

Голові разової спеціалізованої вченої ради ДФ.35.052.050  
Національного університету «Львівська політехніка»  
доктору технічних наук  
Кирику Мар'яну Івановичу

## ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Сайка Володимира Григоровича  
на дисертацію Андрущак Володимира Степановича  
«Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з  
використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання»,  
представлену на здобуття ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

### **Оцінка актуальності теми роботи.**

Забезпечення якості обслуговування є однією із основних задач телекомунікаційних операторів. Зростання кількості трафіку і телекомунікаційних послуг призводить до перевантаження мереж у пікові години навантаження, що у свою чергу призводить до погіршення якості обслуговування. Для вирішення задач більш ефективного використання інфокомунікаційних потоків популярним рішенням є використання програмно-конфігурованого контролера (SDN). На таких контролерах працюють алгоритми, які дозволяють управляти інфокомунікаційними потоками із використанням протоколу OpenFlow. Дані методи ефективно проявляються себе при роботі із статичними потоками. Для вирішення більш складніших задач на сьогоднішній день використовуються алгоритми на базі машинного навчання, зокрема нейронних мереж. Такі алгоритми дозволяють визначити нетипові поведінки трафіку, короткотривалі пікові навантаження, а також врахувати необмежену кількість мережевих параметрів для оптимізації мережі. Особливу увагу слід звернути на моделі управління інфокомунікаційними потоками на рівні передачі даних так і на рівні управління мережі. Наприклад, на відмінну від статичних алгоритмів визначення розміру корисного навантаження, інтелектуальні алгоритми визначення динамічного розміру блоків даних дозволяють більш ефективно використовувати смугу пропускання і зменшити кількість службової інформації. Інтелектуальні алгоритми на рівні управління даних дозволяються при управління інфокомунікаційними потоками врахувати практично необмежену кількість мережевих даних і здійснювати оновлення не цілих алгоритмів на ділянках мережі, а лише перетренованих моделей.

Саме тому, тематика дисертаційної роботи здобувача, яка присвячена важливим аспектам щодо моделей управління інфокомунікаційними потоками із використанням нейронних мереж і в тому числі алгоритмів машинного навчання для забезпечення необхідних параметрів обслуговування є досить актуальною.

### **Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота Андрущака Володимира Степановича виконана згідно з науковими програмами та планами науково-дослідних робіт кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка». Зокрема, робота виконувалась в межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні», (ДБ/LTE-U), (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177, «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні», (ДБ/Блокчейн) (2020–2022 рр.), № держреєстрації 0120U100674, «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою», (ДБ/Smart City), (2020–2022 рр.), № держреєстрації 0120U102193.

### **Аналіз змісту дисертаційної роботи.**

Дисертація Андрущака В.С. складається із вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел та 4-х додатків. Загальний обсяг роботи складає 189 сторінок з додатками. Список використаних джерел містить 98 найменувань розміщених на 13 сторінках.

У вступі наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження, розкрито наукову і практичну цінність отриманих результатів, а також подані відомості про апробацію дисертаційної роботи.

У першому розділі «Аналіз методів побудови та функціонування оптичних транспортних мереж» розглянуто основні принципи побудови та архітектури оптичних транспортних мереж із використанням SDN контролера та інтелектуальних алгоритмів управління мережею. Встановлено, що ефективне управління інфокомунікаційними потоками призводить до раціонального використання мережевих ресурсів та забезпечення необхідних параметрів обслуговування. Одним важливим параметром, який приймається до уваги при управлінні мережею є параметр енергоспоживання, що дозволяє визначити поточні вузькі місця

телекомунікаційної мережі. При раціональному використанні мережевих ресурсів оптичної транспортної мережі, зменшенні кількості службового трафіку та енергоспоживання, телекомунікаційний оператор буде здатний забезпечувати нові послуги без розгортання нової транспортної інфраструктури.

