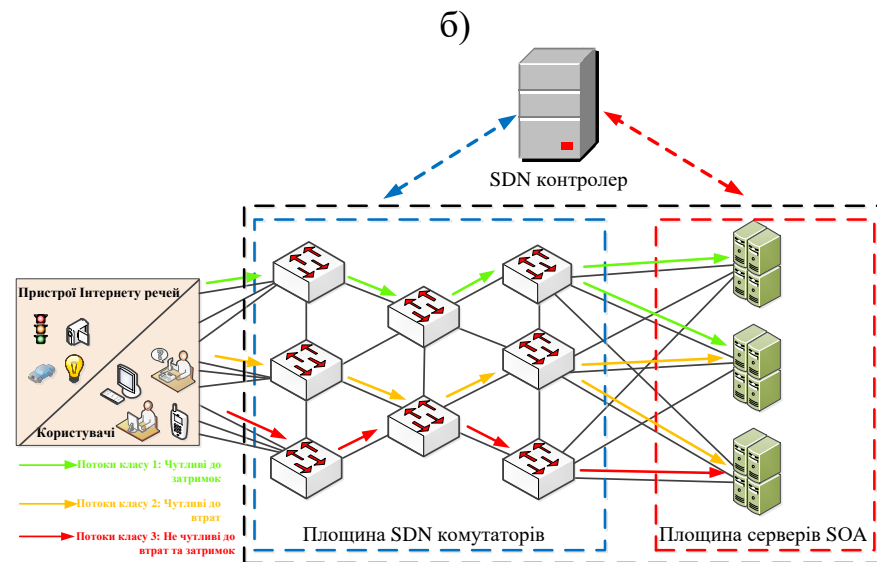
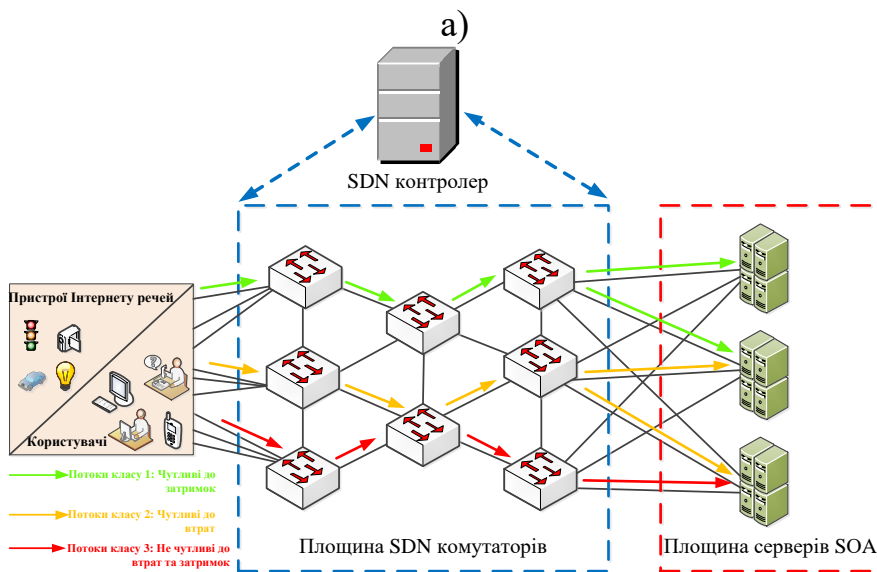
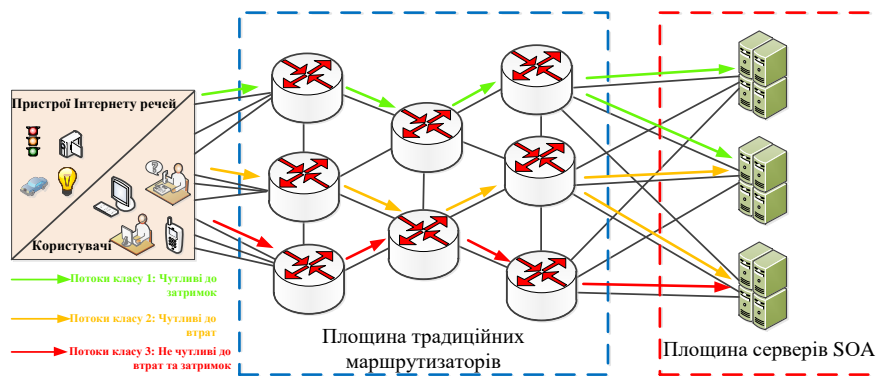
Рис.2.1 Модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування [101, 102]

Таким чином побудова інтегрованої SDN/SOA мережі дасть змогу кінцевим користувачам зробити запит на гарантування якості обслуговування з кінця в кінець на будь-який сервіс в конкретний момент часу. Даний підхід організовується шляхом встановлення QoE оцінок користувачами мережі, яка виставляється за шкалою від 1 до 5 в договорі SLA. Чим вища оцінка тим краща якість сервісу гарантується, тим і дорожче коштуватиме надання даного сервісу. Практична реалізація цього підходу може бути виконана шляхом встановлення програмного забезпечення на кінцевий пристрій абонента (так званий кабінет користувача), де він може зробити запит на наданий сервіс необхідної якості і проводити додаткову оплату. З допомогою даного програмного продукту мережа адаптується під потреби користувача проводячи аналіз запитів на необхідну якість певного типу сервісу в конкретний момент часу від користувачів [102]. Аналіз запитів проводитиме контролер SDN/SOA мережі. За рахунок централізації стану мережі на рівні управління, система гарантує необхідний рівень сервісу аналізуючи QoE оцінки користувачів, шляхом динамічного виставлення пріоритетів послуг згідно замовлених QoE оцінок, розподілу каналних ресурсів у мережевих вузлах, балансування навантаження на серверах та розроблення нових протоколів маршрутизації, які базуються на виборі оптимального вузла обслуговування, аналізу і оцінок характеристик мережі в режимі реального часу [103].

Запропонована SDN/SOA мережа повинна забезпечити необхідну якість обслуговування для різних сервісів. Основним методом гарантування якості обслуговування є використання каналів зв'язку з високою пропускнуою здатністю. Проте, це водночас є і найдорожчим методом. Суть інших методів полягає у пріоритетному наданні ресурсів мережі трафіку для чутливих до затримки даних за рахунок протоколів RTP, RTCP та UDP, яким потрібна висока якість обслуговування. Різні типи сервісів вимагають різної пріоритезації [104]. Тобто з наданням клієнт орієнтованих сервісів однією з основних задач є адаптування якості сервісу (QoS) згідно з вимогами

конкретного виду сервісу [105]. Таким чином, механізми пріоритезації трафіку в мережах SDN/SDN для клієнт орієнтованого обслуговування є одним з найважливіших аспектів, від якого в подальшому буде залежати розвиток телекомунікаційних мереж наступного покоління у світі. При реалізації послуг з використанням QoE вимог необхідно враховувати не тільки пріоритет, увагу слід акцентувати і на затримці, швидкості передачі запиту на виконання, а також гарантії виконання цілісності передавання даних. Що стосується останнього, то при реалізації обміну даних між користувачами важливим є погодження параметрів якості обслуговування, яке повинно здійснюватися на двох кінцях передачі (мережної та серверної) частини з метою оптимального і своєчасного виконання запитів до відповідної вимоги QoE [106].

На рис. 2.2 а) та рис. 2.2. б) показано традиційну децентралізовану телекомунікаційну мережу та традиційну програмно-конфігуровану телекомунікаційну мережу у якій мережна та серверна площина функціонують як два окремих домени із своїми внутрішніми механізмами QoS. У традиційних мережах кожен пристрій самостійно приймає рішення про те, як маршрутизувати або пересилати отримані пакети до місця призначення. Будь-яка зміна мережевої політики вимагатиме значного часу для конфігурації мережі. На відміну від цього, програмно-конфігурована мережа (SDN) роз'єднує функції управління та площину даних [107]. Поділ логіки управління (у централізованому контролері) та шляху пересилання даних (серед розподілених комутаторів) дозволяє сьогодні керувати складними мережами простіше та ефективніше. Проте, у випадку неузгодженості функціонування серверної та мережної площин забезпечити адаптивне управління якістю обслуговування та управління ресурсами з кінця в кінець є неможливим. На рис. 2.2 в) запропоновано схему централізованої програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої телекомунікаційної мережі, яка дає змогу узгодити дві площини функціонування стосовно якості їх функціонування та проводити адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування.



в)

Рис.2.2 Традиційна децентралізована телекомунікаційна мережа –а); традиційна програмно-конфігурована телекомунікаційна мережа – б); запропонована централізована програмно-конфігурована сервісно-орієнтована телекомунікаційна мережа з адаптивним управлінням ресурсами та QoS –в)

Для прикладу розглянемо різні ситуації, які можуть виникнути в процесі передавання даних в телекомунікаційних мережах та вплинути на якість обслуговування.

Для надання гарантованої якості обслуговування з кінця в кінець необхідно, щоб виконувалась умова:

$$QoS_{E2E}(x) \leq QoS_{E2E.допустиме}(x) \quad (2.1)$$

де $QoS_{E2E.допустиме}(x)$ допустиме значення якості обслуговування в телекомунікаційній мережі згідно SLA; $QoS_{E2E}(x)$ поточна якість обслуговування, яка надається мережею для кінцевого користувача.

Поточна оцінка якості обслуговування з кінця в кінець визначається згідно наступної формули:

$$QoS_{E2E}(x) = QoS_{Network}(x) + QoS_{Server}(x) \quad (2.2)$$

де $QoS_{Network}(x)$ якість обслуговування, яка забезпечується в мережній площині за критерієм x , де в ролі x може бути затримка, втрати пакетів, джитер доступна пропускна здатність чи комплексний інтегральний показник; $QoS_{Server}(x)$ якість обслуговування, яка забезпечується в серверній площині за критерієм x , де в ролі x може бути затримка, втрати пакетів чи комплексний інтегральний показник.

Відповідно для забезпечення умови 2.1 необхідно, щоб кожна із площин забезпечувала необхідні допустимі параметри якості обслуговування (затримка та втрати пакетів). Для цього необхідно, щоб виконувалась умова:

$$QoS_{Network}(x) \leq QoS_{N.допустиме}(x) \quad (2.3)$$

$$QoS_{Server}(x) \leq QoS_{S.допустиме}(x) \quad (2.4)$$

Згідно наступних умов бачимо, що якщо одна із площин не забезпечує якості обслуговування це негативно відображається на кінцевій якості обслуговування та як наслідок на якості сприйняття послуги.

В сучасних традиційних мережах досить часто виникає ситуація коли дві площини функціонують з досить високою якістю обслуговування, проте

кінцева якість обслуговування для користувача є незадовільною. Такі ситуації пов'язані з тим, що трафік сучасних мереж володіє самоподібністю, який характеризуються деякою кількістю викидів при відносно невеликому середньому рівні трафіку [108-110]. Через такі сплески навантаження, параметри якості обслуговування також погіршуються: збільшуються втрати пакетів, затримки при проходженні через вузли мереж, вирішення яких можливе шляхом логічного перерозподілу потоків даних [111-114]. Це у свою чергу вимагає постійної реконфігурації мережі, в режимі реального часу, що є неможливим для реалізації в сучасних мережах. Під реконфігурацією розуміється проведення трафіку інжинірингу (маршрутизації, перепріоритезації та балансування навантаження) [115-119].

Для прикладу розглянемо ситуацію коли для критично важливого сервісу за критерієм затримки пакетів повинна виконуватись умова $QoS_{E2E}(t) \leq 100 \text{ мс}$. Наприклад затримка пакетів в мережі становить $QoS_{Network}(t) = 60 \text{ мс}$ та затримка при обчисленні сервером становить $QoS_{Server}(t) = 80 \text{ мс}$. Загальна затримка з кінця в кінець згідно виразу (2.2) становить 140 мс. У випадку коли ресурси серверної машини використовуються на максимум, ситуацію можна виправити шляхом перерозподілу трафіку лише в мережній площині, зокрема вибору кращого шляху передавання даних за критерієм мінімальної затримки, що дасть змогу зменшити затримку із 60 мс, наприклад, в середньому до 20 мс. У такому випадку загальна затримка не перевищуватиме допустимої затримки 100 мс з кінця в кінець. І навпаки, якщо в умовах вибору найкращого шляху за критерієм затримки $QoS_{Network}(t) = 80 \text{ мс}$ та $QoS_{Server}(t) = 60 \text{ мс}$, ситуацію можна виправити шляхом вибору менш завантаженого сервера, що забезпечить меншу затримку обслуговування, наприклад $QoS_{Server}(t) = 20 \text{ мс}$.

Структурно-функціональна схема управлінських рішень, що розглядається в дисертаційній роботі для реалізації моделі програмно-конфігурованої

сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування показано на рис.2.3.



Рис.2.3 Структурно-функціональна схема управлінських рішень, що розробляється в дисертаційній роботі для реалізації моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування

Згідно проведеного аналізу в розділі 1, основним недоліком існуючих методів управління є відсутність інформації про стан мережі в режимі реального часу. Таким чином, першим необхідним рішенням згідно рис. 2.3 для проведення адаптивної реконфігурації мережі є реалізація моніторингу параметрів, що характеризують стан як вузлів площини мережі так і площини

серверів. Згідно проаналізованих систем та методів моніторингу, збір статистики в існуючих системах моніторингу серверів відбувається за допомогою агентів, що встановлюються на мережних та серверних вузлах для збирання статистичної інформації, яка передається з певним інтервалом у центр моніторингу, так званого sFlow колектора [120]. На додаток до цього, протокол Open-Flow дає змогу контролювати більшу кількість параметрів [121]. Проте, деякі із них потребують удосконалення, зокрема метод вимірювання затримки передавання даних, оскільки існуючі методи вимірюють тільки затримку в каналі для агрегованого потоку, що не дає змоги адекватно відобразити затримку та в кінцевому випадку якість обслуговування для потоків з різним пріоритетом обслуговування. Для цього із використанням централізованої архітектури SDN у роботі пропонується удосконалений метод вимірювання затримки інформаційних потоків різного пріоритету

Другим необхідним рішенням це є реалізація алгоритму адаптивної пріоритезації інформаційних потоків мережі, який на відміну від відомих дає змогу автоматизовано за допомогою контролера SDN змінювати пріоритети наданих сервісів в режимі функціонування мережі за потребою окремих користувачів згідно укладеного договору SLA, притому враховуючи вимоги до QoS інших сервісів, що передаються в мережі. Використання адаптивної пріоритезації потоків дасть змогу підвищити якість обслуговування користувачів в моменти їх потрібності. Якщо пріоритет буде встановлений в максимум, потік буде мати найменшу затримку, але найбільший вплив на інші потоки, і навпаки.

Третім рішенням це є алгоритм визначення оптимального сервера для обслуговування інформаційних потоків, вибір якого базується на інтегральному адитивному критерію, що описує стан сервера, щодо можливості оброблення необхідної кількості запитів з необхідним рівнем якості обслуговування.

Четвертим рішенням це є метод адаптивної маршрутизації потоків даних, метрика для визначення оптимального шляху якої базується на

багатокритеріальному аналізу стану функціонування каналів та вузлів мережі щодо поточної якості обслуговування інформаційних потоків шляхом вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації з використанням інтегрального адитивного критерію.

П'ятим рішенням це є адаптивне формування вагових коефіцієнтів для критеріїв по яких відбувається оптимізація в конкретний момент часу, як для мережної, так і для серверної площини, враховуючи допустимі вимоги щодо забезпечення необхідної замовленої якості користувачами для різнотипних інформаційних сервісів.

Відповідно останнім шостим рішенням є встановлення відповідних правил у таблиці потоків для забезпечення замовленої якості обслуговування.

2.2 Удосконалений метод вимірювання затримки передавання даних між будь-якою парою комутаторів та вздовж усього шляху в програмно-конфігурованій мережі

У роботі удосконалено метод вимірювання затримки передавання даних між будь-якою парою комутаторів та вздовж усього шляху в програмно-конфігурованій мережі для моніторингу стану каналів [122].

Запропонований метод вимірювання затримки є досить простий для реалізації, оскільки базується на зальноприйнятих правилах щодо комунікації між контролером та комутаторами. Зазвичай OpenFlow комутатор перевіряє таблицю потоків на прибуття пакета. Якщо пакет знайдений, комутатор застосовує дію до пакету вказаної у записі таблиці, як правило, перенаправляючи його на вказаний інтерфейс. В іншому випадку пакет повинен належати до нового потоку і комутатор пересилає його до SDN контролера повідомленням PACKET_IN. Потім контролер визначає відповідне правило потоку і посилає його до комутатора повідомленням PACKET_OUT або FLOW_MOD. Як наслідок, SDN-контролер отримує потік повідомлення PACKET_IN від кожного OpenFlow комутатора.

Для того, щоб виміряти затримку передавання даних між двома сусідніми комутаторами у роботі запропоновано зробити наступні дії. По-перше, модуль повинен обчислити затримку між контролером і кожним з обох комутаторів (рис. 2.4). Для цього контролер SDN надсилає повідомлення PACKET_OUT обом комутаторам (дія 1 та 3). Ці PACKET_OUT вказують на переадресацію пакету на порт контролера в комутаторах, тому, коли PACKET_OUT приймається в комутаторах, вони витягують пакет з PACKET_OUT і інкапсулюють його в повідомлення PACKET_IN контролеру (дія 2 та 4).

Коли приймається PACKET_IN контролером SDN, цей модуль витягує з нього пакет Ethernet і перевіряє заголовки MAC. За допомогою цих заголовків MAC модуль може ідентифікувати, коли PACKET_IN надходить із раніше надісланого PACKET_OUT. Таким чином, модуль на контролері може реєструвати час, коли було відправлено PACKET_OUT, і час, коли був отриманий PACKET_IN, і разом з цим він визначає затримку T_1 та T_2 між контролером і комутатором.

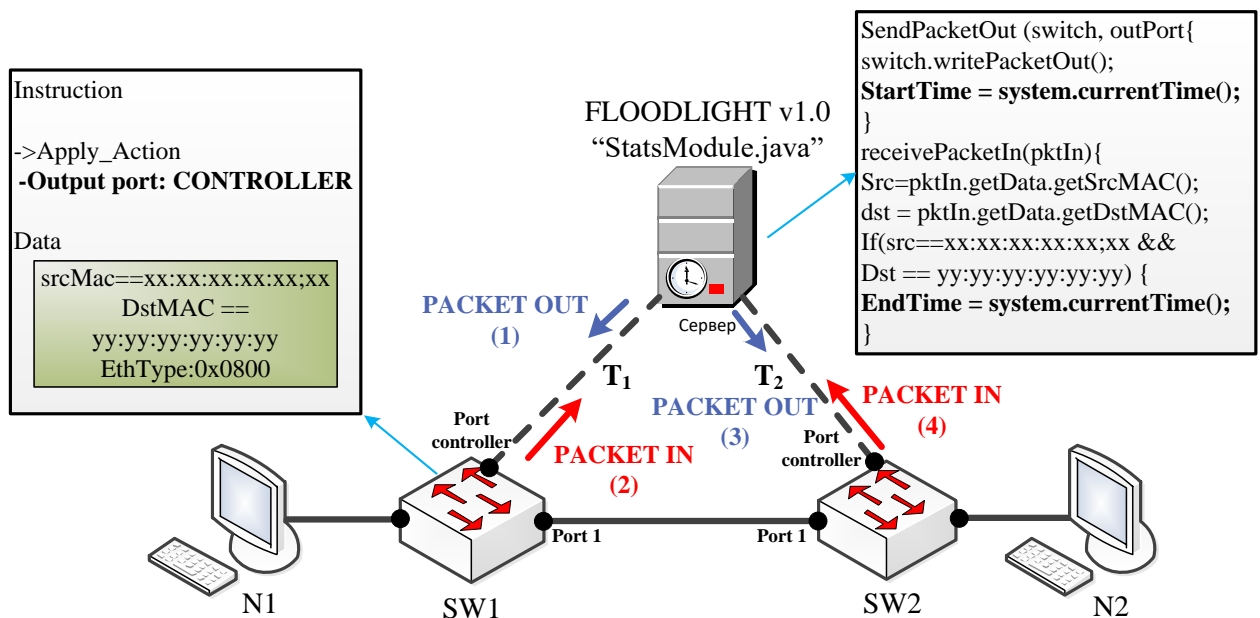


Рис.2.4 Схема вимірювання затримки пакетів між SDN контролером та комутаторами (затримка внесена рівнем управління) [122]

Як тільки контролер знає затримку між контролером і кожним з обох комутаторів, модуль надсилає третє повідомлення PACKET_OUT (дія 5), яке буде переадресовано на комутатор призначення SW2, замість контролера (рис. 2.5). Комутатор SW2 перевіряє таблицю потоків та не знайшовши правила пересилання для даного пакета повідомлення PACKET_OUT пересилає його до SDN контролера повідомленням PACKET_IN (дія 6). Після чого модуль на контролері фіксує час, коли було відправлено PACKET_OUT, і час, коли був отриманий PACKET_IN, та визначає затримку T_{total} . Як показано на наступному рис.2.5, модуль фіксації часу на SDN контролері тепер може визначити затримку між двома сусідніми комутаторами T_3 , оскільки T_1 , T_2 та T_{total} вже були розраховані на попередніх кроках.

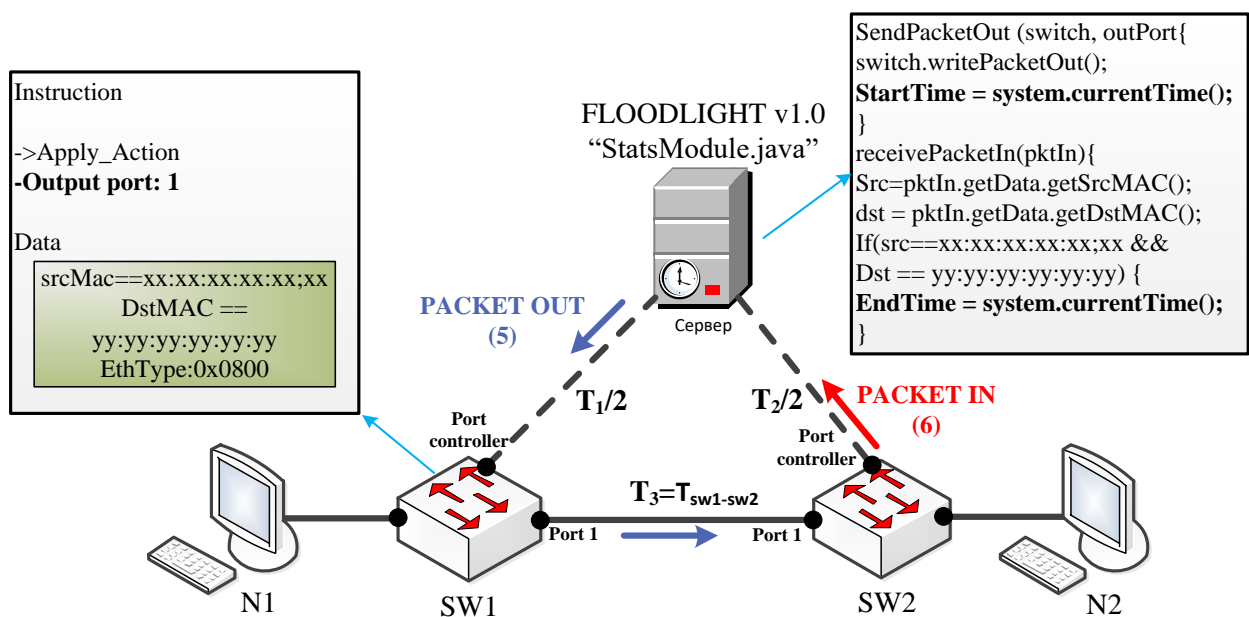


Рис.2.5 Схема вимірювання затримки пакетів між SDN комутаторами (затримка внесена рівнем передавання)

У результаті визначення затримки між двома сусідніми комутаторами розраховується згідно формули наступним чином [20]:

$$T_3 = T_{total} - \frac{T_1}{2} - \frac{T_2}{2} \quad (2.5)$$

У зв'язку із тим, що в сучасних мережах одночасно передається інформація різних видів (відео, голос, дані та ін.) з різними показниками якості обслуговування, на її роботу істотно впливають методи управління трафіком, зокрема в умовах недостатності ресурсів пропускних здатностей на мережевих портах комутатора утворюються черги пакетів. У більшості OpenFlow-комутаторів на кожен фізичний порт припадає вісім черг [123]. Черга з номером вісім – найменш пріоритетна, відповідно затримка обслуговування для них буде найбільшою. Таким, чином затримки пакетів для різного пріоритету в умовах високого навантаження будуть різними. Існуючі методи та засоби вимірювання затримки в SDN мережах дають лише можливість виміряти середню затримку в каналі між комутаторами, не враховуючи при цьому пріоритетність потоків. З однієї сторони вимірювати затримку пакетів кожного пріоритету є недоцільним в умовах низького навантаження, оскільки черги не утворюються і середня затримка обслуговування для всіх пріоритетів буде варіюватися в межах одного значення (використання існуючих методів є виправданими). З другої сторони в умовах високого навантаження, зокрема коли інтенсивність поступлення пакетів є більшою ніж інтенсивність обслуговування, в мережевих пристроях відбувається процеси буферизації, які призводять до зростання затримки обслуговування потоків в мережевих пристроях. У такому випадку, затримка для потоків високого пріоритету і низького відрізнятиметься суттєво (використання існуючих методів є не виправданими, оскільки дають не точні значення). Основна ідея вимірювання затримки пакетів різного пріоритету базуватиметься на вище згадуваному методі, який використовує відомі повідомлення обміну PACKET_OUT та PACKET_IN. Зазвичай пакети повідомлення PACKET_OUT та PACKET_IN передаються, як сигнальна інформація з найвищим пріоритетом обслуговування, тому при вимірюванні затримки в умовах високого навантаження при якому утворюватимуться черги даний пакет оброблятиметься першочергово. Відповідно, затримка пакетів для потоків з найнижчим пріоритетом по факту буде більшою, ніж виміряне

значення. Для вирішення цього у роботі запропоновано вводити так звані пробні пакети вище згаданих повідомлень з різними пріоритетами встановлених в заголовках пакетів, зокрема в полі ToS [124]. Такий підхід дасть змогу визначити точні затримки пакетів для потоків різного пріоритету, оскільки пробні пакети будуть обслуговуватись з черг різної пріоритетності за тим же принципом, що і пакети реальних потоків. На основі розробленої у розділі 4 (підрозділ 4.3) експериментальної схеми SDN мережі проведено тестування запропонованого методу вимірювання затримки в умовах високого та низького навантаження в процесі передавання різнопріоритетного трафіку (рис.2.6) [125]. Як бачимо в умовах високого навантаження різнопріоритетного трафіку (коефіцієнт завантаження ≥ 0.9) на протязі часу спостереження [0-20 с] використання методу вимірювання затримки без пріоритезації та з пріоритезацією пробних пакетів суттєво відрізняються, а саме, максимальні значення яких становить 50 мс та 356 мс відповідно. Це пов'язано із тим, що без пріоритезації пробні пакети повідомлень за замовчуванням обслуговуються першими і потраплятимуть у чергу з високою пріоритетністю.

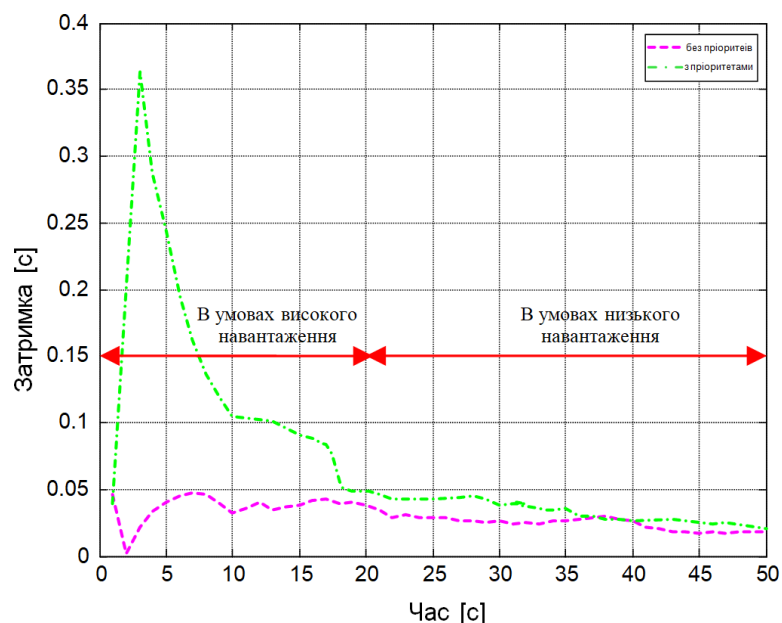


Рис.2.6 Моніторинг затримки пакетів низькопріоритетного потоку без удосконалення методу (без пріоритезації пробних пакетів) та з удосконаленням методу (з пріоритезацією пробних пакетів)

При введенні пробних пакетів з найнищим пріоритетом вони обслуговуватимуться в черзі з низькою пріоритетністю. Процес їх обслуговування починається тоді, коли черги вищого пріоритету будуть пустими. В умовах низького навантаження (коефіцієнт завантаження ≤ 0.9), що спостерігається на протязі часу 20-50с значення затримки пакетів з пріоритезацією та без пріоритезації пробних пакетів, суттєво не відрізняється, що підтверджує факт без потрібності використання модифікацій, з точки зору запуску пробних пакетів різного пріоритету (оскільки дещо ускладнюється процес конфігурації такої мережі та появляється додаткова надлишковість сигнальної інформації). Таким чином, використання методу вимірювання затримки пакетів між комутаторами SDN повинне бути адаптивним, тобто у моменти низького навантаження використовується вище запропонований метод без пріоритезації пробних пакетів, в умовах високого навантаження з пріоритезацією пробних пакетів. Таке рішення дасть змогу наперед визначати контролером SDN придатні ділянки мережі в процесі визначення оптимального шляху для різного типу трафіку з різними пріоритетами обслуговування. Таким чином, пакет який надходить на комутатор, та не містить в таблиці потоків інформації щодо передавання, направиться до контролера SDN. Де контролер проаналізувавши його заголовок та зчитавши пріоритет, встановить правило для маршрутизації потоків по шляху, який буде оптимальним до його вимог затримки на основі наперед зібраної статистики моніторингу стану ділянок мережі за критерієм затримки.

Етапи реалізації методу вимірювання затримки на різних ділянках SDN мережі представлено на рис.2.7.

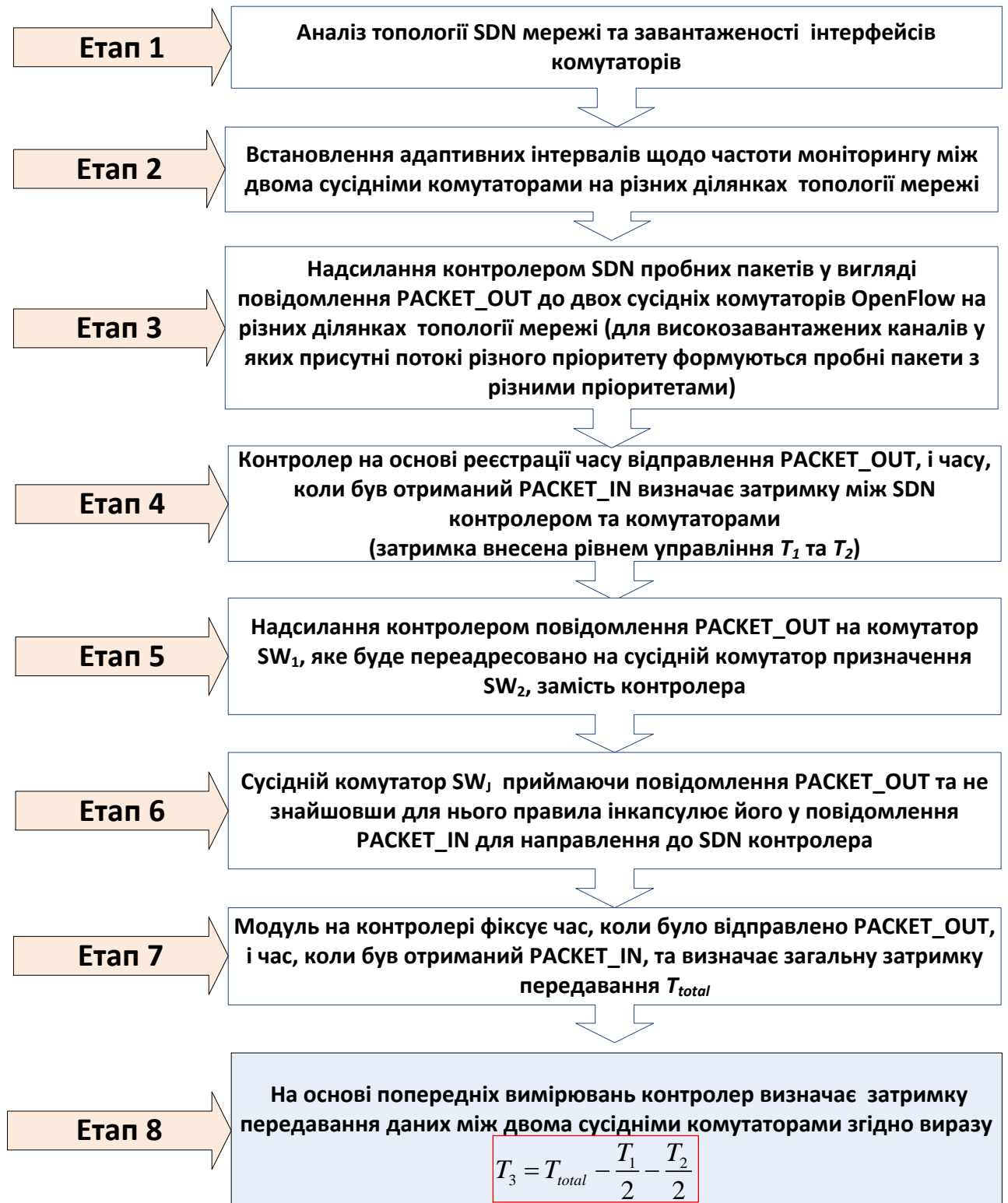


Рис.2.7 Етапи реалізації методу вимірювання затримки на різних ділянках SDN мережі

Основним недоліком існуючих систем моніторингу є його точність: для забезпечення високої точності вимірювання службова інформація набуває

надлишковий характер, що у кінцевому результаті призводить до збільшення тривалості обробки інформаційних потоків. Моніторинг затримки пакетів та інших параметрів, що характеризують стан вузлів (можна проводити трьома способами):

- 1) після кожного пакету окремого потоку, що поступив;
- 2) у фіксовані проміжки часу, які визначаються статичним алгоритмом для його реалізації;
- 3) в нефіксовані проміжки часу, які визначаються динамічним алгоритмом.

