

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-104>

УДК 621:004.451.25

ГОРЯЩЕНКО КОСТЯНТИН

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7034-8702>e-mail: kostyakst@ukr.net**КУШНЕР ІГОР**

Національна академія Державної прикордонної служби України

імені Богдана Хмельницького

<https://orcid.org/0009-0004-3038-3871>e-mail: ztigorkushner@gmail.com**ГРЕСЬ ОЛЕКСАНДР**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

<https://orcid.org/0000-0002-8465-193X>e-mail: o.hres@chnu.edu.ua

ОСНОВНІ ЗАСАДИ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ АНАЛІЗУ ОПТИЧНИХ РЕФЛЕКТОРАМ В ТЕХНОЛОГІЇ TMN

Оптичний рефлектометр або Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) є базовим засобом діагностики ВОЛЗ і використовується на всіх етапах їх життєвого циклу. В роботі наведено основні види оптичних рефлектограм, що фіксуються в процесі монтажу та експлуатації ВОЛЗ. Показано ідеалізовані стани так і типові спотворення сигналів, що мають місце як при організації проведення вимірювань, так і при оцінюванні результатів вимірювань. Причини пошкодження ВОЛЗ є як вікового характеру так і техногенного.

Технологія TMN (Telecommunications Management Network) — це концепція ITU-T (ITU-T M.3010), яка визначає архітектуру управління мережами зв'язку. Показано, що в технології TMN використання штучного інтелекту (ШІ) дозволяє перейти від реактивного управління («виправляти, коли він ламається») до проактивного та автономного. Задачею автоматизації аналізу є усунення або мінімізація впливу людини на оцінювання результату, підтримка роботи 24/7 та мінімізація часу реакції на подію.

Ключові слова: Оптичний рефлектометр, OTDR, оптичні мережі зв'язку, Telecommunications Management Network, TMN, автоматична діагностика, менеджмент відмов мережі.

HORIASHCHENKO KOSTYANTYN

Khmelnytsky of national university

KUSHNER IGOR

National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine

named after Bohdan Khmelnytsky

HRES OLEKSANDR

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF AUTOMATING OPTICAL REFLECTOMETER ANALYSIS IN TMN TECHNOLOGY

Fiber optic measurements are aimed at determining various line characteristics, such as attenuation, reflection, fiber uniformity, quality of welded and detachable joints, as well as localization of defects and damage. A number of specialized instruments are used to perform such measurements, among which the optical reflectometer plays a key role. The Optical Time Domain Reflectometer (OTDR) serves as a fundamental diagnostic tool for fiber-optic communication lines (FOCLs) and is utilized at all stages of their lifecycle, from installation to long-term operation. This study presents the main types of optical reflectograms observed during FOCL deployment and maintenance, highlighting both idealized signal states and typical distortions that can occur during measurement procedures and result interpretation. The causes of FOCL degradation are multifactorial, including both age-related and anthropogenic factors.

The Telecommunications Management Network (TMN) technology, as defined by ITU-T Recommendation M.3010, provides a standardized framework for managing communication networks. This paper demonstrates that integrating artificial intelligence (AI) within the TMN framework enables a shift from reactive network management — repairing faults after they occur — to proactive and autonomous control. The automation of OTDR data analysis aims to reduce or eliminate human intervention, ensure continuous 24/7 operation, and minimize reaction time to network events.

The results underline the potential of combining OTDR diagnostics with AI-driven analysis in TMN-managed networks, providing enhanced reliability, efficiency, and accuracy in the assessment of optical line integrity. Such approaches are essential for modern telecommunication networks, where timely detection and resolution of fiber faults directly impact service quality and operational costs.

