

АНОТАЦІЯ

Андрущак В.С. Моделі управління потоками інфокомунікаційних мереж з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

Розподіл ресурсів та управління мережею є одним із ключовим аспектів для забезпечення стабільного та ефективного функціонування транспортних інфокомунікаційних мереж. Реалізація моделей управління такими потоками здійснюється 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. Такі 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.

В дисертаційній роботі розв'язане 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.

Метою представленої дисертаційної роботи є забезпечення ефективного управління інфокомунікаційними потоками оптичної транспортної мережі із врахуванням параметру енергоспоживання із використанням алгоритмів машинного навчання та нейронних мереж.

Об'єктом дослідження є процес оптимізації мережевих процесів, які відповідають за управління інфокомунікаційних потоків оптичної транспортної мережі з використанням інтелектуальних алгоритмів.

Предметом дослідження є моделі, методи та алгоритми управління інфокомунікаційними потоками в оптичних транспортних мережах.

В процесі досліджень використано методи штучного інтелекту, оптимізації, імітаційного моделювання, математичної статистики та експертних оцінок. Для підтвердження теоретичних результатів застосовано експериментальні методи дослідження.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про впровадження результатів роботи, її апробацію, публікації та особистий внесок здобувача.

У першому розділі «Аналіз методів побудови та функціонування оптичних транспортних мереж» розглянуто основні принципи побудови та архітектури оптичних транспортних мереж із використанням SDN контролера. Такі мережі використовують велику кількість алгоритмів на рівні SDN контролера, які здійснюють управління інфокомунікаційними потоками. Часто ці алгоритми є статичними, тобто зміна певних параметрів вимагає переписання програмного забезпечення і відповідних процедур оновлення. Використання алгоритмів на базі нейронних мереж дозволяє зменшити цей ризик тим фактом, що при правильній архітектурі побудови мережі виправлення таких алгоритмів зводиться до перетренування і оновлення нейронної мережі. Такий більш гнучкий підхід управління дозволяє враховувати більшу кількість мережевих параметрів. Крім того, використання нейронних мереж дозволяє більш швидко реагувати на зміну параметрів інфокомунікаційних потоків на макрорівні та більш ефективно використовувати мережеві ресурси оптичної транспортної мережі.

Аналіз розроблених методів та моделей управління інфокомунікаційними потоками показав, що проблема ефективного використання мережевих ресурсів оптичних транспортних мереж займає важливе місце в наукових працях

закордонних та вітчизняних дослідників.

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. Високе енергоспоживання певних областей мережі може бути фактом неефективного використання обчислювальних ресурсів вузлів або певних невірно вибраних ключових технологій передачі даних. 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. Розроблений алгоритм визначає необхідні стани мережі, які потребують додаткового збору інформації, здійснює перетренування і тестування відповідних моделей. Представлено механізм роботи із резервними сховищами моделей на випадок помилок даних моделей і відповідно оновлення їх на вузлах мережі.

Розроблено алгоритм визначення станів мережі на базі кластерних методів ML алгоритмів k-means та c-means. Даний алгоритм дозволяє побудувати послідовність подій, які дають змогу спрогнозувати із певною ймовірністю наступання певної події мережі. Такий підхід дає змогу більш комплексно підійти до управління інфокомунікаційними потоками і врахувати одночасно більшу кількість мережевих параметрів. Визначено, що перехід адміністрування

від безпосередньо параметрів до послідовностей певного набору кластерів, дають змогу зменшити кількість помилок, яку здійснює адміністратор 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 n ітерацій. Такий підхід дозволив зменшити кількість службового навантаження при невеликій втраті пакетів із забезпеченням необхідних параметрів обслуговування. Доведено, що зменшення кількості службової інформації призводить до зменшення енергетичного споживання проміжного вузла за рахунок зменшення відсотку використання центрального процесора вузла.

Набув подальшого розвитку алгоритм інтелектуального управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж. Розроблений алгоритм на відмінну від існуючих дозволяє врахувати як ще один елемент FE параметр енергоспоживання. Представлена математична модель визначення параметру енергоефективності. 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 використанням 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. Крім того, здійснено моделювання роботи алгоритму управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж та врахуванням параметру енергоспоживання. Також в процесі моделювання здійснено оцінку алгоритму агрегації навантаження на граничному вузлі досліджуваної мережі із використанням

глибокої нейронної мережі.

В процесі моделювання доведено, що розроблений алгоритм управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж дав змогу зменшити параметр затримки у пікові години навантаження на 18%. Зокрема, в даній моделі був врахований параметр енергоспоживання, який був визначений на базі власної методики і в окремому імітаційному програмному забезпеченні. Окреслено, що граничні моменти щодо роботи такого алгоритму визначаються адміністратором мережі для унеможливлення вимкнення телекомунікаційної мережі.

Також шляхом моделювання доведено, що розроблений алгоритм агрегації із використанням глибокої нейронної мережі дозволяє здійснити зменшення кількості службової інформації всередньому на 16%. Крім того, використання імітаційного програмного забезпечення для визначення параметру енергоспоживання дозволило зменшити енергетичне споживання проміжного вузла із використанням даного алгоритму на 11%. В результаті моделювання кількість втрачених IP пакетів становить менше 1%, а врахування попередніх станів на граничному вузлі дозволяє зменшити кількість втрачених IP пакетів при формуванні транспортного модулю.

Проведено верифікації запропонованих алгоритмів у порівнянні із технологією 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 невелика кількість втрачених пакетів.

У четвертому розділі «Практична реалізація системи моніторингу для оптичної транспортної мережі» розроблено модуль для моніторингової системи телекомунікаційних мереж Састі телекомунікаційного оператора міста Львова. Даний розроблений модуль дозволяє розширити поточні можливості даної моніторингової системи за рахунок альтернативного представлення мережевих параметрів. Із використанням результатів ML алгоритмів k-means та c-means адміністратор мережі може здійснювати управління телекомунікаційної мережі

із врахуванням багатьох мережевих параметрів у вигляді певних мережевих станів (кластерів). Даний модуль було впроваджено для використання місцевого телекомунікаційного оператора в якості окремого серверного рішення, який комунікує із основним програмним засобом Састі.

Досліджено ефективність застосування алгоритму управління інфокомунікаційними потоками із використанням графових нейронних мереж із врахуванням параметра енергоефективності для досліджуваної мережі. Розроблене програмне забезпечення надає рекомендації щодо управління інфокомунікаційними потоками у різні години дня для житлового району і бізнес районів міста.

Висновки до дисертації включають узагальнені результати дослідження та рекомендації щодо їх практичного застосування. Теоретичне значення роботи полягає в тому, що її результати дають змогу забезпечити необхідні параметри якості обслуговування в години пікового навантаження із використанням натренованих моделей як на рівні управління так і на рівні передачі даних.

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.

Ключові слова: оптична транспортна мережа, нейронні мережі, алгоритми машинного навчання, параметр енергоспоживання, інфокомунікаційні потоки, системи моніторингу, блок корисного навантаження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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.
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. W. Song, V. Andrushchak, M. Kaidan, M. Beshley, O. Kochan, J. Su, “Methodology for Calculating the Energy Consumption of Information Communication Systems,” *Technical Electrodynamics*, no. 4, pp. 80–88, July 2020.
5. 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.
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: *Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 849, С. 203–209, 2016.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. М. Kaidan, V. Andrushchak and M. Pitsyuk, "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. М. 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

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 (HICT - 2019)*, м. Кам'янець-Подільський, 2019, р. 108-109.