Інформація, отримана першим способом, є найбільшою за обсягом, оскільки вимірювання проводиться після кожного невідомого пакету потоку, що поступив. У випадку другого способу кількість інформації постійна, але потрібно визначити інтервал знімання інформації, щоб обсяг інформації не був надмірним і недостатнім. При третьому способі кількість інформації залежить від частоти інтервалів моніторингу, який повинен пристосовуватися до інтенсивності потоків, що надходять. Підсумовуючи вищесказане, застосування динамічно мінливого інтервалу моніторингу є найбільш придатним з точки зору зменшення надлишковості даних. При такому підході частота моніторингу залежатиме від кількості сплесків (пульсації) вхідного потоку. Присутність окремих сплесків в сучасному трафіку є однією із його характеристик. Інтервал моніторингу повинен скорочуватися, якщо у вхідному потоці виявлений сплеск з метою правильного аналізу стану функціонування мережі та проведення раціонального використання ресурсів.

2.3 Алгоритм адаптивної пріоритезації сервісів телекомунікаційної мережі

Враховуючи обмеженість мережевих ресурсів (буферного простору на вузлах мережі, пропускної здатності каналів зв'язку, розрахункових потужностей та часу на прийняття керівних рішень контролера SDN)

телекомунікаційна мережа повинна мати ефективні механізми забезпечення QoS. Проте, актуальною задачею, розв'язання якої однаково важливе як на етапі планування, так і на етапі адаптивного управління мережевими ресурсами є пріоритезація класів трафіку відповідно до рівнів якості обслуговування. Пріоритезація передбачає розподіл різного роду трафіку за жорсткістю вимог до обсягу мережеских ресурсів, що необхідні для забезпечення якості сервісу [126]. У сучасних програмно-конфігурованих мережах пріоритети класам трафіку надаються здебільшого на основі відповідних рекомендацій ІТУ –Т або за замовчуванням без пріоритетного обслуговування. При цьому виникає ситуація, коли неможливо гнучко управляти ресурсами обслуговуючих вузлів з метою уникнення перевантажень та покращення параметрів якості обслуговування у випадку, коли кількість класів трафіку не обмежується встановленими ІТУ-Т п'ятьма різновидами та різними потребами користувачів, тим більше не враховуючи можливості адаптувати їх до постійно змінюваних потреб клієнтів щодо важливості сервісу в поточний момент часу. Тому, актуальним завдання є розроблення алгоритму пріоритезації інформаційних потоків за критеріями якості обслуговування та важливості для клієнта оскільки вони є основними показниками ефективності планування та управління мережевими ресурсами в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах.

Таким чином, у роботі розроблено адаптивний алгоритм пріоритезації інформаційних потоків, який за рахунок автоматизації управління на рівні SDN контролера дає змогу динамічно змінювати пріоритети мережних потоків у випадку погіршення параметрів якості обслуговування трафіку в процесі передавання крізь мережу для підтримки замовленої якості обслуговування конкретних користувачів [127].

Алгоритм базується на розрахунку відносного пріоритету потоку. Для цього на початковому етапі функціонування програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі визначаються вхідні параметри, які формуються

на основі як вимог QoS сервісів, коефіцієнта попиту на сервіси (так званий пріоритет для групи користувачів), так і пріоритету окремого користувача та політики провайдера мережі згідно укладеного договору SLA. Наступним кроком, після отримання значень відносних пріоритетів для кожного типу трафіку, є присвоєння кожному сервісу кодової комбінації, яка відповідає значенню критерію саме для цього класу трафіку. Після чого отримані комбінації фіксуються у відповідних полях мережових протоколів ToS, DSCP. У рекомендаціях RFC-2474 поле ToS (рис.2.8) замінено на поле DSCP (Differentiated Services Code Point) (рис.2.8) де молодші 6 біт визначають код DS (Differentiated Services), а старші два біти поки, що не визначені і підлягають обнуленню.



Рис. 2.8 Формат поля ToS (Type of Service)

DS5	DS4	DS3	DS2	DS1	DS0	-	-
1	0	1	0	0	0	-	-
Пріоритет			Додаткові біти (для визначення ймовірності відкидання пакетів)			Невизначені	

Рис. 2.9 Додавання до коду пріоритету класу трафіку додаткових біт для поміщення його в полі DSCP

Алгоритм може бути використаний, як для розмежування черговості обробки потоків трафіку в SDN мереж з використанням різних мережевих протоколів, які пристосовані для вказівки рівня пріоритету в заголовках пакетів потоку, так і для реалізації адаптивної багатошляхової маршрутизації потоків.

У таблиці 2.1 наведено основні вимоги телекомунікаційних сервісів до QoS. На сьогоднішній час розрізняють велику кількість телекомунікаційних сервісів, у тому числі для Інтернету речей, у яких однакові вимоги до QoS, для більш детального розуміння певній літері алфавіту відповідатиме набір своїх сервісів з однаковими вимогами до QoS. Відповідно, А – голосові дані реального часу, автоматизований екстрений виклик IoT; В – відеоконференції, дистанційне навчання, IoT дані моніторингу реального часу; С – відео реального часу, IPTV, відео IoVT (Internet of Video Things); D – інтернет дані (HTTP, Online services), IoT-оповіщення (Photo/text/Email); E – відео на замовлення нереального часу VoD, IoVT з камер спостереження ; F – відео нереального часу 720р.

Таблиця 2.1

Вимоги до параметрів QoS телекомунікаційних сервісів

Тип потоку	Параметри QoS			
	P, % Втрати	T, мс Затримка	J, мс Джитер	C, кбіт/с Пропускна здатність
A	<0,25	150	10	64
B	<2	100	20	2048
C	<1	100	50	4096
D	<0,1	100	100	2048
E	<0,1	400	30	2048
F	<1	400	500	4000–10000

Відносні коефіцієнти параметрів QoS розраховують за формулами (2.6-2.9), як відношення мінімальних значень параметрів якості обслуговування до поточних значень, отриманих у результаті моніторингу мережі.

Відносний коефіцієнт втрати пакетів:

$$p = \frac{P_{\min}}{P}. \quad (2.6)$$

Відносний коефіцієнт затримки пакетів:

$$t = \frac{T_{\min}}{T}. \quad (2.7)$$

Відносний коефіцієнт джитера:

$$j = \frac{J_{\min}}{J}. \quad (2.8)$$

Відносний коефіцієнт пропускної здатності:

$$c = \frac{C}{C_{\max}}. \quad (2.9)$$

Формуємо коефіцієнти значимості сервісів Y_i заповнюючи числами 1, 2 та 3, які відображають відповідно низьку, середню та високу значимість вимог до параметрів QoS .

Таблиця 2.2

Формування значимості параметрів QoS для сервісів

Тип потоку	Параметри QoS			
	P, %	T, мс	J, мс	C, кбіт/с
A	2	3	3	1
B	2	3	3	2
C	3	2	2	3
D	3	1	1	1
E	2	2	1	1
F	2	2	2	3

Для кожного з параметрів якості QoS вводимо відносні коефіцієнти значимості параметра відносно інших Z_i , які можуть змінюватись контролером SDN мережі згідно SLA договору:

$Pp=0,23$ - відносний коефіцієнт значимості втрати пакетів;

$Pt=0,18$ - відносний коефіцієнт значимості затримки пакетів;

$P_j=0,14$ - відносний коефіцієнт значимості джитера;

$P_c=0,12$ - відносний коефіцієнт значимості смуги пропускання.

Більш того, підхід щодо пріоритезації потоків може враховувати, ще додатковий параметр, такий як пріоритет клієнта для кожного типу трафіку згідно договору SLA. Якщо пріоритет не заданий явно в договорі щодо надання сервісу, тоді за замовчуванням клієнтові присвоюють найнижчий пріоритет з усіх можливих.

Відповідно, відносний пріоритет для кожної категорії сервісів розраховується за формулою :

$$Pr_i = \frac{\sum_{j=1}^4 X_{ij} Y_{ij} Z_j}{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 X_{ij} Y_{ij} Z_j} \quad (2.10)$$

де Pr_i – відносний пріоритет i -ої послуги;

i – номер типу послуги;

j – номер параметра якості обслуговування;

X_{ij} – відносний пріоритет параметру j для послуги i ;

Y_{ij} – важливість параметру j для послуги i .

Z_{ij} – відносний коефіцієнт значимості параметру j відносно інших.

Кінцевим результатом наведеної формули є дробове число, діапазон значень якого лежить в межах від нуля до одиниці. Чим більше значення, тим вищий пріоритет інформаційного потоку. Формулу можна застосовувати для будь-якої кількості інформаційних потоків та різних вимог щодо якості обслуговування [128].

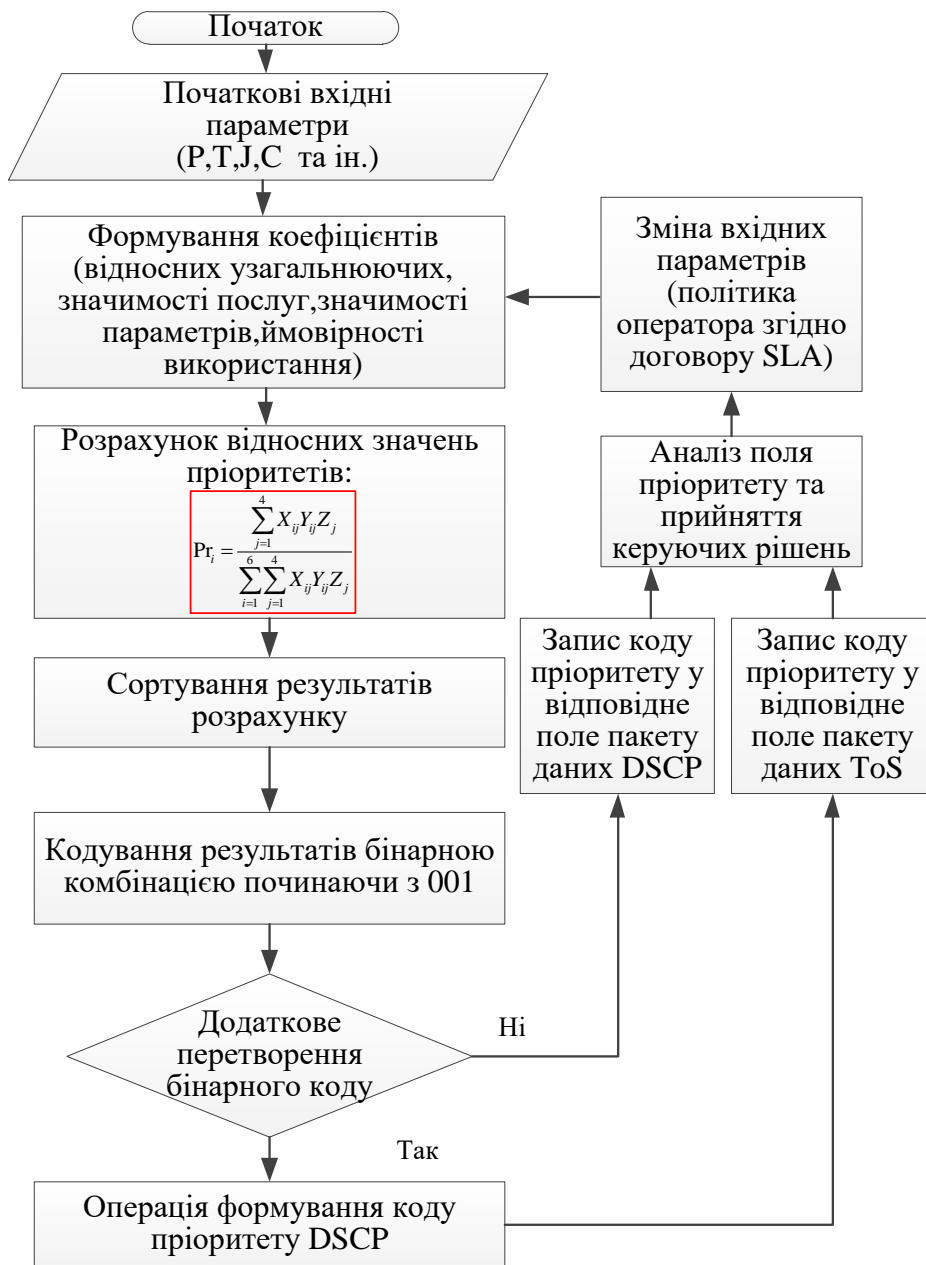


Рис. 2.10 Алгоритм адаптивної пріоритизації сервісів телекомунікаційної мережі [129]

Запропонований алгоритм дає змогу створити уніфікований і формалізований підхід щодо визначення пріоритетів обслуговування різноманітних сервісів телекомунікаційних мереж, у тому числі сервісів Інтернету речей, що є необхідним в процесі розв'язання завдань ефективного та гнучкого управління ресурсами мережі з адаптацією до потреб користувачів.

2.4 Метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах

2.4.1 Математична модель задачі багатокритеріальної оптимізації для адаптивної маршрутизації інформаційних потоків

Одним з потужних методів впливу на ефективне використання ресурсів мережі є технологія Traffic Engineering (TE) під якою розуміються методи та механізми досягнення збалансованості завантаження всіх ресурсів мережі за рахунок раціонального вибору шляхів передавання трафіку через мережу [130]. Важливим питанням у цьому контексті є питання маршрутизації. Маршрутизація разом з елементами управління потоками даних повністю визначає функціонування всієї мережі щодо заданої якості та кількості наданих послуг. Відсутність обліку в алгоритмах маршрутизації додаткових факторів мережі, яких з кожним днем стає все більше і більше, вказує на необхідність поліпшення протоколів маршрутизації шляхом аналізу та оцінок характеристик мереж з урахуванням нечіткого характеру показників оцінки мережі в протоколах маршрутизації [131]. Багатокритеріальний підхід маршрутизації інформаційних потоків є ключовим у запропонованій концептуальній моделі мережі, який дає змогу адаптивно призначати шлях пересилання даних з кінця в кінець з урахуванням параметрів зв'язку (наприклад: втрати пакету, затримки, джитер, доступна пропускна здатність та ін.). Для досягнення цієї мети запропонована архітектура програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі повинна постійно моніторити та контролювати основні параметри функціонування мережі, щоб адаптувати ресурси за потребою. Архітектура також може знайти найкращий шлях (або більше, ніж один найкращий шлях у випадку декількох потоків), який може задовольнити потреби потоку за допомогою нижче описаної математичної моделі.

У роботі пропонується удосконалений метод маршрутизації потоків, який дає змогу балансувати навантаження за критеріями максимального

завантаження каналів мережі та якістю обслуговування для кожного потоку [132]. Для цього використовується класифікація потоків, згідно запропонованого алгоритму пріоритезації сервісів, розглянутого в підрозділі 2.3. Відповідно, задача маршрутизації формується наступним чином. Перша категорія сервісних потоків повинна бути передана оптимальним шляхом, відповідно до інтегрального критерію вартості шляху згідно запропонованої нижче метрики, з урахуванням більшої важливості параметрів якості послуг, а саме затримки і джитера за рахунок кореляції коефіцієнтів важливості критеріїв. Такі потоки дуже чутливі до джитеру, тому маршрутизація по декількох шляхах з балансуванням навантаження для них заборонена, тобто весь потік може передаватися виключно одним шляхом. Друга категорія потоків менш чутлива до параметрів часу якості обслуговування, проте чутлива до втрат даних, у такому випадку допускається їх балансування навантаження по незначній кількості альтернативних шляхах з невеликим коефіцієнтом розподілу навантаження. Формування інтегральної метрики шляху для вартості пересилання таких потоків повинні базуватися на більшій важливості таких критеріїв, як втрати пакетів та джитер, за рахунок зміни вагових коефіцієнтів в метриці маршруту. Потоки третьої категорії можуть бути забезпечені будь-яким способом без гарантії якості обслуговування. Тому, такі потоки використовуються для довантаження ділянок шляхів із низьким навантаженням, які для вищезазначених потоків є неможливим та з метою вирівнювання розподілу навантаження між каналами у всій мережі.

Припустимо, в разі перевантаження конкретного шляху в певному комутаторі виникає необхідність перерозподілу потоків. З огляду на те, що потоки першої категорії чутливі до затримок і джитеру, перерозподіл цих потоків може погіршити якість їх обслуговування. У зв'язку з цим розвантаження шляху починається з перерозподілу потоків третьої категорії. Більш того, після кожної ітерації перерозподілу потоків, часові параметри якості обслуговування вимірюються спочатку для першої категорії, а потім для

другої. У разі якщо параметри відповідають необхідним і шлях не перевантажений, алгоритм перерозподілу завершує свою роботу. Алгоритм балансування навантаження для багатошляхової маршрутизації показано на рис. 2.11.

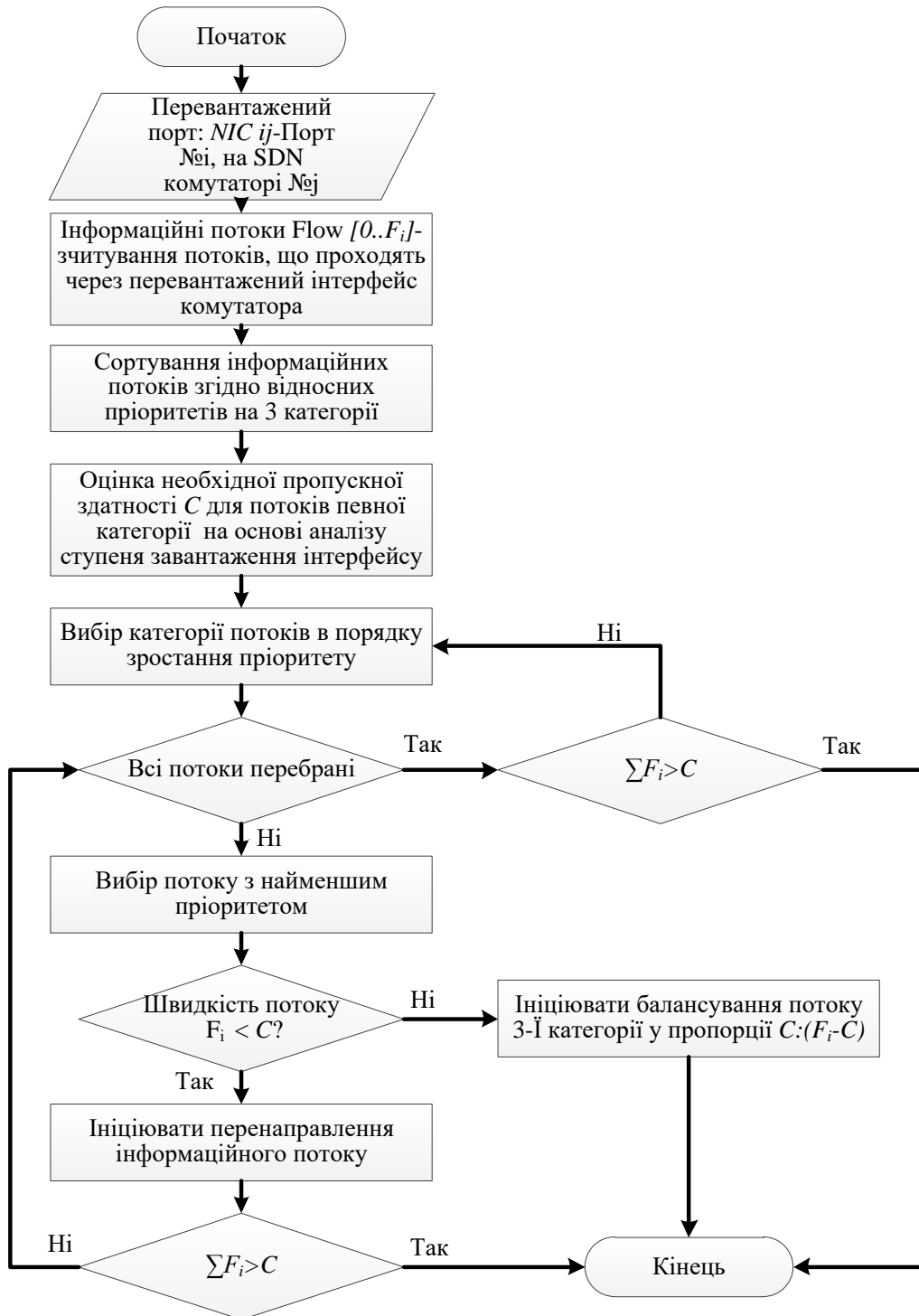


Рис. 2.11 Алгоритм балансування навантаження для багатошляхової маршрутизації

У роботі сформовано математичну модель задачі маршрутизації розв'язання якої дає змогу знайти для кожного інформаційного потоку найкоротший шлях передавання з урахуванням заданих обмежень. Нехай маємо задану мережу у вигляді графа $G=(V, E)$, що складається із V вузлів, де кожен канал E між двома сусідніми вузлами характеризується затримкою, втратами, пропускною здатністю та джитером [133]. Для кожного шляху формується своя вартість $W_{ij} \geq 0$ передавання даних, причому один і той самий шлях для різного типу сервісу матиме різну вартість. Вартість шляху формується на основі багатокритеріального аналізу стану функціонування вузлів. Основною метою даної моделі це пошук оптимальних шляхів у мережі для кожного потоку з мінімальною вартістю та з врахуванням деяких обмежень, зокрема, таких як: максимально допустима затримка, втрати пакетів, джитер та доступна пропускна здатність у каналах. Кожен окремий потік ідентифікується за допомогою відносного пріоритету k , значення якого знаходиться в межах від нуля до одиниці та трансформовані відповідно у заголовки пакетів. набір потоків, які необхідно передати по мережі, позначений K .

Кожен потік характеризується п'ятьма параметрами:

G_{x_k} – мережевий вузол SDN, де потік k входить в мережу;

G_{y_k} – мережевий вузол SDN, де потік k виходить з мережі;

f_k пропускна здатність потоку k , який необхідно доставити з вхідного до вихідного вузла;

$P_{\max}^k \geq 0$ – максимально допустиме значення втрат пакетів для k -го інформаційного потоку;

$D_{\max}^k \geq 0$ – максимально допустиме значення затримки для інформаційного k -го потоку.

Завдання оптимізації полягає в тому, щоб прокласти всі потоки в мережі по найкоротшому шляху з мінімальними витратами.

Набори:

вузли: $n \in V$;

ребра: $(i, j) \in E$;

канали: $(i, j) \in E \cup (j, i) \in E$;

Змінні:

$0 \leq x_{ij}^k \leq f_k$ – обсяг k -го інформаційного потоку, що проходить по каналу (i, j) .

Параметри:

$b_{ij} \geq 0$ – доступна пропускна здатність у каналі зв'язку (i, j) ;

$w_{ij} \geq 0$ – вартість каналу (i, j) ;

$G_{x_k} \in V$ – вхідний вузол k -го потоку;

$G_{y_k} \in V$ – вихідний вузол k -го потоку;

f_k – швидкість k -го потоку;

$P_{\max}^k \geq 0$ – максимально допустиме значення втрат пакетів k -го потоку;

$p_{ij} \geq 0$ – значення втрат пакетів у каналі (i, j) ;

$D_{\max}^k \geq 0$ – максимально допустиме значення затримки k -го потоку;

$d_{ij} \geq 0$ – затримка в каналі (i, j) ;

$J_{\max}^k \geq 0$ – максимально допустиме значення джитеру пакетів k -го інформаційного потоку;

$j_{ij} \geq 0$ – значення джитеру пакетів у каналі (i, j) ;

$B^k \geq 0$ – пропускна здатність, необхідна для k -го інформаційного потоку.

Цільова функція (2.11) мінімізує вартість шляху залежно від параметрів якості обслуговування в каналах, а також від коефіцієнта мінімального/максимального завантаження каналів, який залежить від типу відносного пріоритету інформаційного потоку:

$$F(x) = \sum_{(i,j) \in E} \sum_{k \in K} w_{ij} x_{ij}^k \rightarrow \min \quad (2.11)$$

Обмеження (2.12) відповідає умові збереження потоку:

$$\sum_{(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{(i,j) \in E} x_{ji}^k = \begin{cases} f_k, & i = s_k, \\ -f_k, & i = t_k, \\ 0, & i \neq s_k, t_k \end{cases} \quad \forall i \in V, \forall k \in K \quad (2.12)$$

Дане обмеження пов'язане з балансуванням потоку. Він враховує добре відомий закон про збереження потоку, який стверджує, що загальний потік, що надходить у кожен вершину, дорівнює загальному потоку, що виходить з цієї ж вершини, за винятком відправника та отримувача.

Наступні обмеження (2.13 - 2.15) відображають максимально допустимі значення втрат пакетів, затримки та джитеру, які не повинні перевищувати критичних значень D_{\max}^k , P_{\max}^k , J_{\max}^k для потоку з відносним пріоритетом k . У випадку маршрутизації третьої категорії цим параметрам надається максимально можливе значення:

$$\sum_{(i,j) \in E} P_{ij} \leq \begin{cases} P_{\max}^k, & x_{ij}^k > 0, \forall k \in K; \\ 0, & x_{ij}^k = 0, \forall k \in K; \end{cases} \quad (2.13)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} d_{ij} \leq \begin{cases} D_{\max}^k, & x_{ij}^k > 0, \forall k \in K; \\ 0, & x_{ij}^k = 0, \forall k \in K; \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} j_{ij} \leq \begin{cases} J_{\max}^k, & x_{ij}^k > 0, \forall k \in K; \\ 0, & x_{ij}^k = 0, \forall k \in K; \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\sum_{(i,j) \in E} B^k \leq \begin{cases} b_{ij}, & x_{ij}^k > 0, \forall k \in K; \\ 0, & x_{ij}^k = 0, \forall k \in K; \end{cases} \quad (2.16)$$

Нерівність (2.16) задає обмеження на доступну пропускну здатність кожного каналу з врахуванням всіх потоків k , що проходять цими каналами. При чому, це обмеження є нижчим у випадку маршрутизації потоків другої та третьої категорії, що спричиняє їх передачу шляхами з низькою ефективністю завантаження та з погіршенням якості обслуговування:

Остання умова (2.17) визначає діапазон значень змінної та гарантує, що змінна набуває значення в межах швидкості потоку [134]:

$$0 \leq x_{ij}^k \leq f_k \quad \forall (i, j) \in E, \quad \forall k \in K \quad (2.17)$$

Таким чином, розв'язання сформованої задачі багатокритеріальної маршрутизації полягатиме у пошуку мінімального значення вартості шляху для певної категорії інформаційних потоків.

2.4.2 Метод розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального шляху передавання даних в SDN з використанням інтегрального адитивного критерію

Метрика це вартість маршруту, що характеризує міру його переваги. Метрика маршруту - найважливіша частина будь-якого протоколу маршрутизації. Чим краща метрика, тим більша ймовірність того, що мережевий пристрій прийме оптимальне рішення відправити пакет по маршруту, який вона характеризує.

Сучасні протоколи маршрутизації при обчисленні метрик маршрутів часто спираються на використання до трьох основних критеріїв, що регламентуються ІТУ-Т. Це відсоток втрачених пакетів (IPLR) в наскрізному каналі між двома пристроями в мережі, пропускна здатність (Bandwidth) і затримка при передаванні мережевих пакетів (IPTD) [135]. Кожен з них, з тих чи інших причин безпосередньо впливає один на одного. Дані критерії дають лише загальну оцінку каналів зв'язку, а зміни їх значень можуть бути лише наслідком впливу інших випадкових чинників. Врахування таких чинників в майбутньому допоможе створювати найбільш докладну картину стану зв'язків в мережі і всієї системи в цілому.

Як було сказано вище вартість шляху (метрика) формується на основі декількох критеріїв оптимальності, що спонукає до розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації. У роботі для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації вибрано метод адитивного критерію

оптимальності. Відповідно, розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для вибору шляху полягає в тому, що набір критеріїв які характеризують канал зв'язку, $f_i(x), i = 1, n$ поєднуються у вигляді одного інтегрального критерію $F(x) = \Phi(f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$, після чого знаходиться максимум чи мінімум цієї цільової функції [136]. Цільову функцію будують шляхом додавання нормованих значень власних критеріїв. В загальному випадку узагальнена цільова функція на основі інтегрального адитивного критерію має наступний вигляд:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{f_i(x)}{f_i^0(x)} = \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i^H(x) \rightarrow \max(\min) \quad (2.18)$$

де n – кількість об'єднаних часткових критеріїв; α_i – ваговий коефіцієнт i – го часткового критерію; $f_i(x)$ – числове значення i – го часткового критерію; $f_i^0(x)$ – нормований дільник i – го часткового критерію; $f_i^H(x)$ – нормоване значення i – го часткового критерію.

У більшості випадків критерії оптимальності характеризуються різною фізичною природою, а тому мають і різну розмірність. Таким чином просте їх підсумування є некоректним. Відповідно до цього твердження у попередній формулі числові значення критеріїв оптимальності нормуються: Як нормуючі дільники приймаються максимальні (мінімальні) значення критеріїв, що досягаються в області припустимих рішень. Розмірності власних критеріїв оптимальності та відповідних дільників, що нормують є однаковими. Відповідно у результаті чого інтегральний адитивний критерій є безрозмірною величиною. Алгоритм розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації показано на рис. 2.12.

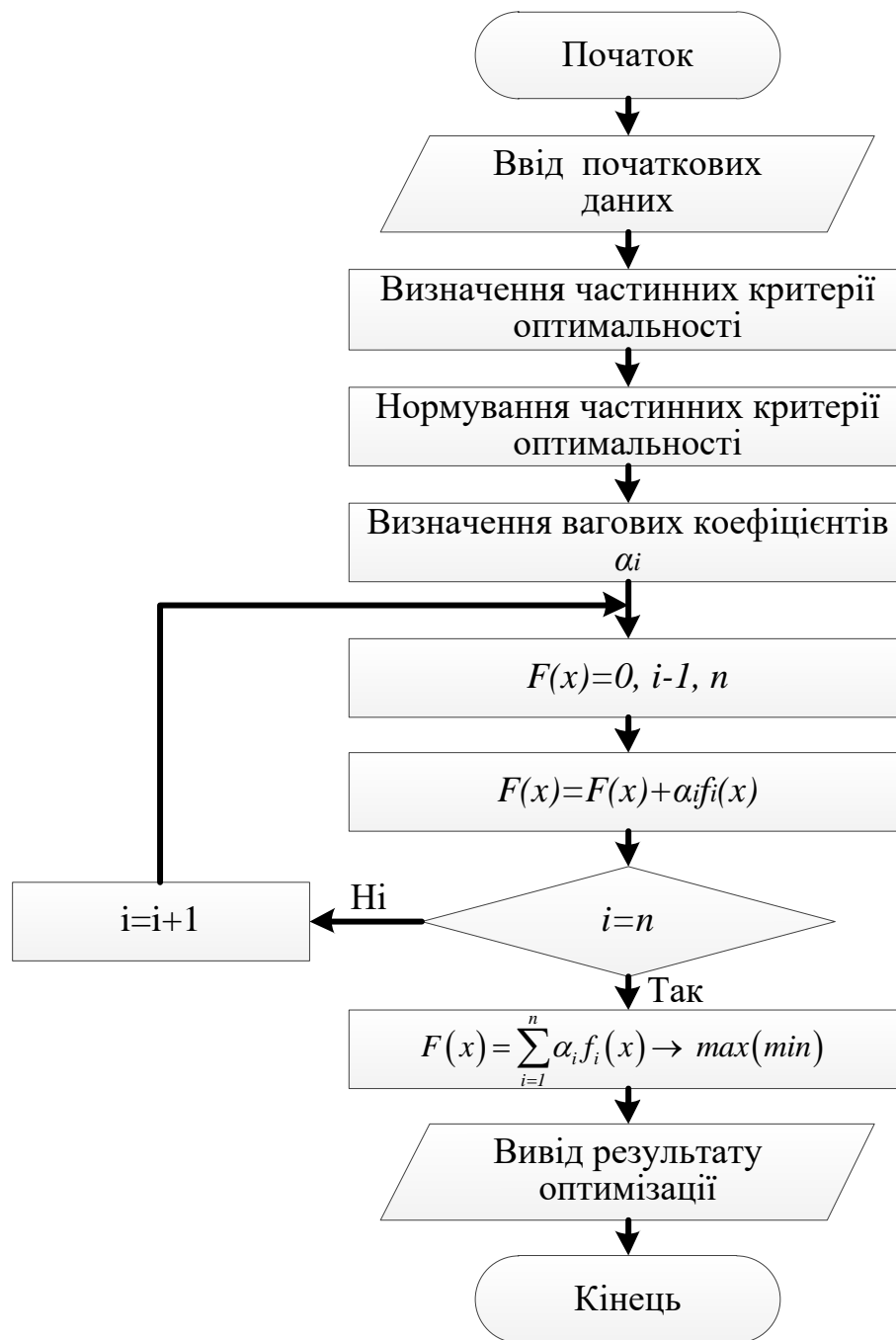


Рис. 2.12 Блок-схема алгоритму розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації з використанням інтегрального адитивного критерію

Для отримання інформативної картини щодо багатокритеріальної маршрутизації для концептуальної моделі площини мережі SDN, введемо інтегральну метрику $W_{(i,j)}$, що складається з чотирьох критеріїв: відсоток втрачених пакетів, пропускна здатність, джитер, затримка між вузлами i, j .

Розглянемо структуру мережі зв'язку, що складається з мережевих N SDN пристроїв. Чисельні значення метрики каналів зв'язку $W_{(i,j)}$ можна представити у вигляді матриці суміжності A як [133]:

$$A = \begin{pmatrix} w_{1,1} & \cdots & w_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{N,1} & \cdots & w_{N,N} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Варто зазначити, що матриця параметрів A^w не є симетричною ($w_{(i,j)} \neq w_{(j,i)}$). Мінімізація цільової функції $w_{(i,j)}$ на яку можуть бути накладені кілька обмежень або граничних значень, називається багатокритеріальною оптимізацією.

Як нормуючі дільники в цій задачі приймемо найкращі значення власних критеріїв:

- для кількості втрачених пакетів

$$P_{i,j} = \min, P_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{M_{i,j}} \quad (2.20)$$

де $N_{i,j}$ - кількість прийнятих пакетів, $M_{i,j}$ - кількість переданих пакетів та $M_{i,j} > 0$.