Keywords: Optical Time Domain Reflectometer, OTDR, Fiber-Optic Communication Lines, Telecommunications Management Network, TMN, Artificial Intelligence, Automated Diagnostics, Network Fault Management

Стаття надійшла до редакції / Received 11.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.09.2025

Вступ

Експлуатація та будівництво ліній зв'язку нерозривно пов'язані з необхідністю постійного об'єктивного контролю їх технічного стану та якості функціонування. Особливої актуальності це питання набуває для волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), де навіть незначні дефекти оптичного волокна, з'єднань або муфт можуть призводити до суттєвого погіршення параметрів передавання

інформації. Залежно від поставлених завдань, вимірювання на ВОЛЗ спрямовані на визначення різних характеристик лінії, таких як загасання, відбиття, однорідність волокна, якість зварних і роз'ємних з'єднань, а також локалізацію дефектів і пошкоджень. Для виконання таких вимірювань застосовується низка спеціалізованих приладів, серед яких ключову роль відіграє оптичний рефлектометр.

Оптичний рефлектометр (Optical Time Domain Reflectometer, OTDR) є базовим засобом діагностики ВОЛЗ і використовується на всіх етапах їх життєвого циклу — від вхідного контролю оптичного кабелю перед початком будівельно-монтажних робіт, контролю якості прокладання та зварювання волокон, до моніторингу технічного стану лінії в процесі експлуатації та визначення місць пошкоджень у разі виникнення аварійних ситуацій. Завдяки своїй універсальності OTDR дозволяє виконувати вимірювання без доступу до віддаленого кінця лінії, що є особливо важливим для протяжних або важкодоступних трас.

Принцип дії оптичного рефлектометра ґрунтується на аналізі сигналів зворотного релєвського розсіювання та відбиттів, які виникають під час поширення короткого оптичного імпульсу вздовж волокна. У процесі проходження імпульсу частина світлової енергії безперервно розсіюється в товщі волокна внаслідок мікроскопічних неоднорідностей його структури, тоді як на межах неоднорідностей, зварних з'єднань, роз'ємів або механічних пошкоджень виникають відбиті сигнали. Реєстрація часової затримки та амплітуди цих сигналів дає змогу визначити відстань до події та оцінити її характер.

Розсіяні та відбиті світлові імпульси повертаються до приймального тракту рефлектометра, де надходять на фотоприймач і перетворюються на електричний сигнал. Подальша обробка цього сигналу включає накопичення результатів вимірювань, цифрову фільтрацію та усереднення з метою підвищення співвідношення сигнал/шум. Оброблені дані відображаються на дисплеї приладу або комп'ютера у вигляді графічної залежності рівня сигналу від відстані, яка отримала назву рефлектограми.

Рефлектограма є інформативним представленням стану волоконно-оптичної лінії, оскільки дозволяє виявляти та ідентифікувати різні типи подій уздовж траси, оцінювати рівень загасання волокна, втрати на з'єднаннях, а також визначати координати дефектів із високою просторовою точністю. Аналіз рефлектограм може здійснюватися як візуально оператором, так і автоматизовано з використанням вбудованих програмних алгоритмів, що забезпечує об'єктивність результатів та значно підвищує ефективність діагностики ВОЛЗ.

Приклади рефлектограм оптичного кабелю

На рисунку 1 наведено приклад рефлектограми змонтованої волоконно-оптичної лінії зв'язку. Подана рефлектограма відображає характерну залежність рівня зворотного розсіяного сигналу від відстані вздовж оптичного волокна та містить інформацію про основні події на трасі лінії, зокрема зварні з'єднання, роз'ємні з'єднання, ділянки з підвищеними втратами, а також кінець волокна.

Аналіз рефлектограми дозволяє оцінити рівень загасання оптичного волокна на протязі всієї лінії, визначити втрати на окремих з'єднаннях та локалізувати можливі дефекти або неоднорідності структури волокна. Наявність характерних піків і спадів на графіку відповідає відбиттям та змінам коефіцієнта розсіювання, що дає змогу ідентифікувати тип події та визначити її координати з високою просторовою точністю.

Таким чином, рефлектограми змонтованих волоконно-оптичних ліній зв'язку є основним інструментом для контролю якості монтажу та подальшої оцінки технічного стану лінії в процесі експлуатації.

