

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу Бешлея Миколи Іванович на тему «Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів», подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук а за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

1. Актуальність теми дисертації

Поточний етап розвитку сучасного суспільства характеризується все більш широким впровадженням інформаційно-комунікаційних систем і технологій. Основу інфокомунікацій формують телекомунікаційні системи та мережі, які забезпечують одночасне надання великої множини сервісів на базі однієї транспортної платформи. Результати проведеного аналізу сучасного стану телекомунікаційних технологій і основних протокольних рішень показали стрімку динаміку розвитку інфокомунікаційних мереж в напрямку побудови програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж нового покоління з можливістю функціональної адаптації під потреби користувачів, що пов'язано з необхідністю пошуку нових підходів до визначення їх фізичної та функціональної архітектури. Інтелектуальне управління та технологія програмно-конфігурованих мереж є основою архітектури інтенційно-орієнтованих мереж.

Передумовою побудови інтенційно-орієнтованої мережі стало постійне виявлення ряду недоліків в традиційних мережах з точки зору управління ресурсами та якістю обслуговування на протязі життєвого циклу функціонування. Вперше за все в традиційних IP-мережах існує безліч невизначеностей як з точки зору попиту, так і пропозиції надання послуг. Що стосується попиту, послуги та мережі не можуть належним чином узгоджуватися, а рівень якості обслуговування не відповідає чітким очікуванням кінцевих користувачів. Для усунення невизначеностей у сфері попиту надання послуг необхідно точно визначати наміри користувачів щодо індивідуалізації обслуговування. За рахунок централізації управління мережею і передавання інформації про стан системи, інфраструктура програмно-конфігурованих мереж може краще адаптуватися до динамічно мінливих потреб користувача шляхом розробки нових методів управління якістю надання послуг, розподілу ресурсів, інженерії трафіку та мережевої безпеки. Особливу увагу у контексті розвитку перспективних інформаційно-комунікаційних систем в напрямку інтенційно-орієнтованих мереж є використання інтелектуальної платформи аналізу та управління мережею, яка дасть змогу усунути невизначеності щодо якості надання послуг та

управління інфраструктурою використовуючи алгоритми машинного навчання.

Саме тому дисертаційна робота Бешлея М.І., що присвячується розробленню 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 і захищається від потенційних кібератак шляхом використання нових методів розподілу ресурсів, інженерії трафіку, мережевої аналітики та існуючих алгоритмів машинного навчання є актуальною та своєчасною.

2. Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота Бешлея Миколи Івановича відповідає науковому напряму «Інфокомунікаційні системи та мережі» кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка». Дисертація виконана в межах 5-ти держбюджетних науково-дослідних роботах та 4-х госпдоговірних тем, серед яких слід виділити ці, де автор є керівником: «Розробка методів та уніфікованих програмно-апаратних засобів для розгортання енергоефективних інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж подвійного призначення» (ДБ/ІВН), (№ держреєстрації 0120U102201, (2020-2022 рр.); «Розробка компонентів системи моніторингу та управління якістю надання послуг в інформаційних мережах з використанням технологій машинного навчання та мережної аналітики» (ГД №0655) ТОВ «МаксіТех» (15.10.2020 р. – 15.12.2020 р.).

Робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 450 сторінок друкарського тексту, із них: 16 сторінок вступу, 335 сторінок основного тексту, список використаних джерел із 280 найменувань.

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 аналіз основних вимог щодо якості надання послуг в сучасних інфокомунікаційних мережах. Встановлено, що існуючі телекомунікаційні технології та застосовані у них методи управління трафіком не здатні задовільнити мінливі вимоги користувачів 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 та ефективності функціонування. Визначено, що забезпечення адаптивної якості надання послуг в залежності від вимог користувача може бути досягнуто шляхом реалізації нових програмних додатків на рівні SDN контролера, що відповідають за маршрутизацію потоків, балансування навантаження та захисту даних. На основі огляду останніх релевантних робіт встановлено, що існуючі мережі SDN характеризуються рядом недоліків, щодо переходу до повної автоматизації та проведення гнучкості управління ресурсами на основі мінливих бізнес вимог користувачів, вирішення яких можливе з використанням штучного інтелекту та нових методів управління мережею, що дасть змогу створити інтенційно-орієнтовані мережі нового покоління.

