



На засідання запрошені:

1. Стрихалюк Богдан Михайлович, Національний університет "Львівська політехніка", директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем, д.т.н.;
2. Бондарев Андрій Петрович, Національний університет "Львівська політехніка", професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, д.т.н., професор;
3. Фаст Володимир Миколайович, Національний університет "Львівська політехніка", доцент кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, к.т.н., доцент;
4. Яремко Олег Миколайович, Національний університет "Львівська політехніка", докторант кафедри радіоелектронних пристроїв та систем Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, к.т.н.;
5. Русин Богдан Павлович, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, завідувач відділу методів і систем дистанційного зондування, д.т.н., професор;
6. Дронюк Іванна Мирославівна, Національний університет "Львівська політехніка", доцент кафедри автоматизованих систем управління Навчально-наукового інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології, к.ф.-м.н., доцент.

З присутніх – 9 докторів наук та 15 кандидатів наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

Головуючий на засіданні – д.т.н., професор, завідувач кафедри телекомунікацій Климаш М.М.

**2.СЛУХАЛИ:** Доповідь аспіранта кафедри телекомунікацій Андрущак Володимира Степановича за матеріалами дисертації: «Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання», представленої на здобуття вищої освіти ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»)

Науковий керівник – д.т.н., доцент Кайдан М.В.

Тему дисертації затверджено "27" жовтня 2017 року на засіданні Вченої ради Навчально-наукового Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету "Львівська політехніка", протокол №5.

*Робота виконана на кафедрі телекомунікацій Національного університету "Львівська політехніка".*

По доповіді було задано 19 запитань, на які доповідач дав правильні та ґрунтовні відповіді. Питання задавали:

- завідувач кафедри телекомунікацій, д.т.н., проф. Климаш Михайло Миколайович;
- професор кафедри телекомунікацій, д.т.н., доц. Кирик Мар'ян Іванович;

- професор кафедри телекомунікацій, д.т.н., доц. Романчук Василь Іванович;
- докторант кафедри телекомунікацій, к.т.н. Бешлей Микола Іванович;
- докторант кафедри телекомунікацій, к.т.н. Максимюк Тарас Андрійович;
- асистент кафедри телекомунікацій, к.т.н. Шпур Ольга Миколаївна;
- асистент кафедри телекомунікацій, к.т.н. Бугиль Богдан Анатолійович;
- директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки д.т.н. Стрихалюк Богдан Михайлович;
- професор кафедри теоретичної радіотехніки та радіовимірювань, д.т.н., проф. Бондарев Андрій Петрович;
- доцент кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій, д.т.н., проф. Русин Богдан Павлович.

### 3. Виступи присутніх.

З оцінкою дисертації Андрущака В.С. виступили рецензенти:

- професор кафедри телекомунікацій, д.т.н., доц. Романчук Василь Іванович;
- доцент кафедри автоматизованих систем управління, к.ф.-м.н., доц. Дронюк Іванна Мирославівна,

які відзначили актуальність теми дисертаційної роботи та її практичну цінність з огляду на сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій та потребу в нових технічних рішеннях для управління інфраструктурою оптичних транспортних мереж. Дослідження виконані на високому науковому рівні, результати підтверджені експериментально. Здобувач уміло використовує сучасні методи наукових досліджень складних телекомунікаційних систем, інформаційні технології та нейронні мережі для опрацювання даних і подання отриманих результатів. Результати дисертаційної роботи є науково-обґрунтованими та оригінальними. Отримані результати підтверджуються публікаціями у наукових фахових виданнях України та інших держав, а також апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях. Стиль викладення результатів дослідження є хорошим, якість редагування – високою.

Також було вказано на зауваження. У якості зауважень рецензенти д.т.н. Романчук В.І. та к.ф.-м.н. Дронюк І.М. зазначили, що недоліки, які притаманні рецензованій дисертаційній роботі є незначними і переважно мають редакційно-стилістичний характер, що не впливає на позитивне сприйняття роботи. Рецензент д.т.н. Романчук В.І. рекомендував детальніше представити окремі отримані практичні результати у презентації роботи, а також потребу в редакційно-стилістичному опрацюванні рецензованих матеріалів, більш чіткому висвітленні окремих наукових результатів дослідження. Рецензент к.ф.-м.н. Дронюк І.М. відзначила, що під час виступу доцільно було б сфокусуватися на висвітленні пунктів наукової новизни та вказала на деякі невідповідності, що пов'язані з термінологією та об'єктом дослідження.

