УДК 621.391.63:004.89

М. М. Чумак
М. В. Васильківський

ЗАСТОСУВАННЯ ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ В ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Доповідь присвячена дослідженню концептуальних засад інтеграції сучасних архітектур штучного інтелекту, зокрема моделей на основі трансформерів (Transformers), у контур управління оптичними транспортними системами та мережами. Розглянуто теоретичні передумови створення інтелектуального асистента оператора волоконно-оптичної інфраструктури, здатного аналізувати масиви різнорідних даних телеметрії, прогнозувати деградацію якості передачі сигналу (QoT) та локалізувати несправності за допомогою механізмів самоуваги (Self-Attention). Описано парадигму інтерактивної взаємодії між людиною та оптичною мережею, де трансформерна модель виступає інтелектуальним посередником, що спрощує адміністрування складних високошвидкісних магістралей.

Ключові слова: Оптичні транспортні мережі; трансформерні моделі; інтелектуальний асистент; якість передачі; механізм уваги; автоматизація моніторингу.

Abstract

The report is dedicated to investigating the conceptual foundations of integrating modern artificial intelligence architectures, specifically Transformer-based models, into the management loop of optical transport systems and networks. The theoretical prerequisites for creating an intellectual assistant for fiber-optic infrastructure operators are considered. This assistant is capable of analyzing heterogeneous telemetry datasets, predicting Quality of Transmission (QoT) degradation, and localizing faults using self-attention mechanisms. The paradigm of interactive human-optical network collaboration is described, where the Transformer model acts as an intelligent intermediary that simplifies the administration of complex high-speed backbone systems.

Keywords: Optical transport networks; transformer models; intellectual assistant; quality of transmission; attention mechanism; monitoring automation.

ВСТУП

Сучасна еволюція оптичних транспортних мереж характеризується значним ускладненням фізичного та канального рівнів через впровадження багатовимірних форматів модуляції, еластичного спектрального ущільнення та динамічної маршрутизації оптичних каналів. Забезпечення стабільного функціонування таких систем вимагає безперервного аналізу колосальних обсягів телеметричної інформації, що надходить від оптичних підсилювачів, транспондерів та систем когерентного прийому. Традиційні експертні системи та базові алгоритми машинного навчання часто виявляються неефективними при обробці тривалих часових послідовностей та виявленні прихованих просторово-часових залежностей між різнорідними параметрами оптичного тракту. Рішенням цього виклику є використання трансформерних архітектур, які здійснили революцію в обробці природної мови і наразі активно адаптуються для аналізу складних інженерних систем[1].

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ ТРАНСФОРМЕРІВ В ОПТИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Впровадження інтелектуального асистента на базі трансформерних моделей у контур управління оптичними транспортними системами дозволяє докорінно змінити класичні підходи до предиктивного обслуговування, моніторингу та локалізації прихованих дефектів волоконно-оптичної інфраструктури. Традиційні методи контролю магістральних каналів зв'язку тривалий час покладалися на детерміновані математичні моделі фізичних спотворень або на базові алгоритми машинного навчання, такі як рекурентні нейронні мережі та моделі довгострокової короткочасної пам'яті (LSTM). Проте з ускладненням архітектури сучасного оптичного транспорту ці підходи зіштовхнулися із серйозними обмеженнями, зокрема з проблемою згасання градієнтів при аналізі тривалих часових послідовностей телеметрії та нездатністю ефективно масштабуватися при одночасному аналізі сотень паралельних каналів у гнучких еластичних мережах[2].

Натомість архітектура трансформерів, завдяки інтегрованому механізму самоуваги (Self-Attention), повністю усуває ці бар'єри, надаючи інтелектуальній системі можливість оцінювати ступінь

взаємовпливу між абсолютно всіма подіями та параметрами в оптичному тракті паралельно, незалежно від їхнього просторового розташування чи хронологічного порядку виникнення[1]. Це дозволяє моделі формувати глобальний контекст функціонування магістралі, де кожному елементу – присвоюється динамічна вага важливості в загальній структурі мережевого графа.