- для часу затримки потоку

$$D_{i,j} = \min, D_{i,j} = \frac{t_{min}}{t_{i,j}} \quad (2.21)$$

де t_{min} - мінімальне значення затримки в матриці суміжності, і $t_{min}, t_{i,j} > 0$

- для пропускної здатності каналу

$$C_{i,j} = \min, C_{i,j} = \frac{B_{i,j}}{B_{max}} \quad (2.22)$$

- для джитера потоку

$$J_{i,j} = \min, J_{i,j} = \frac{j t_{min}}{j t_{i,j}} \quad (2.23)$$

де $j t_{min}$ - мінімальне значення джитера в матриці суміжності, і $j t_{min}, j t_{i,j} > 0$

Значення інтегрального адитивного критерію розраховуються для кожного каналу зв'язку. Таким чином, метрика каналів зв'язку на основі п'яти параметрів матиме такий вигляд:

$$W_{i,j} = 1 - (X_1 \cdot (P_{i,j}) + X_2 \cdot (D_{i,j}) + X_3 \cdot (C_{i,j}) + X_4 \cdot (J_{i,j})) \quad (2.24)$$

Вартість маршруту передбачає суму метрик кожного каналу. З безлічі альтернативних маршрутів буде обраний той, що має найменшу вартість (тобто меншим значенням сумарної метрики).

$$F(x) = \sum w_{i,j} \rightarrow \min \quad (2.25)$$

де X_1, X_2, X_3, X_4 - вагові коефіцієнти, що змінюються в діапазоні від 0 до 1, і їх сума повинна дорівнювати одиниці:

$$\begin{cases} X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 1 \\ X_1 \leq 1 \\ X_2 \leq 1 \\ X_3 \leq 1 \\ X_4 \leq 1 \end{cases} \quad (2.26)$$

Змінюючи значення вагових коефіцієнтів в метриці $W_{(i,j)}$, ми, тим самим, створюємо апарат для управління значимістю того чи іншого параметра метрики в підсумковій оцінці каналу передавання даних від вузла i до вузла j .

З математичної точки зору в якості «ідеальної» вибирається точка з координатами, що відповідають $t_{min}, P_{min}, C_{max}, jt_{min}$, при фіксованих вагових коефіцієнтах X_1, X_2, X_3, X_4 . У реальності, з урахуванням динаміки роботи всієї системи зв'язку, вибір вагових коефіцієнтів обумовлений характером першорядних типів трафіку.

Рекомендація ІТУ-Т [100] регламентує п'ять основних класів якості надання сервісів (IP QoS), до яких можна віднести систему зв'язку. Мережі класу 0 найбільш вимогливі до значень робочих характеристик каналів зв'язку. Як правило, це мережі, що забезпечують надання сервісів реального часу, найбільш чутливі до затримок (VoIP, відеоконференцзв'язок, онлайн ігри і т.д.).

В даний час немає єдиної концепції до побудови систем і мереж зв'язку, що забезпечують надання всіх сервісів з найвищою якістю [128]. У зв'язку з цим виникає необхідність в розробці гнучкого механізму маршрутизації трафіку окремо обраного сервісу з урахуванням поточних можливостей системи зв'язку і вимог на якість його надання. Якість надання сервісів нерозривно пов'язано з основними параметрами, що фігурують в метриці $w_{(i,j)}$. Основна ідея розробленого механізму забезпечення гнучкої ефективної маршрутизації полягає в маніпуляції ваговими коефіцієнтами таким чином, щоб домагатися найкращих можливих значень робочих характеристик, що визначає клас IP QoS. В реаліях у програмно-конфігурованих мережах можливість реалізації такого механізму є найбільш перспективна. Ядром такої мережі є керуючий пристрій - програмний контролер, який відповідає за управління структурою мережі [137, 138]. В даному випадку - цей пристрій, здатний оптимально підбирати вагові коефіцієнти метрики $w_{(i,j)}$. У роботі запропоновано блок-схему розробленого методу маршрутизації (рис. 2.13) і опис роботи його функціональних блоків.

Робота алгоритму починається з визначення базових значень вагових коефіцієнтів метрики. Для систем загального користування, які одноразово вимагають рівноправного внеску кожного з первинних параметрів метрики, базові коефіцієнти можна задавати рівнозначними. При пріоритетності конкретного виду трафіку вибір значень вагових коефіцієнтів може визначатися згідно даних у наведених роботах [128, 139,140], яка враховує їх взаємний вплив на якість надання цього трафіку. Паралельно запускається процес, який відповідає за обчислення первинних характеристик, що визначають стан всіх існуючих каналів зв'язку. Отримані результати надходять в блок «Обчислення значень метрики $w_{(i,j)}$ ». У ньому за формулою (2.24) проводиться обчислення відповідних значень метрики для кожного каналу. Значення записуються в

матрицю суміжності A^w , що використовується для визначення вартості маршрутів таблиць маршрутизації.

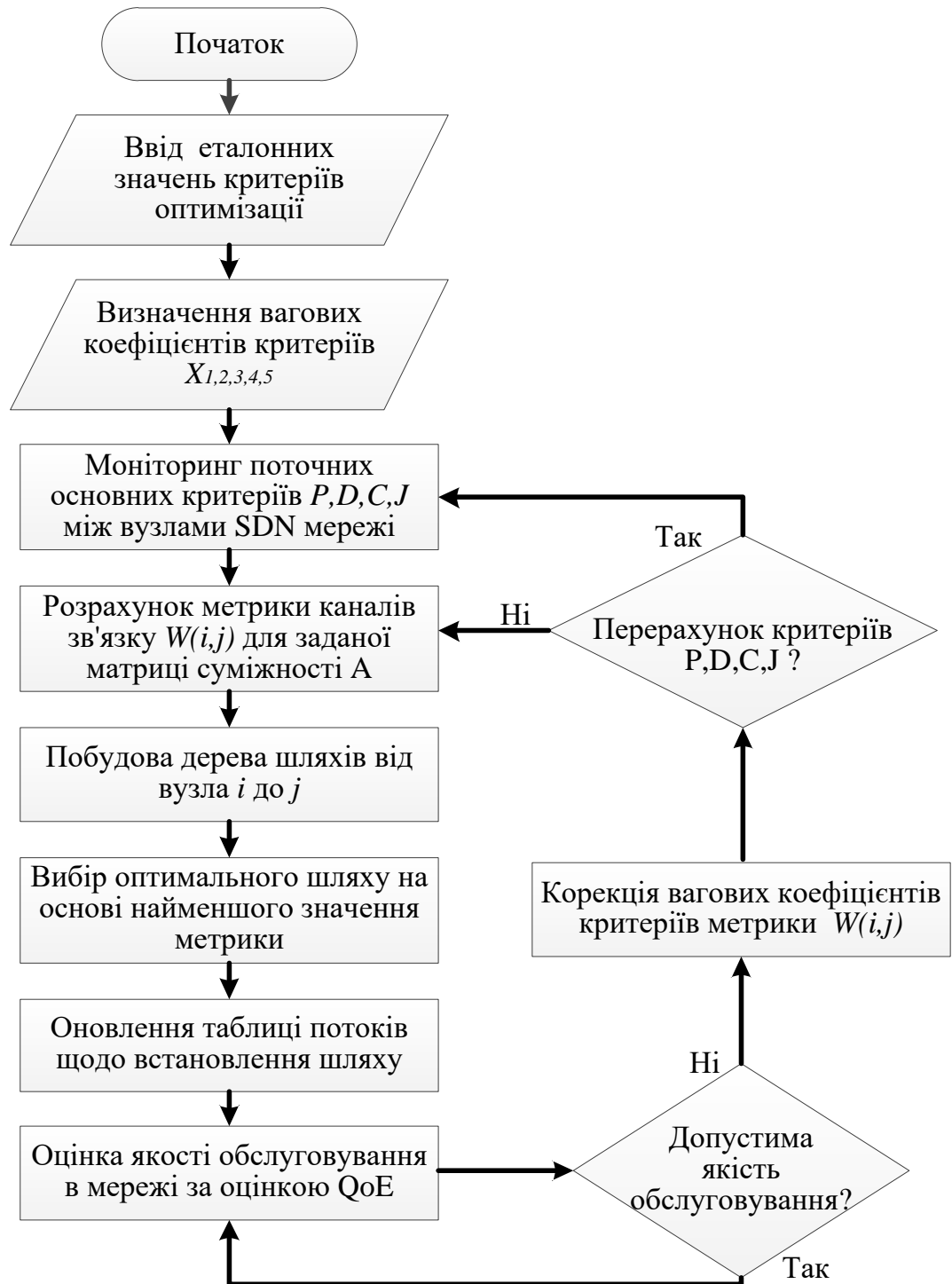


Рис. 2.13 Блок-схема розробленого методу адаптивної маршрутизації в SDN

[133]

Запропонований метод дозволяє домагатися постійного поліпшення якості роботи мережі, шляхом перевірки поточних значень робочих характеристик мережі, які відповідають QoS вимогам мережі в цілому. У варіанті невідповідності значень робочих характеристик заданим вимогам до системи зв'язку, при необхідності, є можливість проводити коригування значень вагових коефіцієнтів, з метою налаштувати поточну топологію мережі на максимальну ефективність роботи .

З огляду на те, що зміна значень може впливати на поточні значення первинних характеристик каналів зв'язку, можливо здійснювати перерахунок метрик, з метою підтримки актуальності характеристик каналів. Прийняття рішень з перерахунку первинних параметрів мережі і безпосереднє коригування значень вагових коефіцієнтів метрики - основне завдання контролера програмно-конфігурованих мереж.

У реальності підбір значень вагових коефіцієнтів не тривіальне завдання, оскільки, з огляду на динаміку роботи IP-мереж, немає чітких правил щодо її управління, наприклад, в разі виникнення непередбачених ситуацій (сплесковість трафіку).

Робота контролера являє собою інтелектуальну систему, яка, приймаючи до уваги поточний стан мережі, здатна управляти всією мережею з метою досягнення необхідних найкращих результатів передачі трафіку. Розроблений метод дає необхідний інструмент для спрощення управління інформаційно-комунікаційною системою, шляхом маніпуляції ваговими коефіцієнтами метрики (2.24), тим самим зводячи завдання до підбору їх «найкращих» значень. Принцип роботи запропонованого методу маршрутизації в програмно-конфігурованих мережах показаний на рис.2.14.

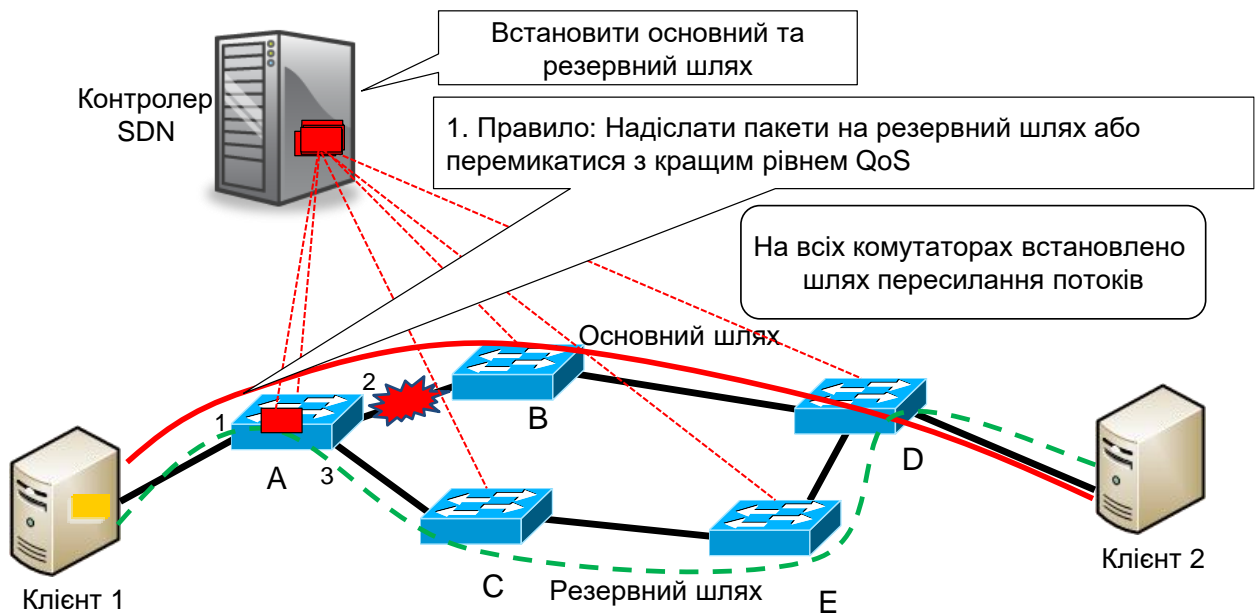


Рис. 2.14 Принцип роботи запропонованої маршрутизації в SDN мережах [125]

Використання розробленого методу адаптивної маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній інфраструктурі, дасть змогу забезпечити гарантований рівень якості обслуговування інформаційних послуг з кінця в кінець, шляхом динамічного управління мережевими потоками даних. А також, вибрати оптимальні маршрути передавання даних при виникненні несправностей або погіршення одного із параметрів QoS в комутаторах SDN мережі для потоків різної пріоритетності.

2.5 Алгоритм розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію

Одним з методів підвищення якості надання послуг у пропонованій концептуальній моделі телекомунікаційної мережі є зменшення навантаження на кінцеві сервери обслуговування за рахунок використання розробленої адаптивної маршрутизації трафіку. Це зменшення навантаження на сервери

телекомунікаційній мережі можливо досягти за рахунок вибору оптимального сервера обслуговування на основі багатокритеріального моніторингу важливих параметрів функціонування, що характеризують його динамічний стан. При цьому, якщо завантаженість визнана більшою, ніж може допустити сервер, необхідно перенаправити трафік на інші сервери за допомогою яких здійснюється маршрутизація у телекомунікаційній мережі або на іншу однотипну віртуальну машину меншої завантаженості.

Суть запропонованого методу розв'язання багатокритеріальної оптимізації для вибору оптимального сервера є аналогічним, як і для маршрутизації та полягає в тому, що набір критеріїв які характеризують функціональність сервера, поєднуються в один інтегральний критерій, а потім знаходиться максимум чи мінімум цієї цільової функції.

Алгоритм розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію показано на рис.2.15. Згідно даного алгоритму для розв'язання цієї задачі будується функція корисності, яка дає змогу визначити показник ефективності рішення і процес надання переваги зводиться до порівняння чисел-значень. При цьому SDN контролер, що приймає рішення, враховує, що один набір значень локальних критеріїв володіє перевагою над іншими, якщо йому відповідає більше значення функції переваги. У випадку погіршення якості обслуговування SDN контролер проводить корекцію вагових коефіцієнтів для адаптації серверної площини до забезпечення необхідного рівня якості обслуговування шляхом узгодженості із рівнем QoS, що забезпечується мережною площиною.

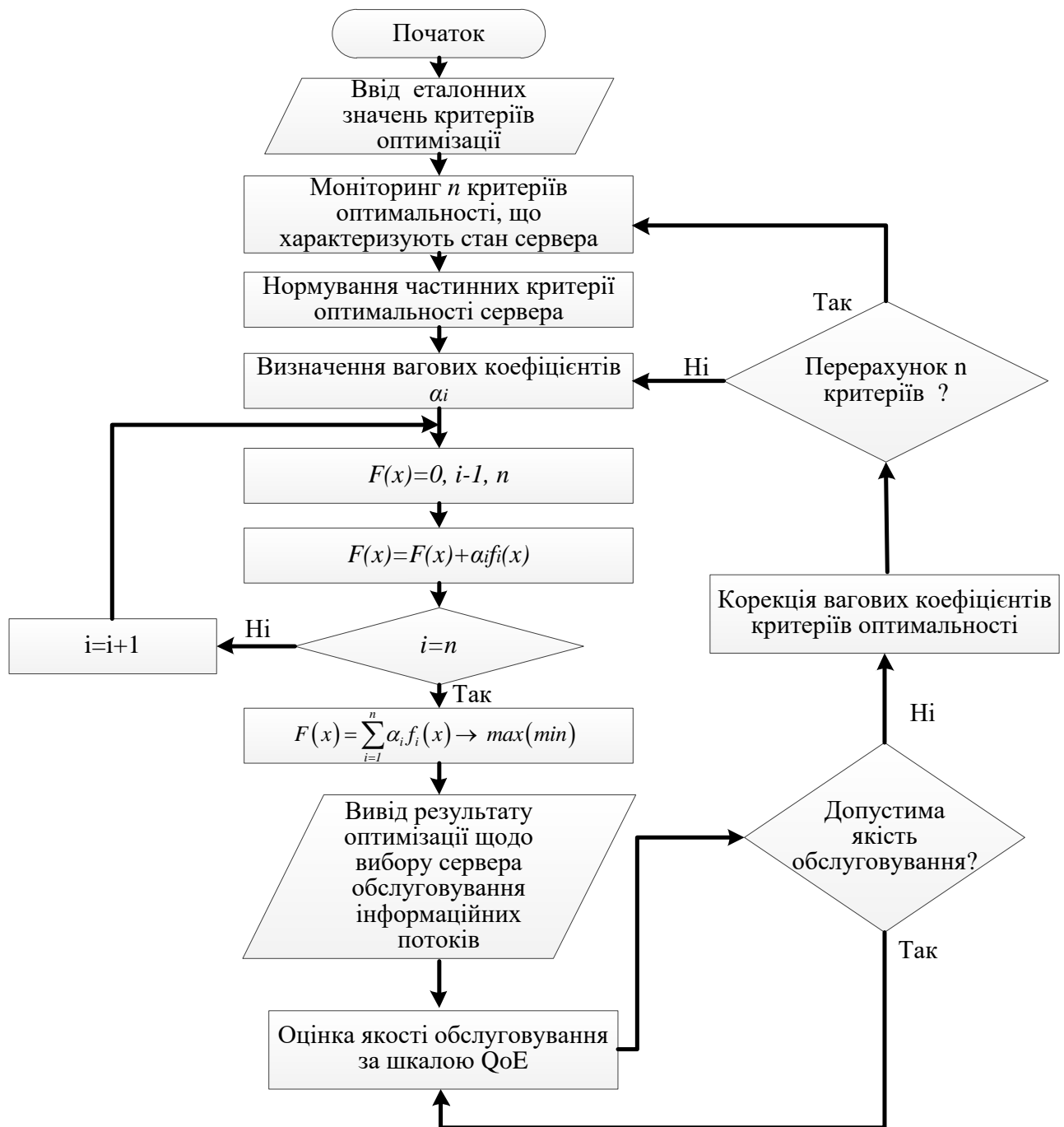


Рис.2.15 Блок-схема алгоритму розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для адаптивного визначення оптимального сервера обслуговування інформаційних потоків з використанням інтегрального адитивного критерію

Розглянемо приклад задачі, яку потрібно розв'язати для пошуку оптимального варіанта сервера з використанням інтегрального адитивного критерію. Часткові критерії, які характеризують функціональність сервера в

поточний момент часу є завантаження процесора CPU, завантаження RAM, тривалість оброблення запиту, ймовірність втрат запитів та завантаження мережевого інтерфейсу сервера. Відповідно найкращим варіантом сервера буде той у якого в процесі моніторингу забезпечується найменше значення завантаження процесора CPU, завантаження RAM, середня тривалість оброблення запитів, ймовірність втрат запитів та завантаження мережевого інтерфейсу сервера. Початкові дані для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Початкові дані для визначення оптимального сервера обслуговування на основі моніторингу стану їх функціонування

Критерій, i	Ваговий коефіцієнт, α_i	Виміряні значення критеріїв для різних варіантів серверів		
		Сервер 1	Сервер 2	Сервер 3
Завантаження CPU, %	0.3	60	70	50
Завантаження RAM, %	0.2	50	30	60
Середня тривалість оброблення запитів, мс	0.2	100	150	400
Ймовірність втрат запитів, %	0.2	0.5	0.8	0.3
Завантаження мережевого інтерфейсу, %	0.1	80	70	60

Цільова функція на основі узагальненого адитивного критерію запишеться в такий спосіб:

$$F(x) = \sum_{i=1}^5 \alpha_i \frac{f_i^0(x)}{f_i(x)} = \sum_{i=1}^5 \alpha_i f_i^H(x) \rightarrow \max \quad (2.27)$$

Як нормуючі дільники в даній задачі для вибору оптимального сервера приймемо найкращі мінімальні значення власних критеріїв, тобто $f_1^0(x) = 50$, $f_2^0(x) = 30$, $f_3^0(x) = 100$, $f_4^0(x) = 0.3$, $f_5^0(x) = 60$.

$$\text{Сервер 1. } F(x) = 0.3 \cdot \left(\frac{50}{60}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{30}{50}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{100}{100}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{0.3}{0.3}\right) + 0.1 \cdot \left(\frac{60}{80}\right) = 0.845,$$

$$\text{Сервер 2. } F(x) = 0.3 \cdot \left(\frac{50}{70}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{30}{30}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{100}{150}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{0.3}{0.8}\right) + 0.1 \cdot \left(\frac{60}{70}\right) = 0.707,$$

$$\text{Сервер 3. } F(x) = 0.3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{30}{60}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{100}{400}\right) + 0.2 \cdot \left(\frac{0.3}{0.3}\right) + 0.1 \cdot \left(\frac{60}{60}\right) = 0.75.$$

Таким чином, оптимальним є 1-й варіант сервера, тому що йому відповідає максимальне значення узагальненого адитивного критерію.

Висновки до 2-го розділу

Запропоновано концептуальну модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування. Встановлено, що запропонована модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі дає змогу гарантувати замовлений рівень сервісу аналізуючи QoE оцінки користувачів згідно договору SLA, шляхом адаптивного виставлення пріоритетів послуг, розподілу каналних ресурсів у мережевих вузлах, балансування навантаження на серверах та реалізації нових протоколів маршрутизації.

Удосконалено метод вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах, використання на практиці якого, дало змогу в процесі моніторингу підвищити до 70% точність оцінки стану каналу між комутаторами за критерієм затримки для низько пріоритетних потоків. А це, в свою чергу, дало можливість забезпечити правильність вибору оптимального шляху в процесі реалізації адаптивної маршрутизації, метрика, якої базується на багатокритеріальному аналізі стану каналу, одним і з яких є поточна затримка каналу.

Розроблено адаптивний алгоритм пріоритезації інформаційних потоків, який за рахунок автоматизації управління на рівні SDN контролера дає змогу динамічно змінювати пріоритети мережних потоків у випадку погіршення параметрів якості обслуговування трафіку в процесі передавання крізь мережу для підтримки замовленої якості обслуговування конкретних користувачів.

Розроблено метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах, який використовує адаптивну інтегральну метрику окремо для кожного класу інформаційних потоків. Дана метрика базується на вимірних параметрах QoS, що характеризують кожну гілку топології мережі в процесі її функціонування та необхідних вимог до якості надання сервісів згідно укладеного договору SLA. Перевагою запропонованого підходу до управління механізмами маршрутизації є його можливість розгортання, як в поточних програмно-конфігурованих мережах, так і в рамках окремо взятої сукупності вузлів зв'язку, об'єднані єдиною логікою організації мережевих ресурсів. Доведено, що розроблений метод маршрутизації дає необхідний інструмент для спрощення управління системою зв'язку, шляхом маніпуляції ваговими коефіцієнтами інтегральної метрики, тим самим зводячи завдання забезпечення необхідної якості надання сервісів до підбору їх «найкращих» значень адаптуючись під потреби користувачів. Прийняття рішень з перерахунку первинних параметрів мережі і безпосереднє коригування значень вагових коефіцієнтів метрики - основне завдання контролера програмно-конфігурованих мереж. Для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації пошуку оптимального шляху передавання даних в SDN вибрано та автоматизовано на контролері метод з використанням узагальненого адитивного критерію оптимальності.

Для визначення оптимального сервера обслуговування даних запропоновано алгоритм розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації з використанням інтегрального критерію. Відповідно до цього алгоритму для розв'язання даного завдання формується функція корисності, яка забезпечує

вимірювання ефективності запропонованого рішення, а процес переваги зводиться до порівняння числових значень. У такому випадку при ухваленні рішення, контролер SDN враховує, що один набір локальних значень критерію має перевагу перед іншими, якщо він відповідає більшому значенню функції корисності. У тому випадку, якщо якість сервісу погіршується, SDN контролер автоматично встановлює оптимальні вагові коефіцієнти для адаптації серверної площини з метою забезпечення необхідного рівня якості сервісу за рахунок відповідності рівню QoS, який забезпечує мережевою площиною.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ТА ЯКІСТЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ У ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ СЕРВІСНО- ОРІЄНТОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Структурно-функціональна схема імітаційної моделі програмно- конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі

Для проведення дослідження стосовно ефективності запропонованих методів адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування у роботі розроблено імітаційну модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі. Моделювання мережі здійснено за допомогою мови програмування Java та середовища Mininet version 2.2.1. Структурно-функціональна схема досліджуваної мережі складається із таких компонентів (рис.3.1):

- Моніторингової системи (на базі SDN контролера)
- Програмно-конфігурованих мережевих пристроїв (SDN комутаторів)
- Серверів доступу до сервісів
- Персональних комп'ютерів користувачів

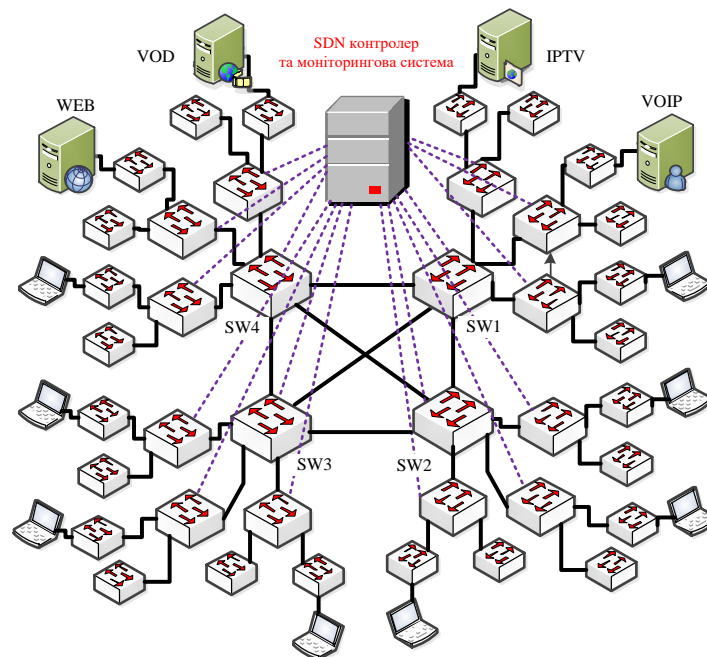


Рис. 3.1 Схема досліджуваної мережі з моніторинговою системою

Центральним елементом досліджуваної мережі є контролер, який відповідає за встановлення правил щодо обслуговування потоків в мережі на основі моніторингу основних параметрів якості функціонування її елементів. Розроблена автоматизована система моніторингу, що розгортається в межах контролера мережі, дає змогу без допомоги системного адміністратора визначати вузькі місця мережі та покращувати QoE оцінку користувачів, які потребують замовленої якості. Розроблена мережа розрахована на 50 користувачів і надасть можливість надавати їм хороший рівень таких сервісів як VOIP (голосові дані), IPTV, Інтернет дані, Медіа за запитом.

3.2 Аналіз та генерація трафіку інформаційно-телекомунікаційної мережі

Дані для аналізу трафіку та подальшого його використання у дослідженні було взято з програми Wireshark, яка дає можливість не просто проаналізувати пакети, але й розпізнати структуру різноманітних мережевих протоколів, що забезпечує можливість розібрати мережевий пакет та відобразити значення кожного поля протоколу будь-якого рівня. На основі аналізу характеристик реального мережевого трафіку у роботі створено генератор трафіку адекватність якого доведена у роботі [141]. На рис.3.2 продемонстрований агрегований мультисервісний трафік користувачів. Користувачі використовують усі представлені 4 сервіси у такій пропорції VOIP – 10 користувачів, IPTV – 20 користувачів, інтернет дані – 10 користувачів та IPTV – 10 користувачів.

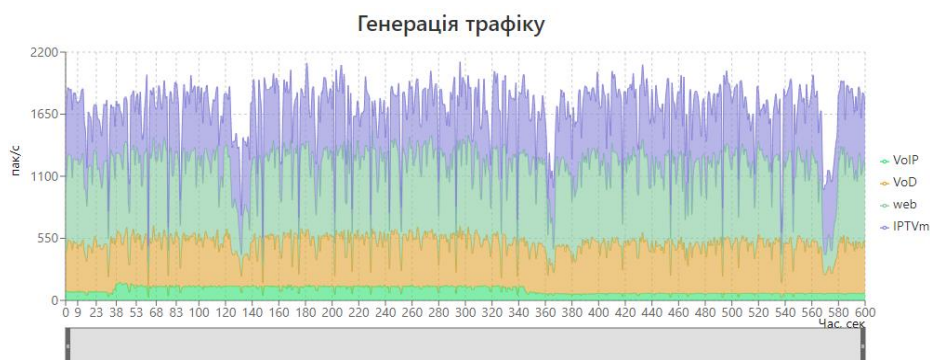


Рис. 3.2 Трафік різних типів сервісів

Для простоти дослідження в імітаційній моделі реалізовано моніторинг основних параметрів таких як, значення втрат (p), затримки (t) та джитеру (j) [142]. Припускається, що в процесі функціонування мережі без запропонованих рішень відбувається погіршення якості обслуговування для користувачів послуг IPTV (відеопотоків реального часу). На рис. 3.3 показано моніторинг параметрів QoS для 10 користувачів сервісу «IPTV».

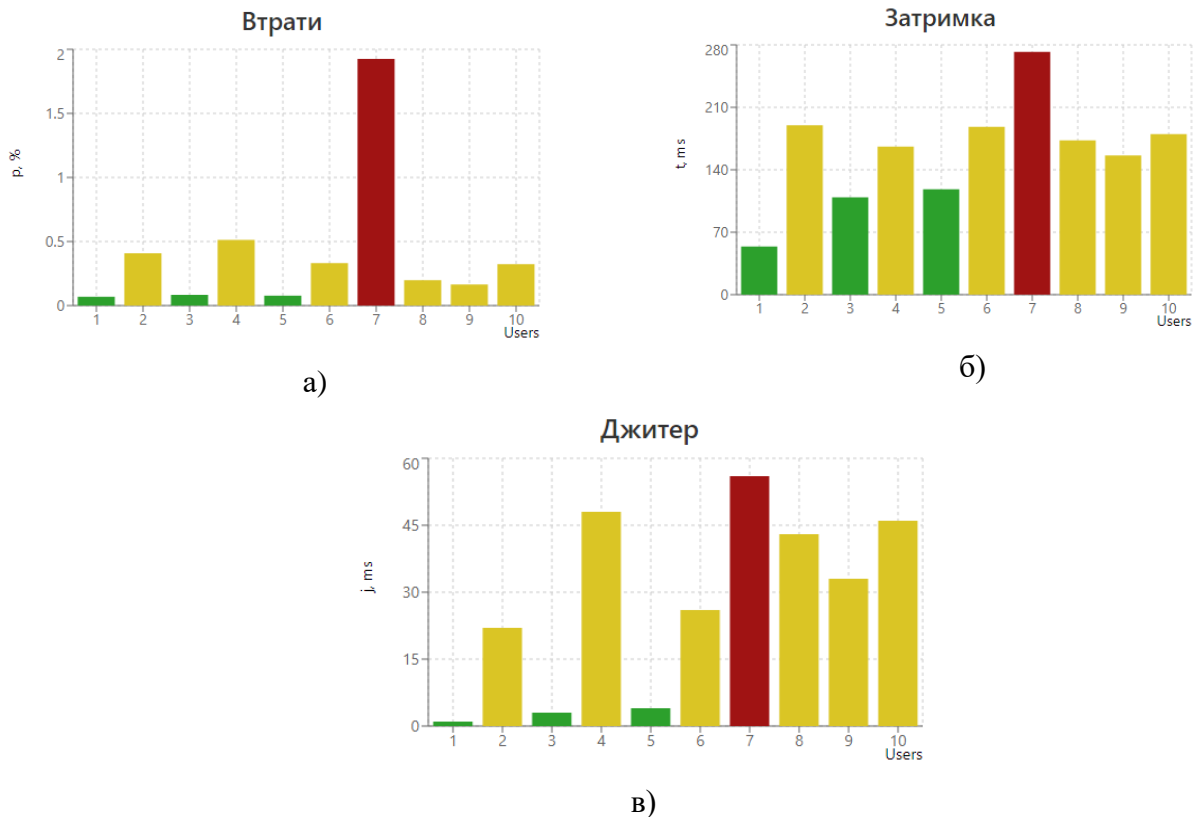


Рис. 3.3 Моніторинг параметрів QoS для користувачів сервісу «IPTV» а) – відсоток втрат пакетів, б) – затримки пакетів та в) –джитеру пакетів

Наступним кроком розроблена моніторингова система автоматизовано проаналізує отримані результати QoS та визначить за оцінкою QoE користувача в якого найгірші значення якості зв'язку. Оцінка QoE представлена значеннями від 1 до 5, де 1 – це найгірший показник, 5 – найвищий показник. Мінімальні вимоги QoS для відеопотоків реального часу при яких забезпечується висока якість сприйняття послуг користувачами визначені рекомендаціями ITU-T та підтвержені експериментальним шляхом у 4 розділі показано в таблиці 3.1

Таблиця 3.1

Мінімальні вимоги QoS для відео
потоків реального часу при яких забезпечується висока якість сприйняття
послуг користувачами

Сервіс	Затримка	Втрати пакетів	Джитер	Пропускна здатність
IPTV	≤ 150 мс	≤ 1 %	≤ 20 мс	-

Моніторингова система буде визначати та демонструвати користувача з найнижчим показником QoE, тобто в якого показник QoS відповідає відмітці QoE – погано. Система буде виводити незадовільні значення джитеру, втрат та затримки для користувача та зображати його червоним кольором як на рис. 3.4.