З оцінкою дисертаційної роботи також виступили присутні на фаховому семінарі кафедри телекомунікацій:

- професор кафедри телекомунікацій, д.т.н., проф. Климаш Михайло Миколайович, який відзначив актуальність тематики дисертаційної роботи, суттєву новизну одержаних наукових результатів. Рекомендував редагувати назви третього та четвертого розділу роботи. Вказав на безсумнівний вклад здобувача в одержані та представлені ним результати. Звернув увагу на практичне значення роботи, яке полягає у можливості їх безпосереднього застосування для управління інфокомунікаційних потоків у оптичних транспортних мережах;
- директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки, доцент кафедри радіоелектронних пристроїв та систем, д.т.н. Стрихалюк Богдан Михайлович, який відзначив науковий потенціал здобувача, актуальність обраного напрямку досліджень, особливо у зв'язку з потребою нових технологічних рішень, що дадуть змогу забезпечити необхідну якість

обслуговування телекомунікаційних сервісів із зростаючими вимогами до трафіку. Відзначив, що запропонований метод управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж забезпечує необхідну якість обслуговування в години пікового завантаження мережі;

- докторант кафедри телекомунікацій, к.т.н. Максимюк Тарас Андрійович, який акцентував на важливість представлених у роботі досліджень. Звернув увагу на високу науково-технічну ерудицію здобувача та його відчутний науково-педагогічний досвід. Вказав на практичну значущість одержаних результатів, що дозволяє говорити про високий потенціал щодо їх застосування операторами телекомунікаційних мереж;
- докторант кафедри телекомунікацій, к.т.н. Бешлей Микола Іванович, який наголосив, що дисертаційна робота Андрущак Володимира Степановича виконана на належному теоретичному, практичному і методологічному рівні, вирізняється своєю змістовністю та інформаційною насиченістю, тому її можна рекомендувати для подання до розгляду у спеціалізовану вчену раду.

Загальна характеристика дисертації – позитивна.

З характеристикою наукової зрілості аспіранта виступив науковий керівник д.т.н., доц. Кайдан М.В., який відзначив, що Андрущак В.С. є сформованим науковцем, який самостійно і творчо працював над написанням дисертаційного дослідження, ґрунтовно опановуючи обрану тематику. Аспірант широко використовує комп'ютерні технології під час оброблення експериментальних даних та оформлення роботи. Проявив здатність самостійно планувати та ставити науковий експеримент, опрацьовувати, аналізувати та обґрунтовувати результати досліджень, логічно зв'язувати отримані висновки з фундаментальними науковими розробками. Аспірант зарекомендував себе як людина з науковим мисленням, досвідчений в телекомунікаційній області, про що свідчить його дисертація та рівень наукових праць. Результати роботи постійно висвітлювалися в публікаціях у фахових науково-практичних журналах та наукових конференціях, зокрема міжнародних. Андрущак В.С. активно співпрацює з аспірантами та магістрантами кафедри, є співвиконавцем держбюджетних тем. Враховуючи наукову зрілість, хорошу теоретичну підготовку, вміння аналізувати та узагальнювати фактичний матеріал, хорошу загальну ерудицію, якісна характеристика особистості Андрущак Володимира Степановича як дослідника є позитивною.

**4. Заслухавши та обговоривши доповідь Андрущак Володимира Степановича, а також за результатами попередньої експертизи представленої дисертації на фаховому семінарі кафедри телекомунікацій, прийнято наступні висновки щодо дисертації «Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання»:**

#### **Висновок**

**фахового семінару кафедри телекомунікацій Національного університету "Львівська політехніка" про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання»**

**здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії за спеціальністю**

**172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

**(галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»)**

#### **4.1. Актуальність теми дисертації**

Розподіл ресурсів та управління мережею є одним із ключових елементів для забезпечення необхідних параметрів обслуговування інфокомунікаційних мереж. Такі мережі за одиницю часу передають терабіти інформації. Помилки на рівні управління такої

мережі можуть призвести до втрат даних цілого міста або області (регіону). Популярним рішенням для здійснення управління такими мережами є використання SDN контролера. Тобто програмно конфігуровані мережі можуть адаптуватись під потреби сервісів і забезпечення необхідних параметрів якості обслуговування. Додатковим мережевим параметром є параметр енергоспоживання, який дає змогу оцінити роботу алгоритмів транспортної мережі із точки зору споживання електроенергії. Це дає змогу, наприклад, з'ясувати чи виграш від розробленого алгоритму оптимізації ресурсів мережі не дає зворотнього програшу через високе зростання енергоспоживання.