Зовнішній вигляд окремих ділянок рефлектограми відповідає структурі виміряної волоконно-оптичної лінії зв'язку та має характерне графічне відображення на дисплеї оптичного рефлектометра. Кожен елемент лінії — зварні та роз'ємні

з'єднання, ділянки волокна, а також кінець лінії — формує на рефлектограмі специфічний образ, який може бути ідентифікований як досвідченим оператором у процесі візуального аналізу, так і самим приладом у режимі автоматичної обробки результатів вимірювань.

Процес зняття рефлектограми залежить від етапу виконання робіт та типу побудованої лінії зв'язку. Під час вхідного контролю оптичного кабелю оптичне волокно підключається безпосередньо до рефлектометра за допомогою спеціального адаптера. У цьому випадку основними вимірюваними параметрами є довжина лінії та питомі втрати (кілометричне загасання), а процес збору даних не потребує значного часу.

Вимірювання вже побудованої волоконно-оптичної лінії зв'язку виконуються, як правило, з



Рис. 1. Рефлектограма змонтованої волоконно-оптичної лінії зв'язку

кінців лінії. При цьому рефлектометр підключається до кінцевих оптичних пристроїв за допомогою з'єднувального оптичного шнура або компенсаційної котушки з оптичним волокном. Такі вимірювання вимагають підвищеної просторової роздільної здатності та детальнішого збору даних, унаслідок чого час зняття однієї рефлектограми збільшується. Проте навіть у цьому випадку тривалість одного вимірювання зазвичай становить від 10 до 30 секунд і залежить від довжини досліджуваної лінії та вибраних параметрів рефлектометра.

Аналіз графічної інформації здійснюється як безпосередньо в процесі зняття рефлектограми, так і після завершення вимірювань — на екрані приладу або в програмному середовищі для подальшої обробки та збереження результатів.

Одним із ключових елементів, на які необхідно звернути увагу під час рефлектометричних вимірювань, є початок лінії зв'язку. На рефлектограмі він відображається у вигляді майже вертикальної лінії, яка переходить у пряму з незначним нахилом, що відповідає загасанню сигналу у волокні. Перехід між цими ділянками повинен бути близьким до прямого кута, а початок рефлектограми має розташовуватися якомога вище на екрані приладу (рисунк 2). Такий вигляд свідчить про якісне підключення вимірювального обладнання та забезпечує коректність подальших результатів рефлектометричних вимірювань.

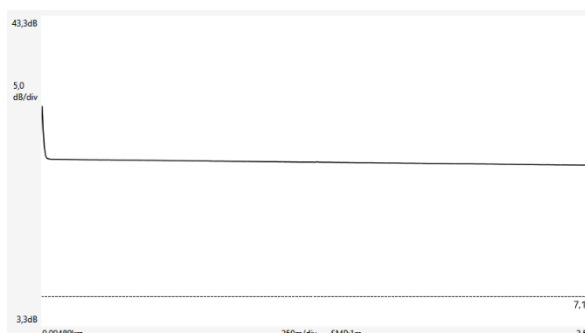


Рис. 2. Приклад якісного підключення до вимірюваного оптичного волокна

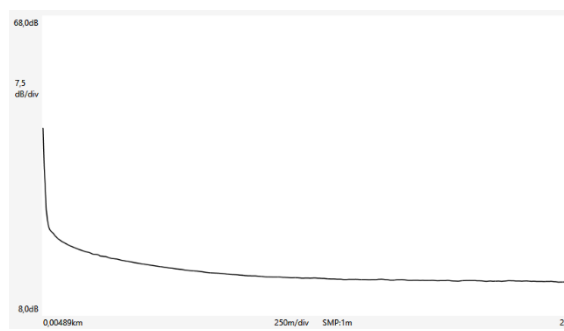


Рис. 3. Приклад неякісного підключення до вимірюваного оптичного волокна

Якщо на початку рефлектограми перехід до горизонтальної ділянки є надто плавним і розтягнутим у часі або горизонтальна ділянка взагалі відсутня, це свідчить відповідно про неякісне підключення до оптичного волокна або повну відсутність підключення. У такому випадку початкова частина рефлектограми не забезпечує коректних умов для подальшого аналізу вимірювань. Приклад відображення неякісного підключення на рефлектограмі наведено на рис. 3.

