

12.04.2021р.

Голові разової спеціалізованої вченої ради ДФ.35.052.040
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук
Стрихалюку Б.М.

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки Єременко Олександри Сергіївни на дисертаційне дослідження Панченка Олексія Михайловича «Адаптивне управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах», представленого на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка», галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Актуальність теми роботи

Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій і використання програмно-конфігурованих мереж (Software-defined Network, SDN) сприяють розширенню та впровадженню широкого спектру послуг. Водночас вимоги до якості обслуговування QoS (Quality of Service, QoS) стають все більш жорсткими. В межах сучасних і передових систем управління телекомунікаційною мережею особлива увага приділяється методам маршрутизації, пріоритезації та розподілу ресурсів для забезпечення заданого рівня якості обслуговування. Слід зазначити, що використання перспективних технологій програмно-конфігурованих мереж дозволяє операторам проводити гнучке налаштування, централізоване управління та оптимізацію, на відміну від традиційних мереж, де проведення адаптивного управління мережними ресурсами майже неможливе. Проте, не дивлячись на переваги технології SDN, вона потребує вдосконалення існуючих протоколів маршрутизації, пріоритезації та механізмів балансування навантаження з метою задоволення вимог щодо чисельних значень ключових показників QoS окремих інформаційних потоків користувачів програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж, а також узгодженості управління ресурсами як серверної, так і мережної частини мережі.

Виходячи з цього, є актуальною проблематика дисертаційної роботи Панченка Олексія Михайловича, яка присвячена розв'язанню науково-практичного завдання щодо забезпечення замовленої якості обслуговування шляхом розроблення нової моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі з адаптивним управлінням ресурсами та якістю обслуговування, що базується на удосконалених методах адаптивної пріоритезації, маршрутизації та вибору сервера обслуговування.

Актуальність теми дисертації також підкріплена впровадженням отриманих дисертантом результатів у науково-дослідні роботи (НДР):

- «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (2017 – 2018 рр.), № держреєстрації 0117U004449;
- «Розробка методів та уніфікованих програмно-апаратних засобів для розгортання енергоефективних інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж подвійного призначення» (2020 – 2022 рр.), № держреєстрації 0120U102201;

які виконувались у Національному університеті «Львівська політехніка».

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 200 сторінок друкарського тексту, із них: 8 сторінок вступу, 143 сторінки основного тексту, 83 рисунків, 6 таблиць, список використаних джерел із 150 найменувань, додатки на 11 сторінках.

У *вступі* подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі процедурні положення та подано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У *першому розділі* проведено порівняльний аналіз принципів побудови, архітектури та процесів функціонування традиційних і програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж. Досліджено основні параметри, що характеризують якість обслуговування в мережах із сервісно-орієнтованою архітектурою. В результаті аналізу існуючих систем управління мережею встановлено, що маршрутизація потоків, як і раніше, здійснюється за допомогою алгоритмів знаходження найкоротшого шляху за критеріями якості обслуговування та доступності ресурсів мережі, що використовуються в існуючих протоколах маршрутизації. Аналіз останніх досліджень показав, що маршрутизація потоків у програмно-конфігурованих мережах здійснюється зазвичай або за критерієм якості обслуговування, або за критерієм рівномірного завантаження мережних ресурсів. Крім того, постійно зростаючий попит на використання мультимедійних додатків привів відповідно до посилення вимог щодо забезпечення рівня якості обслуговування за множиною QoS показників.

У *другому розділі* роботи запропоновано моделі та методи управління процесом обслуговування потоків даних з метою забезпечення адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах. Розроблено метод вимірювання затримки окремого класу інформаційних потоків в агрегованому каналі для індивідуального моніторингу параметрів якості обслуговування послуг і подальшого їх використання для визначення оптимального маршруту. Розроблено метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації потоків даних у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах, який використовує адаптивну інтегральну метрику окремо для кожного класу інформаційних потоків. Розроблено адаптивний алгоритм пріоритезації

інформаційних потоків, використання якого 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. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для визначення оптимального сервера обслуговування даних з використанням інтегрального адитивного критерію.

У *третьому розділі* показано результати моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої телекомунікаційної мережі. В результаті проведених досліджень доведено, що комплексне використання запропонованого методу адаптивної маршрутизації і пріоритезації потоків даних забезпечило високий рівень якісного сприйняття сервісу відеопотоку реального часу в умовах перевантаження окремих елементів мережі. Встановлено, що використання адаптивної маршрутизації забезпечує необхідний рівень якості обслуговування для конкретного виду трафіку шляхом маніпулювання ваговими коефіцієнтами метрики маршруту.

