

67-72-105/1
в.п. 12.05.2021р.

Голові разової спеціалізованої вченої ради ДФ.35.052.050
Національного університету «Львівська політехніка»
доктору технічних наук, доценту
Кирику М.І.

ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В. В. Поповського Харківського національного університету радіоелектроніки Євдокименко Марини Олександрівни на дисертаційне дослідження Андрущака Володимира Степановича «Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання», представленого на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка», галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»

Актуальність теми роботи. Сучасний стан розвитку інформаційних технологій та відповідне зростання обсягів трафіку у мережах фіксованого та мобільного зв'язку ставить нові виклики перед оптичними транспортними системами. Поточна гетерогенність сервісів спричиняє проблему управління інформаційними потоками із забезпеченням вимог до пропускну здатності та енергетичної ефективності оптичних транспортних систем. Враховуючи динаміку глобальних інформаційно-комунікаційних систем, а також постійну появу нових типів сервісів, для підвищення ефективності функціонування оптичних транспортних систем необхідно розробити нові методи та моделі управління інформаційними потоками в оптичних транспортних системах.

Таким чином, актуальною є тема дисертаційної роботи Андрущака Володимира Степановича, яка присвячена розв'язанню науково-практичного завдання розроблення методів та моделей управління інформаційними потоками в оптичних транспортних мережах з використанням алгоритмів машинного навчання та засобів штучного інтелекту, в умовах високої динаміки зміни ймовірно-часових характеристик інформаційних потоків та суперечливих вимог до якості обслуговування.

Актуальність проблематики досліджень додатково підтверджується їх виконанням в рамках ряду держбюджетних науково-дослідних робіт, які виконувались у Національному університеті «Львівська політехніка» за участі здобувача:

– «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні», № 0117U007177, (2018–2019 рр.);

– «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» № 0120U100674, (2020-2022 рр.).

– «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою», № 0120U102193, (2020-2022 рр.).

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення.

Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 189 сторінок друкарського тексту, із них: 7 сторінок вступу, 125 сторінок основного тексту, 64 рисунки, 12 таблиць, список використаних джерел із 98 найменувань.

У *вступі* подано загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано всі формальні положення, подано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, а також наведено інформацію про впровадження основних практичних результатів.

У *першому розділі* проведено аналіз методів побудови сучасних оптичних транспортних мереж з точки зору їх архітектури та основних структурно-функціональних елементів. Зокрема, розглянуто важливі аспекти інтеграції оптичної транспортної інфраструктури із інфраструктурою мереж фіксованого та мобільного зв'язку, враховуючи ієрархію інформаційних потоків від комірок різного розміру. Проведено детальний аналіз різних технологій каналного рівня оптичних транспортних систем, таких як SDH, OTN, OBS та OLS. Проаналізовано існуючі технічні рішення для управління оптичними транспортними системами з використанням технології програмно-конфігурованих мереж SDN. Крім того, розглянуто основні аспекти збору статистичних даних мережі та управління основними параметрами мережної інфраструктури з використанням засобів штучного інтелекту. На основі проведеного аналізу, систематизовано основні завдання, які розв'язуються у дисертаційній роботі для підвищення ефективності використання ресурсів та якості обслуговування в системах мобільного зв'язку нового покоління.

У *другому розділі* роботи представлено запропоновану концептуальну модель оптичної транспортної інфраструктури з програмним управлінням на основі алгоритмів машинного навчання. Запропоновано новий метод визначення станів оптичної транспортної мережі з використанням методів машинного навчання, зокрема алгоритмів кластеризації K-середніх та C-середніх. Представлено запропонований автором удосконалений метод ефективного управління інфокомунікаційними потоками на основі графових нейронних мереж, який враховує параметри енергоспоживання оптичної транспортної системи. Запропоновано алгоритм агрегації інформаційних потоків у граничному вузлі оптичної транспортної системи з використанням глибоких нейронних мереж, що дає змогу зменшити кількість службового навантаження при невеликій втраті пакетів із забезпеченням необхідних параметрів обслуговування.

