

Голові спеціалізованої
вченої ради Д 35.052.10
у Національному університеті
«Львівська політехніка»

Львів-13, вул. С. Бандери, 12

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки Єременко Олександри Сергіївни на дисертаційне дослідження Бешлея Миколи Івановича на тему «Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів», що подана до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Актуальність теми роботи

У зв'язку з інтенсивним розвитком технологій програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж (Intent-Based Software-Defined Network), які дозволяють створити єдину інфраструктуру з централізованим управлінням мережними ресурсами та наданням всіх видів сучасних мультимедійних сервісів, на сьогоднішній день пріоритетним завданням стає забезпечення якості обслуговування та безпеки на основі намірів користувачів в інфокомунікаційних мережах. Водночас виконання цих вимог має забезпечуватися відповідними засобами перетворення інформаційних бізнес-намірів користувачів на відповідні конфігурації мережі для всіх пристроїв на основі аналізу її стану та застосування методів машинного навчання.

Проте, використання гетерогенних мереж з централізованим управлінням потребує вирішення завдань підвищення ефективності існуючих і створення нових технологічних рішень, моделей, методів та алгоритмів адаптивного інтелектуального управління ресурсами та якістю обслуговування з поєднанням сучасних методів мережної аналітики та машинного навчання, що реалізуються на контролерах мережі.

Виходячи з цього, є актуальною проблематика дисертаційної роботи Бешлея Миколи Івановича, яка присвячена розв'язанню науково-прикладної проблеми щодо розроблення методології аналізу та синтезу складних гетерогенних інфокомунікаційних систем з метою створення нової програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі, яка постійно на основі мінливих вимог користувачів щодо якості надання сервісів і розгортання інфраструктури навчається, адаптується, автоматизується та захищається від потенційних кібератак шляхом використання нових методів розподілу

ресурсів, інженерії трафіку, мережної аналітики та існуючих алгоритмів машинного навчання.

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

- «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN-технологій для систем електронного урядування» (2015-2016 рр.), ДР №0115U000444;
- «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (2017–2018 рр.), ДР №0117U004449;
- «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (2018–2019 рр.), ДР №0117U007177;
- «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (2020-2022 рр.), ДР №0120U100674;
- «Розробка методів та уніфікованих програмно-апаратних засобів для розгортання енергоефективних інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж подвійного призначення» (2020-2022 рр.), ДР №0120U102201,

які виконувались у Національному університеті «Львівська політехніка».

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення

Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 450 сторінок друкарського тексту, із них 16 сторінок вступу, 335 сторінок основного тексту, 189 рисунків, 20 таблиць, список використаних джерел із 280 найменувань.

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 і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Бешлея М.І.,

впливають з достовірності отриманих дисертантом результатів, засвідчених відповідними актами впровадження, обговоренням матеріалів дисертації на 36 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 моделей і методів у межах розроблених прототипів програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі корпоративного сегменту, а саме:

- імітаційного моделювання процесу функціонування інтенційно-орієнтованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку, за допомогою якої оцінено ефективність запропонованого методу інтенційно-орієнтованого управління частотно-часовими ресурсами та формування структури рівня радіодоступу;
- порівняння розробленої інтелектуальної програмної системи Deep Packet Inspection (DPI) з існуючою системою DPI SolarWinds, яка також містить функції виявлення мережних аномалій, контролю трафіку, детектування інформаційних протоколів і розпізнавання атак;
- імітаційного моделювання гетерогенної мережі LTE/NB-IoT з комплексним використанням розроблених методів пріоритезації IoT трафіку та балансування навантаження;
- експериментального дослідження розробленого прототипу інтенційно-орієнтованої мережі на базі мікроконтролерних платформ, апаратних SDN комутаторів ZODIAC FX/GX і віртуалізації мережних функцій компонентів технології SDN, в яких реалізовано та оцінено ефективність запропонованих рішень щодо адаптивного клієнт-орієнтованого управління ресурсами та якістю обслуговування.

Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій

Новими науковими результатами, що *отримані здобувачем вперше* є:

- потокова модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж з вибором оптимального шляху передавання даних на основі адаптивної QoE метрики маршруту, що розраховується контролером з використанням математичної моделі кореляції нормалізованого значення замовленого рівня якості сприйняття сервісу та інтегрального адитивного критерію поточних показників якості обслуговування з урахуванням завантаженості вузлів;
- метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для інтенційно-орієнтованих мереж, що в умовах високого навантаження для формування якості послуги враховує об'єктивну оцінку часових характеристик мережі та суб'єктивні QoE оцінки користувачів, крім того, за допомогою машинного навчання здійснюється реагування на несприятливі поєднання значень показників якості та попередження

незадоволеності користувачем якістю отримуваних сервісів для адаптивного прогнозування переконфігурації мережі;