Велика кількість алгоритмів оптимізації роботи оптичних транспортних мереж дає змогу більш ефективно використовувати спектральні ресурси оптичних каналів, зменшувати кількість службового навантаження із використанням методів агрегації корисного навантаження, зменшувати end-to-end затримку для певних послуг. Велика частина із існуючих алгоритмів є програмною реалізацією на SDN контролерах. Зміна будь-яких параметрів таких алгоритмів призводить до оновлення програмного забезпечення. Для вирішення поставлених задач в оптичних транспортних мережах слід використовувати більш гнучкі інструменти, такі як ML-алгоритми та нейронні мережі. Такі інструменти дають можливість більш гнучко управляти мережею без зміни необхідного програмного забезпечення.

Дослідженням завдань управління інфокомунікаційними потоками оптичних транспортних мереж в сучасних телекомунікаційних мережах активно займаються, як фахівці України: Захарченко О.О., Климаш М.М., Кайдан М.В., Агеев Д.В., інші та іноземних країн: Y. Zhao, B. Yan, A. L. Paraschis.

Реалізація методів управління інфокомунікаційними потоками реалізується із використанням статичних та інтелектуальних алгоритмів. Використання алгоритмів на базі нейронних мереж дає змогу здійснювати більш гнучку оптимізацію за рахунок врахування практично необмеженої кількості параметрів. Дані алгоритми здатні працювати на мікрорівні і здійснювати багаторазову переконфігурацію оптичної транспортної мережі протягом досить малого часу. Це дає змогу більш раціонально використовувати мережеві ресурси на базі багатокритеріального підходу. Проте велика кількість таких алгоритмів не передбачає інструментів для збору, тренування і тестування нейронних мереж на існуючій інфраструктурі оптичних транспортних мереж.

Таким чином, неухильне зростання різноманітності та обсягів інформаційних потоків в телекомунікаційних мережах, спонукають до розв'язання науково-практичного завдання розробки інфраструктури оптичної транспортної мережі для забезпечення ефективного управління інфокомунікаційними потоками на базі інтелектуальних алгоритмів машинного навчання і нейронних мереж із врахуванням параметру енергоспоживання.

#### **4.2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри**

Тематика дисертаційного дослідження виконувались у відповідності до наукового напряму кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі», в межах низки 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.

### **4.3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів**

Аналіз структури та змісту дисертації та наукових праць, що опубліковані автором, дозволяє стверджувати, що усі наукові та практичні результати отримані ним особисто і повною мірою опубліковані та апробовані.

Андрушаком В.С. запропоновано концептуальну модель інфраструктури оптичної транспортної мережі, яка дає змогу інтегрувати елементи інтелектуального управління мережею з використанням засобів штучного інтелекту на рівні управління. На відміну від існуючої інфраструктури оптичних транспортних мереж, запропонована модель дає змогу забезпечити управління даними мережі на рівні елементів інфраструктури та протоколів керування. Запропонована інфраструктура представляє ізольований домен для інтелектуальних алгоритмів, який передбачає використання імітаційної моделі існуючої оптичної транспортної мережі для тестування інтелектуальних алгоритмів управління інформаційними потоками.

Розроблено алгоритм моніторингу, який дає змогу адаптивно вибирати часові інтервали для збору даних із вузлів мережної інфраструктури на основі визначення стану мережі з використанням методів машинного навчання K-means та C-means для підвищення ефективності управління потоками в оптичних інфокомунікаційних мережах. Крім того, розроблений алгоритм дає змогу підвищити інформативність зворотного зв'язку адміністратору мережі, для зменшення кількості помилок, зумовлених людським фактором. Важливою перевагою запропонованого технічного рішення є простота практичної реалізації на основі програмно-конфігурованих мереж та протоколу OpenFlow.