Рефлектограми, отримані за умов неякісного підключення, не підлягають збереженню та подальшому аналізу. Після усунення причин некоректного підключення зняття рефлектограми виконується повторно. До найбільш поширених причин належать забруднення торців оптичних конекторів, їх неправильне встановлення або наявність виробничого браку. Крім того, погіршення якості підключення може бути зумовлене наявністю макрозгинів оптичного волокна, дефектами зварювання у кросі або підвищеними втратами у з'єднаннях.

У випадку виконання вимірювань із використанням з'єднувального оптичного шнура можливим джерелом спотворень рефлектограми також може бути сам шнур, зокрема його пошкодження або забруднення конекторів.

Ділянки однорідного оптичного волокна, що відповідають будівельній довжині кабелю, відображаються на рефлектограмі у вигляді прямих ліній значної протяжності з незначним нахилом (рисунк 4). Такий нахил зумовлений рівнем загасання оптичного сигналу у волокні та є важливою характеристикою його якості.



Рис. 4. Приклад рефлектограми однорідної ділянки оптичного волокна

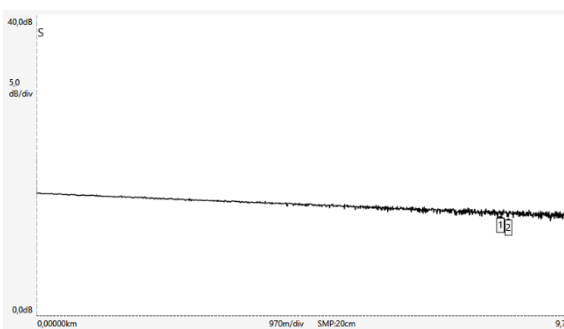


Рис. 5. Шуми на рефлектограмі

Під час зняття рефлектограми необхідно також звертати увагу на відсутність шумів на

однорідних ділянках оптичного волокна. Візуально така ділянка повинна відображатися у вигляді прямої лінії з рівномірним нахилом, без хвилеподібних коливань. Наявність шумів на рефлектограмі може бути наслідком неякісного підключення до вимірюваного волокна або неправильного налаштування параметрів оптичного рефлектометра, зокрема тривалості зондуючого імпульсу та часу усереднення сигналу.

Приклад рефлектограми того самого оптичного волокна, але з підвищеним рівнем шумів, зумовленим некоректними налаштуваннями приладу, наведено на рисунку 5. Для порівняння, на рисунку 4 показано рефлектограму цієї ж ділянки волокна за правильних умов вимірювання, де сигнал має рівномірний характер без сторонніх спотворень.

Наявність шумів на рефлектограмі суттєво ускладнює або унеможливорює виявлення та вимірювання з'єднань і дефектів оптичного волокна з малими втратами. У протилежному випадку, під час автоматичного аналізу, оптичний рефлектометр або програмне забезпечення для обробки рефлектограм можуть помилково інтерпретувати окремі шумові складові як реальні дефекти волокна. На рисунку 5 такі хибні події на рефлектограмі позначені цифрами 1 і 2. Водночас аналіз рефлектограми цього ж волокна на рисунку 4 підтверджує відсутність будь-яких неоднорідностей на відповідній ділянці.

Сварні та конекторні з'єднання оптичних волокон, макро- та мікрозгини, а також інші дефекти волокна, що проявляються на рефлектограмі, прийнято називати неоднорідностями або подіями. Залежно від фізичної природи такі неоднорідності поділяються на відбивні та невідбивні. Відбивні неоднорідності відображаються на рефлектограмі у вигляді характерних піків, тоді як невідбивні мають вигляд ступінчастих спадів рівня сигналу.

Аналіз неоднорідностей виконується після зняття рефлектограми шляхом встановлення маркерів або курсорів, за якими обчислюються втрати, пов'язані з конкретною подією. При цьому достовірність результатів значною мірою залежить від правильної інтерпретації характеру неоднорідності та умов проведення вимірювань.