- інтелектуальна DPI (Deep Packet Inspection) система моніторингу та аналізу мережного трафіку, що базується на поєднанні методів сигнатурного, статистичного та фрактального аналізу інформативних ознак з метою детектування інформаційних протоколів і ранжування прихованих властивостей аномального трафіку під час управління процесом передавання даних;
- метод розподілу частотно-часових ресурсів низхідного та висхідного каналів зв'язку гетерогенної мережі LTE/NB-IoT, що дозволяє врахувати наміри користувачів щодо рівня якості надання сервісів Інтернету речей та адаптивно планувати процес виділення ресурсів на основі аналізу пріоритетності даних, зокрема у вузькосмуговому NB-IoT спектрі, забезпечуючи необхідну міжкінцеву інтенційно-орієнтовану якість обслуговування;
- адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів і формування структури рівня радіодоступу 4G/5G з урахуванням локалізації групи інтенційно-орієнтованого користувацького навантаження та аналізом замовлених оцінок щодо забезпечення необхідного рівня якості сприйняття сервісу з підвищенням ефективності використання енергетичних і частотно-часових ресурсів мережі із забезпеченням заданого рівня якості обслуговування;
- методологія синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої мережі на основі її представлення як централізовано програмованої інфраструктури та підвищення рівня адаптивності системи з використанням розроблених методів управління енергоефективністю, якістю сприйняття сервісу, захищеності даних і розподілу ресурсів.

Здобувачем удосконалено метод виявлення аномалій мережного трафіку з формуванням набору інформативних ознак нормальної й аномальної поведінки мережі на основі оцінки параметра Херста та самонавчання, що може застосовуватися в традиційних і майбутніх інтенційно-орієнтованих мережах.

В дисертаційній роботі *набули подальшого розвитку*:

- метод балансування навантаження в мережі LTE/NB-IoT, у межах якого шляхом використання розробленої централізованої системи моніторингу частотно-часових ресурсів та аналізу пріоритету за умови дефіциту ресурсів для обслуговування критично-важливих IoT даних основною базовою станцією забезпечується надійний зв'язок завдяки перенаправленню на обслуговування менш завантаженою альтернативною базовою станцією;
- імітаційна модель інтенційно-орієнтованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку з урахуванням параметрів мережі для створення реальних умов дослідження та автоматизації запропонованих методів

управління частотно-часовими ресурсами та формування структури рівня радіодоступу.

Крім того, здобувачем *розвинуто* математичну модель визначення суб'єктивної якості сприйняття QoE відповідно до зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, що забезпечуються в мережі, зокрема для відео та аудіо сервісів реального часу, на основі кореляції між нормалізованим значенням якості сприйняття та інтегральним адитивним критерієм QoS показників з урахуванням завантаженості вузлів мережі.

Практична значимість результатів роботи

Отримані в дисертаційній роботі Бешля М.І. наукові результати мають суттєву практичну цінність у зв'язку з тим, що можуть бути використані під час створення нових і вдосконалення існуючих моделей і методів адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж з урахуванням вимог користувачів щодо якості надання сервісів і розгортанням інфраструктури, що навчається, адаптується, автоматизується та захищається від потенційних кібератак. Впровадження запропонованих моделей і методів дозволяє підвищити рівень якості обслуговування, якості сприйняття та безпеки за наступними показниками:

- за рахунок використання удосконаленого алгоритму вимірювання затримки передавання даних у програмно-конфігурованих мережах шляхом формування IBN/SDN контролером пробних пакетів меншого розміру з різними пріоритетами у високонавантажених каналах для низько пріоритетних потоків вдалося покращити точність моніторингу до 45% та зменшити до 22% сигналізаційне навантаження у порівнянні з відомими алгоритмами;
- застосування методу адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг дозволяє отримати вигравш у середньому від 2-5 разів за критерієм кількості користувачів, які вимагають високої якості сприйняття послуги;
- використання розробленої інтелектуальної DPI системи моніторингу та аналізу трафіку забезпечує виявлення складних атак, зокрема Non-Spoofed UDP Flood, SYN Flood, фрагментацію HTTP, та шляхом автоматизованого блокування виявленого шкідливого трафіку зменшує загальний рівень втрат на 5% у порівнянні з існуючою DPI системою SolarWinds;
- комплексне використання розроблених методів пріоритезації IoT трафіку та балансування навантаження дають змогу зменшити середню міжкінцеву затримку передавання повідомлень реального часу на 68,8% (або 3,21 рази), а також під час використання механізму пріоритезації, зменшити кількість відмов у обслуговуванні на 58% для класу L1 (трафік RT) та 76% для L2 (трафік URLLC) у порівнянні з існуючим методом пропорційного розподілу ресурсів в режимі високого навантаження;

- застосування адаптивного інтенційно-орієнтованого методу розподілу ресурсів і формування структури рівня радіодоступу мереж 4G/5G дав змогу ефективніше на 25 % використовувати наявні частотно-часові ресурси та зменшити на 8,7% енергоспоживання мережі рівня радіодоступу для забезпечення замовленої якості обслуговування користувачів у порівнянні з традиційними методами;
- використання моделі енергоефективної QoE-маршрутизації потоків даних у порівнянні з відомою моделлю DMCQR для програмно-конфігурованих мереж дало змогу досягти кращої збалансованості завантаження каналів мережі та зменшити до 3 разів середню міжкінцеву затримку обслуговування потоків реального часу, а також в умовах низької інтенсивності трафіку зменшити енергоспоживання мережі до 53,56%.