Удосконалено метод управління інформаційними потоками із використанням графових нейронних мереж. Розвинуто алгоритм агрегації трафіку в граничному вузлі оптичної транспортної мережі із використанням повнозв'язної нейронної мережі. Даний алгоритм дав змогу знизити обсяг службової інформації у каналах зв'язку, у порівнянні із раніше відомими алгоритмами у мережах на основі технології OTN. Додатковою перевагою запропонованого Андрушаком В.С. технічного рішення є зниження навантаження на проміжні вузли оптичної транспортної мережі, що дає змогу знизити їх енергетичне споживання. Експериментальні випробування даного алгоритму показали, що він дає змогу здійснювати прогнозування розміру блоків даних, з урахуванням вимог до якості обслуговування пакетів у вузлах.

Проведено моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі оптичної транспортної мережі. Встановлено, що алгоритм визначення і прогнозування станів дає можливість кластеризувати мережеві параметри у наглядні комбінації для покращення якості прийняття рішень адміністратором мережі. Із використанням розробленої імітаційної моделі встановлено, що розроблений алгоритм управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж дав змогу зменшити значення затримки у пікові години навантаження на 18%. Крім того, дослідження алгоритму агрегації трафіку у граничному вузла оптичної транспортної мережі встановили, що він дає змогу зменшити кількість службового трафіку на 17% а енергетичне споживання проміжного вузла на 11%.

Для практичного впровадження отриманих наукових результатів, Андрушаком В.С. розроблено програмне забезпечення, яке розширює функціональні можливості системи моніторингу оптичної транспортної мережі міста Львова, яка використовується оператором ПАТ «Укртелеком». Розроблене програмне забезпечення дало змогу в залежності від періоду доби здійснювати перенаправлення інформаційних потоків через резервні шляхи із використанням обхідних маршрутизаторів.

**4.4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій** підтверджуються коректним використанням апробованого математичного апарату, методів моделювання, різними способами виконання розрахунків; результатами проведених автором імітаційних комп'ютерних експериментів, відповідністю результатів моделювання (розрахунку) експериментальним результатам, їх зв'язком з існуючими результатами, отриманими із

застосуванням класичних методів, а також порівняльним аналізом результатів дисертаційних досліджень із даними літературних джерел, результатами апробацій.

#### **4.5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру**

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.

#### **4.6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації**

Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, внесок Андрущак В.С. є вирішальним, зокрема авторові належать: у роботах [1, 7, 12] аналіз існуючих методів управління інфокомунікаційними потоками, [11, 18, 23] розробка інфраструктури оптичної транспортної мережі із елементами інтелектуального управління мережею на рівні управління мережі і передачі даних, [19, 27] розробка алгоритму збору даних із вузлів оптичної транспортної мережі для тренування, тестування і розгортання інтелектуальних алгоритмів управління, [4, 5, 6, 8, 9, 17] розробка методу управління інфокомунікаційними потоками оптичної транспортної мережі із врахуванням параметру енергоспоживання для ефективного виділення мережевих ресурсів у різні години дня, [13, 15, 20, 21] розробка методу агрегації трафіку на граничному вузлі мережі, [2, 14, 16, 26] моделювання та дослідження ефективності запропонованих рішень на основі розробленої імітаційної моделі телекомунікаційної мережі, [3, 10, 22, 24, 25] дослідження впливу реалізованих алгоритмів на оптичній транспортній мережі міста..

Основні положення та результати дисертації опубліковано у 27 наукових праць, з яких 4 наукові статті у закордонних виданнях, з них 2 у журналах з індексом цитування (імпакт-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:

##### **Монографії:**

1. М. М. Климаш, М. В. Кайдан, В. С. Андрущак, Ю. В. Климаш. Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж – Львів: Львів: Видавництво «Львівської політехніки», 2018, 176 с.

##### **Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:**

2. M. Kaidan, V. Andrushchak, N. Kryvinska, M. Klymash, M. Seliuchenko, “Configuration of network management for energy efficiency in optical transport networks using GMPLS and OBS techniques,” Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 74, pp.17–27, 2017.

3. T. Maksymyuk, V. Andrushchak, S. Dumych, B. Shubyn, G. Bugar, J. Gazda, "Blockchain-based network functions virtualization for 5G network slicing," Acta Electrotechnica et Informatica, vol. 20, no. 4, pp. 54-59, 2020.