У *другому розділі* «Моделі та методи інтелектуального використання мережевих ресурсів у оптичних транспортних мережах» запропоновано концептуальну модель програмно-конфігурованої оптичної транспортної мережі, яка забезпечує необхідну інфраструктуру для підтримки розроблених інтелектуальних алгоритмів управління інфокомунікаційними потоками. Дана інфраструктура забезпечує і описує правила збору інформації для тренування, тестування і розгортання відповідних моделей інтелектуальних алгоритмів управління інфокомунікаційними потоками. Розроблено алгоритм визначення станів мережі на базі кластерних методів ML (машинного навчання) алгоритмів k-means та c-means. Даний алгоритм дозволяє побудувати послідовність подій, які дають змогу спрогнозувати із певною ймовірністю виникнення наступної події мережі. Удосконалено метод агрегації корисного навантаження на граничних вузлах оптичної транспортної мережі із використанням глибоких нейронних мереж. Даний підхід базується на врахуванні «історії» поведінки трафіку протягом дня, розміру блоку даних протягом певної кількості ітерацій. Такий підхід дозволив зменшити кількість службового навантаження при невеликій втраті пакетів із забезпеченням необхідних параметрів обслуговування. Розвинуто алгоритм інтелектуального управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж. Даний алгоритм дозволяє врахувати як ще один елемент FE параметр енергоспоживання. Використання графових нейронних мереж як спосіб представлення роботи оптичної транспортної мережі враховує особливості побудови архітектури мережі, мережеві параметри вузлів та каналів зв'язку.

У *третьому розділі* «Моделювання та дослідження методів інтелектуального управління інфокомунікаційними потоками із використання нейронних мереж і машинного навчання». Для проведення дослідження стосовно ефективності запропонованих методів управління інфокомунікаційними потоками у роботі розроблено імітаційну модель оптичної транспортної мережі. Досліджено метод збору даних із використанням ML алгоритмів k-means та c-means для інтелектуальних алгоритмів управління інфокомунікаційними потоками оптичної транспортної мережі. Здійснено моделювання роботи алгоритму управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж та врахуванням параметру енергоспоживання. В процесі моделювання здійснено оцінку алгоритму агрегації навантаження на граничному вузлі

досліджуваної мережі із використанням глибокої нейронної мережі. Проведено верифікації запропонованих алгоритмів у порівнянні із технологію каналного рівня оптичних транспортних мереж OTN шляхом імітаційного моделювання. Порівняння здійснено щодо ієрархій швидкостей блоків даних OTUk. Встановлено, що з використанням алгоритму агрегації досягається необхідний рівень обслуговування і невеликою кількістю втрачених пакетів.

У четвертому розділі «Практична реалізація системи моніторингу для оптичної транспортної мережі» розроблено модуль для моніторингової системи телекомунікаційних мереж Састі оператора міста Львова. Розроблений модуль дозволяє розширити поточні можливості даної моніторингової системи за рахунок альтернативного представлення мережевих параметрів. Модуль було впроваджено для використання місцевого телекомунікаційного оператора в якості окремого серверного рішення, який комунікує із основним програмним засобом Састі.

У *висновках* дисертаційної роботи викладено основні результати і рекомендації, які випливають з проведених досліджень, представлено та охарактеризовано кількісні оцінки показників ефективності в процесі використання запропонованих рішень.

У *додатках* до дисертації долучено обрані початкові коди розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць і апробацій автора за темою дисертації.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації, їх достовірність.**

Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень і висновків є достатнім та підтверджується проведенням досліджень із коректним застосуванням відомих теоретичних та чисельних методів, співпадінням теоретичних результатів із експериментальними даними та практичним ефектом, який підкріплений актами впровадження. Основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи базуються на загальновідомих фундаментальних положеннях теорії системного аналізу, теорії телекомунікаційних систем, моделювання, а отже є достовірними.

### **Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.**

Наукова новизна роботи полягає у розробленні методів та моделей для адаптивного управління ресурсами з метою забезпечення необхідної якості

обслуговування в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах. Зокрема у роботі:

- Вперше розроблено структурно-функціональну модель програмно-конфігурованої оптичної транспортної мережі, яка, на відміну від існуючих, використовує машинне навчання, що дозволяє підвищити ефективність функціонування мережі за критеріями якості обслуговування та енергоефективності.