У *другому розділі* роботи викладено основну частину методичної бази досліджень, в якій запропоновано нові моделі побудови програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж з адаптивним управлінням якістю надання сервісів. Сформовано математичну модель визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE в залежності від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, що забезпечуються в програмно-конфігурованих мережах. Розроблено потокову модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж, яка дає необхідний інструмент для адаптивного управління системою зв'язку, шляхом маніпуляції ваговими коефіцієнтами інтегральної метрики маршруту, тим самим зводячи завдання забезпечення замовленої якості надання сервісів до підбору їх «найкращих» значень адаптуючись під вимоги користувачів. При цьому паралельно вирішуючи задачу оптимального розподілу мережеских ресурсів за критерієм мінімізації енергозбереження при забезпеченні замовленої якості обслуговування користувачів. Запропоновано математичну модель, що дає змогу описати функціонування багаторівневої хмарної системи для адаптивного надання послуг в гетерогенній IBN мережі національного оператора мобільного зв'язку, шляхом вибору підсистеми граничних та хмарних обчислень.

У *третьому розділі* розроблено кардинально нові методи, алгоритми і моделі адаптивного розподілу мережеских ресурсів та управління трафіком для синтезу корпоративних інтенційно-орієнтованих мереж з використанням алгоритмів машинного навчання. Проведено моделювання та дослідження ефективності пропонуваніх рішень на основі розробленої імітаційної моделі інтенційно-орієнтованої мережі. На основі досліджень встановлено, що розроблений новий метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для інтенційно-орієнтованих мереж дав змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на функціональну конфігурацію мережі, а з допомогою машинного навчання реагувати на

несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі.

У *четвертому розділі* для підвищення рівня мережевої безпеки в інтенційно-орієнтованих мережах розроблено унікальну систему моніторингу та аналізу мережевого трафіку, яка базується на гармонійному поєднанні переваг методів сигнатурного, статистичного та фрактального аналізу інформативних ознак щодо детектування інформаційних протоколів та ранжування прихованих властивостей аномального трафіку. Для вирішення проблеми виявлення мережевих аномалій та розпізнавання атак запропоновано метод формування набору інформативних ознак, що формалізують нормальну та аномальну поведінку системи на основі оцінки параметра Херста мережевого трафіку. Встановлено, що розроблені програмні компоненти запропонованої системи підвищують ефективність використання стандартних систем виявлення та запобігання вторгненню шляхом виявлення та врахування нових нестандартних факторів та залежностей. Експериментальним шляхом доведено, що використання розробленої системи в комунікаційній інфраструктурі дало змогу з достатнім ступенем точності оцінити присутність аномалій трафіку та забезпечити блокування або фільтрацію небажаних інформаційних потоків у порівнянні із відомими рішеннями.

У *п'ятому розділі* роботи розглядаються основні аспекти синтезу рівня радіодоступу гетерогенної IPv6 мережі для адаптивного надання сервісів. Зокрема, для врахування мінливих намірів користувачів щодо якості обслуговування удосконалено існуючі методи оптимального вибору технології та формування структури рівня радіодоступу 4G/5G, розроблено нові методи планування, розподілу та оптимізації частотно-часових ресурсів. Зокрема на основі проведеного дослідження доведено, що запропонований адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та 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 із традиційними методами. Комплексне використання розроблених методів пріоритезації IoT трафіку та балансування навантаження, дають змогу зменшити середню затримку передавання повідомлень реального часу з кінця в кінець до 3 разів, при цьому роблячи систему NB-IoT придатною для забезпечення ультра надійного зв'язку з низькими затримками, що є важливим для розвитку інтенційно-орієнтованих мереж 5G.