Третій розділ присвячено імітаційному моделюванню оптичних транспортних систем для різних умов їх функціонування. Оцінка ефективності оптичної транспортної системи здійснюється за критеріями затримки, ефективності використання пропускної здатності та сумарного енергоспоживання комутаційних вузлів мережі. Зокрема, визначено, що запропонований алгоритм управління інформаційними потоками на основі графових нейронних мереж забезпечує на 18% нижчу затримку у періоди

пікового навантаження, у порівнянні з існуючими системами. Також доведено, що використання розробленого алгоритму агрегації трафіку на основі нейронних мереж дає змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності каналів зв'язку до 16% за рахунок зниження обсягів службової інформації, забезпечуючи при цьому на 11% нижче енергоспоживання вузлів.

У *четвертому розділі* представлено розроблену систему моніторингу телекомунікаційної інфраструктури на основі існуючої системи Састі, яка використовується операторами телекомунікацій. Запропонований автором програмний модуль дає змогу розширити можливості існуючої системи моніторингу, шляхом використання алгоритмів машинного навчання для аналізу параметрів мережі. Крім того, у розділі проведено дослідження ефективності запропонованого методу управління інформаційними потоками на основі графових нейронних мереж, з точки зору параметрів енергетичної ефективності досліджуваної оптичної транспортної системи. Автором запропоновано унікальне програмне забезпечення, яке визначає оптимальні параметри управління інформаційними потоками в залежності від району міста та часу доби.

У висновках дисертаційної роботи узагальнено наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів. Список використаних джерел та відповідних посилань на них у тексті дисертаційної роботи свідчить про проведений аналіз попередніх наукових досліджень провідних вчених за даною тематикою. Усі наукові та практичні результати дисертаційної роботи у повній мірі висвітлені у наукових фахових публікаціях та апробовані на міжнародних науково-технічних конференціях.

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі Андрущак В.С., підтверджуються наступним:

- у роботі коректно використано математичний апарат теорії ймовірності та математичної статистики, методів оптимізації, а також елементів штучного інтелекту;
- отримані результати не суперечать фундаментальним основам оптичних транспортних систем та відповідають існуючим стандартам ІТУ;
- достовірність підтверджено шляхом аналітичного, імітаційного та експериментального моделювання, що засвідчено актами впровадження;
- отримані нові результати гармонійно доповнюють відомі;
- матеріали дисертації обговорювались на 15 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях, а також на наукових семінарах, і отримали схвальну оцінку.

Достовірність і новизна наукових положень, висновків і рекомендацій. У дисертаційній роботі Андрущак В.С. отримано наступні наукові результати:

1. Вперше розроблено структурно-функціональну модель програмно-конфігурованої оптичної транспортної мережі, яка, на відміну від відомих, використовує систему штучного інтелекту для тренування, тестування і оновлення програмного забезпечення вузлів мережі, що дає змогу підвищити ефективність функціонування мережі за критеріями якості обслуговування та енергоефективності шляхом адаптивного управління інфокомунікаційними потоками.

2. Удосконалено метод агрегації трафіку в граничному вузлі програмно-конфігурованої оптичної транспортної мережі, який відрізняється від відомих можливістю адаптації розміру блоків даних на основі статистики часових характеристик трафіку, що дає змогу підвищити ефективність процесу передавання інформаційних потоків з різними вимогами до параметрів якості обслуговування.

3. Набув подальшого розвитку метод управління інфокомунікаційними потоками з використанням графових нейронних мереж, шляхом використання додаткового параметру енергоефективності для навчання нейронної мережі, що дає змогу здійснювати управління інфокомунікаційними потоками із одночасним врахуванням параметрів якості обслуговування та енергетичної ефективності інфокомунікаційної мережі.

Практична значимість результатів роботи. Отримані в дисертаційній роботі Андрущак В.С. наукові результати мають практичну цінність та можуть бути використані операторами оптичної транспортної телекомунікаційної інфраструктури для оптимізації інформаційних потоків. Зокрема:

1. Удосконалено метод агрегації навантаження на граничному вузлі оптичної транспортної мережі, що дало можливість зменшити кількість службової інформації у каналах зв'язку в середньому на 16%.