- Удосконалено метод агрегації трафіку в граничному вузлі програмно-конфігурованої оптичної транспортної мережі, який дозволяє адаптувати розмір блоків даних на основі статистики часових характеристик трафіку, що призводить до підвищити ефективність процесу передавання інформаційних потоків з різними вимогами до параметрів якості обслуговування.

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

### **Практичне значення результатів дисертаційного дослідження.**

Показано, що алгоритму управління інфокомунікаційними потоками разом з використанням графових нейронних мереж дозволяє зменшити середню затримку для маршрутів у години найбільшого завантаження та зменшує електроенергоспоживання мережі.

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 машинного навчання, зокрема кластерного методу k-means та c-means.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка», зокрема для студентів спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» в курсі лекцій з дисципліни «Програмування вбудованих систем» та «Кіберфізичні системи», а також у держбюджетних та госпдоговірних науково-дослідних роботах кафедри телекомунікації. Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних корпоративних мережах ПАТ «Укртелеком», ТОВ «KeenEthics», що підтверджено актами впровадження.

### **Повнота викладу матеріалів дисертації в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.**

За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 27 наукових праць, з яких 4 наукові статті у закордонних виданнях, з них 2 у журналах з індексом цитування (імпаکت-фактором, квартиль 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

У працях здобувача повністю висвітлені основні положення та результати дисертаційного дослідження.

### **Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.**

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора, зарахованих за її темою, порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи фабрикації тексту в роботі відсутні.

### **До зауваження дисертації слід віднести:.**

1. У першому розділі автор навів незначну кількість статичних алгоритмів управління інфокомунікаційними потоками на SDN контролері по відношенню до інтелектуальних алгоритмів.

2. У підрозділі 2.1 і на рис. 2.3 представлено структурну схему архітектури оптичної транспортної мережі із використанням алгоритмів на базі штучного інтелекту. Представлено яким чином здійснюється збір даних, тренування і розгортання відповідних моделей. Проте в роботі недостатньо описано роботу ізольованого домену, а також упущений процес тренування моделей на мережевих параметрах.

3. На сторінці 79 дисертант описує математичну модель визначення параметру енергоспоживання із врахуванням мережевих параметрів фізичного, каналного і мережевого рівня. Автор стверджує, що високий параметр енергоспоживання може вказати вузькі місця мережі. Проте насправді такий мережевий параметр у графових нейронних мережах може призвести до того, що фактично раціональне енергоспоживання мережі буде становити 0 Вт. Автор наводить тезу, що слід ввести граничні умови для таких випадків, проте не вказує яким чином має бути введено обмеження щодо тренування наведеної графової нейронної мережі.

4. У третьому розділі проведено моделювання роботи оптичної транспортної мережі із використанням моделей управління інфокомунікаційними потоками із використанням алгоритмів на базі нейронних мереж та алгоритмів машинного навчання. При моделюванні роботи алгоритму управління мережею із використанням графової нейронної мереж вказано, що алгоритм може враховувати при управлінні фактично

необмежену кількість мережевих параметрів. Проте при моделюванні не враховано яким чином були промодельовані дані параметри у моделі. Також у моделюванні представлено управління інфокомунікаційними потоками і оцінка здійснюється лише тільки для одного параметру затримки. Інші мережеві параметри за винятком енергоспоживання невраховані.

5. У 3 розділі здійснено моделювання запропонованих рішень за допомогою розробленого імітаційного програмного забезпечення. Проте всі моделювання здійснено для однієї топології мережі, а інші топології не представлені і недосліджені.

6. У четвертому розділі представлено практичну реалізацію запропонованих рішень у роботі у систему моніторингу Састі. У роботі представлено, що модуль здійснює збір даних через протокол SNMP проте не представлено яким чином має здійснюватися управління мережевими ресурсами.

### **Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України.**

Дисертаційна робота Андрущак В.С. «Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання» є завершеною науковою працею. Сама 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, а здобувач, Андрущак Володимир Степанович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент

професор кафедри прикладних інформаційних систем

Київського національного університету

імені Тараса Шевченка,

д.т.н., проф.



Сайко В. Г.

Підпис Сайко В. Г. засвідчую.