У *шостому розділі* роботи проводиться практична реалізація інтенційно-орієнтованої мережі корпоративного сегменту з використанням

технології SDN та автоматизації запропонованих управлінських рішень. Зокрема розроблено ряд прототипів інтенційно-орієнтованої мережі корпоративного сегменту із використанням мікроконтролерних платформ, апаратних SDN комутаторів ZODIAC FX/GX та віртуалізації мережевих функцій компонентів технології SDN. На основі розроблених прототипів успішно реалізовано нову енергоефективну QoE-маршрутизацію, удосконалений алгоритм вимірювання затримки в SDN, систему моніторингу якості функціонування мереж, удосконалений алгоритм вибору сервера обслуговування, що дало змогу стверджувати, окрім наукової складової роботи ще й практичну цінність запропонованих рішень. Розроблено прототип мобільного та операторського додатку для адаптивного клієнт-орієнтованого надання послуг в гетерогенній мережі, що дає змогу отримувати замовлену якість обслуговування на основі розробленого засобу зворотного зв'язку між користувачем та оператором мережі. В результаті проведення різноманітних експериментів доведено, що запропоновані рішення підвищують гнучкість управління мережею, зменшують енергоспоживання та забезпечують необхідну якість надання критично важливих сервісів Інтернету речей в корпоративних мережах, результативність та достовірність яких підтверджено актами впровадження у виробництво.

Додатки до дисертації містять обрані (найбільш суттєві) початкові коди розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць автора.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, наданих в дисертації, їхня достовірність

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Бешлея Миколи Івановича, впливають з наступного:

- план роботи логічний і послідовний, структура роботи чітка та спрямована на досягнення поставленої мети;
- достовірність отриманих результатів обґрунтовано коректним застосуванням відомих методів досліджень, сучасних засобів моделювання програмно-конфігурованих мереж, відтворюваність результатів моделювання та практичною реалізацією на основі реального обладнання SDN ZODIAC FX/GX;
- достовірність отриманих здобувачем науково-практичних результатів засвідчено актами впровадження;
- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі;

- матеріали дисертації пройшли необхідну апробацію, обговорювались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

4. Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Результати наукової новизни складаються із 10 пунктів, які чітко окреслюють що було запропоновано автором вперше, а що розвинуто із вже існуючого.

Переходячи до обговорення наукової новизни основних положень роботи дисертант вперше:

- запропонував потокову модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж, яка дала змогу підтримувати компроміс між бажаною інтенційно-орієнтованою якістю обслуговування користувачів, завантаженістю та енергоефективністю мережі;
- розробив метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для інтенційно-орієнтованих мереж, який дав змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на функціональну конфігурацію мережі, а з допомогою машинного навчання прогнозувати моменти переконфігурації мережі для уникнення деградації якості обслуговування бізнес-користувачів;
- розробив інтелектуальну DPI систему моніторингу та аналізу мережевого трафіку, що дала змогу ефективно управляти трафіком в режимі реального часу, підвищувати якість послуг та забезпечувати захист інфокомунікаційної мережі на основі запропонованого методу виявлення аномалій та ;
- розробив методи розподілу частотно-часових ресурсів, балансування навантаження та формування структури рівня радіодоступу для забезпечення адаптивного надання сервісів;
- запропонував методологію синтезу інтенційно-орієнтованих мереж для поетапної трансформації сучасних інфокомунікаційних мереж.

5. Повнота викладу наукових положень, висновків, рекомендацій в опублікованих працях

Всього опубліковано 60 наукових праць, серед них 1 – одноосібна монографія у закордонному виданні, 1 – колективна монографія, 8 – статей у виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science, 2 – статті у закордонних періодичних виданнях, 12 – статей у наукових фахових

виданнях України, 36 – у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій, з них індексованих у наукометричній базі Scopus/Web of Science – 27.

6. Відсутність порушення академічної доброчесності

Підстав для сумнівів у науковій доброчесності здобувача при детальному ознайомленні з дисертаційною роботою не виявлено. Узгодженість тексту дисертації із науковими працями Бешлея М.І. свідчать про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей, методів та гіпотез дотичних до теми інших робіт містить відповідні посилання.

7. Практична цінність отриманих результатів

Основним практичним результатом дисертації, який одержаний на основі проведених теоретичних та практичних досліджень, є розвиток методології синтезу інфокомунікаційних систем шляхом узгодженого конфігурування її мережно-незалежних рівнів для забезпечення вимог до адаптивності мережної системи, якості обслуговування користувачів та оперативності доставки даних, що є основними цілями необхідних для реалізації майбутніх програмно-конфігурованих мереж. Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних корпоративних мережах: Науково-дослідного інституту інтелектуальних комп'ютерних систем, ТОВ «ОСТВЕР СЕРВІСІЗ», ТОВ «Телекомунікаційна компанія», ПАТ «Укртелеком», ТОВ ВТФ «Контех», ТОВ «МаксіТех», ТОВ «ІнформКонсалт», Hubei University of Technology, що підтверджено актами впровадження. Розроблені та підтверджені в процесі функціонування моделі та методи реалізовані у вигляді самостійних програмних модулів, які можуть бути використанні в подальших практичних дослідженнях в області дослідження та оптимізації програмно-конфігурованих інтенційно-орієнтованих мереж, оскільки алгоритми, вихідні коди та функціональні схеми знаходяться в додатках до дисертаційної роботи.