4. K. Przystupa, M. Beshley, M. Kaidan, V. Andrushchak, I. Demydov, O. Kochan, D. Pieniak, "Methodology and Software Tool for Energy Consumption Evaluation and Optimization in Multilayer Transport Optical Networks," Energies, vol. 13, no. 23, pp. 6370-1-6370-21. Dec. 2020.

**Статті у наукових фахових виданнях України, що включені до наукометричних баз даних:**

5. T. Maksymyuk, V. Andrushchak, S. Dumych, B. Shubyn, G. Bugar, J. Gazda, "Blockchain-based network functions virtualization for 5G network slicing," Acta Electrotechnica et Informatica, vol. 20, no. 4, pp. 54-59, 2020.

**Статті у наукових фахових виданнях України:**

6. М. В. Кайдан, В. С. Андрущак, М. В. Піцик, В. З. Пашкевич, "Аналіз енергетичного балансу оптичної транспортної мережі з врахуванням технологічних і архітектурних підходів", Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації, № 818, С. 120–129, 2015.

7. Б. М. Стрихалюк, П. О. Гуськов, В. С. Андрущак, В. Є. Мурак, С. М. Редчук, "Підвищення якості надання послуг у мультисервісних мережах шляхом інтеграції технологій IP/MPLS та DWDM", Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації, № 818, С. 94–103, 2015.

8. М. В. Кайдан, В. С. Андрущак, "Визначення параметру енергоефективності оптичних транспортних мереж", Системи обробки інформації, № 7, С. 134–142, 2016.

9. М. М. Климаш, М. В. Кайдан, В. С. Андрущак, "Дослідження порядків модуляції для підвищення енергоефективності телекомунікаційних систем передачі", Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку, № 2, С.12– 25, 2016.

10. В.С. Андрущак, М.В. Кайдан, Т.А Максимюк, С.С. Думич, Ю.В. Пиріг, "Інтелектуальне управління інформаційними потоками в оптичних транспортних мережах", Телекомунікаційні та інформаційні технології, № 3(64), С. 4-16, 2019.

11. Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, Д.О. Мисаковець, В.С. Андрущак, С.С. Думич, "Метод адаптивного логічного розділення мережі 5G на основі глибокого навчання", Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, том 31(70), № 5, С. 36-42, 2020.

12. М. В. Кайдан, В. С. Андрущак, С. С. Думич, В. З. Пашкевич, "Дослідження принципів побудови транспортних мереж на основі технології OLS", Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації, № 849, С. 203–209, 2016.

**Публікації у матеріалах конференцій, що входять до складу міжнародних наукометричних баз даних:**

13. M. Kaidan, V. Andrushchak and M. Pitsyk, "Calculation model of energy efficiency in optical transport networks," 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2015, pp. 167-170.

14. M. Kaidan, V. Andrushchak and M. Klymash, "Research on the efficiency of optical resources utilization for OLS networks," 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2016, pp. 30-32.

15. V. Andrushchak, S. Dumych, T. Maksymyuk, M. Kaidan and O. Urikova, "Intelligent data flows management for performance improvement of optical label switched network," IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics,



Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1143-1146.

16. M. Kaidan, V. Andrushchak, B. Stryhalyuk and S. Dumych, "Intelligent Data Flow Management Based on Optical Label Switching Technology for Photonic Transport Network," 2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2018, pp. 1-4.

17. V. Andrushchak, T. Maksymyuk, D. Ageyev and M. Klymash, "Development of the iBeacon's positioning algorithm for indoor scenarios," IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Oct. 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 741-744.

18. M. Kaidan, T. Maksymyuk, V. Andrushchak and M. Klymash, "Intelligent Data Flow Aggregation in Edge Nodes of Optical Label Switching Networks," 2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT), 2019, pp. 145-148.

19. M. Klymash, Y. Pyrih, M. Kaidan and V. Andrushchak, "A Meta-Heuristic Data Routing Algorithm for Networks with Dynamically Variable Structure," 2019 IEEE 20th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2019, pp. 1-4.

20. V. Andrushchak, M. Kaidan, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Smart payload management in edge nodes of optical label switching networks," IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Dec. 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 175-178.