Сварні з'єднання оптичних волокон на рефлектограмі, як правило, відображаються у вигляді ступінчастих змін рівня сигналу. За висотою такої ступінки можна зробити попередній висновок щодо якості зварного з'єднання, однак остаточна оцінка його відповідності нормативним вимогам можлива лише після виконання вимірювань з протилежного боку лінії та подальшого усереднення отриманих результатів. За умови якісного зварювання ступінка на рефлектограмі або практично не спостерігається, або має дуже малу величину. Для неякісного з'єднання характерна значна висота ступінки, яка чітко виділяється на загальному фоні рефлектограми.

Приклади якісного зварного з'єднання (подія № 1) та неякісного з'єднання (подія № 2) наведено на рисунку 6.

Іноді виникає ситуація, коли сварне з'єднання на рефлектограмі виглядає як ступінка вгору. Таке негативне загасання сигналу пояснюється зварюванням волокон з різним діаметром модового поля або з різними коефіцієнтами зворотного розсіювання. Волокно, розташоване після сварного з'єднання, відображає оптичний імпульс більш інтенсивно, і це подія алгоритмічно інтерпретується рефлектометром як підсилення сигналу.

Це явище найчастіше зустрічається при з'єднанні волокон різних виробників. Якщо провести вимірювання того ж з'єднання з протилежного боку лінії, воно відображатиметься на рефлектограмі у вигляді звичайної ступінчастої ділянки вниз. У такому випадку істинне значення втрат визначається, як і для звичайного з'єднання, шляхом усереднення результатів вимірювань з обох напрямків.

Вміння відрізнити на рефлектограмі неякісну сварку від вигину волокна має ключове значення як під час будівництва, так і в процесі експлуатації волоконно-оптичних ліній зв'язку. По-перше, наявність вигину сигналізує про недопустимий вплив на волокно або кабель, що згодом може призвести до локальної або повної втрати сигналу. По-друге, правильна ідентифікація проблеми дозволяє уникнути витрати часу на марні дії при усуненні несправності. Наприклад, немає сенсу намагатися покращити якість сварного з'єднання в муфті, якщо справжня причина порушення сигналу полягає у вигині волокна на вході в муфту.

Види пошкоджень оптичного кабелю

Основні типи пошкоджень оптичного кабелю (ОК) включають:

- одиночний обрив оптичного кабелю;

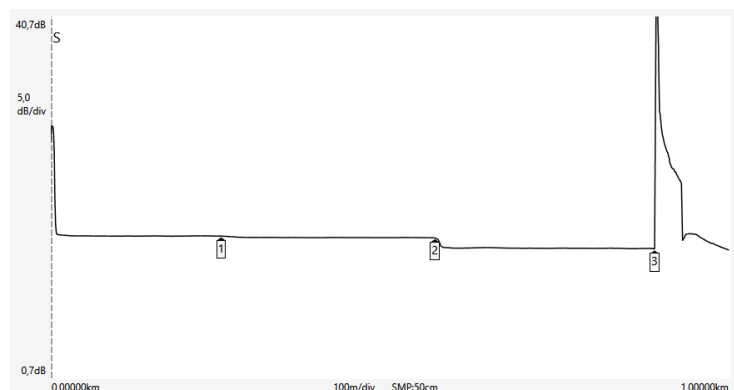


Рисунок 6. Сварні з'єднання на рефлектограмі

- обрив оптичного кабелю в декількох місцях;
- пошкодження кабелю з обривом усіх або частини оптичних волокон при збереженні цілісності захисних покривів;
- підвищене загасання оптичних волокон;
- пошкодження зовнішньої поліетиленової оболонки кабелю при збереженні працездатності волокон за умови цілісності металевих бронепокривів;
- пошкодження зовнішньої поліетиленової оболонки кабелю з порушенням цілісності бронепокривів, при цьому оптичні волокна залишаються працездатними.

