

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Скулиш Марії Анатоліївни на дисертаційне дослідження Бешлея Миколи Івановича «Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів», представленого на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Характеристика актуальності дисертаційного дослідження.

Еволюційний розвиток суспільно-економічних процесів та інформаційних технологій обумовлюють обмеження на період часу актуальності сьогоденних моделей побудови телекомунікацій. В першу чергу, це пов'язано із переміщенням акценту з технічних питань на питання бізнесу і необхідністю врахування домінуючого характеру якісних, невизначених та нечітких факторів в процесі формування висновку про рівень якості надання мережевих сервісів. У зв'язку з цим в найближчі роки гравцям ринку телекомунікаційних послуг необхідно провести цифрову трансформацію. Технологія програмно-конфігурованих мереж (Software-Defined Networking, SDN) повинна сприяти переорієнтації операторських бізнес-моделей на хмарні і цифрові сервіси, даючи змогу гнучко управляти інфраструктурою з допомогою централізованого контролера. Останнім часом розвиток технологій програмно-конфігурованих мереж відбувається в напрямку інтелектуальної автоматизації процесів управління мережевими ресурсами для виконання мінливих вимог з боку бізнесу, що у свою чергу призвело до появи інтенційно-орієнтованих мереж (Intent-Based Networking, IBN), які в ближчому майбутньому стануть основним трендом мережних технологій. Основними перевагами IBN для такого роду інфраструктури є централізація управління мультивендорним середовищем, спрощення процесів обслуговування та модернізації, зменшення часу на оновлення програмних кодів комутаторів та маршрутизаторів і впровадження нових сервісів. На сьогоднішній час технологія IBN розглядається компаніями Cisco, Arista, Juniper та ін., як перспектива лише з боку побудови корпоративного класу мереж для бізнес-користувачів, проте останнім часом в науковому товаристві в області розвитку інформаційно-комунікаційних мереж дана технологія розглядається, як основна, що дасть автоматизувати управління всіма доменами мережі, включаючи глобальні мережі, Інтернет речей, 5G та Big Data, забезпечуючи істотно новий рівень якості надання послуг, підвищуючи ефективність обслуговування, швидкість запуску інновацій та надійність роботи мережевої інфраструктури.

Тому актуальність і важливість вирішення наукової проблеми 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 і захищається від потенційних кібератак шляхом розроблення нових методів розподілу ресурсів, інженерії трафіку, мережевої аналітики та використання існуючих алгоритмів машинного навчання є багатосторонньою та релевантною для сучасних викликів щодо трансформації інформаційно-комунікаційних мереж у світовій та вітчизняній науці загалом.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності.

Дисертаційна робота має загальний обсяг 450 аркушів, містить 6 розділів та 4 додатки. Згідно пояснювальної записки рукопису роботи підготовлено автореферат. Всі подані матеріали цілком відповідають чинним вимогам до оформлення дисертаційних робіт.

У 1-му розділі автор розглядає основні концептуальні моделі побудови майбутніх інфокомунікаційних мереж на основі технологій SDN, у тому числі необхідних для розвитку систем мобільного зв'язку п'ятого покоління. Проводить огляд основних особливостей їх функціонування та наводить недоліки існуючих методів трафіку інжинірингу для реалізації адаптивного управління ресурсами та якістю обслуговування. Дисертант встановив, що низька міжсистемна узгодженість обслуговування на рівні радіодоступу мережі та сервісів вимагає перегляду побудови традиційних мереж та їх систем управління, з метою реалізації динамічних стратегій управління здатних адаптивно підлаштовуватися під зміни стану мережі та мінливі вимоги бізнес користувачів. Ґрунтуючись на проведеному аналізі тенденцій розвитку, особливостей побудови й функціонування сучасних інфокомунікаційних мереж, автором сформульовано ряд важливих вимог, яким мають задовольняти новітні технологічні рішення в галузі забезпечення гарантованої якості обслуговування.

В 2-у розділі автором формалізовано модель адаптивного управління розподілом ресурсів інфокомунікаційних мереж для реалізації концепції IBN. В якості головного критерію адаптивного управління перерозподілом ресурсів у контексті реалізації концепції IBN пропонується використовувати комплексний показник якості обслуговування користувачів, сформований у вигляді оцінки QoE. Для визначення суб'єктивного рівня задоволеності користувачів оцінкою QoE розроблено математичну модель, що залежить від зміни об'єктивних показників якості обслуговування QoS, які надаються в мережі IBN/SDN, зокрема, для відео та аудіо послуг реального часу. Формування математичної моделі QoS/QoE кореляції здійснюється на основі власних експериментальних досліджень на реальному обладнанні SDN мережі. Запропоновано потокову модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих

мереж. Новизною моделі є те, що для вибору оптимального шляху передавання даних використовується адаптивна QoE-орієнтована метрика маршруту, яка базується на розробленій математичній моделі QoS/QoE кореляції. Удосконалено алгоритм вимірювання затримки передавання даних в програмно-конфігурованих мережах.