8. Зауваження до дисертаційної роботи

1. У першому розділі не приділено достатньої уваги існуючим аспектам побудови корпоративних інтенційно-орієнтованих мереж, пропоновані такими провідними компаніями як Cisco, Juniper, Huawei їх особливості, переваги, відмінності від традиційних мереж з точки зору якості надання послуг кінцевим користувачам.

2. У другому розділі роботи (пункт 2.2) здобувач на основі проведеного

експериментального дослідження розвинув математичну модель кореляції рівня задоволеності користувача за оцінкою QoE з технічними параметрами QoS. Відповідно, доцільно було б порівняти існуючі математичні моделі кореляції QoS/QoE та навести необхідність розвитку математичної моделі.

3. Дисертант запропонував у другому розділі дисертаційного дослідження (пункт 2.3) потокову модель енергоефективної QoE-маршрутизації, згідно якої метрика маршруту базується на параметрах QoS та ступеня завантаженості вузла, що характеризують поточний стан мережі. З точки зору реалізації, такий процес вимагає постійного точного моніторингу мережі, зокрема із дисертаційної роботи не зрозуміло, яким чином в процесі практичного експерименту, що наводиться у 6 розділі відбувається моніторинг, таких параметрів як: джитер та завантаженість каналів, оскільки у роботі для оцінки ефективності QoE-маршрутизації наведено експерименти, що присвячені лише вимірюванню затримок передавання даних та втрат пакетів.

4. У таблиці 5.2 дисертаційної роботи автор наводить характеристики QCI_{IoT} за критерієм затримки, допустимої кількості відмов в обслуговуванні та типом сервісів Інтернету речей, проте не відомо, на основі яких специфікацій чи вимог вони формуються.

5. Відомо, що основною особливістю концепції інтенційно-орієнтованих мереж є використання штучного інтелекту, на жаль у роботі приділено мало уваги питанням реалізації, складності імплементації та кількості обчислювальних ресурсів з точки зору використання засобів штучного інтелекту.

6. Важко зрозуміти, як саме дисертант врахував вплив засобів віртуалізації в процесі організації віртуальних маршрутизаторів, базових станцій та серверів на продуктивність обслуговування пакетів. А також не відомо як запропонований спосіб динамічної віртуалізації ресурсів мережевого вузла реалізовуватиметься на практиці та як функціонуватиме в процесі експлуатації мережі, враховуючи мінливість вхідного навантаження на мережу.

7. В процесі тестування та верифікації запропонованих рішень, що наводяться у шостому розділі роботи важливим завданням є проведення значної кількості експериментів перед її виробництвом, зокрема їх недостатня кількість може призвести до зниження достовірності отриманих виграшних характеристик. Експериментальні результати наведені у підрозділі 6.1.3, що виконувались для оцінки QoE-маршрутизації проводились автором одноразово. Хоча у самій роботі наводяться кількісні виграшні показники, які також підтверджуються актами впровадження у виробництво.

9. Загальні висновки

На підставі розгляду змісту дисертації, автореферату, праць здобувача, актів впровадження, аналізу ступеня новизни наукових положень та практичної значимості отриманих у роботі результатів, висновків та рекомендацій можна зробити висновок, що дисертаційна робота «Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів» є завершеною працею. Сама робота відповідає вимогам, які ставляться до докторських дисертацій (пп. 9, 10, 12) чинного положення про «Порядок присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (зі змінами та доповненнями), а її автор Бешлей Микола Іванович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри комутаційних систем
Державного університету
інтелектуальних технологій і зв'язку,
доктор технічних наук, професор.

А.Г. Ложковський

Підпис д.т.н., проф. Ложковського А.Г. засвідчую.