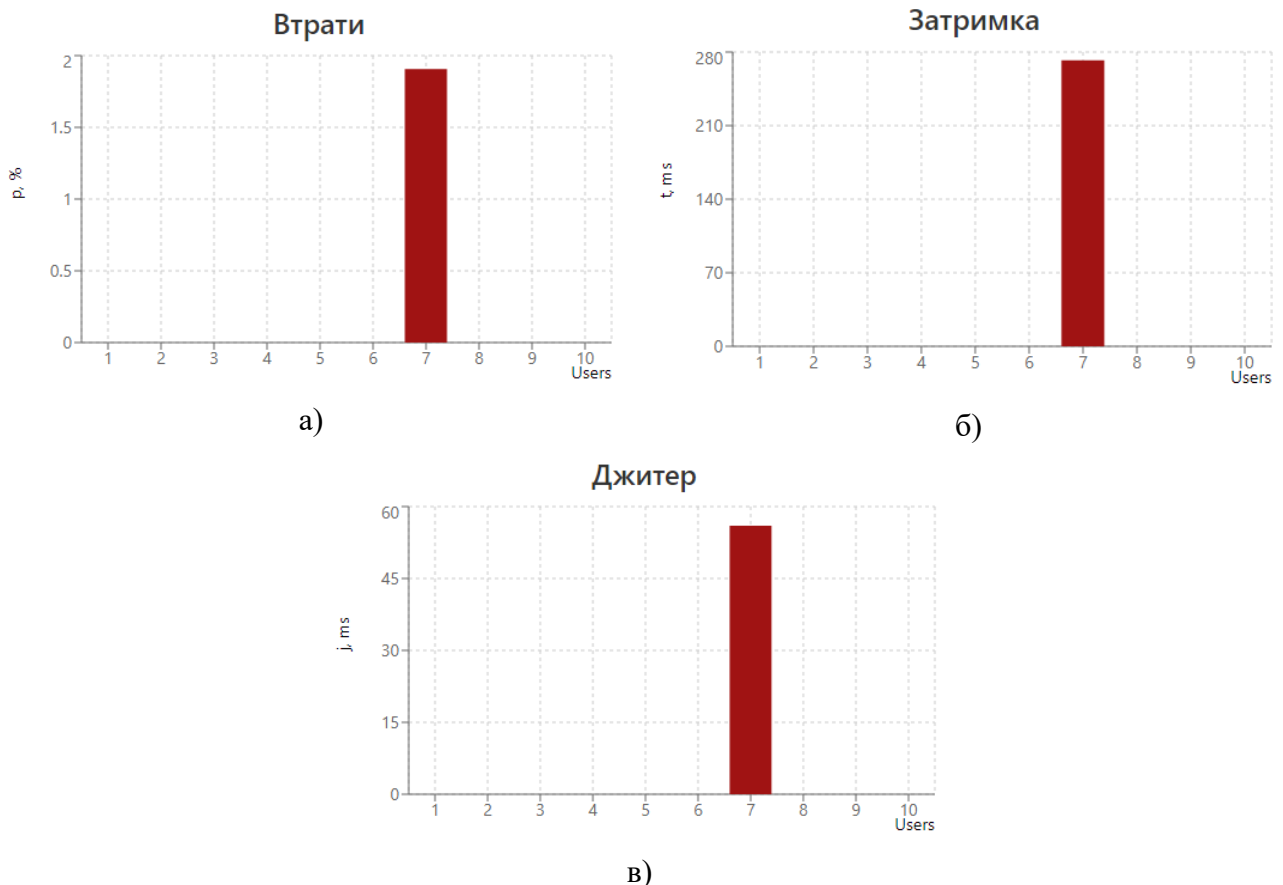


Рис. 3.4 Моніторинг параметрів QoS для користувачів сервісу «IPTV» у яких погана якість сприйняття послуги (користувач 7) а) – відсоток втрат пакетів, б) – затримки пакетів та в) – джитеру пакетів

Оскільки розроблена моніторингова система є автоматизованою, вона зможе самостійно покращувати якість сервісів, але тільки для того користувача мережі, якого вона буде не задовольняти і який безпосередньо звернеться з цим проханням письмово або дзвінком. Якщо користувач мережі звернувся з проханням покращити надання сервісу тоді система на основі запропонованої математичної моделі кореляції QoE оцінки від параметрів QoS (формула 4.2), представленої у вигляді функції зможе перевірити чи дійсно показники якості наданих послуг не відповідають належному рівню сприйняття сервісу підписаної згідно договору SLA (рис. 3.5).

Відношення показників якості до QoE

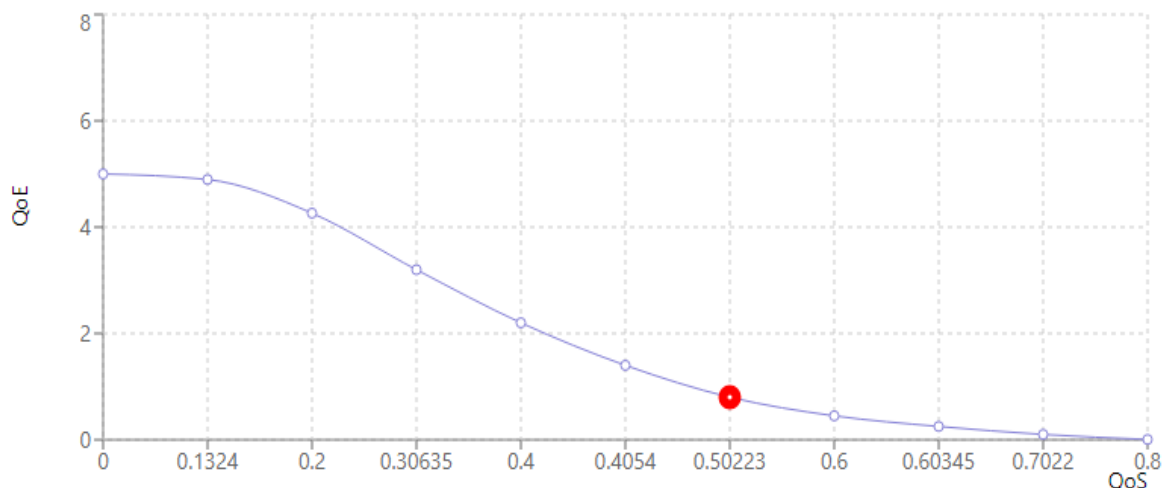


Рис. 3.5 Автоматизоване визначення QoE на основі QoS параметрів для користувача (7) який отримує незадовільну якість

Згідно рис.3.4 бачимо, що нормалізоване значення інтегрального параметра $QoS(x) = 0.5023$ при якому орієнтована оцінка QoE – 1 визначених згідно формули (4.1) та (4.2) відповідно. В результаті розрахунків бачимо, що дійсно є потреба у підвищенні якості надання сервісу IPTV для користувача №7. Базове налаштування модельованої мережі щодо існуючих засобів управління трафіком з яким порівнюватимуться запропоновані рішення - це є традиційна маршрутизація OSPF та алгоритм обслуговування черг FIFO та PQ.

3.3 Виявлення ділянок мережі, які спричиняють погану якість надання сервісу

Для підвищення якості надання інформаційного сервісу виникає необхідність визначення перевантажених ділянок. Аналізувати будемо користувача №7, який повідомив про неналежний рівень надання IPTV послуги [143].

Для аналізу нам знадобиться змодельювати мережу та розглянути по якому шляху передаються дані сервісу IPTV користувача №7, щоб наочно продемонструвати ділянки задіяних каналів та вузлів. На рис. 3.6 зображено весь шлях надходження пакетів від сервера послуг IPTV до користувача. Пакети в змодельованій мережі передаються по протоколу UDP (протокол датаграми користувачів), які використовуються для сервісу IPTV. Маршрутизація в мережі відбувається згідно метрики протоколу OSPF.

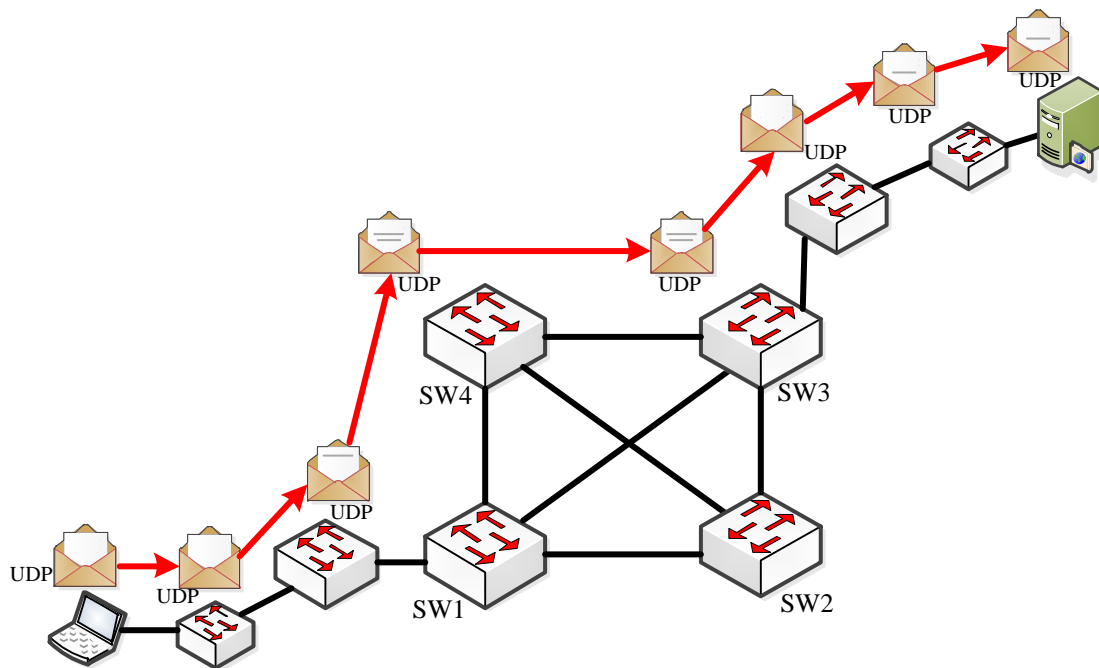


Рис. 3.6 Шлях пересилання пакетів сформованого для користувача №7 згідно протоколу OSPF

Встановлено, що відеопотік користувача в процесі передавання даних по встановленому шляху з кінця в кінець зазнає джитеру 58мс, розбиваємо шлях за кількість переходів між вузлами, щоб переглянути на якому вузлі джитер буде найвищим. На рис. 3.7 представлено вузьке місце в мережі, що призводить до джитеру.

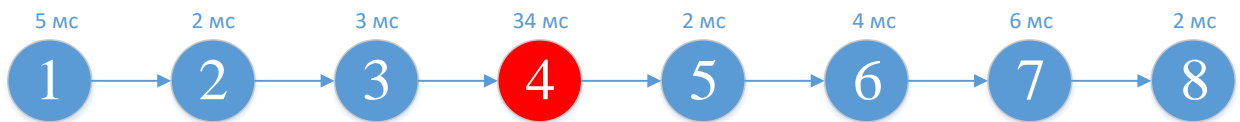


Рис. 3.7 Вузьке місце на шляху передавання з кінця в кінець з найбільшим параметром джитеру

Також, вище продемонстровані дослідження показали, що відеопотік IPTV користувача зазнає втрат пакетів у розмірі 1.8 %, а затримка пакетів становить 277 мс, дослідження яких продемонстровано на рису. 3.8, 3.9.

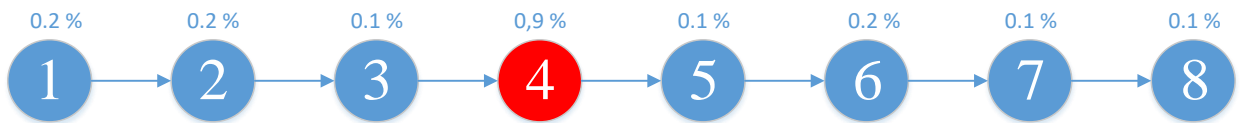


Рис. 3.8 Вузьке місце на шляху передавання з кінця в кінець з найвищим параметром втрат

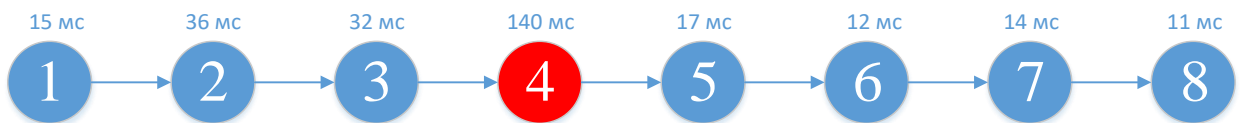


Рис. 3.9 Вузьке місце на шляху передавання з кінця в кінець з найвищим параметром затримки

Після виявлення проблемної ділянки мережі, проведено більш детальний аналіз вузького місця для того, щоб підібрати метод, який усуне завантаження, зокрема із 4 вузла, що і зображено на рис. 3.10. Виявлено, що вузол працює по принципу FIFO, тобто який перший пакет прийшов на вузол такий і буде

першим обслужений. При невисокому навантаженні на мережу даний принцип буде справлятися з поставленими задачами, але коли навантаження зростає, тоді пакети які не встигли обробитись потрапляють в буфер. Оскільки пакети затримуються у буфері в середньому на 300 мс, то вони просто втрачаються при перенавантаженому вузлі. Відповідно зростають втрати, стає більшим джитер та затримка.

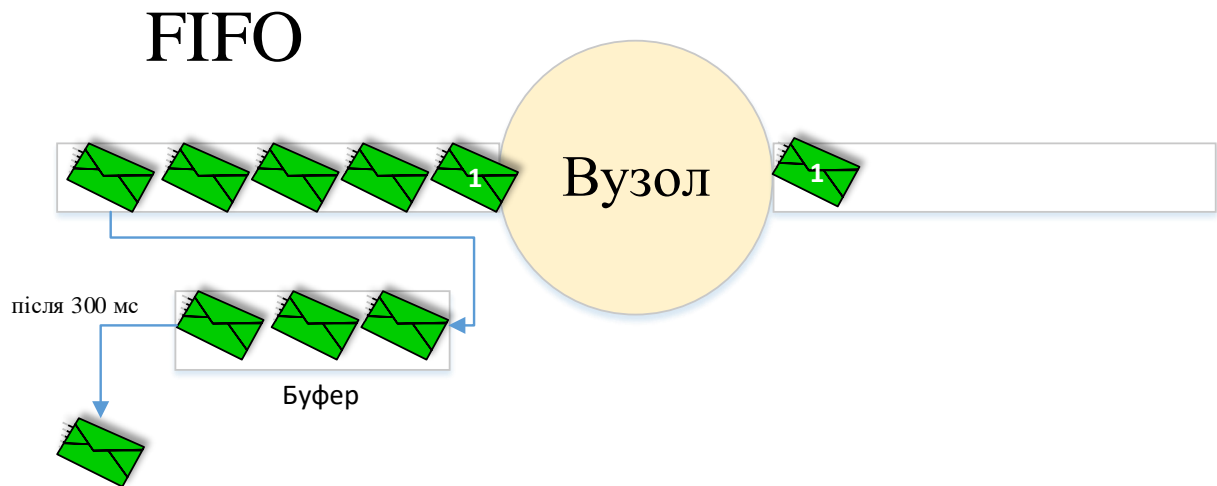


Рис. 3.10 Схема вузла мережі з алгоритмом обслуговування черг FIFO

Принцип FIFO є дієвим у випадку якщо система не навантажена, але коли система стає перевантаженою, з'являються вузькі місця, тоді QoE користувача починає погіршуватись прямо-пропорційно до погіршення якості наданих послуг.

3.4 Моделювання та дослідження пріоритетного обслуговування інформаційних потоків в телекомунікаційній мережі

Виникає необхідність сконфігурувати мережу таким чином, щоб покращити якість наданого сервісу. Тому у даній роботі пропонуються три підходи щодо покращення якості наданого сервісу користувачеві, який звернувся із скаргою про незадовільне надання послуг.

Метод перший полягає у сконфігуруванні мережі таким чином, щоб якість забезпечувалась шляхом пріоритезації потоків. На рис. 3.11 продемонстрована схема мережевого вузла з реалізацією пріоритетного обслуговування черг.

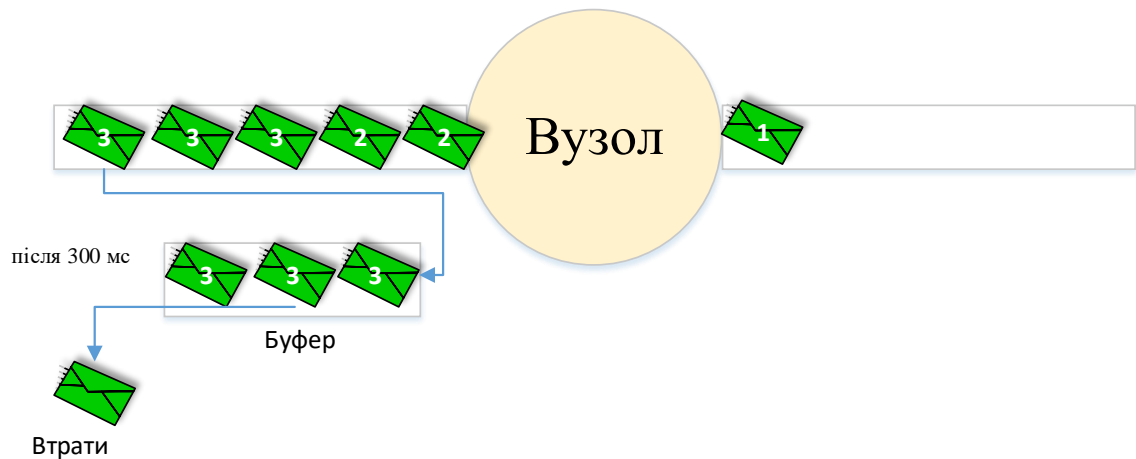


Рис. 3.11 Схема вузла мережі з пріоритетним обслуговування черг згідно стандартної класифікації послуг

Алгоритми пріоритетної обробки черг (Priority Queuing) дуже популярні в багатьох галузях обчислювальної техніки, зокрема в операційних системах, коли одним прикладним програмам потрібно віддати перевагу перед іншими при обробці їх в мультипрограмноій суміші. Застосовуються ці алгоритми також і для забезпечення переважної обробки одного класу трафіку в порівнянні з іншими. Механізм пріоритетної обробки трафіку базується на розділенні всього мережевого трафіку на невелику кількість класів, а потім – призначенні кожному класу деякої числової ознаки – пріоритету. Розділення на класи (класифікація) може проводитися різноманітними способами, проте найбільш відомим є стандартизоване надання пріоритетів [144]. Для прикладу використаємо універсальний алгоритм пріоритезації інформаційних потоків запропонованого у розділ 2, щоб надати пріоритети сервісами згідно рекомендацій CISCO класифікації. По суті, вибраний спосіб класифікації не пов'язаний безпосередньо з функціонуванням алгоритму обслуговування на основі пріоритетів – головне, щоб всі пакети, що поступають в чергу, мали

деякий пріоритет. Обслуговування конкретного абонента диференційоване в залежності від ймовірності користування послугою. На основі аналізу трафіку сформовано вимоги до структурних параметрів пристрою доступу до послуг при умові підключення різних груп абонентів. Представляємо параметри якості та ймовірність використання для кожної категорії сервісів у вигляді таблиці, яка реалізована у розробленій імітаційній моделі показані на рис. 3.12.

Вимоги до QoS для кожної категорії сервісів

Група домашніх користувачів	Втрати пакетів P, %	Затримка T, мс	Джитер J, мс	Смуга пропускання C, кбіт/с	Ймовірність використання P _{викор.} %
Голосові дані	0.1	150	10	64	0.35
IPTV	1.5	100	20	2048	0.25
Інтернет дані	0.1	1000	50	4096	0.2
Медіа за запитом	0.05	500	1000	2048	0.2

Рис. 3.12 Параметри якості обслуговування та ймовірність використання сервісу

Базуючись на даних таблиць, розраховуємо загальні зважувальні коефіцієнти для кожної категорії сервісів. Відносний коефіцієнт втрати пакетів, затримки пакетів, джитеру та пропускну здатності (смуги пропускання каналу) розраховуються на основі формул 2.6-2.9. Весь процес розрахунку пріоритетів у імітаційній моделі є автоматизованим.

Результати розрахунків відображаються на рис. 3.13:

Формування відносних коефіцієнтів

	Втрати пакетів p	Затримка t	Джитер j	Смуга пропускання c
Голосові дані	0.5	0.6666666666666666	1	0.015625
IPTV	0.03333333333333333	1	0.5	0.5
Інтернет дані	0.5	0.1	0.2	1
Медіа за запитом	1	0.2	0.01	0.5

Рис. 3.13 Формування відносних коефіцієнтів

Формуємо значимості послуг щодо забезпечення необхідної якості, використовуючи коефіцієнти B_p , B_t , B_j , B_c , що можуть приймати значення

від 1 до 3, де вище значення означає більшу значимість певного параметра якості обслуговування для даної категорії сервісу, що зображений на рис. 3.14.

Формуємо значимості послуг щодо забезпечення необхідної якості

Група домашніх користувачів	Втрати пакетів V_p	Затримка V_t	Джитер V_j	Смуга пропускання V_c
Голосові дані	2	3	3	1
IPTV	2	2	2	2
Інтернет дані	1	1	1	2
Медіа за запитом	2	2	2	3

Р

Рис. 3.14 Формування значимості інформаційних сервісів за критеріями QoS

Для кожного з параметрів якості QoS вводимо відносний коефіцієнт значимості параметра відносно інших. Поля в імітаційній моделі для перелічених вище даних наведені на рис. 3.15.

Відносний коефіцієнт значимості параметра відносно інших:

P_p	0.3
P_t	0.25
P_j	0.3
P_c	0.15

Рис. 3.15 Відносні коефіцієнти значимості параметрів відносно інших

Розраховуємо відносний пріоритет для кожної категорії послуг за формулою (3.1):

$$Pr_i = \frac{(p_i \cdot Vp_i \cdot Pp + t_i \cdot Vt_i \cdot Pt + j_i \cdot Vj_i \cdot Pj + c_i \cdot Vc_i \cdot Pc) P_{викор_i}}{\sum_{k=1}^7 (p_k \cdot Vp_k \cdot Pp + t_k \cdot Vt_k \cdot Pt + j_k \cdot Vj_k \cdot Pj + c_k \cdot Vc_k \cdot Pc) P_{викор_k}}. \quad (3.1)$$

Зображаємо результати на рис. 3.16, які були автоматично розраховані в імітаційній моделі.

Відносний та абсолютний пріоритет сервісів

Група домашніх користувачів	Ймовірність використання Рвикор, %	Відносний пріоритет Pr, %	Абсолютний пріоритет Pa
Голосові дані	0.35	0.5265661658194934	4
IPTV	0.25	0.21431343063052616	3
Інтернет дані	0.2	0.09456303949470636	1
Медіа за запитом	0.2	0.1645573640552741	2

Рис. 3.16 Відносний та абсолютний пріоритет сервісів

У моніторинговій системі розробленої імітаційної моделі, нажавши кнопку «Метод 1» буде можливість переглянути результати від застосування даного методу (рис. 3.16).

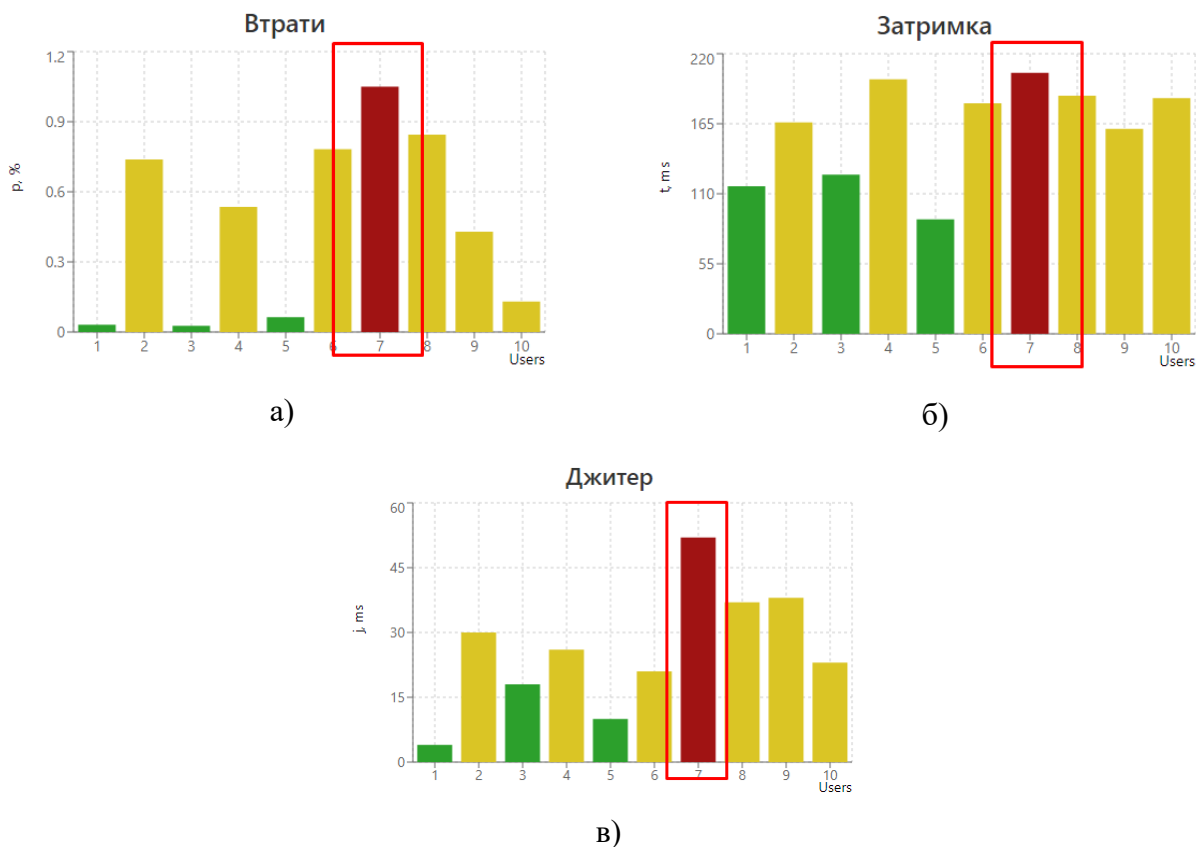


Рис. 3.16 Моніторинг параметрів QoS для користувачів сервісу «IPTV» після застосування пріоритетного обслуговування черг на основі стандартної класифікації а) – відсоток втрат пакетів, б) – затримки пакетів та в) – джитеру пакетів

Після застосування даного методу розглянемо відношення QoS до QoE, для того, щоб визначити на скільки піднялась якість задоволення користувачем згідно оцінки QoE. Результат зображений на рис. 3.17.

Відношення показників якості до QoE

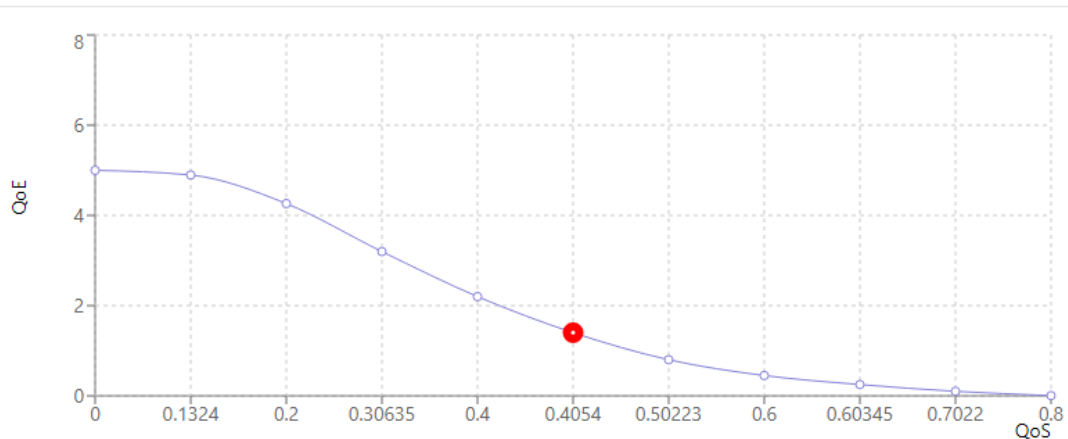


Рис. 3.17 Визначення рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від технічних параметрів QoS після застосування алгоритму пріоритетного обслуговування черг

3.5 Моделювання та дослідження ефективності застосування адаптивного алгоритму пріоритезації інформаційних потоків в умовах низьких значень QoE

Таким чином, надання пріоритетів сервісам згідно стандартизованої класифікації не дало змогу забезпечити необхідний рівень якості сприйняття послуг. Відповідно наступним кроком моделювання та дослідження було реалізація запропонованого алгоритму адаптивної пріоритезації інформаційних потоків, що дасть змогу динамічно міняти пріоритети під потреби користувача у випадку погіршення якості обслуговування для дотримання вимог згідно укладеного договору SLA. В даному дослідженні прийнято, що 10 користувачів користуються IPTV і один з них або декілька скаржаться на погану якість сприйняття сервісу, тоді на основі системи моніторингу в SDN мережі приймається рішення надати вищий пріоритет для цієї групи користувачів

сервісу IPTV. Даний процес обслуговування пакетів в мережевих пристроях згідно визначених пріоритетів інформаційних сервісів показано на рис. 3.18.

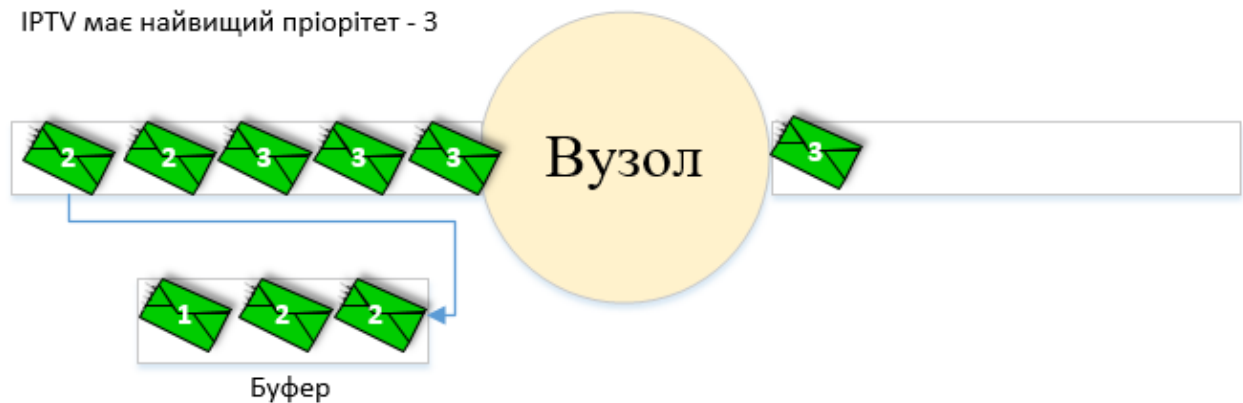


Рис. 3.18 Схема вузла мережі з пріоритетним обслуговування черг згідно запропонованої адаптивної пріоритезації послуг

Відповідно параметри якості та ймовірність використання для кожної категорії сервісів у вигляді таблиці, яка реалізована у розробленому середовищі моделювання і показані на рис. 3.19. Згідно алгоритму адаптивної пріоритезації потоків, системою прийметься рішення про корегування параметрів зокрема надання ймовірності використання послуги IPTV вищого значення по відношенню до інших інформаційних сервісів.

Вимоги до QoS для кожної категорії сервісів

Група домашніх користувачів	Втрати пакетів P,%	Затримка T, мс	Джитер J, мс	Смуга пропускання C, кбіт/с	Ймовірність використання R _{викор.} %
Голосові дані	0.1	150	10	64	0.1
IPTV	1.5	1000	50	4096	0.75
Інтернет дані	0.1	1000	1000	2048	0.1
Медіа за запитом	0.05	500	30	10240	0.05

Рис. 3.19 Параметри якості та ймовірність використання сервісу після застосування алгоритму адаптивної пріоритезації

Результати відносних коефіцієнтів продемонстровані на рис. 3.20:

Формування відносних коефіцієнтів

	Втрати пакетів p	Затримка t	Джитер j	Смуга пропускання c
Голосові дані	0.5	1	1	0.00625
IPTV	0.033333333333333333	0.15	0.2	0.4
Інтернет дані	0.5	0.15	0.01	0.2
Медіа за запитом	1	0.3	0.3333333333333333	1

Рис. 3.20 Формування відносних коефіцієнтів

Наступним кроком є формування значимості послуг щодо забезпечення необхідної якості, використовуючи коефіцієнти B_p , B_t , B_j , B_c , що можуть приймати значення від 1 до 3, де вище значення означає більшу значимість певного параметра якості обслуговування для даної категорії сервісу, результати розрахунку зображено на рис. 3.21.

Формуємо значимості послуг щодо забезпечення необхідної якості

Група домашніх користувачів	Втрати пакетів B_p	Затримка B_t	Джитер B_j	Смуга пропускання B_c
Голосові дані	2	2	2	1
IPTV	3	3	3	3
Інтернет дані	1	2	2	1
Медіа за запитом	1	1	1	1

Рис. 3.21 Формування значимості послуг після застосування алгоритму адаптивної пріоритизації

Відносний коефіцієнт значимості параметра QoS відносно інших залишається без змін.

Результати автоматизованого розрахунку відносного та абсолютного пріоритету для кожної категорії сервісів показано на рис.3.22.

Відносний та абсолютний пріоритет сервісів

Група домашніх користувачів	Ймовірність використання $R_{викор}, \%$	Відносний пріоритет $P_r, \%$	Абсолютний пріоритет P_a
Голосові дані	0.1	0.24393030873534943	3
IPTV	0.75	0.6562122514718526	4
Інтернет дані	0.1	0.04544514696760291	1
Медіа за запитом	0.05	0.05441229282519506	2

Рис. 3.22 Відносний та абсолютний пріоритет сервісів

Результати моніторингу параметрів якості обслуговування користувачів за критеріями затримки, втрат та джитеру пакетів, отримані шляхом імітаційного моделювання після застосування алгоритму адаптивної пріоритезації показано на рис. 3.23.

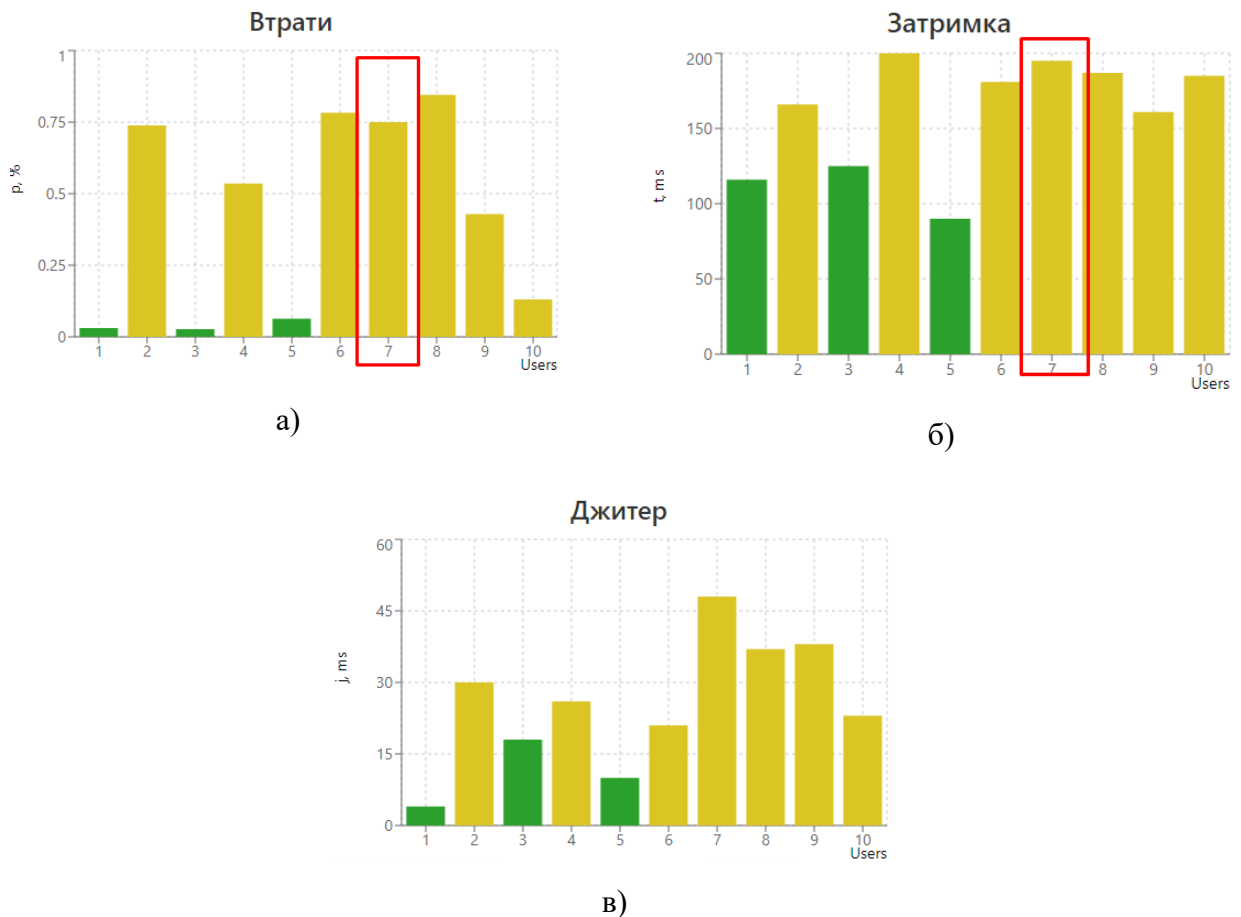


Рис. 3.23 Моніторинг параметрів QoS для користувачів сервісу «IPTV» після застосування запропонованого алгоритму адаптивної пріоритезації) – відсоток втрат пакетів, б) – затримки пакетів та в) –джитеру пакетів

Після застосування даного методу розглянемо відношення QoS до QoE, для того, щоб визначити на скільки піднявся рівень якості сприйняття IPTV сервісу визначеного на основі суб'єктивної п'ятибальної експертної оцінки QoE. Графічні результати зображені на рис. 3.24.