21. V. Andrushchak, M. Kaidan, S. Dumych, O. Dashkovska and H. Kopets, "Deep Learning based Traffic Optimization in Optical Transport Networks," 2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2020, pp. 873-876.

22. V. Andrushchak, M. Kaidan, S. Dumych, Y. Pyrih and T. Maksymyuk, "Research on the scalability of all-optical switches in the OLS networks," IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779310

**Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:**

23. M. Kaidan, V. Andrushchak, "Investigation of energy efficiency in optical transport networks on based technology OBS," IEEE International Conference on RadioElectronics and InfoCommunications (UkrMiCo`2016), 11-16 September, 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 338-340.

24. М. Кайдан, В. Андрущак, "Оцінка параметру енергоефективності оптичних транспортних мереж на базі електрооптичних пристроїв", Восьма міжнародна науково-технічна конференція "Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем", 19-22 квітня 2016 р. м. Київ, С.107-109.

25. М. Климаш, М. Кайдан, В. Андрущак, "Модель визначення параметру енергоефективності транспортних оптичних мереж з використанням SDN контролера", Міжнародна Науково-технічна конференція "Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології", 17-20 листопада 2015, Київ, Україна, Т.2, С.21-23.

26. М. Кайдан, В. Андрущак, "Модель розрахунку енергоефективності для електро- та акутооптичних пристроїв у оптичних транспортних мережі", Міжнародна науково-практична конференція "Нові досягнення в галузі інформаційно-комунікаційних технологій – 2015", 29 Жовтня – 1 Листопада, 2015, Львів, Україна, С.171-174.

27. М.В. Кайдан, В.С. Андрущак, М.І. Бешлей, Т.А. Максимюк, "Енергоефективність оптичних транспортних мереж комутованих по мітках", High-Tech Technologies in Infocommunications (НІСТ - 2019), м. Кам'янець-Подільський, 2019, р. 108-109.

#### **4.7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозиумах, семінарах тощо**

Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 14-ох міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське 2018, 2020 pp.); IEEE International Conference on RadioElectronics and InfoCommunications (м. Київ, 2016 p.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologie (м. Львів, 2019 pp.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2019 pp.); Міжнародних конференціях з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (м. Одеса, 2018 pp) Міжнародних конференціях «Проблеми інфокомунікацій. Наука і Технології» (м. Харків 2015, 2016, 2018); восьмій міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем» (м. Київ, 2016); міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології» (м. Київ, 2015); міжнародній науково-практичній конференції «Нові досягнення в галузі інформаційно-комунікаційних технологій» (м. Львів, 2015); High-Tech Technologies in Infocommunications (м. Кам'янець-Подільський, 2019); IEEE 20th International conference on computational problems of electrical engineering (м. Львів, 2019); IEEE International conference on Advanced trends in information theory (м. Київ, 2019) Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

#### **4.8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати**

Дисертаційна робота 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 ймовірнісно-часових характеристик інформаційних потоків та суперечливих вимог до якості обслуговування.

Наукове значення роботи полягає у розвитку теоретичних засад побудови програмно-конфігурованих оптичних транспортних мереж, шляхом інтеграції засобів штучного інтелекту для управління інформаційними потоками; розробленні алгоритму збору даних із вузлів оптичної мережної інфраструктури для навчання, тестування та розгортання інтелектуальних алгоритмів управління; розробленні методу управління інформаційними потоками для підвищення ефективності оптичних транспортних мереж за критеріями енергоефективності та якості обслуговування; удосконалення методу агрегації трафіку у граничних вузлах оптичної транспортної мережі з урахуванням суперечливих вимог до якості обслуговування.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсу лекцій з дисциплін, «Програмування вбудованих систем» та «Кіберфізичні системи».

#### **4.9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані**

1. Удосконалено алгоритм агрегації трафіку в граничному вузлі оптичної транспортної мережі, який може бути застосований в транспортних мережах національного та регіонального масштабу для зниження обсягу службової інформації у

каналах зв'язку в середньому на 16%.

2. Розроблено алгоритм управління даними інфокомунікаційної інфраструктури, який забезпечує процес тренування, тестування та оновлення моделей машинного навчання з урахуванням динаміки зміни ймовірнісних характеристик інформаційних потоків.