У 3-у розділі дисертації розроблено метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю надання послуг для інтенційно-орієнтованих мереж, що дасть змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на функціональну конфігурацію мережі, а з використанням алгоритмів машинного навчання для централізованої системи моніторингу та управління мережею реагувати на несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі. Розроблено унікальну імітаційну модель мережі з можливістю перемикання між двома методами управління якістю обслуговування (традиційного та клієнт-орієнтованого). Встановлено, що запропонований метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг дає вигоду в середньому від 2-5 разів за критерієм кількості користувачів, які вимагають високої якості сприйняття послуги.

У 4-у розділі дисертантом удосконалено метод виявлення аномалій мережевого трафіку та атак для майбутніх інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж, який відрізняється від відомих способом формування набору інформативних ознак, що формалізують нормальну та аномальну поведінку системи на основі оцінки параметра Херста. Розроблено інтелектуальну DPI систему моніторингу та аналізу трафіку, яка дала змогу виявити складні атаки різного роду, зокрема таких як SYN Flood, фрагментація HTTP, UDP Flood, DNS Flood, Non-Spoofed UDP Flood.

У 5-у розділі роботи автор зосередив основну увагу на синтезі рівня радіодоступу для трансформації мереж мобільного зв'язку в напрямку інтенційно-орієнтованих мереж. Для цього дисертантом розроблено методи розподілу частотно-часових ресурсів, балансування навантаження та формування структури рівня радіодоступу мереж 4G/5G для забезпечення адаптивного надання сервісів. Запропоновано методологію синтезу інтенційно-орієнтованих мереж для поетапної трансформації сучасних інфокомунікаційних мереж на основі розроблених методів та наскрізної віртуалізації IBN інфраструктури.

Шостий розділ роботи містить результати, найбільш цінні з точки зору практики, зокрема розроблено прототипи інтенційно-орієнтованої мережі на базі мікроконтролерних платформ, апаратних SDN комутаторів ZODIAC FX/GX та віртуалізації мережевих функцій компонентів технології SDN, в межах яких реалізовано та оцінено ефективність запропонованих рішень щодо адаптивного клієнт-орієнтованого управління ресурсами та якістю

обслуговування. Розроблено унікальну систему моніторингу якості функціонування реалізованих прототипів ІВН мереж. Особливістю системи є використання розробленого методу наскрізного вимірювання затримки передавання даних з кінця в кінець для кожного компонента мережі шляхом додавання власної мітки часу до метаданих. 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.

Зміст представленої автореферату стисло та у необхідному обсязі характеризує дисертацію. Здобувач не виносить на захист положень, які представлялися до захисту кандидатської дисертації.

Кваліфікаційна наукова праця відповідає паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Оцінка рівня наукової новизни.

У дисертаційній роботі Бешлея Миколи Івановича отримано 10 пунктів наукової новизни, зокрема варто зосередити увагу на пункти, що пропонуються вперше, а саме:

- запропоновано потокову модель енергоефективної QoE-маршрутизації для інтенційно-орієнтованих мереж, яка дає змогу підвищити якість обслуговування користувачів та енергоефективність мережі. Унікальністю маршрутизації є те, що метрика маршруту відповідає математичній функції QoS/QoE кореляції. Таким чином, розв'язання завдання вибору оптимального маршруту для забезпечення адаптивного рівня якості обслуговування в ІВН мережі зводиться до пошуку такого значення метрики маршруту, яке наближається до значення інтегрального адитивного критерію якості, що відповідає за певний замовлений рівень QoE.
- запропоновано метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг для інтенційно-орієнтованих мереж, який в умовах високого навантаження мережі для формування якості послуги включає в себе як об'єктивні критерії часових мережевих характеристик, так і замовлені згідно намірів суб'єктивні QoE оцінки клієнтів. Такий підхід щодо обслуговування дає змогу кінцевим користувачам сервісів опосередковано впливати на функціональну конфігурацію мережі, а з допомогою засобів машинного навчання попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для переконфігурації мережі.
- розроблено інтелектуальну систему моніторингу та аналізу мережевого трафіку, яка, на відміну від існуючих, для інтелектуального прийняття управлінських рішень процесом передавання даних базується на гармонійному поєднанні переваг методів сигнатурного, статистичного та фрактального аналізу інформативних ознак щодо детектування

інформаційних протоколів та ранжування прихованих властивостей аномального трафіку, що дало змогу виявляти користувачів, які споживають великі обсяги трафіку, ефективно управляти трафіком в режимі реального часу, підвищувати якість послуг та забезпечувати захист мережі.