2. Розроблено алгоритм збору даних для алгоритмів управління інфокомунікаційними потоками, який забезпечує процес збору, тренування, тестування і розгортання відповідних оновлень нейронних мереж.

3. Використання алгоритму управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж дає змогу не тільки зменшити середню затримку для маршрутів у години найбільшого завантаження на 18% а й здійснити зменшення енергоспоживання телекомунікаційної мережі.

4. Розроблено модуль розширення до існуючого програмного забезпечення Састі моніторингу оптичної транспортної мережі який дає змогу адміністратору мережі оцінити комплексно послідовність події мережі із точки зору кластерного методу k-means та c-means.

Важливість результатів дисертації для практики підтверджена актами впровадження в телекомунікаційних мережах ПАТ «УкрТелеком», ТОВ «Сайпрес Семікондактор Україна» та ТОВ «Кінетікс».

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 27 наукових праць, з яких 4 наукові статті у закордонних виданнях, з них 2 у журналах з індексом цитування (імпакт-фактором, квантиль Q1-Q2), що входить до наукометричної бази Scopus/Web of Science, 8 статей у наукових фахових виданнях, 14 праць у збірниках матеріалів конференцій, тези доповідей та 1 монографія.

Відповідність теми дисертації профілю спеціальності. Дисертація Андрущака В.С. 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 Андрущака В.С. свідчить про відсутність ознак фальсифікації. Проведений аналіз основних ідей та методів дотичних до тематики інших робіт містить відповідні посилання.

Зауваження та недоліки

1. У першому розділі роботи варто було б більш детально розглянути попередні дослідження провідних вчених у напрямку застосування методів штучного інтелекту для управління інформаційними потоками у телекомунікаційних мережах.

2. У роботі представлено метод управління інформаційними потоками з використанням графових нейронних мереж, який дає змогу знизити енергоспоживання мережі. Проте, не наведено дослідження складності запропонованого методу, що не дає змогу оцінити частку доданого енергоспоживання мережі на проведення додаткових обчислень.

3. В дисертаційній роботі значна увага приділяється методам машинного навчання. Відомо, що такі методи мають здатність удосконалюватись в процесі функціонування за рахунок накопичення більшої кількості статистичних даних та постійного навчання. Проте, у роботі недостатньо повно розглянуто аспекти тренування відповідних моделей та необхідного розміру статистичної вибірки для досягнення результатів ефективності, які представлені у третьому розділі.

4. На рис. 3.17-3.18 представлено порівняння прогнозованого розміру блоку з використанням штучного інтелекту із статичними варіантами, що є не зовсім коректним. Було б доцільно додатково провести порівняння із існуючими альтернативними методами прогнозування на основі машинного навчання.

5. На рис. 3.15. та у табл. 3.6. представлено результати кількості втрачених пакетів. Проте, незрозуміло чи враховував автор при цьому різні типи сервісів, оскільки між ними є суттєві відмінності з точки зору вимог до втрати пакетів. Це не дає змоги оцінити економічний ефект від запропонованого методу агрегації безпосередньо для оператора.

6. У роботі автор використовує як синтетично згенерований трафік на основі

відомих ймовірно-часових характеристик, так і реальний трафік отриманий шляхом моніторингу мережі оператора. На мою думку, порівняння результатів запропонованих методів управління інформаційними потоками для цих двох варіантів трафіку значно б посилює дану дисертаційну роботу.

Загальний висновок. Наведені зауваження не змінюють загальну позитивну оцінку наукової значимості і практичної цінності дисертаційної роботи Андрущак В.С., у якій розв'язано актуальне науково-практичне завдання розроблення методів та моделей управління інформаційними потоками в оптичних транспортних мережах з використанням алгоритмів машинного навчання та засобів штучного інтелекту, в умовах високої динаміки зміни ймовірно-часових характеристик інформаційних потоків та суперечливих вимог до якості обслуговування.

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 Андрущак Володимир Степанович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка».

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



М. О. Євдокименко

Підпис доцента Євдокименко М.О. засвідчую

Учений секретар
Харківського національного
університету радіоелектроніки



І. В. Магдаліна