У *четвертому розділі* розроблено експериментальний макет SDN мережі за допомогою програмного розгортання віртуального багаторівневого комутатора з відкритим кодом Open vSwitch на апаратній платформі Raspberry Pi 3 Model B та контролера Floodlight на платформі Orange Pi Prime. На основі розробленого експериментального зразка мережі проведено дослідження впливу технічних параметрів якості обслуговування в процесі передавання відеопотоків реального часу на рівень якості сприйняття сервісу кінцевим користувачем.

Висновки по дисертаційній роботі підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень. Список використаних джерел і посилань на них у тексті дисертації свідчить про те, що під час роботи було проаналізовано сучасні результати наукових досліджень провідних учених світу. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи достатньо висвітлені в публікаціях у наукових фахових виданнях та апробовані на міжнародних і науково-технічних конференціях.

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертаційної роботи, висвітлює всі отримані результати, сформульовані висновки та запропоновані рекомендації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Панченка О.М., впливають з достовірності отриманих дисертантом результатів, засвідчених відповідними актами впровадження, обговоренням матеріалів дисертації на 16 міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях, а також

наукових семінарах, де отримали схвальну оцінку. Адекватність отриманих рішень та оцінка їхньої ефективності підтверджені результатами моделювання та дослідження запропонованих методів адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування шляхом використання розробленої імітаційної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі, а саме:

- дослідження методів автоматизованого покращення якості надання послуг безпосередньо для абонента, який звернувся зі скаргою, зокрема метод адаптивної пріоритезації, що базується на розставленні пріоритетів пакетам потоків, що надходять у мережу, за умови надання найвищого пріоритету сервісу, який використовується найбільше;
- дослідження запропонованого методу адаптивної маршрутизації, спрямованого на гарантоване покращення QoE для конкретного сервісу;
- проведення верифікації запропонованої адаптивної маршрутизації у порівнянні з існуючими алгоритмами маршрутизації OSPF та EIRGP шляхом імітаційного моделювання.

Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій

У дисертаційній роботі Панченка О.М. отримано такі наукові результати:

1. Вперше розроблено модель програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої телекомунікаційної мережі з використанням централізованого адаптивного управління ресурсами мережної та серверної площин за рахунок проведення моніторингу та узгодження динаміки стану їх функціонування. Це дозволило забезпечити адаптивне управління якістю обслуговування користувачів.
2. Удосконалено метод вимірювання затримки передавання даних між будь-якою парою комутаторів і вздовж маршруту загалом у програмно-конфігурованій мережі за рахунок формування SDN контролером пробних пакетів з різними пріоритетами, призначених для моніторингу каналів зв'язку, якими передаються потоки різних класів обслуговування, що дозволило підвищити точність оцінки стану каналу за критерієм затримки.
3. Набув подальшого розвитку метод маршрутизації потоків даних у програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих мережах на основі багатокритеріальної оптимізації із застосуванням інтегрального адитивного критерію розрахунку адаптивної метрики маршруту для певного класу інформаційних потоків з метою визначення оптимального маршруту передавання даних в умовах динамічної зміни стану мережі.
4. Розвинуто математичну модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE з технічними параметрами QoS, які забезпечуються в мережі при перегляді відеопотоків реального часу, під час адаптивної маршрутизації потоків даних з метрикою маршрутів,

розрахунок якої базується на багатокритеріальній оптимізації з інтегральним адитивним критерієм.

Практична значимість результатів роботи

Отримані в дисертаційній роботі Панченка О.М. наукові результати мають суттєву практичну цінність у зв'язку з тим, що можуть бути використані під час створення нових і вдосконалення існуючих методів та алгоритмів адаптивної пріоритетизації, маршрутизації та вибору серверів обслуговування в програмно-конфігурованих сервісно-орієнтованих телекомунікаційних мережах. Впровадження запропонованих моделей, методів та алгоритмів дозволяє підвищити рівень якості обслуговування та якості сприйняття за наступними показниками:

- за рахунок використання удосконаленого методу вимірювання затримки передавання даних у програмно-конфігурованій мережі у високонавантажених каналах для низько пріоритетних потоків вдалось покращити точність моніторингу до 70%;
- застосування алгоритму адаптивної пріоритетизації сервісів телекомунікаційної мережі дозволило отримати рівень якості сприйняття QoE відеосервісу, що становив 3,3, тоді як без використання цього алгоритму рівень отриманої якості становив 1,8;
- комплексне використання методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритетизації потоків даних дало змогу забезпечити високий рівень якості сприйняття відеосервісу реального часу в умовах перевантаження окремих елементів мережі, зокрема без використання комплексного підходу рівень отриманої якості QoE становив 1,8, а з використанням методу адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритетизації потоків даних рівень якості сприйняття QoE відеосервісу становив 4,2;
- використання розробленого скрипт файлу для конфігурації стану характеристик каналів зв'язку програмно-конфігурованої мережі дало змогу знайти кореляцію між параметрами якості обслуговування та якістю сприйняття сервісу кінцевими користувачами;
- застосування прототипу програмно-конфігурованої мережі на базі мікроконтролерних платформ дало змогу підтвердити ефективність запропонованих рішень і дослідити вплив параметрів якості обслуговування в процесі передавання відеопотоків реального часу на рівень якості сприйняття сервісу.