3. Розроблено алгоритм управління потоками з використанням графових нейронних мереж, який може бути використаний операторами оптичних телекомунікаційних мереж для зниження середньої затримки передавання даних у години найбільшого завантаження на 18%, при одночасному зменшенні витрат електроенергії телекомунікаційного оператора.

4. Розроблено алгоритм моніторингу оптичної транспортної мережі, який інтегрований в існуюче програмне забезпечення мережі ПАТ «Укртелеком», що дало змогу адміністратору мережі оцінювати комплексні послідовності подій мережі з точки зору методів кластеризації K-means та C-means.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсу лекцій з дисципліни «Програмування вбудованих систем» та «Кіберфізичні системи».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в оптичних транспортних мережах ПАТ «Укртелеком», ТОВ «KeenEthics», що підтверджено актами впровадження.

#### **4.10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення**

Робота складається з переліку умовних скорочень, анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 189 сторінок друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 125 сторінок основного тексту, 68 рисунків, 12 таблиць, список використаних джерел із 98 найменувань, 4 додатки на 19 сторінках. Дисертаційна робота за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам Міністерства освіти і науки України.

**У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.**

5. З урахуванням зазначеного,

**на фаховому семінарі кафедри телекомунікації ухвалили:**

**5.1.** Дисертація Андрушака Володимира Степановича «Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання» є завершеною працею, 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 ймовірнісно-часових характеристик інформаційних потоків та суперечливих вимог до якості обслуговування, що має важливе значення для галузі знань 17 «Електроніка та телекомунікації».

**5.2.** У 27 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з яких 4 наукові статті у закордонних виданнях, з них 2 у журналах з індексом цитування (імпакт-фактором, квартиль Q1-Q2), що входять до наукометричної бази Scopus/Web of science, 8 статей у наукових фахових виданнях України, 14 праць у збірниках матеріалів конференцій, тези доповідей та 1 монографія.

5.3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167).

5.4. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Андрущака В.С. дисертація «Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання» рекомендується для подання до розгляду у спеціалізовану вчену раду.

За затвердження висновку проголосували:


за	24	<b>Двадцять чотири</b>
проти	-	(немає)
утримались	-	(немає)

Головуючий на засіданні фахового семінару,  
зав. кафедри телекомунікацій, д.т.н.,  
професор


 Климаш М.М.

Рецензенти:

д.т.н., доцент, професор кафедри  
телекомунікацій

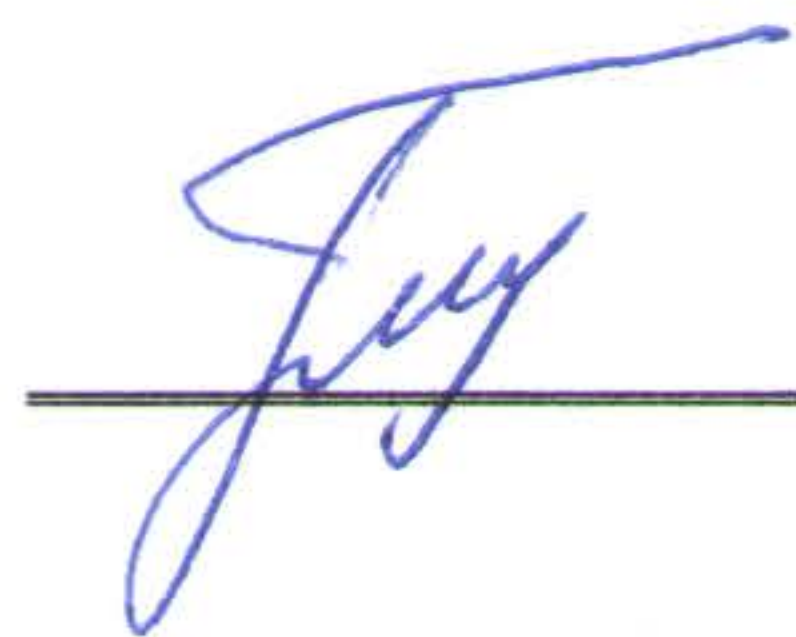
 Романчук В.І.

к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри  
автоматизованих систем управління

 Дронюк І.М.

Відповідальний у ІТРЕ за атестацію  
PhD

к.т.н., докторант, старший викладач  
кафедри телекомунікацій

 Бешлей М.І.

"3" березня 2021 р.