- запропоновано метод розподілу частотно-часових ресурсів низхідного та висхідного каналу зв'язку гетерогенної мережі LTE/NB-IoT, який, враховує наміри користувачів щодо рівня якості надання сервісів Інтернету речей та проводить адаптивне інтелектуальне планування процесом виділення ресурсів на основі аналізу пріоритетності даних, зокрема у вузькосмуговому NB-IoT спектрі, що дозволило забезпечити замовлену якість обслуговування.
- запропоновано адаптивний інтенційно-орієнтований метод розподілу ресурсів та формування структури рівня радіодоступу 4G/5G, який відрізняється від існуючих урахуванням локалізації групи інтенційно-орієнтованого користувацького навантаження та аналізом замовлених оцінок щодо забезпечення необхідного рівня якості сприйняття сервісу, що дало змогу ефективніше використовувати наявні енергетичні та частотно-часові ресурси із забезпеченням замовленої якості обслуговування.
- запропоновано методологію синтезу гетерогенної інтенційно-орієнтованої мережі, згідно якої можна інтелектуально виділяти зв'язки між структурно-функціональними елементами мережі, які можуть не тільки автоматизовано перебудовуватись з різною продуктивністю, але й виникати заново, вишукуючи шляхи найбільш адекватного пристосування до мінливих вимог користувачів щодо адаптивного надання сервісів.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає у тому, що запропоновані методи дають змогу одержати позитивний приріст по продуктивності функціонування, показникам якості обслуговування, захищеності даних, забезпечити гнучкість управління ресурсами мережі без значних кошторисних затрат на модернізацію мережної інфраструктури.

Розроблено імітаційну модель мережі з можливістю перемикання між двома методами управління якістю обслуговування (традиційного та клієнт-орієнтованого). Перевагою даної моделі є можливість досліджувати нові рішення для майбутньої концепції інтенційно-орієнтованих мереж шляхом інтеграції унікальних алгоритмів у ядро мережі. Встановлено що запропонований метод адаптивного клієнт-орієнтованого управління якістю послуг дає вигреш в середньому від 2-5 разів за критерієм кількості користувачів, які вимагають високої якості сприйняття послуги. Розроблено алгоритм вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі з використанням Big Data, який, на відміну від відомих, враховує та аналізує оцінки замовленої якості сприйняття послуги та дає змогу покращити якість обслуговування високопріоритетних сервісів на вимогу та збільшити прибуток

оператора. Розроблено прототип мобільного та операторського додатку для адаптивного клієнт-орієнтованого надання послуг в гетерогенній мережі, що дає змогу отримувати замовлену якість обслуговування на основі зворотного зв'язку між користувачем та оператором мережі. Розроблено прототипи корпоративного сегменту енергоефективної інтенційно-орієнтованої мережі різного призначення на базі мікроконтролерних платформ, апаратних SDN комутаторів ZODIAC FX/GX та віртуалізації функцій компонентів технології SDN, в межах яких реалізовано та оцінено ефективність запропонованих рішень щодо адаптивного клієнт-орієнтованого управління ресурсами та якістю обслуговування. Розроблено унікальну систему моніторингу якості функціонування реалізованих прототипів IBN мереж за критерієм затримки передавання даних, що є одним із ключових параметрів моніторингу якості надання сервісів реального часу критично-важливої інфраструктури. Особливістю системи є використання розробленого методу наскрізного вимірювання затримки з кінця в кінець для кожного компонента мережі шляхом додавання власної мітки часу до метаданих, так що, порівнюючи дві мітки між компонентами, можна визначити час затримки та в умовах перевищення норм сповіщати про прийняття необхідних керуючих рішень.

Враховуючи значний обсяг виконаних науково-експериментальних досліджень, вважаю, що рівень практичного значення є достатнім. Дисертація має ознаки завершеного комплексного наукового дослідження.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність.

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових результатів забезпечується коректним використанням математичного апарату та засобів імітаційного моделювання. Крім того, достовірність результатів роботи підтверджена збігом результатів імітаційного моделювання із експериментальними дослідженнями, зокрема в процесі реалізації енергоефективної QoE-маршрутизації. Акти про використання результатів підтверджують висновки і рекомендації, які представлені у дисертаційній роботі. Робота достатнім чином опублікована та апробована.