Важливість для практики результатів дисертаційної роботи підтверджена актами їхнього впровадження, а саме:

- у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» з метою підвищення рівня якості сприйняття відеоконтенту в телекомунікаційній мережі використано алгоритм адаптивної пріоритетизації сервісів, а також метод адаптивної багатокритеріальної маршрутизації та пріоритетизації потоків даних;

- у ТзОВ ВТФ «Контех» впроваджено метод вимірювання затримки передавання даних у програмно-конфігурованій мережі та скрипт файл для моделювання та конфігурації стану характеристик каналів зв'язку;
- результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» та ТзОВ ВТФ «Контех», відповідають результатам досліджень, представлених у дисертаційній роботі.

Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях

Проведений аналіз показав, що здобувач має необхідний обсяг наукових публікацій та апробацій. Результати дисертаційної роботи викладені у 24 наукових працях, серед них 6 статей у наукових фахових виданнях України та 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, з яких 1 наукова стаття у журналі з імпаکت-фактором, кuartиль Q2, що входить до наукометричної бази Scopus, 3 статті у виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз. Дисертант доповідався на 16-ти міжнародних і всеукраїнських конференціях, з яких 13 доповідей були представлені на конференціях, які проходили під егідою IEEE та індексуються в наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library.

Відповідність теми дисертації профілю спеціальності

Дисертація Панченка О.М. повністю відповідає спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Відсутність порушення академічної доброчесності

Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача під час детального ознайомлення з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації з науковими працями Панченка О.М. свідчать про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей, методів і гіпотез дотичних до тематики інших робіт містить відповідні посилання.

Зауваження та недоліки

1. У першому розділі роботи не приділено достатньої уваги існуючим аспектам забезпечення якості обслуговування та управління ресурсами в мережах саме із сервісно-орієнтованою архітектурою.
2. У роботі на основі імітаційного моделювання проводиться дослідження ефективності запропонованого методу маршрутизації відносно протоколу маршрутизації EIGRP, пропрієтарного для мережного обладнання компанії CISCO. Із проведеного дослідження, наведеного у

третьому розділі, не зрозуміло, яким чином реалізується протокол маршрутизації EIGRP в середовищі Mininet для програмно-конфігурованих мереж. Доцільно було б показати у додатках фрагменти програмного коду реалізації розробленого методу маршрутизації.

3. У процесі дослідження ефективності розробленого методу маршрутизації не проведено оцінку швидкодії розрахунку оптимального маршруту, що є важливим з урахуванням динаміки функціонування мережі та забезпечення якості обслуговування потоків реального часу відповідно до запропонованої дисертантом концептуальної моделі програмно-конфігурованої сервісно-орієнтованої мережі.
4. Відповідно до запропонованого в роботі методу маршрутизації потоків даних (розділ 2.4) на основі багатокритеріальної оптимізації із застосуванням інтегрального адитивного критерію, розрахунок адаптивної метрики маршруту здійснюється за параметрами QoS, що характеризують поточний стан мережі. Проте, такий процес вимагає постійного моніторингу стану мережі. Отже, з дисертаційної роботи не зрозуміло, яким чином відбувається реалізація моніторингу в середовищі моделювання таких параметрів, як джитер, втрати пакетів і завантаженість каналів зв'язку. Також у роботі наведено лише результати вимірювання затримки передавання даних.
5. З дисертації не зрозуміло, як саме реалізується узгодженість процесів управління вибором сервера обслуговування та маршруту передавання даних, що потребує додаткового пояснення.
6. У четвертому розділі дисертаційної роботи розвинуто математичну модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE з технічними параметрами QoS, які забезпечуються в мережі в процесі перегляду відеопотоків реального часу. Доцільно було б представити результати порівняння цієї моделі з існуючими математичними моделями кореляції QoS/QoE.

Загальний висновок

У дисертаційній роботі Панченка О.М. розв'язано актуальну науково-прикладну задачу щодо забезпечення замовленої якості обслуговування в умовах обмеженості мережних 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.

Дисертаційна робота відповідає вимогам наказу МОН України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 року № 167. Зміст автореферату відповідає положенням дисертаційної роботи.

Здобувач Панченко Олексій Михайлович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

Офіційний опонент
професор кафедри інфокомунікаційної інженерії
імені В. В. Поповського
Харківського національного університету
радіоелектроніки
доктор технічних наук
професор



О. С. Єременко

Перший проректор
Харківського національного
університету радіоелектроніки
доктор технічних наук
професор



І. В. Рубан