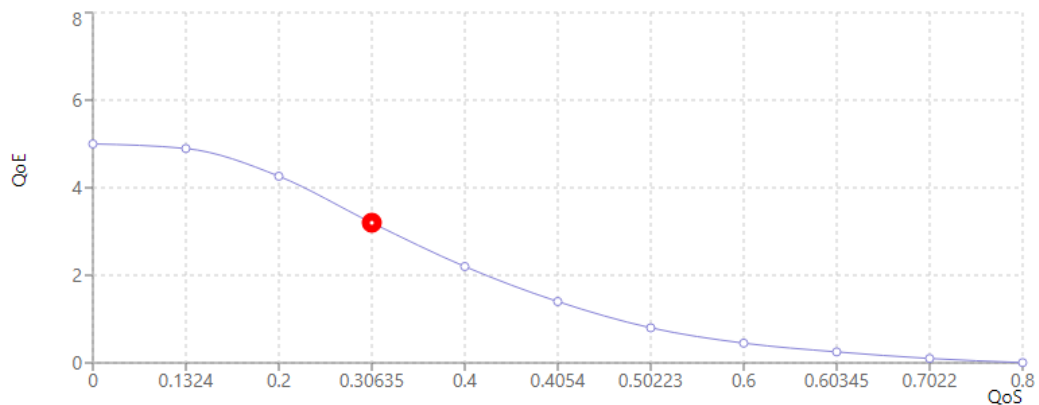


Рис. 3.24 Визначення рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від технічних параметрів QoS після застосування розробленого алгоритму адаптивної пріоритетизації сервісів

З результатів дослідження випливає, що застосування алгоритму адаптивної пріоритетизації інформаційних сервісів дає змогу в умовах обмеженості мережевих ресурсів підвищити рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу (IPTV). Зокрема, при використанні стандартного підходу щодо призначення пріоритетів послуг, рівень отриманої якості становить QoE – 1.8, а з розробленим алгоритмом адаптивної пріоритетизації, рівень якості сприйняття IPTV сервісу становить QoE – 3.3.

3.6 Моделювання та дослідження методу адаптивної маршрутизації відеопотоків реального часу щодо забезпечення необхідного рівня QoE

У зв'язку із тим, що вищезгадані підходи хоча і підвищили рівень задоволеності користувача, проте отримана якість не відповідає замовленій якості згідно договору SLA. Таким чином, у роботі для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування при перегляді відеосервісів IPTV пропонується використати розроблений метод адаптивної маршрутизації інформаційних потоків. Впершу чергу, для реалізації даного методу маршрутизації в імітаційній моделі мережі замість використання метрики

протоколу OSPF пропонується використати інтегральну метрику адаптивної маршрутизації запропонованої у розділі 2 формула 2.25. Дана метрика базується на багатокритеріальному аналізі стану функціонування вузлів, зокрема шляхом моніторингу таких параметрів як затримка, втрати пакетів, джитер та доступна пропускна здатність у каналах. Відповідно на основі розробленої імітаційної моделі в процесі її функціонування проведено моніторинг даних параметрів QoS та визначено оптимальний шлях для передавання відеопотоків IPTV базуючись на замовленому рівні QoE. На рис. 3.25 показано шлях передавання потоків IPTV встановлений на основі відомої метрики протоколу OSPF (червоний колір) та шлях передавання (зелений колір) визначений на основі метрики запропонованої адаптивної багатокритеріальної маршрутизації.

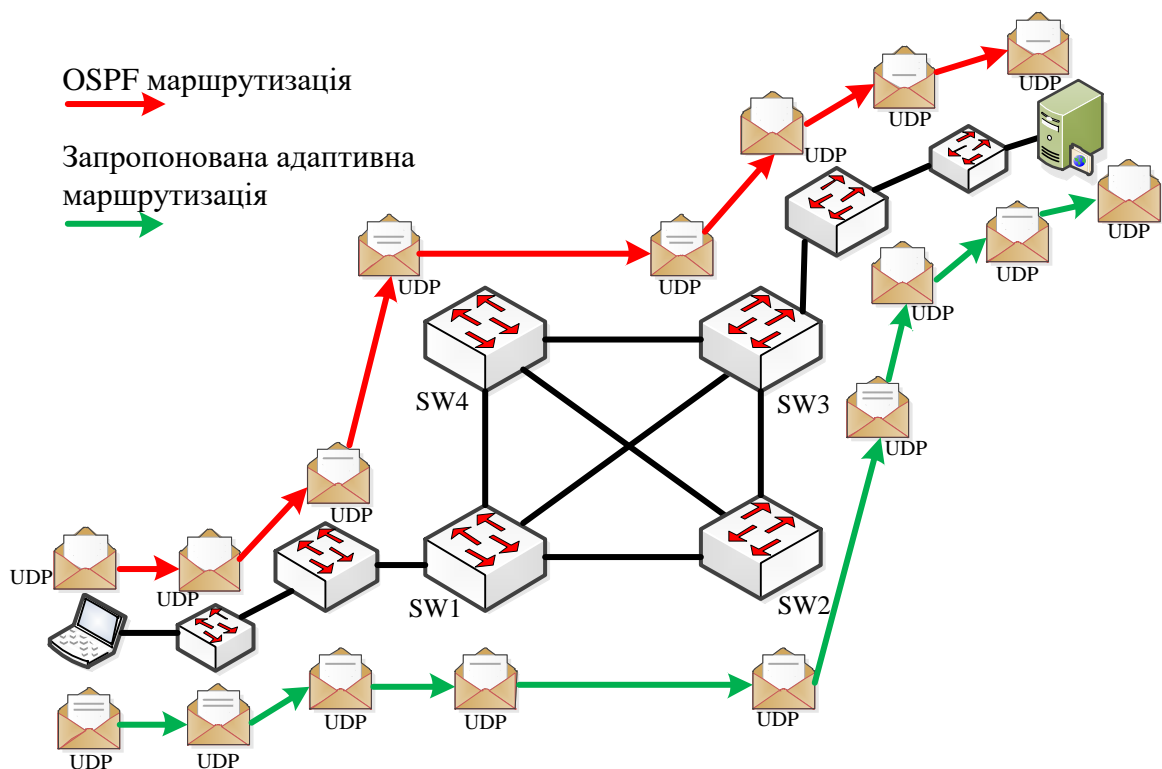


Рис. 3.25 Вибір шляху передавання для сервісу IPTV користувача №7 при традиційній маршрутизації OSPF (червоний шлях) та розробленої адаптивної маршрутизації (зелений шлях)

Після чого у роботі проведено оцінку параметрів якості обслуговування сервісів IPTV, зокрема і користувача №7, який отримував незадовільну якість сприйняття сервісу. Графічне покращення параметрів якості можна переглянути натиснувши «Метод 3» у імітаційні моделі, результати зображені на рис. 3.26.

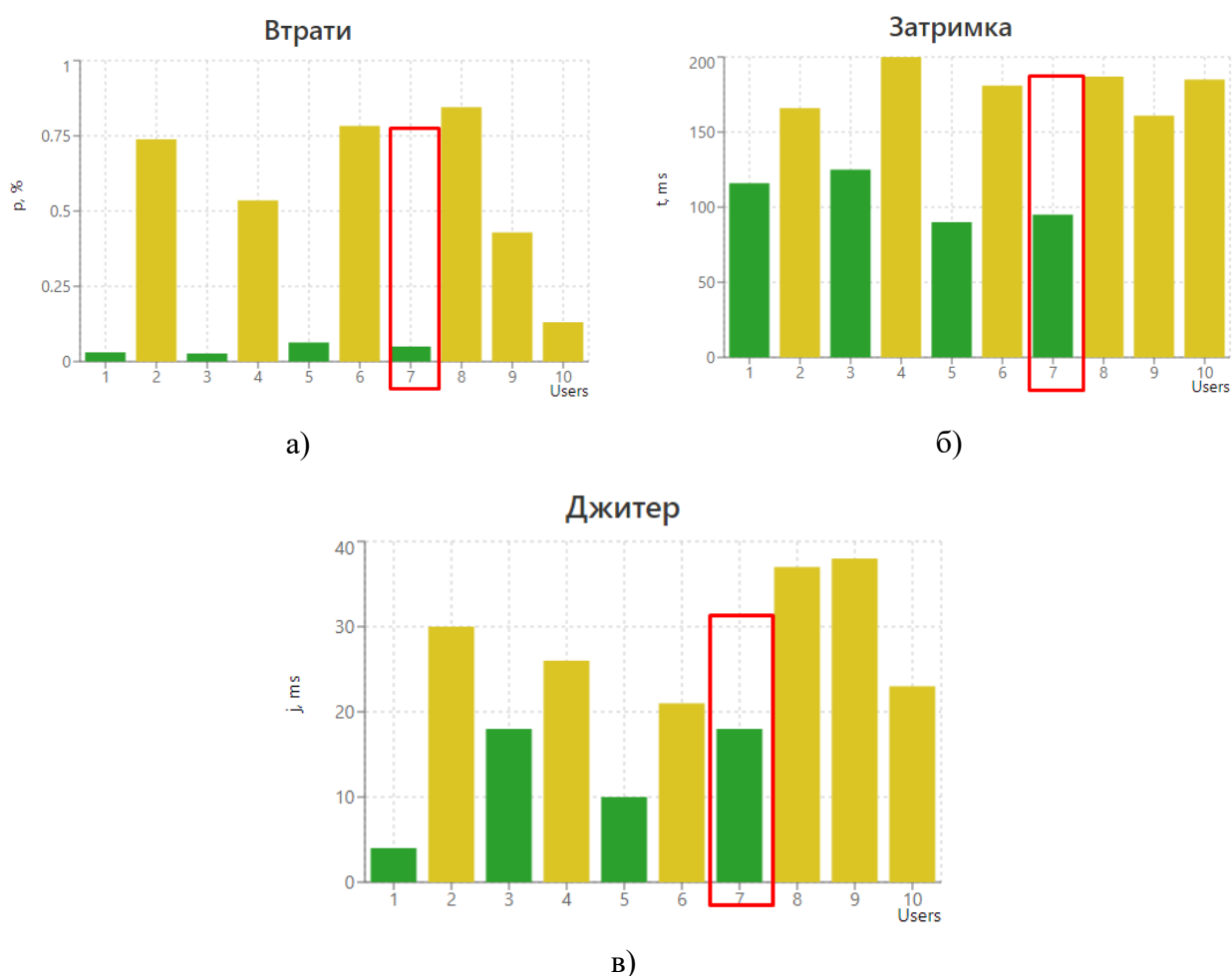


Рис. 3.26 Моніторинг параметрів QoS для користувачів сервісу «IPTV» після застосування методу адаптивної маршрутизації та пріоритезації послуг) – відсоток втрат пакетів, б) – затримки пакетів та в) –джитеру пакетів

Після застосування даного методу адаптивної маршрутизації оцінено рівень QoE, який надаватиметься користувачу 7 (рис. 3.27).

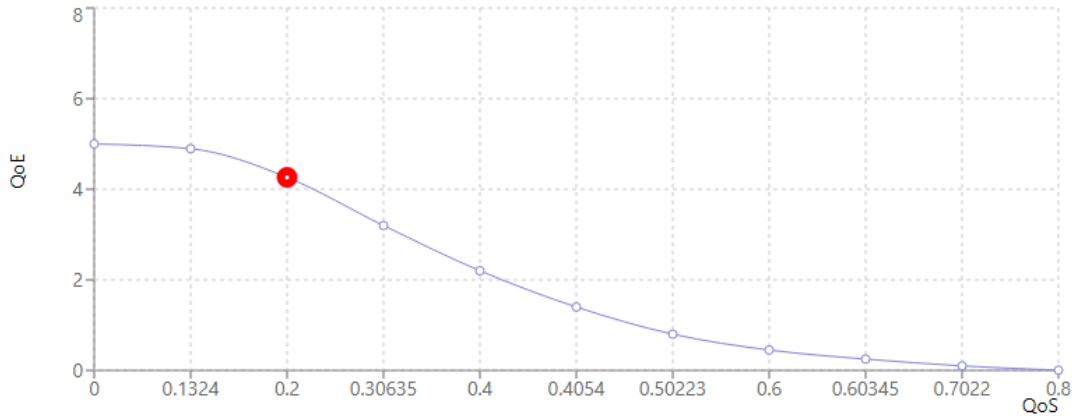


Рис. 3.27 Визначення рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від технічних параметрів QoS після застосування розробленого методу адаптивної маршрутизації та пріоритезації сервісів

З результатів моделювання бачимо, що комплексне використання методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних, дало змогу забезпечити високий рівень якості сприйняття IPTV сервісу в умовах перевантаження окремих елементів мереж, зокрема без використання комплексного підходу рівень отриманої якості становив QoE – 1.8, з використанням методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних рівень якості сприйняття становить QoE – 4.2.

На рис. 3.28 зображена динаміка покращення показника QoE з впровадженням різних розроблених методів та алгоритмів покращення якості надавання сервісу.



Рис. 3.28 Динаміка росту показника QoE

Найнижчий показник на графіку це початкове значення на момент звернення користувача зі скаргою про незадовільний рівень надання сервісів. З введенням існуючого методу «Пріоритезації» показник підвищився, проте перебував у межах – поганої якості перегляду. Далі запропоновано алгоритм «Адаптивної пріоритезації», який значно підвищив QoE до межі – допустимої якості перегляду, останній метод «Адаптивна маршрутизація» виявився найкращим і підняв показник QoE до позначки 4.2, що свідчить про добру якість перегляду. Оскільки користувачів в основному цікавить час обробки мережеских послуг, а не пропускна здатність мережі, наскрізний зв'язок між пристроями кінцевих користувачів необхідний для гарантування максимального рівня якості обслуговування. Таким чином, точна оцінка сприйнятого QoE для користувача дозволяє постачальникам послуг не тільки забезпечувати QoS, але й уникати надмірного забезпечення для задоволення вимог користувача.

На основі розробленої імітаційної моделі, створено емульовану SDN-мережу, що складається з 18 мережеских вузлів. Первинні параметри, що характеризують розроблену метрику, задавалися з умовою досяжності критичних ситуацій, тобто генерувався реальний трафік мережі, який володіє сплесковістю. Через такі сплески навантаження, характеристики мережі також погіршуються: збільшуються втрати, затримки при проходженні через вузли мереж, вирішення яких можливе шляхом логічного перерозподілу потоків даних. Завдання, яке вирішується системою зв'язку, зводилося до забезпечення замовленої якості передавання інформаційного потоку, для користувача, який отримує деградацію якості сприйняття послуги в умовах недостатності ресурсів.

В якості еталонних алгоритмів маршрутизації трафіку для порівняння були обрані алгоритми EIGRP і OSPF, які оперують лише чисельними заданими значеннями пропускної здатності і затримки в каналах зв'язку. В ході проведених досліджень отримані значення затримки, відсотки втрачених

пакетів і джитер для еталонних алгоритмів EIGRP і OSPF. Після чого, в процесі встановлення з'єднання, із значень метрики $w_{(i,j)}$ була складена матриця суміжностей, що описує поточний стан всієї системи зв'язку (SDN мережі) при заданих початкових коефіцієнтах, рівних $x_1, x_2, x_3, x_4 = 0,2$, що гарантують рівнозначний внесок кожного з основних параметрів метрики. У процесі моделювання встановлено, що середня затримка по відношенню до OSPF знизилася на 36%, до EIGRP - на 23%. Відсоток втрачених пакетів в свою чергу знизився на 80% по відношенню до OSPF і на 84,6% - по відношенню до EIGRP (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2

Результати моделювання якості функціонування SDN мережі при різних алгоритмах маршрутизації

Критерії оптимізації	Затримка, [мс]	Втрати пакетів, [%]	Джиттер, [мс]
Алгоритм маршрутизації			
OSPF	1242,45	10,82%	29,69
EIGRP	1019,44	24,60%	73
Адаптивна маршрутизація $x_1=x_2=x_3=x_4=0,2$	789,93	2,1%	22,46
Адаптивна маршрутизація для сервісів чутливих до затримок $x_2=[0,48;0,69]$ $x_1=x_3=x_4=(1-(x_2))/3$	510,52	24%	71,7
Адаптивна маршрутизація для сервісів чутливих до втрат $x_1=[0,3;0,35]$ $x_2=x_3=x_4=(1-(x_3))/3$	701,71	0%	10,99

В умовах передавання потоків реального часу пріоритетним критерієм є затримка в каналі зв'язку, відповідно вагові коефіцієнти знаходяться у межах діапазону значень $x_2=[0,48; 0,69]$ при рівних $x_1 = x_3 = x_4$ середня затримка за весь модельний час роботи мережі знизилася на 59% по відношенню до OSPF і на 50% по відношенню до EIGRP, що на 35% є більш ефективним, ніж в режимі роботи алгоритму при рівних значеннях вагових коефіцієнтів. При цьому

відсоток втрачених пакетів склав 24%, що може дуже негативно позначатися на наданні сервісів, чутливих до втрат пакетів. Таким чином, знайдений шлях є придатним для потоків чутливих до затримок та не чутливих до втрат. При пріоритетності критерію, який характеризує втрати в каналі в діапазоні значень $x_1 = [0,3; 0,35]$, при рівних $x_2 = x_3 = x_4$, середня затримка знизилася на 43% по відношенню до еталонного алгоритму OSPF і на 31% до EIGRP, що на 12% є більш ефективним, ніж при використанні методу маршрутизації при рівних значеннях вагових коефіцієнтів. При цьому втрати пакетів знизилися до нуля, що говорить про те, що був знайдений оптимальний шлях, що задовольняє поточним потребам мережі для передавання інформаційних потоків чутливих до втрат. Пошук оптимальних шляхів в умовах використання різної маршрутизації показано на рис.3.29.

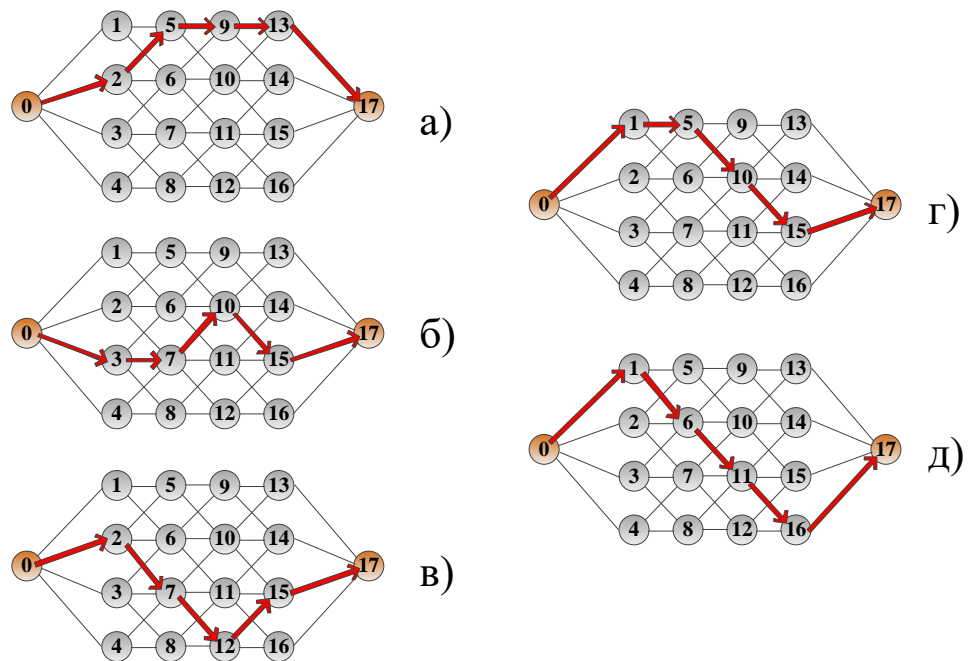


Рис. 3.29 Зміна маршруту інформаційних потоків при різних значеннях метрики: а) OSPF; б) EIGRP; в) запропонований адаптивний метод при рівних вагових коефіцієнтах; г) запропонований адаптивний метод для потоків чутливих до затримки; д) запропонований адаптивний метод для потоків чутливих втрат [133]

З нього видно, що при різних методах оцінки вартості каналів зв'язку змінюється маршрут потоку. На практиці завдання розробленого механізму, адаптивно підбирати маршрут, який максимізує якісні характеристики роботи мережі, виходячи з потреб системи і поточного стану всієї мережі, шляхом зміни вагових коефіцієнтів наведених в запропонованій метриці.

Висновки до 3-го розділу

Для проведення дослідження стосовно ефективності запропонованих методів адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування у роботі розроблено імітаційну модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі.

Зокрема, досліджено методи автоматизованого покращення якості надання послуг, безпосередньо для абонента який звернувся зі скаргою. Дані методи дають змогу частково або повністю покращити якість транслявання сервісів. А саме метод адаптивної пріоритезації, який базується на розставленні пріоритетів надходженням пакетам, суть якого полягає в наданні найбільшого пріоритету тому сервісу, яким користувачі найбільше користуються. Також в процесі моделювання досліджено запропонований метод адаптивної маршрутизації, який є спрямований на гарантоване покращення QoE для конкретного сервісу.

В процесі моделювання доведено, що розроблений алгоритм адаптивної пріоритезації сервісів телекомунікаційної мережі дав змогу в умовах обмеженості мережних ресурсів підвищити рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу. Зокрема, без застосування в імітаційній моделі алгоритму адаптивної пріоритезації потоків даних, рівень отриманої якості відеосервісу становить QoE – 1.8, а із застосуванням алгоритму пріоритезації, рівень якості сприйняття цього ж відео становить QoE – 3.3.

Також шляхом моделювання доведено, що комплексне використання методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків

даних дало змогу забезпечити високий рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу в умовах перевантаження окремих елементів мереж, зокрема без використання комплексного підходу рівень отриманої якості становив QoE – 1.8, а з використанням методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних рівень якості сприйняття відеосервісу становив QoE – 4.2.

Проведено верифікацію запропонованої адаптивної маршрутизації у порівнянні із існуючими алгоритмами маршрутизації OSPF та EIRGP шляхом імітаційного моделювання. Встановлено, що з використанням адаптивної маршрутизації забезпечується необхідний рівень якості обслуговування для конкретного типу трафіку, маніпулюючи ваговими коефіцієнтами метрики маршруту.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО- КОНФІГУРОВАНОЇ СЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МЕРЕЖІ З АДАПТИВНИМ УПРАВЛІННЯМ РЕСУРСАМИ ТА ЯКІСТЮ ОБСЛУГОВУВАННЯ

4.1 Особливості використання віртуального комутатора Open vSwitch для побудови програмно-конфігурованої мережі на основі мікроконтролерних платформ

У даній роботі пропонується малогабаритні комутаційні пристрої OpenFlow розгорнуті на основі платформи Raspberry, які є економічними, гнучкими і масштабованими і здатні забезпечити розроблені методи адаптивного управління QoS для комунікаційної інфраструктури, у тому числі Інтернету речей IoT. Для реалізації недорогого і гнучкого SDN комутатора використано відкриті SDN комутатори і багатоцільові міні-комп'ютери Raspberry pi 3. На основі проведеного аналізу встановлено, що Raspberry pi 3 model B є одним з найпопулярніших і дешевих пристроїв. Він підтримує чудову конфігурацію, включаючи 1,2 ГГц процесор, 1 Гб оперативної пам'яті, Wi-Fi, 1 вбудований порт Ethernet і до 4 USB-портів. Ці функції ідеально відповідають вимогам, що пред'являються до відкритих для дослідження віртуальних SDN комутаторів. Open vSwitch (OVS) вважається одним з найперспективніших у проведені тестових досліджень завдяки своїй високій сумісності і добре розробленим модулям. Open vSwitch, який може підтримувати протоколи OpenFlow, є програмним комутатором. Він включає в себе модуль ядра (openvswitch.ko) і домен простору користувача (vswitchd). Домен простору користувача розгортає комутатор і використовує модуль ядра для виконання деяких критичних за часом процесів комутації. Open vSwitch може працювати як програмний комутатор, запущений всередині гіпервізора, так і як окремий пристрій встановлений на фізичну машину без віртуалізації ресурсів. Фактично, це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом перенесено на безліч

платформ віртуалізації, а також на безліч чіпсетів комутації. На основі цього у роботі розроблено 4-портовий SDN комутатор з пристроєм Raspberry pi 3 і програмним забезпеченням OVS.

У зв'язку з апаратним обмеженням Raspberry pi 3, яка спочатку надавала тільки один порт Ethernet, пропонується використати ще 4 адаптера USB-to-Ethernet для реалізації чотирьох Ethernet-портів 100 Мбіт/с для розробленої системи, в той час як останній порт USB зарезервований для використання в майбутньому. Цей порт USB може бути використаний для внутрішнього каскадування декількох Raspberry pi 3 пристроїв для збільшення кількості портів комутатора SDN та забезпечення масштабованості системи. Крім того, у роботі встановлено програмне забезпечення OVS (версія 2.8) на Raspberry pi 3 пристрій під управлінням Raspbian OS версії 4.9.35-v7. Для управління розробленим SDN комутатором впроваджено програму управління комутатором 3-го рівня, засновану на мові Python, і розгорнуто контролер Floodlight. На рис.4.1 показано розроблену архітектуру комутації SDN на основі мікрокомп'ютерів.

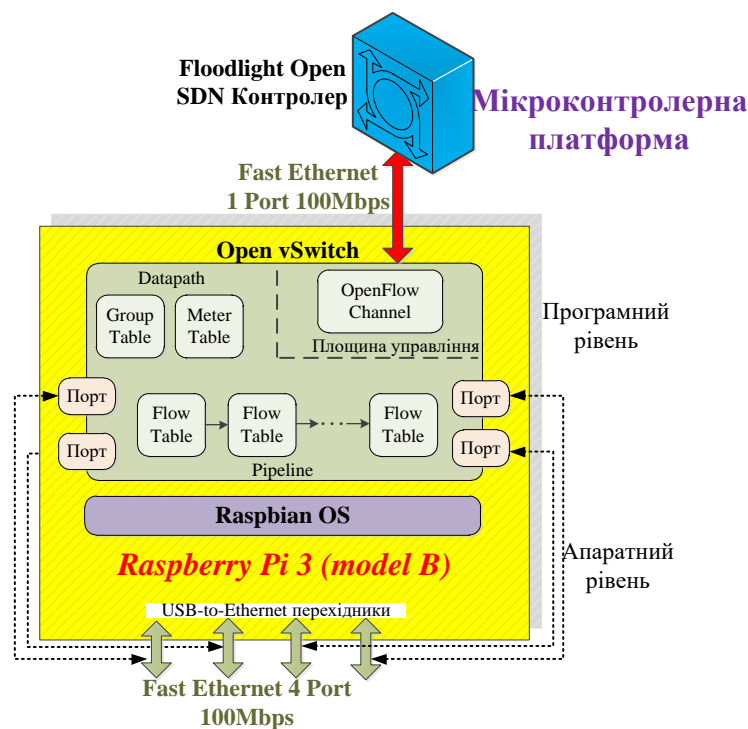


Рис. 4.1 Розроблена архітектура комутатора SDN на основі Raspberry Pi 3

Реальний прототип програмно-конфігурованого комутатора показано на рис. 4.2.

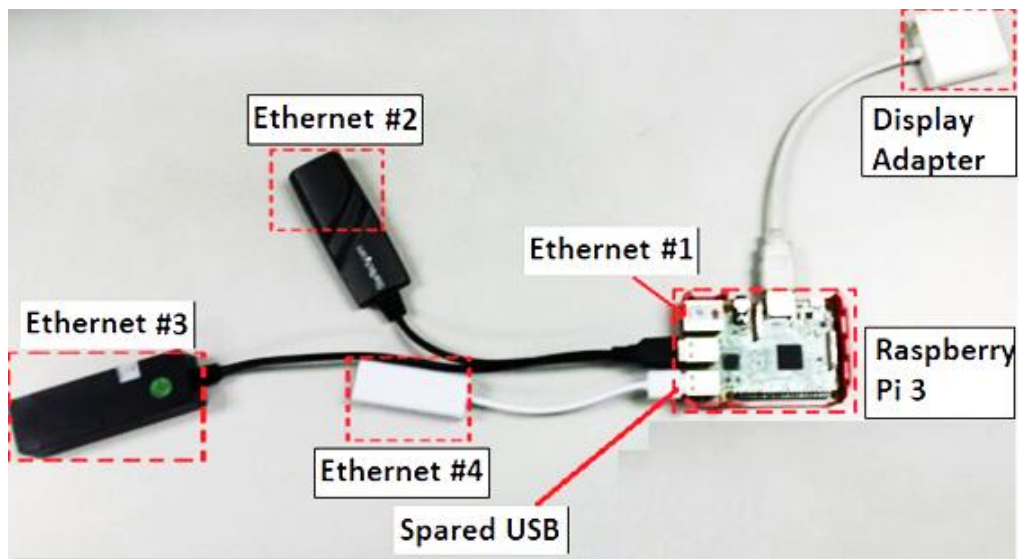


Рис. 4.2 Розроблений прототип SDN комутатора

Завдяки використанню OpenvSwitch, розроблена система, а саме програмний комутатор, пропонує багато переваг. Він здатний не тільки надавати той же функціонал, що і звичайний комутатор, але і бути легко розширюваним і гнучко конфігурованим. Розроблений комутатор налаштовується через просту базу даних (звану ovsdb), яка може бути модифікована деякими інструментами, включаючи ovsdb-client, ovsdb-tool і ovs-vsctl. База даних використовує протокол JSON для зв'язку і зберігання даних. Крім того, комутатор використовує інструмент ovs-ofctl для роботи з командами OpenFlow. Розроблений комутатор також може бути гнучко і легко розширений за рахунок необхідної додаткової функціональності, тобто надання гарантії щодо QoS. Однак, як програмний комутатор, комутатор страждає деякими недоліками, включаючи велику кількість необхідної обчислювальної потужності і більш повільну обробку комутатора.

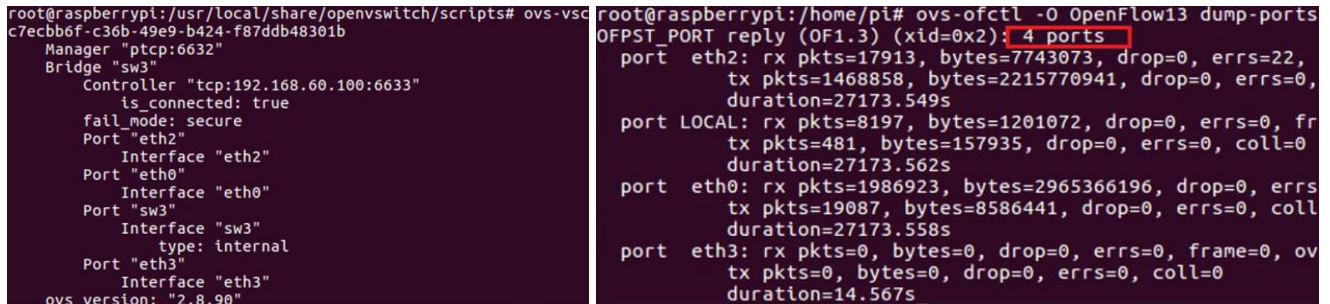
Розроблений SDN комутатор може забезпечити необхідну QoS (затримка, джитер, пропускна здатність і т.д.) завдяки використанню OpenFlow.

Комутатор, сумісний з OpenFlow, може гнучко управляти процесом передавання даних на рівні пакетів або на рівні потоків через свої контролери. Він дозволяє користувачам задавати, як обробляти окремі інформаційні потоки. Фактично, OpenFlow пропонує ряд інструментів програмування для створення / переробки і управління потоками / віртуальними потоками. Користувач може динамічно і гнучко визначати мережеві політики для розподілу мережевих ресурсів (черги, комутатори, маршрутизатори, ...) по різних потокам / віртуальним потокам з різними пріоритетами. Комутатор на базі OpenFlow підтримує таблиці потоків, і на основі записів в таблицях потоків приймає рішення про переадресації пакетів на відповідний порт або про скидання / відкидання пакетів. Якщо поля заголовків пакету не збігаються ні з одним із записів в поточних таблицях потоків, комутатор інкапсулює і відправляє пакет до контролера [145]. Контролер бере на себе відповідальність і вирішує, як працювати з пакетом, тобто повідомляє комутатор про необхідність відкинути пакет або зробити новий потік шляхом введення в таблицях потоків для роботи з новим потоком.

4.2 Конфігурація розробленого прототипу SDN комутатора розгорнутого на основі платформи Raspberry Pi 3 Model B

У цій частині проведено тестування розробленого комутатора SDN. Для тестування побудовано експериментальний макет, що включає розгорнутий комутатор SDN, контролер Floodlight і 2 хоста, підключених до 2 з 4 портів Ethernet. Зверніть увагу, що розроблений комутатор може працювати з іншими контролерами SDN, такими як POX, NOX, Ryu, для простоти, у роботі встановлено контролер Floodlight, який базується на Python. У роботі для тестування та аналізу роботи системи також використано програмне забезпечення Wireshark [146]. На рис. 4.3 показано конфігурацію розробленої нами системи в тому вигляді, в якому вона була спроектована. На рис.4.2, розроблений прототип комутатора названо sw3, який був підключений до

контролера за адресою 192.168.60.100 (порт 6633). Кількість портів і версія програмного забезпечення OVS були чітко перевірені на рис. 4.3б, а на рис. 4.3б показано активний стан всіх чотирьох портів і використовувана версія протоколу OpenFlow (OpenFlow 1.3).