Повнота викладу результатів досліджень у опублікованих працях.

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, автором опубліковано 60 наукових праць, серед них 1 – одноосібна монографія у закордонному виданні, 1 – колективна монографія, 7 – статей у закордонних виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus/Web of Science, 1 – стаття у фаховому виданні України, що входить до наукометричних баз Scopus, 2 – статті у закордонних періодичних виданнях, 12 – статей у наукових фахових виданнях України, 36 – у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Наведений перелік опублікованих праць, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації, у повному обсязі відображають сформульовані положення, отримані наукові результати та висновки.

Недоліки та зауваження щодо роботи.

1. В першому розділі дисертаційної роботи бажано було б провести дослідження іноземних вчених з точки зору інтенційно-орієнтованого управління ресурсами мережі. Порівняти відомі концептуальні методи управління ресурсами для забезпечення QoE, які використовуються у програмно-конфігурованих мережах.

2. У другому розділі роботи (підрозділ 2.4) автор удосконалює алгоритм вимірювання затримки даних в програмно-конфігурованих мережах для реалізації точнішого моніторингу та наводить результати, що підтверджують похибку вимірювання затримки до 45%, проте автор у першому пункті практичної цінності дисертаційної роботи, також стверджує, що використання алгоритму дає змогу зменшити до 22% сигналізаційного навантаження, яким чином і за рахунок чого отриманий такий результат у самій роботі не показано.

3. У процесі дослідження методу клієнт орієнтованого обслуговування на основі розробленої імітаційної моделі інтенційно-орієнтованої мережі наведеного у третьому розділі роботи (підрозділ 3.7) автор стверджує, що використання алгоритмів машинного навчання формують вирішальні правила, які дають змогу реагувати на несприятливі поєднання значень показників якості і попереджати ситуації, коли користувач незадоволений якістю отриманих сервісів для адаптивного прогнозування моменту переконфігурації мережі. Проте у самому розділі не описано, яким чином відбуватиметься переконфігурація мережі, в режимі реального часу функціонування та чи не вплине це на якість обслуговування потоків чутливих до затримок, також не наведено самих правил, що автоматизують цей процес конфігурування.

4. Із дисертаційної роботи, важко зрозуміти, які саме автор використовував алгоритми машинного навчання для розроблення інтелектуальної DPI система моніторингу та аналізу трафіку. Також, варто було б наголосити на таких особливостях, як способи реалізації алгоритмів машинного навчання, складність та ресурси обчислень, що є важливим для класу інтелектуальних DPI систем.

5. У четвертому розділі роботи доцільно було б показати чим же саме автор удосконалив метод виявлення аномалій мережевого трафіку, що базується на параметрі Херста, адже автор у першому розділі наводить іноземні роботи, які теж використовують цей критерій для виявлення аномалій та мережевих атак.

6. У роботі не описано якими технічними засобами оперувався автор для дослідження наскрізної віртуалізації мережевої інфраструктури в процесі

синтезу ІВН мережі. Оскільки вибір засобів віртуалізації впливатиме на загальну продуктивність віртуалізованої машини.

Загальні висновки.

1. Вважаю, що дисертаційна робота Бешлея М.І. «Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів» є завершеною науковою працею, яка за оформленням, обсягом, науковим рівнем та практичним значенням, оригінальністю тексту та результатів, їх достовірністю відповідає нормативним вимогам, що пред'являються до докторських кваліфікаційних наукових праць.

2. Дисертація вирішує актуальну науково-прикладну проблему 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 і захищається від потенційних кібератак шляхом використання нових методів розподілу ресурсів, інженерії трафіку, мережевої аналітики та існуючих алгоритмів машинного навчання.

3. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

4. Результати дисертації достатнім чином апробовані та опубліковані.

5. Автореферат ідентично та з необхідною повнотою розкриває зміст і основні положення дисертації.

6. Дисертаційна робота «Синтез та реалізація інтенційно-орієнтованих інфокомунікаційних мереж для адаптивного надання сервісів» відповідає пп. 9 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 року (зі змінами та доповненнями), а її автор – Бешлей Микола Іванович – заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за заявленою спеціальністю.

Офіційний опонент:

професор кафедри
інформаційно-телекомунікаційних мереж
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
д.т.н., с.н.с.

Підпис д.т.н., с.н.с. Скулиш М.А. засвідчую.