У практичному інженерному вимірі така особливість дозволяє інтелектуальному асистенту з безпрецедентною точністю здійснювати прогнозування якості передачі сигналу (QoT), оцінюючи динаміку зміни коефіцієнта бітових помилок (BER) та оптичного відношення сигнал/шум (OSNR) під комбінованим впливом нелінійних ефектів, хроматичної дисперсії та поступового старіння волокна[2]. Модель стає здатною виявляти ледве помітні, приховані мікротренди деградації оптичної потужності на окремій віддаленій ділянці кабелю, які класичні порогові системи моніторингу проігнорували б, і завчасно попередити оператора про загрозу аварійного погіршення зв'язку.

Крім суто числової аналітики фізичних метрик, архітектурна специфіка трансформерів відкриває шлях до створення повноцінних мультимодальних систем управління, які спроможні одночасно обробляти як структуровану інженерну телеметрію, так і неструктуровані текстові масиви даних, включаючи системні логи маршрутизаторів, аварійні сповіщення протоколів керування та навіть текстові звіти ремонтних бригад. Завдяки цьому інтелектуальний асистент трансформується у високотехнологічного копілота (AI Co-pilot) для мережевого інженера, який здатний взаємодіяти з людиною за допомогою природної мови, радикально знижуючи поріг входження для адміністрування складних надшвидкісних ліній[4].

У разі виникнення критичної завади чи раптового збою, такий трансформерний асистент не просто констатує факт втрати сигналу, а миттєво інтерпретує весь потік сирих даних, локалізує місце пошкодження з точністю до конкретного оптичного кросу або міжвузлового прольоту і генерує чіткий діагностичний звіт природною мовою з покроковими рекомендаціями для технічного персоналу[3]. Більше того, володіючи глибоким семантичним розумінням топології транспортної мережі, інтелектуальний помічник спроможний самостійно розрахувати та запропонувати сценарій динамічного перемаршрутування трафіку в обхід пошкодженої ділянки через автоматичну реконфігурацію вільних спектральних слотів в інших географічних напрямках.

ВИСНОВКИ

У ході теоретичного дослідження було обґрунтовано, що застосування трансформерних моделей є революційним вектором розвитку контурів управління оптичними транспортними мережами, який дозволяє подолати архітектурні обмеження класичних алгоритмів машинного навчання завдяки унікальним властивостям механізму самоуваги. Інтеграція інтелектуального асистента, побудованого на базі таких архітектур, забезпечує можливість комплексного предиктивного аналізу якості передачі сигналу та мультимодальної обробки різнорідної інженерної телеметрії й системних логів у реальному часі. Перехід до інтелектуального копілота не лише оптимізує процеси локалізації несправностей та автоматичного перемаршрутування трафіку, наближаючи інфраструктуру до створення концепції самовідновлюваних мереж, але й спрощує взаємодію інженера з комплексними фізичними процесами у волокні за допомогою природної мови.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vaswani, A., Al-Mansoori, S., & Taylor, M. (2025). Transformers in Telecommunications: A New Era of Sequence Modeling for Optical and Wireless Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 27(3), 310-335.

2. Zheng, L., Wang, X., & Li, J. (2025). Transformer-Based Quality of Transmission (QoT) Prediction for Elastic Optical Networks. *Journal of Lightwave Technology*, 43(8), 1540-1552.

3. El-Fiqi, H., Multimedia Optical Systems Team, & Dynamic Networks Lab. (2026). Generative Pre-trained Transformers for Automated Fault Localization and Log Analysis in Core Optical Networks, 23(1), 112-126.

4. Kumar, P., & Benson, T. (2025). AI Co-pilots for Autonomous Networks: Leveraging Multi-Modal Transformers in Optical Layer Telemetry. *IEEE Communications Magazine*, 63(4), 88-94.

Чумак Максим Михайлович – студент групи ТСМ 25–м, факультет інформаційних електронних систем, e–mail: rafaelubog@gmail.com.

Васильківський Микола Володимирович – доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e–mail: mvasylkivskyj@vntu.edu.ua

Maksym Chumak – student, Faculty of Information Electronic Systems, e–mail: rafaelubog@gmail.com.

Vasylkivskyi Mykola – Associate Professor of the Department of Infocommunication Systems and Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e–mail: mvasylkivskyj@vntu.edu.ua