The image contains two terminal screenshots. Screenshot (a) on the left shows the configuration of an Open vSwitch (OVS) bridge named 'sw3'. It lists the controller IP (192.168.60.100:6633), fail mode (secure), and four ports: eth2, eth0, sw3, and eth3. Screenshot (b) on the right shows the output of the 'ovs-ofctl -O OpenFlow13 dump-ports' command, displaying statistics for each of the four ports (eth2, LOCAL, eth0, eth3), including received and transmitted packets and bytes.

а)

б)

Рис. 4.3 Підтвердження конфігурації комутатора SDN: а) – Конфігурація та активність 4 фізичних портів Ethernet розробленого комутатора SDN та б) – Стан фізичних портів Ethernet

Більш того, на рис.4.4 продемонстровано результати тестування, отримані за допомогою команд ping між вузлами. Результати підтвердили, що розроблена SDN система працює, комутатор (192.168.60.20) отримує та відповідно обмінюється повідомленнями OpenFlow з контролером (192.168.60.100) і успішно встановлює з'єднання. Для установки з'єднання управління, SDN контролер і SDN комутатор обмінюються Hello повідомленнями, а потім, SDN контролер посилає запит на визначення конфігурації OVS. OVS відповідає повідомленням Feature. Для запиту інформації про потік, тобто про порт, інтерфейс, контролер посилає запит і отримує відповідь OVS з відповідним повідомленням. Повідомлення про зміну потоку використовується, коли потрібна зміна стану OVS. Потім, повідомлення Echo також можуть використовуватися для інформування про мережеві параметри, таких як затримка, пропускна здатність, в той час як повідомлення Packet in і Packet out використовуються для передачі призначених для користувача даних.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
984	20.972889598	192.168.60.100	192.168.60.20	OpenFlow	76	Type: OFPT_HELLO
990	20.973256127	192.168.60.100	192.168.60.20	OpenFlow	76	Type: OFPT_FEATURES_REQUEST
1004	20.977002718	192.168.60.20	192.168.60.100	OpenFlow	100	Type: OFPT_FEATURES_REPLY
1017	20.983802167	192.168.60.100	192.168.60.20	OpenFlow	84	Type: OFPT_MULTIPART_REQUEST,
1023	20.984119850	192.168.60.100	192.168.60.20	OpenFlow	148	Type: OFPT_FLOW_MOD
1030	20.986727906	192.168.60.20	192.168.60.100	OpenFlow	276	Type: OFPT_MULTIPART_REPLY, OF
1136	21.933708212	192.168.60.20	192.168.60.100	OpenFlow	170	Type: OFPT_PACKET_IN
1172	21.947355474	192.168.60.100	192.168.60.20	OpenFlow	168	Type: OFPT_PACKET_OUT
1206	22.633177407	192.168.60.20	192.168.60.100	OpenFlow	262	Type: OFPT_PACKET_IN
1218	22.639508683	192.168.60.100	192.168.60.20	OpenFlow	259	Type: OFPT_PACKET_OUT

Рис.4.4 Повідомлення про відкриття потоку між контролером SDN і комутатором SDN

Таким чином, у роботі розроблено економічно ефективний масштабований SDN комутатор, який дає змогу використовувати протокол OpenFlow 1.3 і механізми QoS, зокрема, що може бути використаний для побудови мережної платформи Інтернету речей. Конфігурація комутатора була перевірена в ході тестових експериментів.

4.3 Експериментальна схема розробленої програмно-конфігурованої мережі для тестування пропускної здатності та затримки передавання даних

У роботі проведено тестування роботи розробленої програмно-конфігурованої мережі. SDN комутатор в тестовому середовищі побудований на мікроконтролерній платформі Raspberry Pi 3 і використовує загальну операційну систему на базі ядра linux під назвою Raspbian. Таким чином, всі пристрої можуть бути легко переналаштовані для оцінки різних мережесередовищ. У ролі клієнта та сервера для генерації потоків використано ноутбуки на яких встановлено генератор трафіку Iperf. Iperf3 - клієнт-серверна програма - генератор TCP і UDP трафіку для тестування пропускної здатності

мережі. З її допомогою досить просто виміряти максимальну пропускну здатність мережі між сервером і клієнтом і провести тестування навантаження каналу зв'язку. Для виконання тестування програма повинна бути запущена на двох пристроях (це можуть бути як комп'ютери, так і смартфони, планшети). Один з них буде виконувати роль сервера, а інший роль клієнта. Між ними і буде відбуватися передача даних для вимірювання пропускну здатності з'єднання.

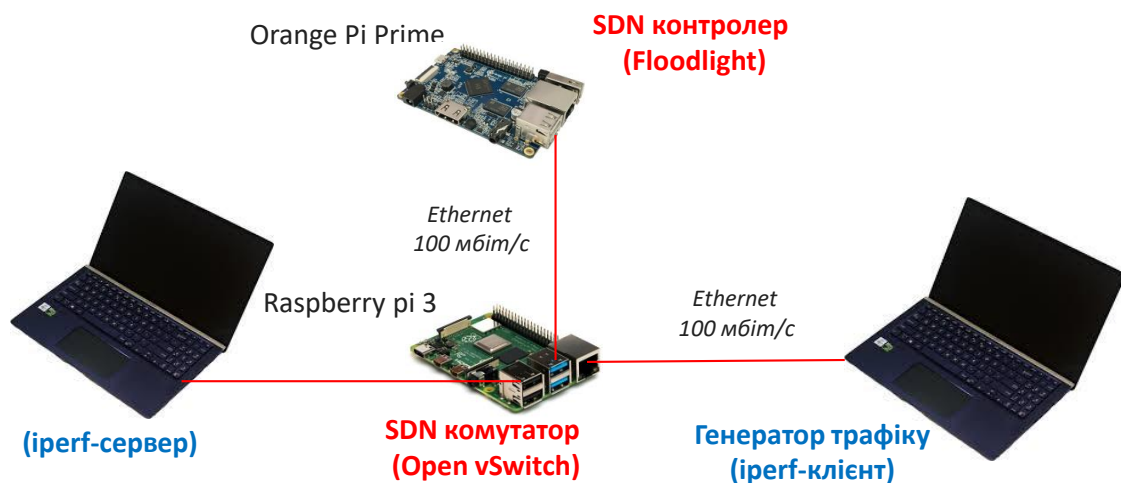


Рис. 4.5 Експериментальна схема для дослідження якості функціонування розробленої програмно-конфігурованої мережі

Рис. 4.5 відображає структуру експериментальної схеми на якій показано взаємодію між Raspberry-Pi OVS і контролером Floodlight на ядрі операційної системи Ubuntu для платформи Orange Pi Prime. Пропонований контролер Floodlight складається з основних модулів: QoS, базова маршрутизація та брандмауер. Таким чином, всі пристрої можуть бути динамічно змінені як мережевий комутатор або хост. Пристрій SDN контролер на експериментальній схемі використовує програмне забезпечення контролера Floodlight. Контролер Floodlight може працювати з великою кількістю устаткування, зберігаючи при цьому високий рівень обслуговування. Таким чином, на розробленому випробувальному стенді можна використовувати різні додатки, такі як адаптивне управління QoS, балансування навантаження і перегляд топології

SDN. Контролер Floodlight може не тільки легко управляти списком існуючих модулів, але і писати на них нові модулі (у нашому випадку це реалізація адаптивної маршрутизації та пріоритезації потоків), використовуючи популярну мову JAVA.

На першому етапі дисертаційного дослідження протестовано максимальну швидкість передачі даних на портах розробленого SDN комутатора. Для цього спочатку було зроблено запит на інформацію про швидкість порту у системного контролера, використовуючи в 2018 році на Міжнародній конференції за передовими технологіями зв'язку (ATC) команду запиту конфігурації, `ovs-ofctl show` (див. рис. 4.6). Швидкість 100 Мбіт/с підтверджена для всіх чотирьох портів комутатора SDN. Для тестування максимальної пропускної здатності фізичних портів використано генератор трафіку `iperf`, який генерує трафік і передає його з хоста 1 на хост 2. Швидкість передачі даних по трафіку збільшувалась з 10 Мбіт/с до 2048 Мбіт/с. Виміряна пропускна здатність показана на рис. 4.7. Показано, що максимальна швидкість фізичного порту становить 100 Мбіт/с, коли швидкість трафіку перевищує 100 Мбіт/с, додатковий трафік не пропускається.

```
root@raspberrypi:/home/pi/script# ovs-ofctl show sw3
OFPT_FEATURES_REPLY (xid=0x2): dpid:0000000000000003
  n_tables:254, n_buffers:0
  capabilities: FLOW_STATS TABLE_STATS PORT_STATS QUEUE_STATS ARP_MATCH_IP
  actions: output enqueue set_vlan_vid set_vlan_pcp strip_vlan mod_dl_src mod_dl_dst mod_nw_src
  1(eth0): addr:b8:27:eb:6e:db:69
    config: 0
    state: 0
    current: 100MB-FD AUTO_NEG
    advertised: 10MB-HD 10MB-FD 100MB-HD 100MB-FD COPPER AUTO_NEG AUTO_PAUSE AUTO_PAUSE_ASYM
    supported: 10MB-HD 10MB-FD 100MB-HD 100MB-FD COPPER AUTO_NEG
    speed: 100 Mbps now, 100 Mbps max
  2(eth2): addr:00:00:00:00:00:00
    config: 0
    state: 0
    current: 100MB-FD AUTO_NEG
    advertised: 10MB-HD 10MB-FD 100MB-HD 100MB-FD COPPER AUTO_NEG AUTO_PAUSE AUTO_PAUSE_ASYM
    supported: 10MB-HD 10MB-FD 100MB-HD 100MB-FD COPPER AUTO_NEG
    speed: 100 Mbps now, 100 Mbps max
```

Рис. 4.6 Швидкість передавання даних по портах SDN комутатора

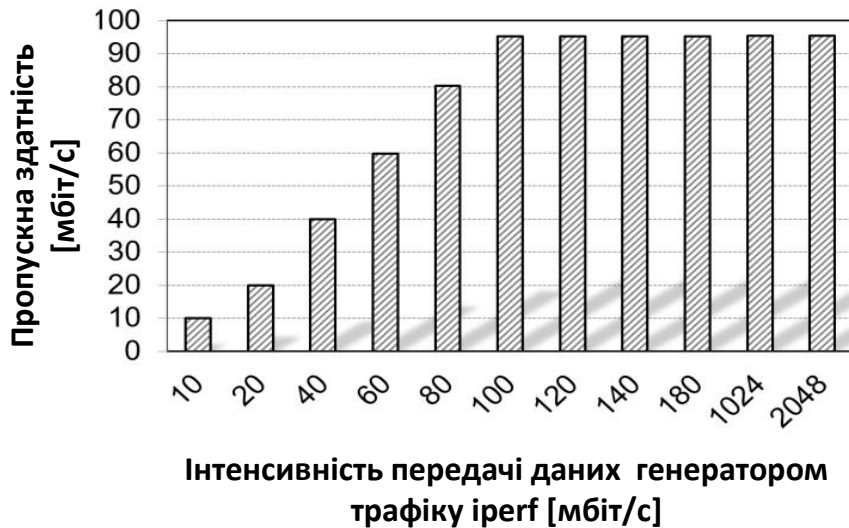


Рис. 4.7 Тестування швидкості передавання даних по фізичних портах комутатора SDN

На другому етапі дослідження, проведено тестування середньої затримки передавання пакетів в залежності від завантаження інтерфейсу на портах розробленого SDN комутатора (рис. 4.8). Для цього також використано генератор трафіку iperf, який генерує трафік і передає його від хоста до клієнта. Завантаження генерувалось від 10 Мбіт/с до 100 Мбіт/с з кроком 10 Мбіт/с.

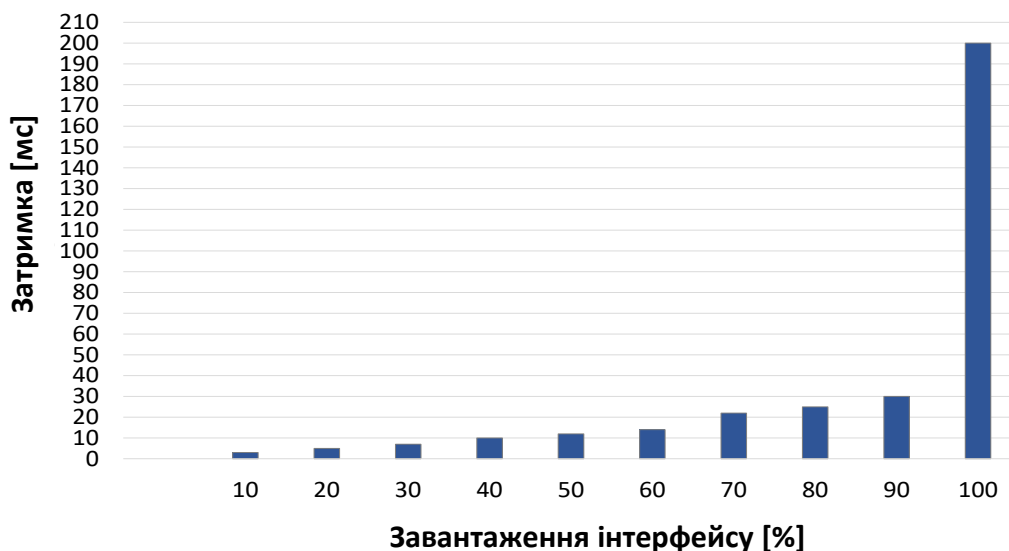


Рис. 4.8 Середня затримка пакета в залеженості від завантаження каналу на одному із портів комутатора SDN

З результатів дослідження бачимо, що коли навантаження коливається в межах від 10-90% на вхідний інтерфейс комутатора, затримка не перевищує 30мс. Таким чином, можна зробити висновок, що розроблена програмно-конфігурована мережа є придатною для передавання потоків реального часу.

4.4 Дослідження впливу параметрів QoS на якість сприйняття відеопотоків реального часу з допомогою розробленого прототипу SDN мережі

Для проведення дослідження стосовно впливу параметрів QoS на якість сприйняття відеопотоків реального часу, в експериментальній схемі (рис.4.1) на клієнті та сервері необхідно запустити VLC плеєр. Для проведення цього дослідження було написано Python скрипт, код якого можна побачити на рис.4.9.

```
class SingleSwitchTopo( Topo ):
    "Single switch connected to n hosts."
    def build( self, n=2 ):
        switch = self.addSwitch( 's1' )
        for h in range(n):
            # Each host gets 50%/n of system CPU
            host = self.addHost( 'h%s' % (h + 1),
                                cpu=.5/n)

            # 100 Mbps, 1ms delay, 0% loss, 1000 packet queue
            self.addLink( host, switch, bw=100, delay='1ms', loss=0,
                          max_queue_size=1000, use_htb=True )

def myNetwork():
    topo = SingleSwitchTopo( n=1)
    net = Mininet( topo=topo,
                  host=CPULimitedHost, link=TCLink )

    print "**** Starting network"

    # Add NAT connectivity
    net.addNAT().configDefault()
    net.start()
    print "**** Hosts are running and should have internet connectivity"
    print "**** Type 'exit' or control-D to shut down network"

    CLI( net )
    # Shut down NAT
    net.stop()

if __name__ == '__main__':
    lg.setLevel( 'info' )
    myNetwork()
```

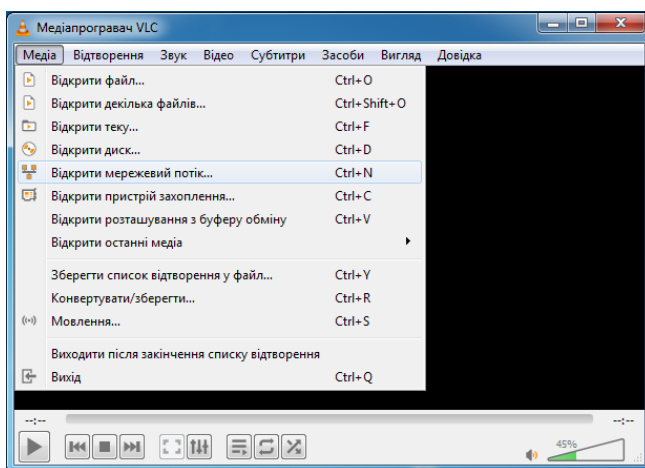
Рис. 4.9 Код Python скрипта для конфігурації каналів зв'язку з різними параметрами QoS

Даний скрипт дає змогу змінювати параметри з'єднань між комутатором та хостами. Серед цих параметрів: пропускна здатність, затримки, втрати,

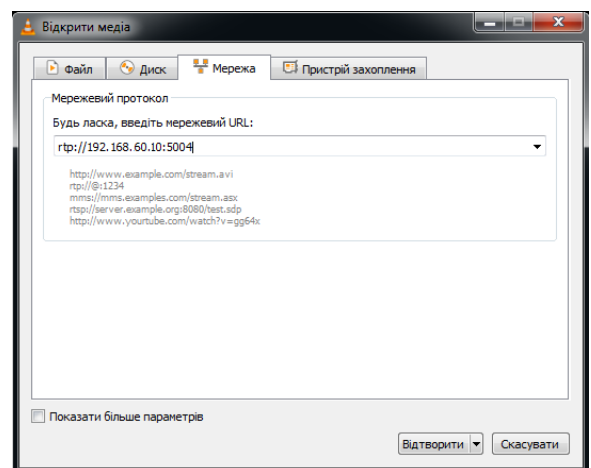
довжина черги. Шляхом зміни цих параметрів можна дослідити їх вплив на якість сприйняття послуги [147].

Для проведення цього дослідження також була необхідною наявність VLC плеєра на реальних хостах. Для перехоплення трафіку та отримання необхідних даних використовувався мережевий аналізатор Wireshark версії 2.6.8.

Порядок налаштування реальних хостів для проведення дослідження є наступним: відкриваємо вкладку медіа та вибираємо відкрити мережевий потік (рис. 4.10 а): У вікні котре зображене на рис.4.10 б необхідно ввести мережевий URL, він починається з аббревіатури протоколу, який використовується та складається з IP-адреси комп'ютера, який прийматиме потік та номер порта який буде відкритий для відеопотоку.



а)



б)

Рис. 4.10 Меню пункту «Медіа» – а) та вікно для введення мережевого URL IP адреси призначення для перегляду відео контенту (вузол призначення-сервер на експериментальній схемі) – б)

Запустивши VLC плеєр у розділі «Медіа» потрібно вибрати підпункт «Мовлення». Результат цієї операції показаний на рис.4.11.

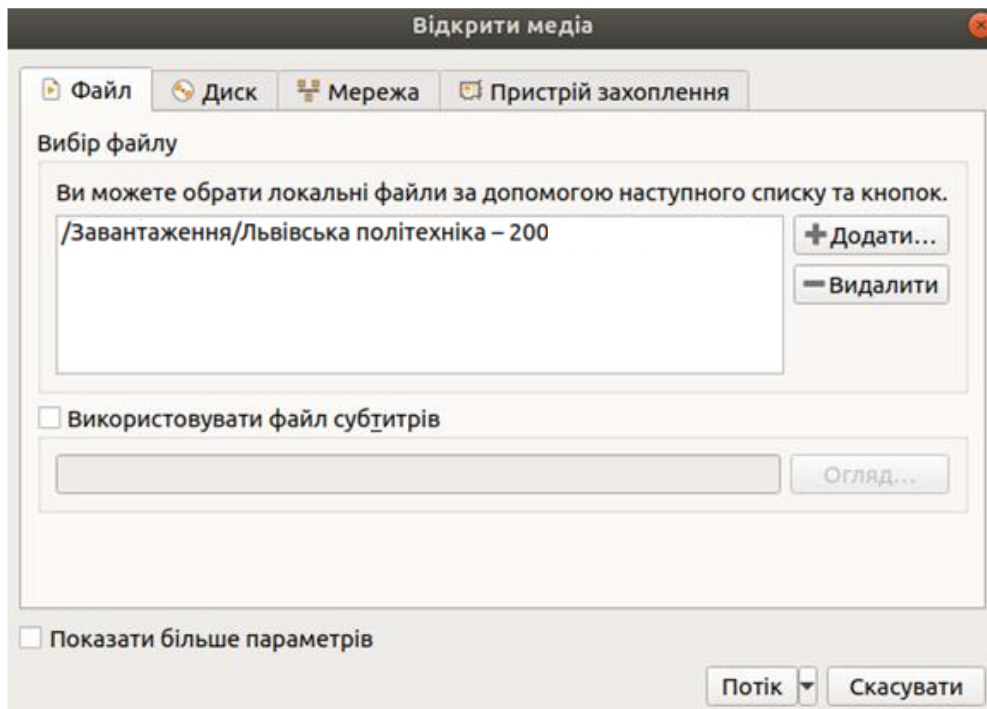


Рис. 4.11 Піпункт «Мовлення» розділу «Медіа»

У вікні показаному на рис. 4.11 потрібно вибрати файл який необхідно транслювати, підтвердити вибір можна нажавши на клавішу «Потік».

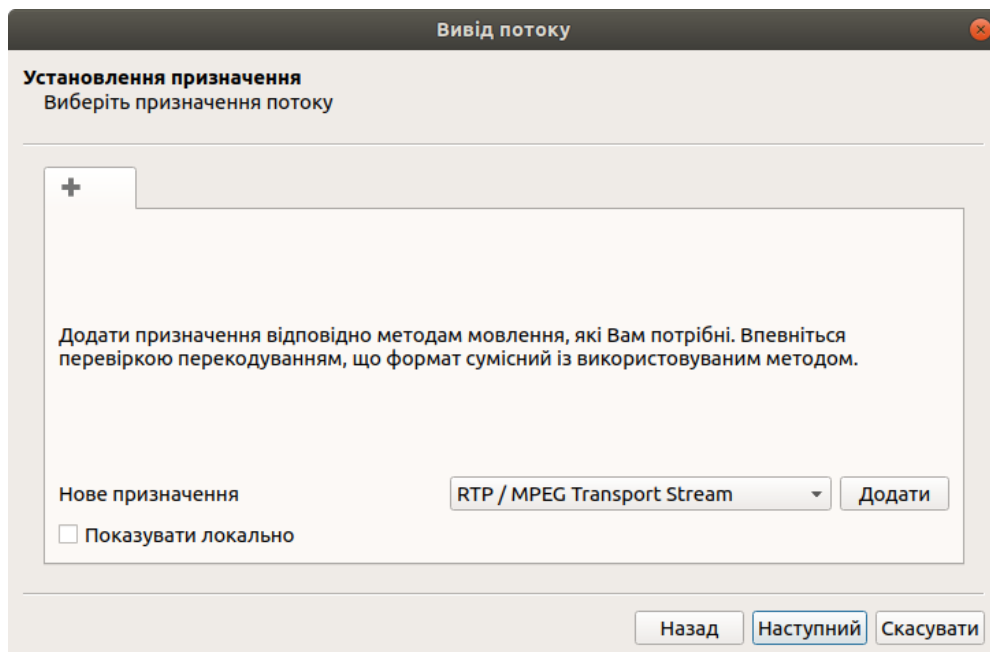


Рис. 4.12. Вікно вибору протоколу передавання

В даному дослідженні вибрано протокол RTP/TS, тобто протокол

передавання в режимі реального часу. Саме цей протокол і вибрано у вікні показаному на рис.4.12.

Після вибору протоколу, необхідно натиснути кнопку «Додати», для того щоб встановити адресу хоста та номер порта, який прийматиме відеопотік (рис.4.13). Поле з назвою потоку є не обов'язковим для заповнення.

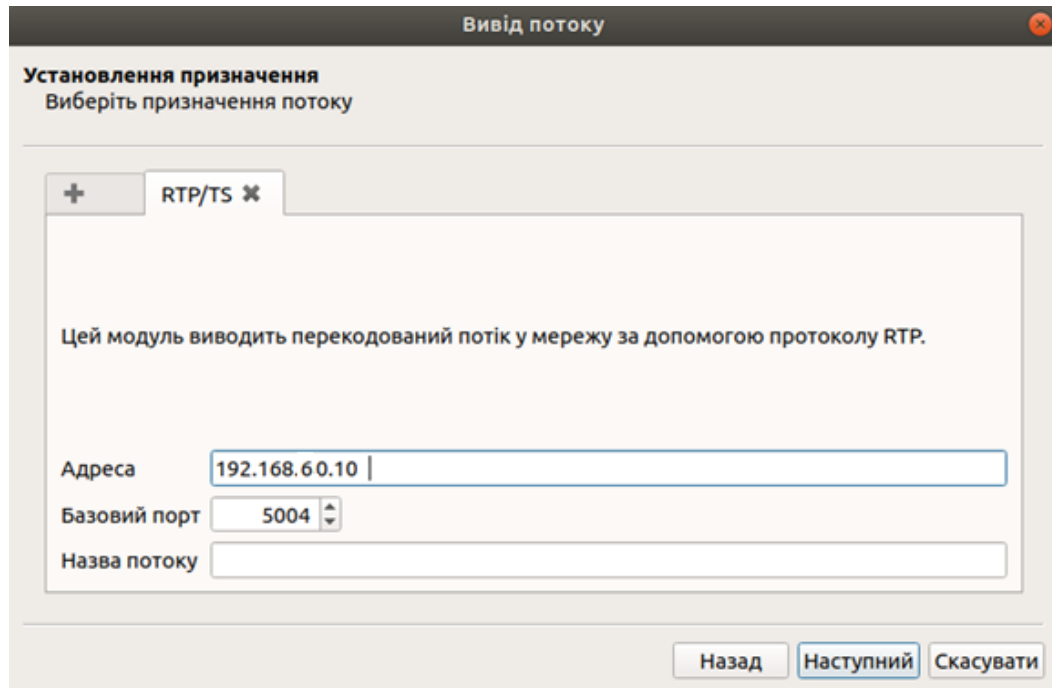


Рис. 4.13 Вікно для встановлення адреси призначення

В даному дослідженні відеопотік передається 60с та з вказаними вище параметрами з'єднань. Отже отримано наступні результати:

На рис. 4.14 зображено сумарну статистику дослідження характеристик відеопотоку реального часу з ідеальними параметрами з'єднань.

Statistics			
<u>Measurement</u>	<u>Captured</u>	<u>Displayed</u>	<u>Marked</u>
Packets	6291	6291 (100.0%)	—
Time span, s	60.447	60.447	—
Average pps	104.1	104.1	—
Average packet size, B	1365	1365	—
Bytes	8589421	8589421 (100.0%)	0
Average bytes/s	142 k	142 k	—
Average bits/s	1 136 k	1 136 k	—

Рис. 4.14 Сумарна статистика відеопотоку

Як видно з рис. 4.14 середня пропускна здатність яка використовується відеопотоком рівна 1.136 Мбіт/с. Кількість перехоплених пакетів 6291. Ієрархія перехоплених пакетів відеопотоку показано на рис. 4.15.

Protocol	Percent Packets	Packets	Percent Bytes	Bytes	Bits/s	End Packets	End Bytes	End Bits/s
Frame	100.0	6291	100.0	8589421	1 136 k	0	0	0
Ethernet	100.0	6291	1.0	88074	11 k	0	0	0
Internet Protocol Version 6	0.1	6	0.0	240	31	0	0	0
User Datagram Protocol	0.0	2	0.0	16	2	0	0	0
Multicast Domain Name System	0.0	2	0.0	282	37	2	282	37
Internet Control Message Protocol v6	0.1	4	0.0	64	8	4	64	8
Internet Protocol Version 4	99.8	6281	1.5	125620	16 k	0	0	0
User Datagram Protocol	99.8	6281	0.6	50248	6 650	0	0	0
Real-time Transport Control Protocol	0.4	24	0.0	720	95	12	384	50
Multicast Domain Name System	0.0	1	0.0	141	18	1	141	18
Data	99.6	6268	96.9	8323904	1 101 k	6268	8323904	1 101 k
Address Resolution Protocol	0.1	4	0.0	112	14	4	112	14

Рис. 4.15 Ієрархія перехоплених пакетів відеопотоку

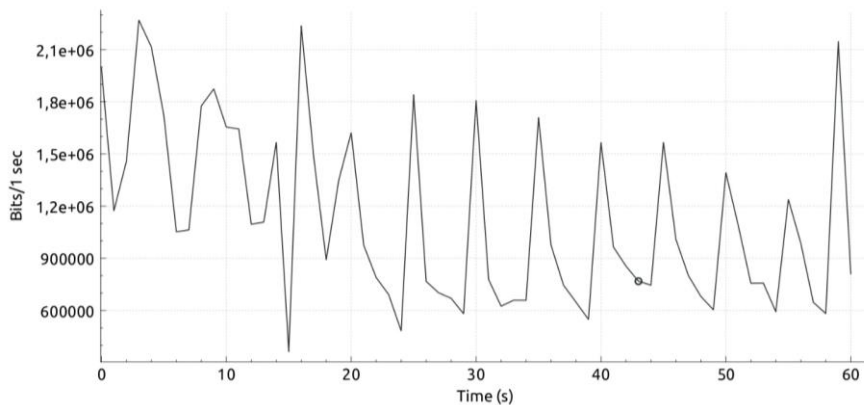


Рис. 4.16 Графічне представлення використання пропускної здатності

З рис. 4.16 можна визначити, що максимальна пропускна здатність рівна 2.3 Мбіт/с. Цей параметр необхідний для подальшого дослідження.

Для подальшого дослідження якості передачі відеопотоку, проведена серія досліджень з наступними параметрами:

1. Вплив на якість зображення відеопотоку при обмеженні пропускної здатності каналу у наступних відношеннях: 20%,40%,80% від максимальної пропускної здатності.
2. Вплив на якість зображення відеопотоку при внесенні штучних втрат у наступних величинах: 1%,2%,5%,10%.
3. Вплив на якість зображення відеопотоку при внесенні затримки в

каналах.

Для того щоб внести необхідні зміни до параметрів мережі, потрібно відредагувати файл з Python скриптом, замінивши значення пропускної здатності в полі змінної bw.

При встановленні пропускної здатності з'єднань в розмірі 1.84 Мбіт/с, що відповідає зменшенню пропускної здатності на 20%, отримано наступні результати:

Measurement	Captured	Displayed	Marked
Packets	6285	6285 (100.0%)	—
Time span, s	60.930	60.930	—
Average pps	103.2	103.2	—
Average packet size, B	1367	1367	—
Bytes	8588622	8588622 (100.0%)	0
Average bytes/s	140 k	140 k	—
Average bits/s	1 127 k	1 127 k	—

Рис. 4.17 Статистичні дані при пропускній здатності 1.84 Мбіт/с

Як видно з рис. 4.17, кількість перехоплених пакетів зменшилась, але суттєвої зміни в якості сприйняття відеопотоку не помічено. Графічне представлення використання пропускної здатності при її значенні рівному 1.84 Мбіт/с показано на рис.4.18.

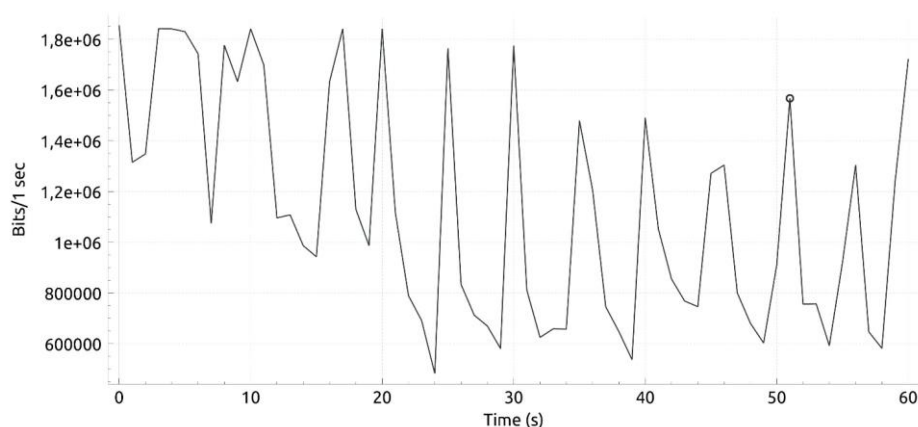


Рис. 4.18 Графічне представлення використання пропускної здатності при її значенні рівному 1.84 Мбіт/с

Встановивши значення пропускної здатності з'єднання до 1.38 Мбіт/с, що відповідає зменшенню пропускної здатності на 40%. Отримуємо наступні значення:

Statistics			
<u>Measurement</u>	<u>Captured</u>	<u>Displayed</u>	<u>Marked</u>
Packets	5977	5977 (100.0%)	—
Time span, s	60.784	60.784	—
Average pps	98.3	98.3	—
Average packet size, B	1366	1366	—
Bytes	8162706	8162706 (100.0%)	0
Average bytes/s	134 k	134 k	—
Average bits/s	1 074 k	1 074 k	—

Рис. 4.19 Статистичні дані при пропускній здатності 1.38 Мбіт/с

З рис. 4.19 видно, що кількість перехоплених пакетів зменшилась та при перегляді відеопотоку, присутні переривання картинки та звуку. Графічне представлення використання пропускної здатності при її значенні рівному 1.38 Мбіт/с показано на рис. 4.20.

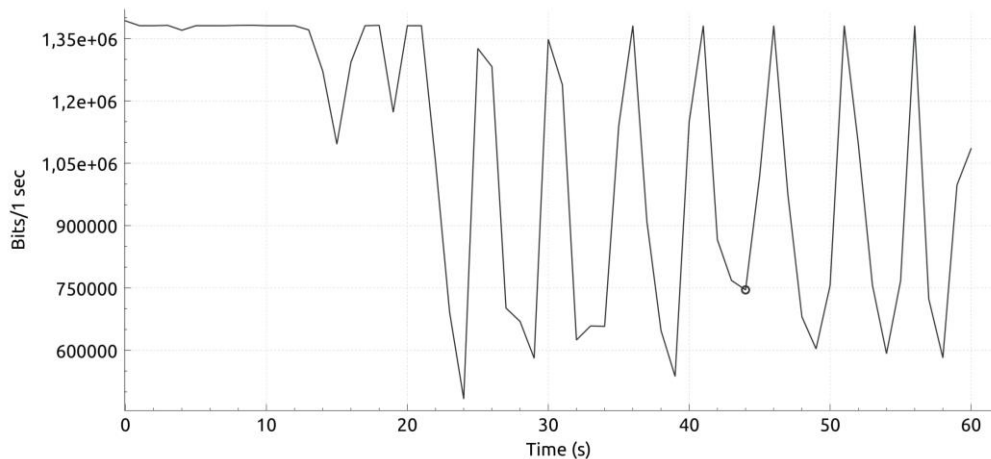


Рис. 4.20 Графічне представлення використання пропускної здатності при її значенні рівному 1.38 Мбіт/с

Встановивши значення пропускної здатності з'єднання до 0.46 Мбіт/с, що відповідає зменшенню пропускної здатності на 80%. Отримуємо наступні значення:

Statistics			
Measurement	Captured	Displayed	Marked
Packets	2764	2764 (100.0%)	—
Time span, s	65.273	65.273	—
Average pps	42.3	42.3	—
Average packet size, B	1358	1358	—
Bytes	3752872	3752872 (100.0%)	0
Average bytes/s	57 k	57 k	—
Average bits/s	459 k	459 k	—

Рис. 4.21 Статистичні дані при пропускній здатності 0.46 Мбіт/с

На основі даних отриманих з рис. 4.21 можна бачити що при заданій пропускній здатності втратилось більше половини пакетів, що призвело до статичного зображення, яке спостерігалось впродовж часу дослідження. Приклад такого статичного зображення представлено на рис. 4.22.