Важливість для практики результатів дисертаційної роботи підтверджена відповідними актами їхнього впровадження, а результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях, 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 60 наукових працях, серед них 1 монографія, 1 колективна монографія, 7 статей у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science, 1 стаття у науковому фаховому виданні України, що індексується наукометричною базою Scopus, 2 статті у закордонних періодичних виданнях, 12 статей у наукових фахових виданнях України. Дисертант доповідався на 36-ти міжнародних і всеукраїнських конференціях, з яких 27 доповідей були представлені на конференціях, що проходили під егідою IEEE та індексуються в наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library.

Зауваження та недоліки

1. У другому розділі дисертаційного дослідження (підрозділ 2.2) автор, базуючись на власних експериментальних дослідженнях, запропонував математичну модель визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE залежно від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, що забезпечуються в програмно-конфігурованій мережі, зокрема для відео та аудіо сервісів реального часу. Проте, у самій роботі представлено експериментальні дослідження лише для відео потоків. Отже, не зрозуміло, яким чином та з використанням яких засобів отримано математичну функцію кореляції QoE/QoS для аудіо сервісів. Крім того, потребує додаткового пояснення, чому автор досліджує саме відео та аудіо сервіси та не приводить інших прикладів інформаційних послуг, а також відповідних математичних функцій кореляції параметрів QoE/QoS.

2. На рис. 2.1 дисертаційної роботи представлено запропоновану автором концептуальну модель побудови інтенційно-орієнтованої інфокомунікаційної мережі з адаптивним управлінням якістю надання сервісів для оператора мобільного зв'язку. Особливістю запропонованої моделі є те, що політика адаптивного управління ресурсами на всіх рівнях моделі відбувається узгоджено за допомогою контролера SDN. Проте, яким шляхом досягається узгодженість в процесі моделювання чи експериментального дослідження мережі, у роботі не описано.
3. У висновках по дисертаційній роботі автор стверджує, що розроблена інтелектуальна DPI система моніторингу та аналізу трафіку дає змогу виявляти складні атаки різних типів, зокрема таких як SYN Flood, фрагментація HTTP, UDP Flood, DNS Flood, Non-Spoofed UDP Flood, хоча у самій роботі наводяться лише дослідження виявлення атаки Non-Spoofed UDP Flood. Таким чином, було б доцільно представити результати дослідження щодо розпізнавання інших типів атак запропонованою дисертантом DPI системою.
4. У розділі 5.2 дисертаційної роботи технічне завдання синтезу рівня радіодоступу 4G/5G автором сформульовано у вигляді оптимізаційної задачі розподілу ресурсів і формування енергоефективної структури рівня радіодоступу, цільова функція якої є багатопараметричною. Однак в роботі не наведено, якими методами розв'язується сформульована задача.
5. У шостому розділі роботи представлено практичну реалізацію запропонованого механізму QoE маршрутизації на відповідному прототипі програмно-конфігурованої мережі, що базується на мікроконтролерах. А втім, автором не пояснено, яким чином вдалося реалізувати наміри (інтенції) користувачів щодо забезпечення необхідної якості обслуговування сервісів Інтернету речей. Також потребує додаткового роз'яснення, чим відрізняється розроблена дисертантом потокова модель енергоефективної QoE маршрутизації від відомого раніше алгоритму QoS маршрутизації DMCQR, оскільки він також базується на багатокритеріальному підході.
6. Здобувачем недостатньо уваги приділено питанням забезпечення відмовостійкості головного контролера інтенційно-орієнтованої інфокомунікаційної мережі, який зі свого боку може стати єдиною точкою відмови, а також негативно впливати на масштабованість і швидкість прийняття мережних рішень.

Загальний висновок

У дисертаційній роботі Бешлея М.І. розв'язано актуальну науково-прикладну задачу щодо розроблення методології аналізу та синтезу складних гетерогенних інфокомунікаційних систем з метою створення нової програмно-конфігурованої інтенційно-орієнтованої мережі, яка постійно на основі мінливих вимог користувачів щодо якості надання сервісів та розгортання

інфраструктури навчається, адаптується, автоматизується та захищається від потенційних кібератак шляхом використання нових методів розподілу ресурсів, інженерії трафіку, мережної аналітики та існуючих алгоритмів машинного навчання.

За актуальністю, науковим рівнем, завершеністю досліджень, аргументованістю та достовірністю отриманих наукових результатів, їх практичною спрямованістю, а також висвітленням основного змісту у наукових публікаціях робота Бешлея Миколи Івановича «Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів» відповідає паспорту обраної спеціальності та вимогам пп. 9, 10, 12, 13 положення про «Порядок присудження наукових ступенів», а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

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

О. С. Єременко

Підпис професора Єременко О.С. засвідчую.
Учений секретар
Харківського національного
університету радіоелектроніки



І. В. Магдаліна