

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.

Предмет 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'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.

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 формалізованої 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 телекомунікації.

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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні 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. (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 - 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*, № 884, с. 66-75, 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. 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. 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, 3-5 листопада 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" (PCSITS)*, м. Київ, 5-6 квітня 2018 р., с. 201-203.

24. 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 2016 р., с. 140-142.