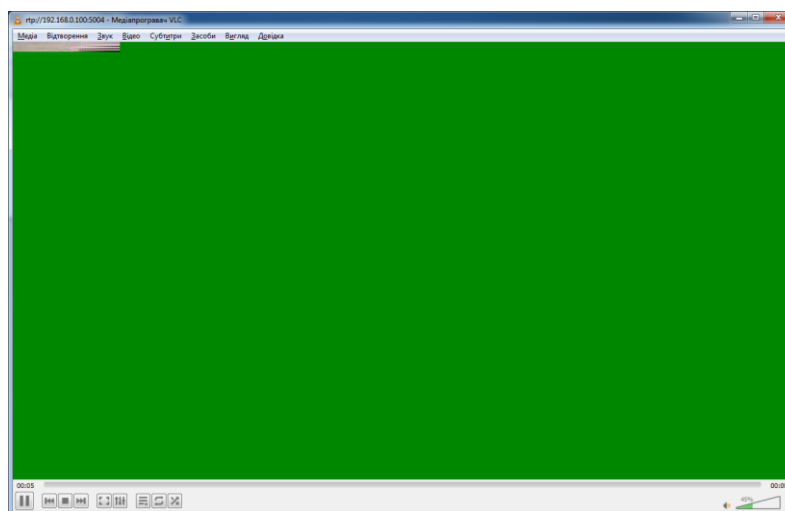


Рис. 4.22 Приклад статичного зображення отриманого при пропускній здатності 0.46 Мбіт/с

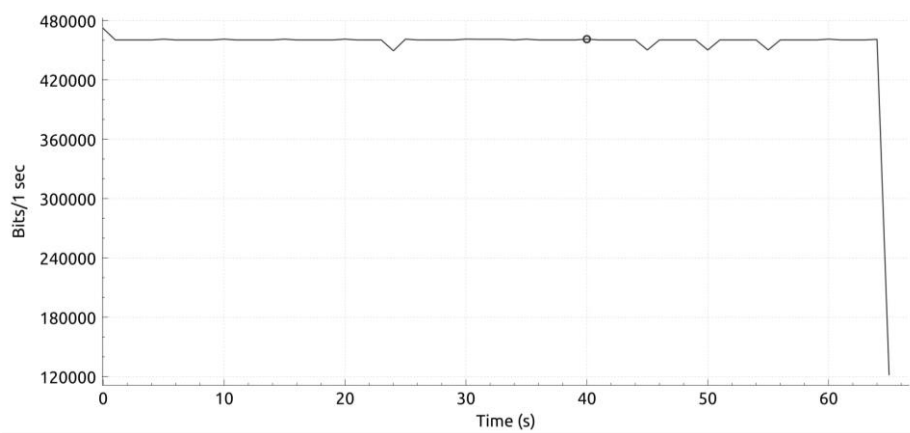


Рис. 4.23 Графічне представлення використання пропускної здатності при її значенню рівному 0.46 Мбіт/с

Як видно з рис. 4.23, впродовж всього часу передачі відеопотоку, значення пропускної здатності залишалось сталим [148].

Наступним експериментом було дослідження якості сприйняття відеопотоку при встановленні різних вимушених втрат пакетів в каналі зв'язку . Встановивши значення штучних втрат з'єднання, на рівні 1%, що означає, що кожен 100-й пакет буде втраченим. Отримуємо наступні значення (рис. 4.24):

Statistics			
Measurement	Captured	Displayed	Marked
Packets	6226	6226 (100.0%)	—
Time span, s	63.426	63.426	—
Average pps	98.2	98.2	—
Average packet size, B	1365	1365	—
Bytes	8497771	8497771 (100.0%)	0
Average bytes/s	133 k	133 k	—
Average bits/s	1 071 k	1 071 k	—

Рис. 4.24 Статистичні дані при штучних втратах рівних 1%

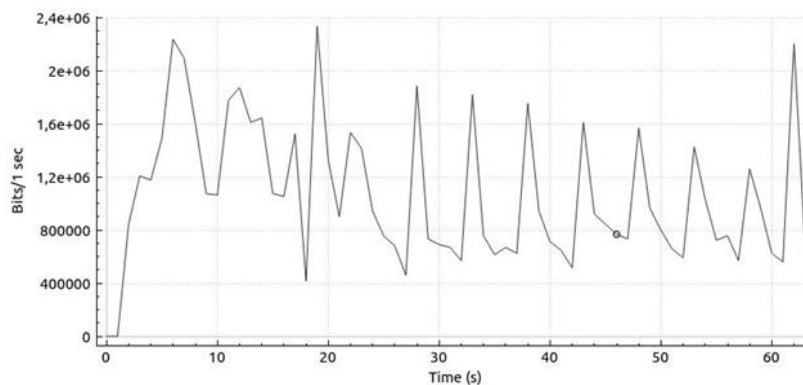


Рис. 4.25 Графічне представлення використання пропускної здатності при штучних втратах рівних 1%

Встановивши значення штучних втрат з'єднання, на рівні 10%, що означає, що кожен 10-й пакет буде втраченим. Отримуємо наступні значення:

Statistics			
Measurement	Captured	Displayed	Marked
Packets	5653	5653 (100.0%)	—
Time span, s	61.598	61.598	—
Average pps	91.8	91.8	—
Average packet size, B	1366	1366	—
Bytes	7721426	7721426 (100.0%)	0
Average bytes/s	125 k	125 k	—
Average bits/s	1 002 k	1 002 k	—

Рис. 4.26 Статистичні дані при штучних втратах рівних 10%

Як видно з рис. 4.26 та 4.27 та кількість перехоплених пакетів зменшилась на ~10%. На якість сприйняття при перегляді відео це значно вплинуло, а саме спостерігалися переривання звуку та спотворення картинки.

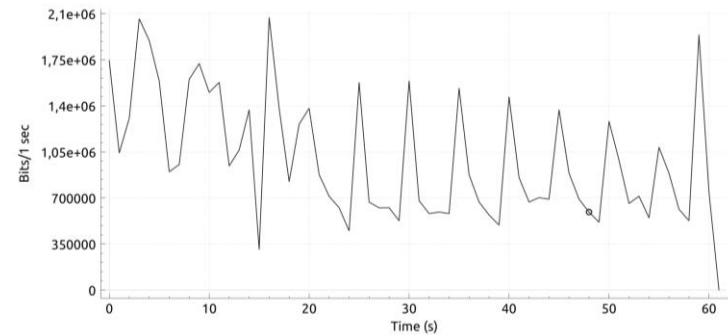


Рис. 4.27 Графічне представлення використання пропускної здатності при штучних втратах рівних 10%

Оцінка якості зображення при різних втратах пакетів, отриманих в процесі експериментального дослідження показано на рис. 4.28.



а) 1%



б) 2%



в) 5%



г) 10%

Рис. 4.28 Отримане відео зображення при штучних втратах 1% – а); 2% – б); 5% – в); 10% – г);

Шляхом експериментального дослідження встановлено, що основні чинники, які впливають на якість сприйняття QoE відеосервісів, залежить від технічних параметрів QoS, які забезпечуються мережею, включаючи доступну пропускну здатність, втрату пакетів, джитер, затримку. Необхідність пов'язати оцінки QoE з мережевими показниками QoS проводиться із метою передбачення QoE відеосервісів за технічними параметрами QoS. Пошук такого взаємозв'язку має дуже важливе значення при виявленні мережових проблем для подальшого покращення якості сприйняття сервісів користувачами шляхом адаптивного управління ресурсами [149].

Згідно написаного вище скрипта створеного для маніпуляції різних параметрів QoS в розробленій SDN мережі в процесі передавання відеопотоку реального часу з розширенням 720p встановлено такий взаємозв'язок між параметрами QoS та оцінкою QoE (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1

Оцінка QoS параметрів та їх вплив на рівень QoE при перегляді відеопотоку реального часу визначеного методом експертного оцінювання

QoS параметр			
Затримка, T	<150 мс	150–200 мс	>200 мс
Джитер, J	0–20 мс	20–50 мс	>50 мс
Втрати, P	0–1%	1-2%	>2%
Пропускна здатність, C	>2 Мбіт/с	1–2 Мбіт/с	<1 Мбіт/с
Якість перегляду	добре	допустимо	погано
Оцінка QoE	5–4	3.5–4	<3.5

У роботі побудовано математичну модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від технічних параметрів QoS, що забезпечуються в мережі. Як зазначено вище, задоволеність користувача

знаходиться під впливом різних параметрів QoS [150]. Для того, щоб математично визначити відхилення параметрів якості QoS в оцінці QoE, потрібна нормалізація процедури розрахунку QoS. Для цього у роботі визначено еталонні мінімальні значення параметрів QoS при яких забезпечується висока якість сприйняття досліджуваного відеопотоку. Також в процесі дослідження встановлено рівень важливості QoS параметрів при перегляді відео у вигляді таблиці 4.2

Таблиця 4.2

Рівень важливості параметрів QoS

QoS параметр	Рівень важливості	Ваговий коефіцієнт
Втрата пакетів, P	30 %	0.3
Джитер пакетів, J	27 %	0.27
Затримка пакетів, T	23 %	0.23
Пропускна здатність, C	20%	0.2

Нормалізоване значення інтегрального адитивного критерію QoS розраховуються за формулою (4.1),

$$QoS(x) = 1 - (K_1(\frac{P_{min}}{P}) + K_2(\frac{T_{min}}{T}) + K_3(\frac{C}{C_{max}}) + K_4(\frac{J_{min}}{J})) \quad (4.1)$$

де K_1, K_2, K_3, K_4 - вагові коефіцієнти важливості параметрів QoS, що змінюються в діапазоні від 0 до 1, і їх сума повинна дорівнювати одиниці.

Математичну модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від зміни інтегрального критерію параметрів QoS, представлено у вигляді функції:

$$QoE(y) = 5 \times (1 - QoS^2(x))^{21.5\sqrt{QoS^8(x)}} \quad (4.2)$$

Таким чином на рис. 4.29 отримано вигляд функції 4.2 в залежності різних параметрів QoS.

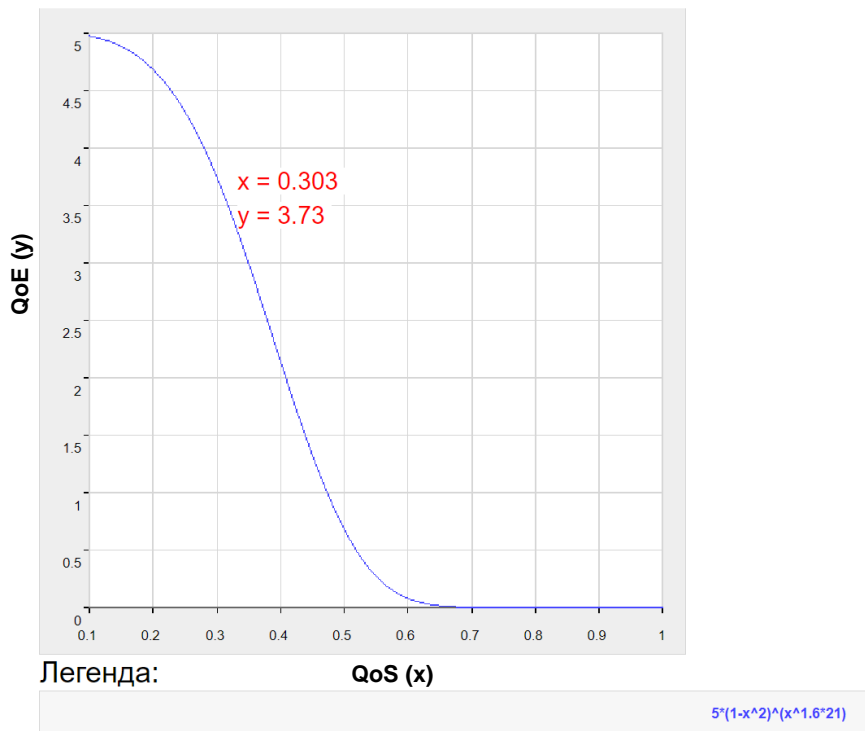


Рис. 4.29 Модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від технічних параметрів QoS

Таким чином завдання забезпечення замовленого рівня якості сприйняття послуги користувачами згідно оцінок QoE полягатиме у пошуку необхідного нормалізованого значення інтегрального адитивного критерію QoS, розв'язання якого здійснюється шляхом багатокритеріальної адаптивної маршрутизації потоків даних, метрика якої, базується на цьому ж інтегральному адитивному критерію QoS. Таким чином використовуючи запропоновану математичну модель (4.2), та використовуючи формулу 2.25 для визначення метрики адаптивної маршрутизації, описане в розділі 2, знаходиться кореляція між вартістю шляху, заданою цільовою функцією, та показником QoE рівнів, описаних в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Оцінка QoS та QoE параметрів при перегляді відеопотоку реального часу

Оцінка QoE	5–4	3.5–4	<3.5
Вартість шляху	<0.28	0.28-0.32	>0.35

4.5 Дослідження якості надання відео послуг на основі пріоритетного обслуговування в розробленій SDN мережі

Для того, щоб протестувати можливості щодо забезпечення якості обслуговування (QoS) в розробленій SDN мережі побудовано економічно ефективну інфраструктуру зв'язку, зокрема для надання сервісів IoT. У роботі припускається, що в мережевій області комунікаційна інфраструктура може підтримувати три типових класа QoS сервісів, якими є високошвидкісні послуги, послуги з постійною швидкістю передачі даних і сервіси, які не відносяться до QoS (або best effort). Ці служби вимагають різних QoS параметрів (тобто пропускної здатності, затримки). Для простоти у роботі розглянуто тільки вимоги до пропускної здатності (як найважливіший параметр). Для цього дослідження в розробленому SDN комутаторі встановлено конфігурацію, що максимальна пропускна здатність фізичного порта не перевищує 10 Мбіт/сек. Три класи трафіку з різними вимогами до QoS можна описати таким чином:

- Високошвидкісний сервіс: вимагає високої (або дуже високої) пропускної здатності з великою надійністю передавання. Передбачається, що її пропускна здатність не перевищує певне значення (тобто ≥ 4 Мбіт / с який на кінцевому пристрої на рівні TCP/IP класифікується по порту 9002).

- Сервіс із постійною швидкістю передачі даних: має постійну швидкість передачі даних і не змінюється з плином часу . У дослідженні таким сервісом є відеопотік реального часу, що розглядався у попередньому розділі (необхідна пропускна здатність становить 2 Мбіт/с , що класифікується по порту 9001).

- Функція Best-effort (без гарантій QoS/регулярна IP-служба): не гарантує пропускної здатності (гарантовано не QoS-служба і її службовий порт призначені на 9000).

В експерименті виконано дослідження агрегованого процесу обслуговування трьох сервісів SDN комутатором, що передаються через один

канал із обмеженою пропускнуою здатністю 10 Мбіт / с. У цій схемі зроблено припущення, що швидкість сервісу з постійною швидкістю передачі даних (Порт 9001) фіксована на рівні 2 Мбіт/с (720р відеопотік реального часу із пріоритетом 1), швидкість передачі даних сервісу best-effort (Порт 9000) також встановлена на рівні 4 Мбіт/с (1080р відеопотік із пріоритетом 3) , в той час як у високошвидкісного фоновому сервісу швидкість передачі даних збільшується з 2 Мбіт/с до 10 Мбіт/с з кроком збільшення 30 секунд (порт 9002).

У даному дослідженні у ролі такого сервісу є трафік генерований генератором трафіку іperf через протокол UDP із пріоритетом 2. В результаті передавання трьох потоків одночасно на рис. 4.30 показано використання пропускнуої здатності трьома сервісами.

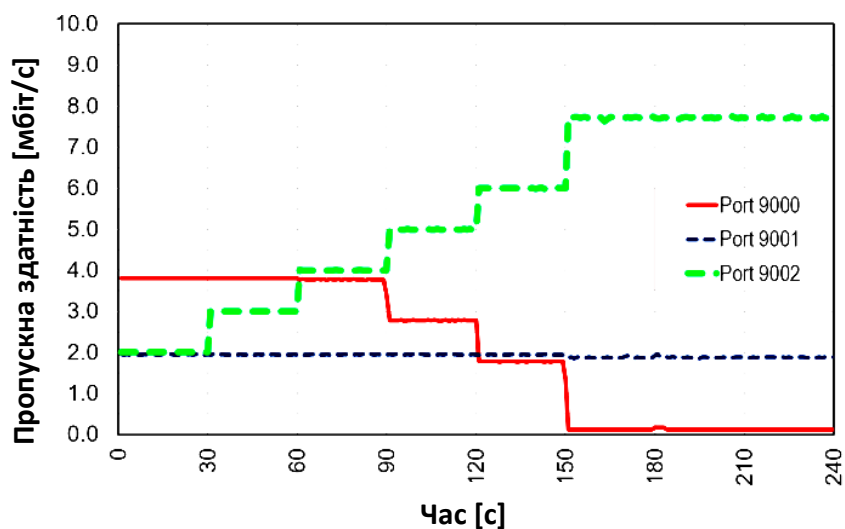
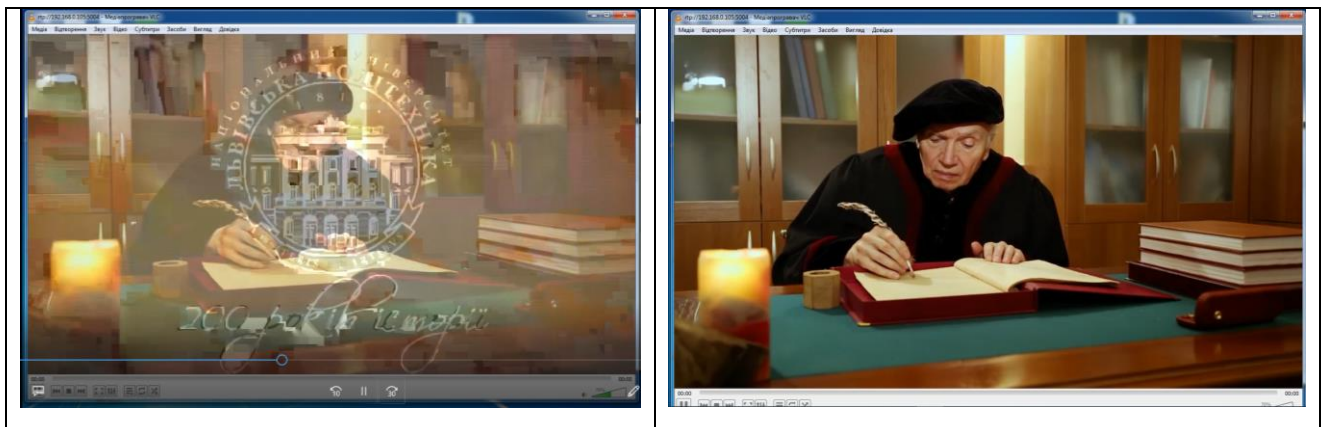


Рис. 4.30 Виділена пропускну здатність для сервісів в процесі пріоритетного обслуговування

Оскільки сервіси з гарантованим QoS, що мають пріоритет 1 та 2 (порти 9001 та 9002) мають більш високий пріоритет тому для них першочергово надається пропускну здатність каналу. Пропускну здатність відеосервісу з постійною швидкістю передачі даних завжди підтримується на рівні 2 Мбіт/с і не схильна до впливу іншого трафіку. При передаванні трафіку

високошвидкісного відеосервісу із швидкістю 4 Мбіт/с пропускна здатність в умовах боротьби за ресурси зменшується на відміну від інших, оскільки пріоритет такого потоку є найнижчим і становить 3. Отримана пропускна здатність для генерованого трафіку програмою iperf (пріоритет 2) не може перевищувати 8 Мбіт/с, так як для цілих трьох послуг загальна пропускна здатність встановлена на рівні 10 Мбіт/с. Крім того, відповідно збільшується і коефіцієнт втрати пакетів для сервісів 2 та 3 того пріоритету.

На рис. 4.31 показано вплив нестачі пропускної здатності на якість зображення відеопотків з пріоритетом 1 (порт 9001) та пріоритетом 3 (порт 9000)



а) через порт 9000 (пріоритет 3) б) через порт 9001(пріоритет 1)

Рис. 4.31 Якість зображення відеопотоку з пріоритетом 3 – а) та пріоритетом 1– б)

Таким чином, з отриманих результатів бачимо, що вплив пріоритезації потоків у мовах обмеженості каналних ресурсів відіграє важливу роль для забезпечення необхідної якості сприйняття сервісу.

Висновки до 4-го розділу

Розроблено прототип телекомунікаційної SDN мережі шляхом програмного розгортання віртуального багаторівневого мережевого комутатора з відкритим кодом Open vSwitch на апаратній платформі Raspberry Pi 3 Model B та контролера Floodlight на платформі Orange Pi Prime. Основною перевагою розробленого прототипу SDN мережі є низька собівартість та доступність реалізації, що є важливим для підготовки фахівців у сфері програмно-конфігурованих мереж в процесі проведення навчальних, тренувальних та дослідницьких цілей.

Досліджено ефективність застосування пріоритетного обслуговування на якість сприйняття відеосервісу реального часу в умовах обмеженості каналних ресурсів на базі розробленого прототипу мережі.

Також, у роботі на основі розробленого прототипу програмно-конфігурованої мережі проведено дослідження впливу технічних параметрів якості обслуговування в процесі передавання відеопотоків реального часу на рівень якості сприйняття сервісу кінцевим користувачем, визначеного шляхом використання методу експертного оцінювання за 5-бальною шкалою. На основі експериментального дослідження знайдено математичну функцію кореляції параметрів якості обслуговування із якістю сприйняття сервісу користувачами.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок науково-практичного завдання забезпечення замовленої якості обслуговування в умовах обмеженості мережевих ресурсів шляхом розроблення нової моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування, яка базується на удосконалених методах та алгоритмах адаптивного встановлення пріоритетів послуг, вибору сервера обслуговування та маршруту передавання даних.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз основних вимог щодо якості надання послуг в сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах. Встановлено, що існуючі телекомунікаційні технології та застосовані у них методи управління трафіком не здатні задовольнити вимоги щодо замовленої якості обслуговування в умовах зростаючих обсягах циркулюючої інформації. Аналіз основних факторів, які впливають на управління розподілом трафіку, показав необхідність використання технології програмно-конфігурованих мереж, яка орієнтована на централізоване управління мережними ресурсами, спрощення обслуговування та модернізації мереж з метою підвищення якості обслуговування користувачів.

2. Запропоновано концептуальну модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування. На відміну від існуючих моделей побудови сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мереж, у яких політика управління ресурсами на рівні мережевих пристроїв та на рівні обчислювальних серверах відбувається не узгоджено, розроблена у роботі модель дає змогу централізувати цих два рівні шляхом введення SDN контролера для узгодженого адаптивного управління ресурсами. Встановлено, що запропонована модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі дає змогу гарантувати замовлений

рівень сервісу аналізуючи QoE оцінки користувачів згідно договору SLA, шляхом адаптивного виставлення пріоритетів послуг, розподілу каналних ресурсів у мережевих вузлах, балансування навантаження на серверах та реалізації нових протоколів маршрутизації.

3. Удосконалено метод вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах, використання на практиці якого, дало змогу в процесі моніторингу підвищити до 70% точність оцінки стану каналу між комутаторами за критерієм затримки для низько пріоритетних потоків. А це, в свою чергу, дало можливість забезпечити правильність вибору оптимального шляху в процесі реалізації адаптивної маршрутизації, метрика, якої базується на багатокритеріальному аналізі стану каналу, однією із яких є поточна затримка каналу. Перевагою даного методу є простота реалізації, оскільки вимірювання затримки в каналі базується на зальноприйнятих правилах щодо комунікації між контролером та комутаторами шляхом обміну повідомленнями Packet_out та Packet_in.

4. Розроблено адаптивний алгоритм пріоритезації інформаційних потоків, який за рахунок автоматизації управління на рівні SDN контролера дає змогу динамічно змінювати пріоритети мережних потоків у випадку погіршення параметрів якості обслуговування трафіку в процесі передавання крізь мережу для підтримки замовленої якості обслуговування конкретних користувачів. Запропонований алгоритм базується на критеріях допустимої якості обслуговування інформаційних потоків та їх важливості для клієнта, що дає змогу створити уніфікований і формалізований підхід щодо визначення пріоритетів обслуговування різноманітних сервісів телекомунікаційних мереж, у тому числі сервісів Інтернету речей, що є необхідним в процесі розв'язання завдань ефективного та гнучкого управління ресурсами мережі з адаптацією до потреб користувачів.

5. Розроблено метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах,

який, на відміну від класичних алгоритмів розв'язання задач маршрутизації, що оперують лише одним чи двома параметрами оптимізації для встановлення вартості шляху, використовує адаптивну інтегральну метрику окремо для кожного класу інформаційних потоків. Дана метрика базується на вимірних параметрах QoS, що характеризують кожну гілку топології мережі в процесі її функціонування та необхідних вимог до якості надання сервісів згідно укладеного договору SLA. Доведено, що розроблений метод маршрутизації дає необхідний інструмент для спрощення управління системою зв'язку, шляхом маніпуляції ваговими коефіцієнтами інтегральної метрики, тим самим зводячи завдання забезпечення необхідної якості надання сервісів до підбору їх «найкращих» значень адаптуючись під потреби користувачів

6. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію. Згідно даного алгоритму для розв'язання цієї задачі будується функція корисності, яка дає змогу визначити показник ефективності рішення і процес надання переваги зводиться до порівняння чисел-значень. При цьому SDN контролер, що приймає рішення, враховує, що один набір значень локальних критеріїв володіє перевагою над іншими, якщо йому відповідає більше значення функції переваги. У випадку погіршення якості обслуговування SDN контролер проводить корекцію вагових коефіцієнтів для адаптації серверної площини до забезпечення необхідного рівня якості обслуговування шляхом узгодженості із рівнем QoS, що забезпечується мережною площиною.

7. Проведено моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої телекомунікаційної мережі. Доведено, що комплексне використання запропонованого методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних, дало змогу забезпечити високий рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу в умовах перевантаження

окремих елементів мереж. Зокрема, встановлено, що в процесі використання традиційних механізмів управління трафіком, а саме динамічної маршрутизації на основі метрики протоколу OSPF та алгоритму обслуговування черг PQ, рівень отриманої якості становив QoE – 1.8, а з використанням методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритезації потоків даних рівень якості сприйняття відеосервісу становив QoE – 4.2.

8. Розроблено прототип SDN мережі шляхом програмного розгортання віртуального багаторівневого мережевого комутатора з відкритим кодом Open vSwitch на апаратній платформі Raspberry Pi 3 Model B та контролера Floodlight на платформі Orange Pi Prime. Основною перевагою розробленого прототипу SDN мережі є низька собівартість та доступність реалізації, що є важливим для підготовки фахівців у сфері програмно-конфігурованих мереж в процесі проведення навчальних, тренувальних та дослідницьких цілей. Зокрема у роботі на базі розробленого прототипу мережі проведено дослідження впливу технічних параметрів якості обслуговування в процесі передавання відеопотоків реального часу на рівень якості сприйняття сервісу кінцевим користувачем, визначеного шляхом використання методу експертного оцінювання за 5-бальною шкалою. Що дало змогу з наукової точки зору знайти кореляцію між параметрами якості обслуговування та якістю сприйняття сервісу користувачами формалізованої у вигляді математичної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. P. Daras et al, "Fundamental Limitations of Current Internet and the path to Future Internet," *White Paper, Future Internet Reference Architecture group, European Commission*, Dec. 2010 pp. 7-18.
2. A. Feldmann and J. Rexford, "IP network configuration for intradomain traffic engineering," in *IEEE Network*, vol. 15, no. 5, pp. 46-57, Sept.-Oct. 2001, doi: 10.1109/65.953233.
3. S. Suman and A. Agrawal, "IP Traffic Management With Access Control List Using Cisco Packet Tracer", *International Journal of Science, Engineering and Technology Research*, vol. 5, pp. 1556–1561, May 2016.
4. R. Simmonds and B. W. Unger, "Towards scalable network emulation", *Denver, CO*, Jul. 2001, pp. 252–262, doi: 10.1117/12.434401.
5. М. М. Климаш, М. І. Бешлей, Ю. Д. Децинський, О. М. Панченко, "Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP," *Комп'ютерні технології друкарства*, № 2, с. 146-155, 2015.
6. А. А. Терешкевич, А. Н. Зубалов, "Обзор технологии "программно-конфигурируемые сети ПКС/sdn"," *Газовая промышленность*. №12 (746), с. 64-71, 2016.
7. M. Hayes, B. Ng, A. Pekar and W. K. G. Seah, "Scalable Architecture for SDN Traffic Classification," in *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3203-3214, Dec. 2018.
8. M. Karakus and A. Durresi, "A survey: Control plane scalability issues and approaches in software-defined networking (SDN)", *Comput. Netw.*, vol. 112, pp. 279-293, Jan. 2017.
9. K. Phemius, M. Bouet and J. Leguay, "Disco: Distributed multi-domain SDN controllers", *Proc. IEEE Netw. Oper. Manage. Symp. (NOMS)*, pp. 1-4, May 2014

10. P. Berde, M. Gerola, J. Hart, Y. Higuchi, M. Kobayashi, T. Koide, et al., "ONOS: Towards an open distributed SDN OS", *Proc. 3rd Workshop Hot Topics Softw. Defined Netw. (HotSDN)*, pp. 1-6, 2014.
11. J. Medved, R. Varga, A. Tkacik and K. Gray, "OpenDaylight: Towards a model-driven SDN controller architecture", *Proc. IEEE Int. Symp. World Wireless Mobile Multimedia Netw. (WoWMoM)*, pp. 1-6, Jun. 2014.
12. S. Lange, S. Gebert, J. Spoerhase, P. Rygielski, T. Zinner, S. Kounev, et al., "Specialized heuristics for the controller placement problem in large scale SDN networks", *Proc. 27th Int. Teletraffic Congr. (ITCs)*, vol. 12, no. 1, pp. 210-218, 2015.
13. S. Lange, S. Gebert, J. Spoerhase, P. Rygielski, T. Zinner, S. Kounev, et al., "Specialized heuristics for the controller placement problem in large scale SDN networks", *Proc. 27th Int. Teletraffic Congr. (ITCs)*, vol. 12, no. 1, pp. 210-218, 2015.
14. P. Xiao, Z.-Y. Li, S. Guo, H. Qi, W.-Y. Qu and H.-S. Yu, "A K self-adaptive SDN controller placement for wide area networks", *Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng.*, vol. 17, no. 7, pp. 620-633, 2016.
15. D. Erickson, "The beacon OpenFlow controller", *Proc. 2nd ACM SIGCOMM Workshop Hot Topics Softw. Defined Netw.*, pp. 13-18, 2013.
16. A. Tootoonchian, S. Gorbunov, Y. Ganjali, M. Casado and R. Sherwood, "On controller performance in software-defined networks", *2nd USENIX Workshop Hot Topics Manage. Internet Cloud Enterprise Netw. Services*, 2012.
17. M. Alsaeedi, M. M. Mohamad and A. A. Al-Roubaiey, "Toward Adaptive and Scalable OpenFlow-SDN Flow Control: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107346-107379, 2019.
18. W. Braun and M. Menth, "Software-defined networking using OpenFlow: Protocols applications and architectural design choices", *Future Internet*, vol. 6, no. 2, pp. 302-336, 2014.

19. F. Hu, Q. Hao and K. Bao, "A survey on software-defined network and OpenFlow: From concept to implementation", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 16, no. 4, pp. 2181-2206, 4th Quart. 2014.
20. A. Mendiola, J. Astorga, E. Jacob and M. Higuero, "A Survey on the Contributions of Software-Defined Networking to Traffic Engineering," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 918-953, Secondquarter 2017
21. Z. Cai and A. Cox, "Maestro: A system for scalable OpenFlow control," *Rice Univ.*, Houston, TX, USA, Tech. Rep., 2011.
22. Z. Guo et al., "STAR: Preventing flow-table overflow in software-defined networks," *Comput. Netw.*, vol. 125, pp. 15–25, Oct. 2017.
23. G. Wang, Y. Zhao, J. Huang, and W. Wang, "The controller placement problem in software defined networking: A survey," *IEEE Netw.*, vol. 31, no. 5, pp. 21–27, Sep./Oct. 2017.
24. F. J. Ros and P. M. Ruiz, "On reliable controller placements in softwaredefined networks," *Comput. Commun.*, vol. 77, pp. 41–51, Mar. 2016.
25. Kim, E. et al. "Enhanced Flow Table Management Scheme With an LRU-Based Caching Algorithm for SDN." *IEEE Access* 5 (2017): 25555-25564.
26. O. S. Al-Heety, Z. Zakaria, M. Ismail, M. M. Shakir, S. Alani and H. Alsariera, "A Comprehensive Survey: Benefits, Services, Recent Works, Challenges, Security, and Use Cases for SDN-VANET," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91028-91047, 2020.
27. M. A. Alqarni, "Benefits of SDN for Big data applications," *2017 14th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT & IoT (HONET-ICT)*, Irbid, 2017, pp. 74-77.
28. L. Davoli, L. Veltri, P. L. Ventre, G. Siracusano and S. Salsano, "Traffic engineering with segment routing: SDN-based architectural design and open source implementation", *Proc. Eur. Workshop Softw. Defined Netw. EWSDN*, no. 1, pp. 111-112, 2015.

29. M.-C. Lee and J.-P. Sheu, "An efficient routing algorithm based on segment routing in software-defined networking", *Comput. Netw.*, vol. 103, pp. 44-55, Jul. 2016.
30. L. Zhang, S. Wang, S. Xu, R. Lin and H. Yu, "TimeoutX: An adaptive flow table management method in software defined networks", *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp. 1-6, Dec. 2015.
31. F. Chen and X. Zheng, "Machine-learning based routing pre-plan for SDN", *Proc. Int. Workshop Multi-Disciplinary Trends Artif. Intell.*, pp. 149-159, 2015.
32. Z. Liu, D. Gao, Y. Liu, H. Zhang and C. H. Foh, "An adaptive approach for elephant flow detection with the rapidly changing traffic in data center network", *Int. J. Netw. Manage.*, vol. 27, no. 6, pp. e1987, 2017.
33. Y. Yu *et al.*, "Fault Management in Software-Defined Networking: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 349-392, Firstquarter 2019.
34. F. A. Lopes, M. Santos, R. Fidalgo and S. Fernandes, "A software engineering perspective on SDN programmability", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1255-1272, 2nd Quart. 2016.
35. D. A. Temesgene, J. Nuñez-Martinez and P. Dini, "Softwarization and Optimization for Sustainable Future Mobile Networks: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25421-25436, 2017.
36. J. W. Guck, A. Van Bempten, M. Reisslein and W. Kellerer, "Unicast QoS Routing Algorithms for SDN: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 388-415, Firstquarter 2018
37. T. Luo, S. Zhang and J. Liu, "Design of Centralized Control Architecture for Distribution Network Communication Network Based on SDN," *2019 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*, Haikou, China, 2019.