Основними причинами пошкоджень підземних оптичних кабелів є:

- механічні пошкодження, що виникають під час будівельно-монтажних робіт сторонніми організаціями у межах охоронних зон кабельної лінії, а також у результаті актів вандалізму; зазвичай такі пошкодження локальні та візуально помітні;
- механічні пошкодження внаслідок переміщення ґрунтів, зокрема обвали, пучення, оповзні, селеві потоки тощо; у більшості випадків пошкодження охоплюють одну-дві будівельні довжини кабелю;
- пошкодження оптичних волокон, викликані старінням матеріалів або попаданням вологи в серцевину кабелю;
- пошкодження кабелю під впливом грозових розрядів, якщо кабель містить металеві елементи конструкції;
- пошкодження, спричинені гризунами, пожежами та іншими зовнішніми факторами.

Перелічені види пошкоджень потребують організації коротких (приблизно 50 м) та протяжних (до 7 км) вставок оптичного кабелю. Більшість лінійних пошкоджень, що супроводжуються перебоями зв'язку, обумовлені обривами кабелю з одночасним ушкодженням оптичних волокон та металевих елементів конструкції кабелю.

Частина лінійних пошкоджень може виникати через неякісний монтаж муфт та попадання води всередину муфти з подальшим замерзанням. Негерметичність муфт можна виявити шляхом періодичного контролю опору ізоляції оболонки кабелю, що особливо актуально для кабелів, прокладених у ґрунті.

Концепція TMN

Технологія TMN (Telecommunications Management Network) — це концепція ITU-T (ITU-T M.3010), яка визначає архітектуру управління мережами зв'язку. Використання штучного інтелекту (ШІ) у цій моделі дозволяє перейти від реактивного управління («виправляти, коли він ламається») до проактивного та автономного.

Основні напрямки застосування ШІ можна класифікувати на функціональні сфери FCAPS та ієрархічні рівні управління TMN.

Модель FCAPS визначає п'ять функцій управління ключами, у кожній з яких застосовується штучний інтелект:

F - Управління несправністю.

1. Прогнозне обслуговування: ШІ аналізує журнали обладнання та метрики (NE – Елементи мережі), щоб передбачити відмови до їх виникнення.
2. Кореляція тривоги: У складних мережах один збій викликає шквал із тисяч тривог. ШІ (особливо нейронні мережі з НЛП та графами) дозволяє ізолювати корінну причину (аналіз першопричини), відфільтровуючи вторинні сповіщення.

C - Управління конфігурацією.

1. Самоорганізуючі мережі (SON): Автоматично налаштовує налаштування нових елементів мережі при їх увімкненні.
2. Динамічне розподілення ресурсів: ШІ оптимізує конфігурацію топології залежно від поточного навантаження (наприклад, зміна діаграми антени в мобільних мережах).

A - Управління бухгалтерією.

1. Прогнозування відтоку: Проаналізуйте поведінку користувачів, щоб визначити тих, хто планує змінити оператора.
2. Адаптивне ціноутворення: ШІ допомагає створювати персоналізовані тарифи на основі моделей споживання трафіку конкретного користувача.

P - Управління продуктивністю.

1. Прогнозування трафіку: Використовуйте часові ряди (LSTM, Transformer) для прогнозування пікових навантажень і автоматичного розподілу потужностей (планування потужності).
2. Оптимізація якості обслуговування (QoS/QoE): ШІ коригує пріоритети трафіку в режимі реального часу, щоб забезпечити кращий користувацький досвід (наприклад, пріоритет для відеоконференцій).

S - Управління безпекою.

1. Виявлення аномалій: Виявіть нетипову онлайн-поведінку, яка може свідчити про DDoS-атаки, шахрайство або несанкціонований доступ.

2. Архітектура нульової довіри: ШІ допомагає автоматично керувати політиками доступу залежно від контексту (місцезнаходження, час, пристрій).