38. M. Caria, A. Jukan and M. Hoffmann, "SDN Partitioning: A Centralized Control Plane for Distributed Routing Protocols," in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 13, no. 3, pp. 381-393, Sept. 2016.
39. S. Vissicchio, O. Tilmans, L. Vanbever and J. Rexford, "Central control over distributed routing", *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 43-56, 2015.
40. S. Agarwal, M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Traffic engineering in software defined networks", *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 2211-2219, 2013.
41. P. Danielis, V. Altmann, J. Skodzik, E. B. Schweissguth, F. Golatowski and D. Timmermann, "Emulation of SDN-supported automation networks," *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*, Luxembourg, 2015, pp. 1-8.
42. C. D. Martino, A. Walid and M. Thottan, "A Cloud-Based Platform Enabling Automation in Resiliency and Performance Testing of SDN," *2018 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, Verona, Italy, 2018, pp. 1-2.
43. C. D. Martino, A. Walid and M. Thottan, "A Cloud-Based Platform Enabling Automation in Resiliency and Performance Testing of SDN," *2018 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, Verona, Italy, 2018.
44. H. Yao and W. Muqing, "SDN-based routing mechanism for cloud data centers," *2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, Chongqing, 2017, pp. 400-404.
45. R. Cziva, S. Jouët, D. Stapleton, F. P. Tso and D. P. Pezaros, "SDN-Based Virtual Machine Management for Cloud Data Centers," in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 13, no. 2, pp. 212-225, June 2016.
46. S. V. Krishna, A. Shrivastava and S. J. Wagh, "SDN in high performance computing for scientific and business environment (SBE)," *2017 International Conference on Computational Intelligence in Data Science (ICCIDS)*, Chennai, 2017.

47. Ardiansyah, Y. Choi, M. R. K. Aziz and D. Choi, "Latency Minimization for Energy Internet Communications with SDN Virtualization Infrastructure," *2019 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, Beijing, China, 2019, pp. 1-7.
48. A. Lara, A. Kolasani, and B. Ramamurthy, "Network innovation using OpenFlow: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 493–512, First Qu. 2014.
49. V. Varadharajan, K. Karmakar, U. Tupakula and M. Hitchens, "A Policy-Based Security Architecture for Software-Defined Networks," in *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 14, no. 4, pp. 897-912, April 2019.
50. I. Ahmad, S. Namal, M. Ylianttila and A. Gurtov, "Security in Software Defined Networks: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2317-2346, Fourthquarter 2015.
51. J. Wang, Q. Qi, J. Gong and J. Liao, "Mitigating the Oscillations Between Service Routing and SDN Traffic Engineering," in *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3426-3437, Dec. 2018.
52. S. Agarwal, M. Kodialam and T. V. Lakshman, "Traffic engineering in software defined networks", *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 2211-2219, 2013.
53. L. Davoli, L. Veltri, P. L. Ventre, G. Siracusano and S. Salsano, "Traffic engineering with segment routing: SDN-based architectural design and open source implementation", *Proc. Eur. Workshop Softw. Defined Netw.*, pp. 111-112, Sep. 2015.
54. H. Zhou *et al.*, "Improving QoS in SDN with lossless multi-domain reconfigurations," *2015 IEEE 23rd International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, Portland, OR, 2015, pp. 77-78.
55. W. Wang, Q. Qi, X. Gong, Y. Hu and X. Que, "Autonomic QoS management mechanism in Software Defined Network," in *China Communications*, vol. 11, no. 7, pp. 13-23, July 2014

56. M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk, "Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization," *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Kiev, 2016.

57. M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko and A. Masiuk, "Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2015.

58. M. Klymash, M. Beshley and B. Stryhaluk, "System for increasing quality of service of multimedia data in convergent networks," *2014 First International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology*, Kharkov, 2014, pp. 63-66.

59. U. It, "ITU-T recommendation G.114," *tech. rep., International Telecommunication Union*, 1993.

60. О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, М. М. Гнатчук, А. В. Поліщук, "Модель системи управління ресурсами мультисервісних мереж в умовах самоподібності трафіку," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, серія "Радіоелектроніка та телекомунікації", №. 738, с. 165–172, 2012.

61. Minghai Xu, Zhengkun Mi, Xiaofang Feng and Wenke Xie, "Implementation techniques of IntServ/DiffServ integrated network," *International Conference on Communication Technology Proceedings, 2003. ICCT 2003.*, Beijing, China, 2003, pp. 231-234 vol.1.

62. Y. Bernet et al., "A Framework for Integrated Services Operation over DiffServ Networks", *RFC*, vol. 2998, November 2000.

63. R Braden, L Zbads, S. Berson, S. Herzog and S. Jamin, "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) - Functional Specification", *RFC*, vol. 2205, September 1997.

64. N. Rouhana and E. Horlait, "Differentiated services and integrated services use of MPLS," *Proceedings ISCC 2000. Fifth IEEE Symposium on Computers and Communications*, Antibes-Juan Les Pins, France, 2000, pp. 194-199.

65. М. М. Климаш, О. В. Корецький, М. І. Бешлей, В. Б. Янишин, "Дослідження побудови технологічних ресурсів у конвергентній мережі на базі мобільного оператора для надання послуги Triple Play", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, серія "Радіoeлектроніка та телекомунікації", №. 705, с. 176–183, 2011.

66. B. Moon and H. Aghvami, "RSVP extensions for real-time services in wireless mobile networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 39, no. 12, pp. 52-59, Dec. 2001.

67. A. Abella, V. Friderikos and H. Aghvami, "Differentiated services versus over-provisioned best-effort for pure-IP mobile networks," *4th International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*, Stockholm, Sweden, 2002, pp. 450-457

68. O. Lemeshko, O. Yeremenko and A. M. Hailan, "Design of QoS-routing scheme under the timely delivery constraint," *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, 2017, pp. 97-99.

69. I. Fițiḡău and G. Todorean, "Network performance evaluation for RIP, OSPF and EIGRP routing protocols," *Proceedings of the International Conference on ELECTRONICS, COMPUTERS and ARTIFICIAL INTELLIGENCE - ECAI-2013*, Pitesti, 2013, pp. 1-4.

70. S. G. Thorenoor, "Dynamic Routing Protocol Implementation Decision between EIGRP, OSPF and RIP Based on Technical Background Using OPNET Modeler," *2010 Second International Conference on Computer and Network Technology*, Bangkok, 2010, pp. 191-195.

71. К. Шевчук, С.Захарченко, "Метод вдосконалення одношляхових протоколів динамічної маршрутизації," *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 2, 16-25, 2018.

72. M. Tang, X. Lin and M. Palesi, "Routing Pressure: A Channel-Related and Traffic-Aware Metric of Routing Algorithm," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 891-901.
73. В. А. Бачинский, В. Ш. Гиоргизова-Гай, "Выбор протокола динамической маршрутизации в корпоративной IP-сети", *Систем. дослідж. та інформ. Технології*, № 1, С. 99-110, 2011.
74. Y. Yu *et al.*, "Fault Management in Software-Defined Networking: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 349-392, Firstquarter 2019.
75. N. L. M. van Adrichem, C. Doerr, and F. A. Kuipers, "OpenNetMon: Network monitoring in OpenFlow Software-Defined Networks," in *NOMS*, pp. 1–8, 2014.
76. M. Jarschel, S. Oechsner, D. Schlosser, R. Pries, S. Goll, and P. Tran-Gia, "Modeling and performance evaluation of an OpenFlow architecture," in *Teletraffic Congress (ITC)*, 2011 23rd International, pp. 1–7, Sept 2011.
77. K. Phemius and M. Bouet, "Monitoring latency with OpenFlow," in *Network and Service Management (CNSM)*, 2013 9th International Conference on, pp. 122–125, Oct 2013.
78. M. Jarschel, S. Oechsner, D. Schlosser, R. Pries, S. Goll, and P. Tran-Gia, "Modeling and performance evaluation of an OpenFlow architecture," in *Teletraffic Congress (ITC)*, 2011 23rd International, pp. 1–7, Sept 2011.
79. K. Phemius and M. Bouet, "Monitoring latency with OpenFlow," *Proceedings of the 9th International Conference on Network and Service Management (CNSM 2013)*, Zurich, 2013, pp. 122-125.
80. R. B. Santos, T. R. Ribeiro and C. d. A. C. César, "A network monitor and controller using only OpenFlow," *2015 Latin American Network Operations and Management Symposium (LANOMS)*, Joao Pessoa, 2015, pp. 9-16.
81. А. В. Лемешко, Т. В. Вавенко. Разработка и исследование потоковой модели адаптивной маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях с

балансировкой нагрузки. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, (3 (29)), 100-108, 2013.

82. H. E. Egilmez, S. T. Dane, K. T. Bagci and A. M. Tekalp, "OpenQoS: An OpenFlow controller design for multimedia delivery with end-to-end Quality of Service over Software-Defined Networks," *Proceedings of The 2012 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*, Hollywood, CA, 2012, pp. 1-8.

83. S. Civanlar, M. Parlakisik, A. Tekalp, B. Gorkemli, B. Kaytaz, and E. Onem, "A QoS-enabled OpenFlow environment for Scalable Video streaming," in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, 2010 IEEE, pp. 351–356, Dec 2010.

84. P. Georgopoulos, Y. Elkhatib, M. Broadbent, M. Mu, and N. Race, "Towards Network-wide QoE Fairness Using Openflow-assisted Adaptive Video Streaming," in *Proceedings of the 2013 ACM SIGCOMM Workshop on Future Human-centric Multimedia Networking, FhMN '13*, (New York, NY, USA), pp. 15–20, ACM, 2013.

85. F. Meng, R. Chai and C. Zhang, "Delay minimization based joint routing and flow allocation for software defined networking," *2017 9th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 2017, pp. 1-6.

86. O. Lemeshko and O. Yeremenko, "Enhanced method of fast re-routing with load balancing in software-defined networks", *Journal of Electrical Engineering*, vol. 68, no. 6, pp. 444–454, Nov. 2017.

87. O. Lemeshko, O. Yeremenko and A. M. Hailan, "Two-level method of fast ReRouting in software-defined networks," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 376-379.

88. O. Lemeshko, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, A. Shapovalova, A. Ilyashenko and B. Sleiman, "Traffic Engineering Fast ReRoute Model with Support of Policing," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 842-845.

89. M. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley, S. Redchuk, “Increasing wavelengths utilization efficiency in OTNoDWDM network based on local resource distribution method”, *Second IEEE International Scientific-Practical Conference “Problems of Infocommunications. Science and Technology”(PICS&T’2015). Conference proceedings. (13-15 October, Kharkiv, Ukraine), 2015. - Kh:KHNURE, - P.157-160.*

90. M. Klymash, M. Beshley, V. Koval, “The model of prioritization of service for efficient usage of resource multiservice network” *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET’2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 320-321.*

91. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko, "Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118-1122.*

92. M. Beshley, M. Klymash, B.Strykhalyuk, O. Shpur, B. Bugil, I. Kagalo, “SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets,” *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*, Volume 4, Issue 1, pp.10-2, 2015.

93. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, M. Klymash, “Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic,” *Smart Computing Review*, Vol.5, No.2, pp.76-88, 2015.

94. М. М. Климаш, М.І. Бешлей, І.О Кагало, Л.М. Готра, “Вдосконалення методів та алгоритмів управління інформаційними потоками в конвергентних телекомунікаційних мережах,” *матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 25-річчю заснування кафедри “Радіотехніки та інформаційні безпеки” Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича”, м. Чернівці, 2014, с.106-107.*

95. М. І. Бешлей, В. П. Ткачук, Б. А. Бугиль, and О. А. Лаврів, “Модель системи динамічного управління пропускнуою здатністю каналу інтегрованої WIFI/GSM мережі,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” №796, с. 83-96, 2014.

96. М. І. Бешлей, М. О. Селюченко, О. А. Лаврів, А. Р. Масюк, Г.В. Холявка, “Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” №. 818, с. 162-173, 2015.

97. 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”*, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” №. 766, с. 76-81, 2013.

98. И. В. Стрелковская, И. Н. Соловская, “Особенности решения задач управления трафиком в телекоммуникационной сети,” *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*, № 2. С. 24-34, 2011.

99. И. В. Стрелковская, И. Н. Соловская, “Сравнительный анализ результатов решений задач многопутевой маршрутизации различными методами,” *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*, № 1, С. 56-64, 2014.

100. “Y.1566 : Quality of service mapping and interconnection between Ethernet, Internet protocol and multiprotocol label switching networks”. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1566-201207-I/en> (accessed Sep. 25, 2020).

101. O. Panchenko, A. Polishuk, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Method for adaptive client-oriented management of quality of service in integrated SDN/CLOUD networks," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 452-455.

102. М.І. Бешлей, О.М. Панченко, І.В. Демидов, М.О Селюченко, “Метод динамічного управління якістю послуг в інтегрованій SDN/CLOUD мережі,”

Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернівці, 3-5 листопада 2016 р., с. 74-75.

103. І. О. Кагало, М. І. Бешлей, М. М. Климаш, О. М. Панченко, Г. В. Бешлей, "Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi," *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с. 24-38, 2019.

104. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 1167-1170.

105. I. Demydov, N. A. Baydoun, M. Beshley, M. Klymash, and O. Panchenko, "Development of Basic Concept of ICT Platforms Deployment Strategy for Social Media Marketing Considering Tectonic Theory," *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 0, no. 1, pp. 18-33, Jan. 2020.

106. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and H. Beshley, "SDN/Cloud Solutions for Intent-Based Networking," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 22-25

107. D. B. Rawat and S. R. Reddy, "Software Defined Networking Architecture, Security and Energy Efficiency: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 325-346, Firstquarter 2017.

108. B. Tsybakov and N. D. Georganas, "Self-similar processes in communications networks," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 5, pp. 1713-1725, Sept. 1998.

109. H. Yin, C. Lin, G. Min and X. Chu, "Effective congestion control for QoS enhancement of self-similar multimedia traffic," in *IEE Proceedings - Communications*, vol. 153, no. 5, pp. 675-682, Oct. 2006.

110. D. Han and J. Chung, "Self-Similar Traffic End-to-End Delay Minimization Multipath Routing Algorithm," in *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 2121-2124, Dec. 2014.

111. I. Strelkovskaya, I. Solovskaya and A. Makoganiuk, "Optimization of QoS characteristics of self-similar traffic," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 497-50.

112. I. Strelkovskaya, I. Solovskaya, T. Grygoryeva and S. Paskalenko, "The solution to the problem of the QoS characteristics definition for self-similar traffic serviced by the W/M/1 QS," *2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, 2016, pp. 40-42.

113. W. Jun, Z. Rui and L. Xianliang, "Providing QoS guarantees for self-similar traffic flows," in *Journal of Systems Engineering and Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 31-36, March 2005.

114. M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Kiev, 2016, pp. 1-6.

115. Y. Tian *et al.*, "Traffic Engineering in Partially Deployed Segment Routing Over IPv6 Network With Deep Reinforcement Learning," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 28, no. 4, pp. 1573-1586, Aug. 2020.

116. O. Lemeshko, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko and A. M. Hailan, "Tensor Based Load Balancing under Self-Similar Traffic Properties with Guaranteed QoS," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 293-297.

117. Pryslupskyi, O. Panchenko, M. Beshley and M. Seliuchenko, "Improvement of Multiprotocol Label Switching Network Performance using

Software-defined Controller," *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 106-109.

118. O. Lemeshko, O. Yeremenko, M. Yevdokymenko, A. Shapovalova, A. Ilyashenko and B. Sleiman, "Traffic Engineering Fast ReRoute Model with Support of Policing," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 842-845.

119. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 1167-1170.

120. M. Afaq and Wang-Cheol Song, "sFlow-based resource utilization monitoring in clouds," *2016 18th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, Kanazawa, 2016, pp. 1-3

121. Y. Yang, C. Yang, S. Chen, W. Cheng and F. Jiang, "Implementation of Network Traffic Monitor System with SDN," *2015 IEEE 39th Annual Computer Software and Applications Conference*, Taichung, 2015, pp. 631-634.

122. M. Seliuchenko, M. Beshley, O. Panchenko and M. Klymash, "Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in software-defined networks," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 2016, pp. 667-670.

123. В. А. Вишняков та Б. А. Монич, "Модели и управление качеством программно-определяемых сетей", *Проблемы инфокоммуникаций*, №1, С.42-47, 2019.

124. Є. В. Орлов, І. Е. Похабова, "Упровадження адаптивного управління програмно-конфігурованою мережею (SDN)," *Журнал "Зв'язок"*, №2(108), С. 11-16, 2014.

125. М.М. Климаш, М.О Селюченко, Панченко М.І, “Система моніторингу пакетної затримки в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах,” *X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції*, м. Київ, 19-22 квітня 2016р., с. 140-142.

126. M. Beshley, N. Kryvinska, M. Seliuchenko, H. Beshley, E. M. Shakshuki, and A.-U.-H. Yasar, “End-to-End QoS “Smart Queue” Management Algorithms and Traffic Prioritization Mechanisms for Narrow-Band Internet of Things Services in 4G/5G Networks”, *Sensors*, vol. 20, no. 8, P. 2324-1–2324-10. Jan. 2020.

127. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Prislupskiy, H. Beshley, O. Panchenko, “Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT,” *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications*, Vol. 3, Issue 1, pp. 22-23. May 2018.

128. М. І. Бешлей, В. В. Червенець, І. В. Демидов, В. І. Романчук, О. М. Панченко, “Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах,” *Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - X: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба*, 5(142), с. 114-123, 2016.

129. В. І Романчук, М. І. Бешлей, О. М. Панченко, А. В. Поліщук, “Метод узгодженого розв’язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережевих пристроїв,” *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку*, №2(50), с. 48-57, 2018.

130. U. Shende and V. Bagdi, "A Review on Traffic Engineering Techniques in Software Defined Networks," *2019 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS)*, Palladam, Tamilnadu, India, 2019, pp. 503-506.

131. T. Kim and T. Nguyen-Duc, "OQR: On-demand QoS Routing without Traffic Engineering in Software Defined Networks," *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, Montreal, QC, 2018, pp. 362-365.

132. М.М. Климаш, М. І. Бешлей, Ю. Д. Дещинський, О. М. Панченко, “Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP,” *Комп’ютерні технології друкарства*, № 2, с. 146-155, 2015.

133. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko and A. Polishuk, "Adaptive flow routing model in SDN," *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, 2017, pp. 298-302.

134. M. Seliuchenko, O. Lavriv, O. Panchenko and V. Pashkevych, "Enhanced multi-commodity flow model for QoS-aware routing in SDN," *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Kiev, 2016, pp. 1-3.

135. Y. N. Krishnan and G. Shobha, "Performance analysis of OSPF and EIGRP routing protocols for greener internetworking," *2013 International Conference on Green High Performance Computing (ICGHPC)*, Nagercoil, 2013, pp. 1-4ю

136. В.Теслюк, “Методи багатокритеріальної оптимізації,” Львів: Видавництво Національного університету — Львівська політехніка, 64 с., 2012.

137. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and M. Seliuchenko, "Dynamic Switch Migration Method Based on QoE- Aware Priority Marking for Intent-Based Networking," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 864-868.

138. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 1167-1170.

139. H. Beshley, M. Kyryk, M. Beshley and O. Panchenko, "Method of Information Flows Engineering and Resource Distribution in 4G/5G Heterogeneous

Network for M2M Service Provisioning," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Lviv, 2018, pp. 229-233.

140. Н. Beshley, О. Panchenko and М. Kyryk, "Investigation and Implementation of Methods for Controlling the Intensity of Flow of Information Protocols," *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-5.

141. М. М. Климаш, В. І. Романчук, О. М. Панченко, М. І. Бешлей, А. В. Поліщук, "Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 884, с. 66-75, 2017.

142. Н. Beshley, О. Panchenko and М. Kyryk, "Investigation and Implementation of Methods for Controlling the Intensity of Flow of Information Protocols," *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-5. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

143. М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, "Розроблення системи моніторингу та аналізу трафіку інформаційно телекомунікаційної мережі для виявлення аномалії і запобігання атак," *І міжнародна науково-практична конференція "Проблеми кібербезпеки інформаційно телекомунікаційних систем" (PCSITS)*, м. Київ, 5-6 квітня 2018 р., с. 201-203

144. "Cisco Unified Communications Voice over Spoke-to-Spoke DMVPN Test Results and Recommendations – Cisco". [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/WAN_and_MAN/VoSD MVPN.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/WAN_and_MAN/VoSD_MVPN.html) (accessed Sep. 25, 2020).

145. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 282-286.

146. V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk, "Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing," *Technology audit and production reserves*, №3/2(41), pp.46-55, 2018.

147. "SDN 101: Integrating Mininet on Raspberry Pi", pakiti.com, Nov. 16, 2015. <http://pakiti.com/sdn-101-integrating-mininet-on-raspberry-pi/> (accessed Sep. 25, 2020).

148. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, 2017, pp. 1-5.

149. V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and P. Arthur, "Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes," *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, 2017, pp. 295-298.

150. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and M. Seliuchenko, "Dynamic Switch Migration Method Based on QoE- Aware Priority Marking for Intent-Based Networking," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 864-868.

Додаток А. Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

ТзОВ ВТФ «Контех»

Смольницький Є.С.

2020 р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Панченка Олексія Михайловича

«Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах»

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ «Контех» для підвищення ефективності функціонування корпоративної інформаційної мережі використані результати дисертаційної роботи Панченка О.М. «Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Зокрема, представниками компанії ТзОВ ВТФ «Контех» за згодою автора Панченка О.М. використано метод вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах, що дало можливість у високонавантажених каналах для низько пріоритетних потоків покращити точність моніторингу до 70%. А також, розроблений Панченком О.М. скрипт файл для моделювання та конфігурації різного стану характеристик каналів зв'язку програмно-конфігурованої мережі шляхом штучного маніпулювання такими параметрами, як пропускна здатність каналу, затримка, втрати пакетів та розмір черги, що забезпечуватимуться в процесі функціонування мережі. Використання розробленого скрипт файлу дало змогу знайти кореляцію між параметрами якості обслуговування та якістю сприйняття сервісу кінцевими користувачами.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ ВТФ «Контех», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 2%.

Керівник відділу
обслуговування мереж

Смольницький О.Є.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Директор
ТзОВ «Телекомунікаційна компанія»

Пентак І.М.
« 26 » 10 2020 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Панченка Олексія Михайловича

«Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах»

Даний акт складений про те, що у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для підвищення рівня якості сприйняття відеоконтенту в телекомунікаційній мережі використані результати дисертаційної роботи Панченка О.М. «Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах», представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме:

- алгоритм адаптивної пріоритизації сервісів телекомунікаційної мережі, що дав змогу в умовах обмеженості мережних ресурсів підвищити рівень якості сприйняття відео сервісу реального часу визначений на основі суб'єктивної п'ятибальної експертної оцінки QoE, згідно якої більше значення відповідає кращому рівню якості сприйняття. Зокрема, без використання алгоритму адаптивної пріоритизації, рівень отриманої якості становить QoE – 1.8, а з розробленим алгоритмом пріоритизації, рівень якості сприйняття відеосервісу становить QoE – 3.3.
- метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритизації потоків даних дали змогу забезпечити високий рівень якості сприйняття відео сервісу реального часу в умовах перевантаження окремих елементів мереж, зокрема без використання комплексного підходу рівень отриманої якості становив QoE – 1.8, а з використанням методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритизації потоків даних рівень якості сприйняття відеосервісу становив QoE – 4.2.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «Телекомунікаційна компанія», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 3%.

Головний інженер



Рубаха І.М.

«Затверджую»
Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н. І.В. Демидов
« 09 » 2020 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Панченка Олексія Михайловича «Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах».

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини, к.т.н., Небесного Р.В., заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М., завідувача кафедри телекомунікацій, д.т.н., проф. Климаша М.М., склала цей акт у тому, що у держбюджетних науково-дослідних роботах: «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (№ держреєстрації 0117U004449, (2017–2018 рр.)); «Розробка методів та уніфікованих програмно-апаратних засобів для розгортання енергоефективних інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж подвійного призначення» (ДБ/ІВН), (№ держреєстрації 0120U102201, (2020-2022 рр.)) використані наступні результати дисертаційної роботи Панченка Олексія Михайловича на тему «Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах»:

- метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних в програмно-конфігурованих мережах;
- методу вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах;
- алгоритм адаптивної пріоритетизації сервісів телекомунікаційної мережі.

Члени комісії:

 Небесний Р.В.
 Чулой Т.В. /
 Климаш М.М.

«Затверджую»
Проректор з наукової-педагогічної
роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
доц. О.В. Давидчак
« 22 » 05 2020 р.

АКТ




про використання результатів дисертаційної роботи Панченка Олексія Михайловича на тему «Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах», у навчальному процесі кафедри телекомунікацій.

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., Стрихалюк Б.М., директора Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., доц., Кайдан М.В., декана магістратури Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувача кафедри телекомунікацій.

проте, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати дисертаційної роботи Панченка О.М. «Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах», а саме прототип програмно-конфігурованої мережі на основі мікроконтролерних платформ та скрипт файл для конфігурації різного стану характеристик каналів зв'язку програмно-конфігурованої мережі шляхом штучного маніпулювання такими параметрами, як пропускна здатність каналу, затримка, втрати пакетів та розмір черги, що забезпечуватимуться в процесі функціонування мережі. Використання розробленого прототипу та скрипт файлу дало змогу знайти кореляцію між параметрами якості обслуговування та якістю сприйняття сервісу кінцевими користувачами. Зокрема, результати використані для модернізації курсу лекцій (Лекція 8 «Технології програмно-конфігурованих мереж») та лабораторних робіт (Лабораторна 9 – 10 «Дослідження якості передавання відео потоку в SDN мережі» з дисципліни «Технології інформаційно-комунікаційних мереж» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології».

Члени комісії:


Стрихалюк Б.М.

Кайдан М.В.

Климаш М.М.

Додаток Б. Програмний код для вимірювання затримки пакетів в SDN

Controller program: measure_delay.py

```
#global variables
start_time = 0.0
sent_time1=0.0
sent_time2=0.0
received_time1 = 0.0
received_time2 = 0.0
src_dpid=0
dst_dpid=0
mytimer = 0
D1=0.0
D2=0.0

#probe protocol, only timestamp field
class myproto(packet_base):
    "My Protocol packet struct"

    def __init__(self):
        packet_base.__init__(self)
        self.timestamp=0

    def hdr(self, payload):
        return struct.pack('!I', self.timestamp)

def _handle_ConnectionDown (event):
    global mytimer
    print "ConnectionDown: ", dpidToStr(event.connection.dpid)
    mytimer.cancel()

def _handle_ConnectionUp (event):
    global src_dpid, dst_dpid, mytimer
    print "ConnectionUp: ", dpidToStr(event.connection.dpid)

#remember the connection dpid for switch to controller (src_dpid) and switch1 to controller(dst_dpid)
    for m in event.connection.features.ports:
        if m.name == "s0-eth0":
            src_dpid = event.connection.dpid
        elif m.name == "s1-eth0":
            dst_dpid = event.connection.dpid

    # when the controller knows both src_dpid and dst_dpid, the probe packet is sent out every 2
    seconds
    if src_dpid<>0 and dst_dpid<>0:
        mytimer=Timer(2, _timer_func, recurring=True)
        mytimer.start()
```

```

def _handle_portstats_received (event):
    global start_time, sent_time1, sent_time2, received_time1, received_time2, src_dpid, dst_dpid,
    D1, D2

    received_time = time.time() * 1000 - start_time
    #measure T1
    if event.connection.dpid == src_dpid:
        D1=0.5*(received_time - sent_time1)
        #print "OWD1: ", OWD1, "ms"
    #measure T2
    elif event.connection.dpid == dst_dpid:
        D2=0.5*(received_time - sent_time1)
        #print "OWD2: ", OWD2, "ms"

def _handle_PacketIn (event):
    global start_time,OWD1,OWD2
    packet = event.parsed
    #print packet

    received_time = time.time() * 1000 - start_time
    if packet.type==0x5577 and event.connection.dpid==dst_dpid:
        c=packet.find('ethernet').payload
        d,=struct.unpack('!I', c)
        print "delay:", received_time - d - D1-D2, "ms"

    a=packet.find('ipv4')
    b=packet.find('arp')
    if a:
        #print "IPv4 Packet:", packet
        msg = of.ofp_flow_mod()
        msg.priority =1
        msg.idle_timeout = 0
        msg.match.in_port =1
        msg.match.dl_type=0x0800
        msg.actions.append(of.ofp_action_output(port = 2))
        event.connection.send(msg)

        msg = of.ofp_flow_mod()
        msg.priority =1
        msg.idle_timeout = 0
        msg.match.in_port =2
        msg.match.dl_type=0x0800
        msg.actions.append(of.ofp_action_output(port = 1))
        event.connection.send(msg)

    if b and b.opcode==1:
        #print "ARP Request Packet:", packet
        msg = of.ofp_flow_mod()
        msg.priority =1
        msg.idle_timeout = 0

```

```

msg.match.in_port = 1
msg.match.dl_type=0x0806
msg.actions.append(of.ofp_action_output(port = 2))
if event.connection.dpid == src_dpid:
    #print "send to switch"
    event.connection.send(msg)
elif event.connection.dpid == dst_dpid:
    #print "send to switch1"
    event.connection.send(msg)

def _timer_func ():
    global start_time, sent_time1, sent_time2, src_dpid, dst_dpid

    if src_dpid <>0:
        sent_time1=time.time() * 1000 - start_time
        #print "sent_time1:", sent_time1
        #send out port_stats_request packet through src_dpid
        core.openflow.getConnection(src_dpid).send(of.ofp_stats_request(body=of.ofp_port_stats_r
equest()))

        f = myproto()
        f.timestamp = int(time.time()*1000 - start_time)
        #print f.timestamp
        e = pkt.ethernet()
        e.src=EthAddr("0:0:0:0:2")
        e.dst=EthAddr("0:1:0:0:1")
        e.type=0x5577
        e.payload = f
        msg = of.ofp_packet_out()
        msg.data = e.pack()
        msg.actions.append(of.ofp_action_output(port=2))
        core.openflow.getConnection(src_dpid).send(msg)

    if dst_dpid <>0:
        sent_time2=time.time() * 1000 - start_time
        #print "sent_time2:", sent_time2
        #send out port_stats_request packet through dst_dpid
        core.openflow.getConnection(dst_dpid).send(of.ofp_stats_request(body=of.ofp_port_stats_reque
st()))

```

Додаток В. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. I. Demydov, N. A. Baydoun, M. Beshley, M. Klymash, and O. Panchenko, “Development of Basic Concept of ICT Platforms Deployment Strategy for Social Media Marketing Considering Tectonic Theory,” *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 0, no. 1, pp. 18-33, Jan. 2020.

2. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Prislupskiy, H. Beshley, O. Panchenko, “Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT,” *Internet of Things (IoT) and Engineering Applications*, Vol. 3, Issue 1, pp. 22-23. May 2018.

3. V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk, “Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing,” *Technology audit and production reserves*, №3/2(41), pp.46-55, 2018.

4. М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко, “Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах,” *Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - X: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба*, 5(142), с. 114-123, 2016.

5. М.М. Климаш, М.І. Бешлей, Ю.Д. Дещинський, О.М. Панченко, “Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP,” *Комп’ютерні технології друкарства*, № 2, с. 146-155, 2015.

6. М.М. Климаш, В.І. Романчук, О.М. Панченко, М.І. Бешлей, А. В. Поліщук, “Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації*, № 885, с. 22-30, 2017.

7. В.І Романчук, М.І. Бешлей, О.М. Панченко, А.В. Поліщук, “Метод узгодженого розв’язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережевих пристроїв,” *Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв’язку*, №2(50), с. 48-57, 2018.

8. І.О. Кагало, М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, “Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi,” *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с. 24-38, 2019.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and M. Seliuchenko, "Dynamic Switch Migration Method Based on QoE- Aware Priority Marking for Intent-Based Networking," *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2020, pp. 864-868. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

10. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko, "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 1167-1170. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

11. M. Beshley, A. Pryslupskyi, O. Panchenko and H. Beshley, "SDN/Cloud Solutions for Intent-Based Networking," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 22-25. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

12. Pryslupskyi, O. Panchenko, M. Beshley and M. Seliuchenko, "Improvement of Multiprotocol Label Switching Network Performance using Software-defined Controller," *2019 IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Polyana, Ukraine, 2019, pp. 106-109. (Очна участь здобувача із доповіддю).

13. H. Beshley, O. Panchenko and M. Kyryk, "Investigation and Implementation of Methods for Controlling the Intensity of Flow of Information Protocols," *2018*

International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1-5. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

14. H. Beshley, M. Kyryk, M. Beshley and O. Panchenko, "Method of Information Flows Engineering and Resource Distribution in 4G/5G Heterogeneous Network for M2M Service Provisioning," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Lviv, 2018, pp. 229-233. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

15. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 282-286. (Очна участь здобувача із доповіддю).

16. O. Panchenko, A. Polishuk, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Method for adaptive client-oriented management of quality of service in integrated SDN/CLOUD networks," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 452-455. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

17. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," *2017 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, 2017, pp. 1-5. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

18. V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and P. Arthur, "Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes," *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, 2017, pp. 295-298. (Очна участь здобувача із доповіддю).

19. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko and A. Polishuk, "Adaptive flow routing model in SDN," *2017 14th International Conference the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, 2017, pp. 298-302. (Очна участь здобувача із доповіддю).

20. M. Seliuchenko, M. Beshley, O. Panchenko and M. Klymash, "Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in software-defined networks," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 2016, pp. 667-670. (Очна участь здобувача із доповіддю).

21. M. Seliuchenko, O. Lavriv, O. Panchenko and V. Pashkevych, "Enhanced multi-commodity flow model for QoS-aware routing in SDN," *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Kiev, 2016, pp. 1-3. (Очна участь здобувача із доповіддю).

22. М.І. Бешлей, О.М. Панченко, І.В. Демидов, М.О Селюченко, "Метод динамічного управління якістю послуг в інтегрованій SDN/CLOUD мережі," *Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Чернівці, 3-5 листопада 2016 р., с. 74-75. (Очна участь здобувача із доповіддю).

23. М.І. Бешлей, М.М. Климаш, О.М. Панченко, Г.В. Бешлей, "Розроблення системи моніторингу та аналізу трафіку інформаційно телекомунікаційної мережі для виявлення аномалії і запобігання атак," *I міжнародна науково-практична конференція "Проблеми кібербезпеки інформаційно телекомунікаційних систем" (PCSITS)*, м. Київ, 5-6 квітня 2018р., с. 201-203. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

24. М.М. Климаш, М.О Селюченко, О.М. Панченко, "Система моніторингу пакетної затримки в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах," *X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції*, м. Київ, 19-22 квітня 2016р., с. 140-142. (Очна участь здобувача із доповіддю).