Архітектура TMN складається з чотирьох рівнів управління, де ШІ виконує різні ролі, які пердставлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Рівні управління	
Рівень TMN	Роль ШІ у TMN
Business Management	Аналіз ринку, стратегічне планування інвестицій в інфраструктуру, розрахунок ROI
Service Management	Автоматизація SLA (Service Level Agreement), інтелектуальні чат-боти для підтримки клієнтів
Network Management	Наскрізна оркестрація ресурсів, оптимізація маршрутизації в гетерогенних мережах
Element Management	Інтелектуальний моніторинг конкретних вузлів, оптимізація енергоспоживання обладнання

Технології, готові до майбутнього в контексті TMN:

1. Цифрові близнюки. Дозволяють створити точну віртуальну копію мережі на основі TMN, щоб імітувати зміни за допомогою ШІ перед їх впровадженням у реальну мережу.

2. Генеративний ШІ (GenAI), а саме LLM (Великі мовні моделі) можна використовувати для аналізу технічної документації TMN та генерації скриптів конфігурації на текстовий запит інженера.

3. ШІ для 5G/6G (мережеве слайсинг) дозволяють управляти мережевим слайсингом, де ШІ динамічно розподіляє віртуальні ресурси для конкретних завдань (наприклад, автономні транспортні засоби).

Висновок

Прогнозне обслуговування (PdM) — можливо, найекономічніший сценарій для впровадження ШІ в телекомунікаціях. Його суть полягає у переході від моделі «Ремонт після відмови» до моделі «Прогноз і запобігання». Перехід до аналізу OTDR із використанням нейронних мереж є передовою телекомунікаційної індустрії. А, відповідно, ключовий алгоритмічний підхід тепер виглядає так:

- попередня обробка, що призводить до знецінення шуму за допомогою вейвлет-перетворень або автоенкодерів;
- класифікація використання 1D-CNN (одновимірних згорткових мереж), оскільки рефлектограма по суті є часовою послідовністю даних;
- Локалізація та використання регресійних моделей для точного визначення відстані до події.

Література

1. Горященко К.Л. Використання програмно-конфігурованих мереж для забезпечення надійності функціонування мереж в стандарті TMN / Горященко К.Л., Шевчук О.В. // Вісник Хмельницького національного університету, №5, 2019 (277). – С. 258-263
2. Панеш А.Х. Достоинства и недостатки программно-конфигурируемых компьютерных сетей [Электронный ресурс] / А.Х. Панеш // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2016. – № 3 (186).
3. Aganval S., Kodialam M., Lakshman T.V. Traffic Engineering in Software Defined Networks. 2013. Proceedings IEEE INFOCOM, paper no. 06567024, pp. 2211–2219.
4. Heller B., Sherwood R., McKeown N. On Reliability-optimized Controller Placement for SoftwareDefined Networks. Rev., 2009, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.
5. ITU-T серія M: рекомендації TMN (M.3010, M.3400)
6. "Artificial Intelligence for Optical Networks: From Basics to Advanced Topics" (M. Ruano et al.)
7. "Machine Learning for Future Wireless Communications" (F.-C. Zheng et al.)

References

1. Horiashchenko K.L. Vykorystannia prohramno-konfihurovanykh merezh dlia zabezpechennia nadiinosti funktsionuvannia merezh v standarti TMN / Horiashchenko K.L., Shevchuk O.V. // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, №5, 2019 (277). – S. 258-263
2. Panesh A.Kh. Dostoynstva y nedostatky prohrammo-konfyhuryruemykh kompiuternykh setei [Elektronnyi resurs] / A.Kh. Panesh // Vestnyk Adygeiskoho hosudarstvennoho unyversyteta. Seryia 4: Estestvenno-matematycheskye y tekhnicheskyye nauky. – 2016. – № 3 (186).
3. Aganval S., Kodialam M., Lakshman T.V. Traffic Engineering in Software Defined Networks. 2013. Proceedings IEEE INFOCOM, paper no. 06567024, pp. 2211–2219.
4. Heller B., Sherwood R., McKeown N. On Reliability-optimized Controller Placement for SftwareDefined Networks. Rev., 2009, vol. 38, no. 2, pp. 69–74.
5. ITU-T seriia M: rekomendatsii TMN (M.3010, M.3400)
6. "Artificial Intelligence for Optical Networks: From Basics to Advanced Topics" (M. Ruano et al.)
7. "Machine Learning for Future Wireless Communications" (F.-C. Zheng et al.)