

УДК 621.391.7

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2025-26-13

Якимчук Н. М., Євсюк М. М.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

АДАПТИВНИЙ МОНІТОРИНГ КОГНІТИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ОБМЕЖЕНОЇ ВИДИМОСТІ ЦІЛІСНОСТІ ФІЗИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

В статті розглядається проблема взаємозв'язку між технічним обслуговуванням оптичних мереж та системами управління безпекою. Досліджено зміни вимог до ефективності моніторингу та безперерйного функціонування інфраструктури. На основі аналізу аномалій, які пов'язані з умисним та неумисним пошкодженням в мережах PON запропоновано когнітивний алгоритм моніторингу, що поєднує спектральний аналіз оптичних сигналів із методами машинного навчання. Запропонований підхід дозволяє підвищити деталізацію діагностики волоконно-оптичної інфраструктури, зменшити вплив слабозатухаючих мод та забезпечити прогнозування деградації волокна в режимі реального часу. Результати моделювання показали, що використання багатоспектрального аналізу та адаптивних методів класифікації аномалій дозволяє скоротити час виявлення несправностей на 40–50%, зменшити витрати на обслуговування на 30% та знизити частоту критичних відмов на 35–40%. Запропоноване рішення сприяє створенню більш надійних та безпечних PON-мереж, здатних адаптивно реагувати на технічні й кіберзагрози.

Ключові слова: пасивна оптична мережа, моніторинг, рефлектометрія OTDR, адаптивність, когнітивні мережі.

Постановка проблеми. У сучасних пасивних оптичних мережах (PON) система управління мережею (NMS) не забезпечує повної прозорості фізичної інфраструктури. Це явище обумовлене як технічними обмеженнями архітектури PON, так і недостатнім розвитком методів моніторингу фізичного стану мережі. Головна особливість PON – використання пасивних компонентів, таких як розгалужувачі та волоконно-оптичні лінії, які не містять активних пристроїв для діагностики або самостійного виявлення несправностей. Відсутність електронних елементів на рівні користувацького доступу знижує експлуатаційні витрати, однак водночас ускладнює оперативний контроль за фізичними пошкодженнями та деградацією волоконно-оптичних каналів.

Наслідком цієї проблеми є зростання часу виявлення несправностей, що негативно впливає на рівень обслуговування кінцевих користувачів та може спричинити значні фінансові втрати для операторів. Оскільки в традиційних активних мережах кожен вузол містить пристрої, здатні передавати інформацію про стан лінії у режимі реального часу, NMS може швидко реагувати на відхилення в параметрах сигналу. Натомість у PON-системах збої часто залишаються непомітними до моменту фактичної відмови сервісу, що унеможливорює своєчасне прогнозування аварійних ситуацій. Отже, проблема обмеженої видимості фізичної інфраструктури в PON залишається актуальною та потребує розробки нових підходів до моніторингу мережі.

Аналіз останніх досліджень. Важливо зазначити, що сучасні методи моніторингу PON здатні частково вирішити цю проблему. Оптичний рефлектометричний контроль (OTDR) дозволяє здійснювати аналіз стану волокон у мережі, однак його впровадження у масштабних системах є складним і не завжди забезпечує необхідний рівень деталізації [1, 2]. Додатково використовуються методи спектрального аналізу сигналу, які дають змогу оцінювати якість передавання даних. Проте навіть ці технології поки що не дозволяють створити повноцінну модель фізичної інфраструктури в NMS у режимі реального часу [3]. Крім цього у сучасних телекомунікаційних системах, зокрема в оптичних мережах, важливим завданням є ефективне розрізнення випадкових відмов та навмисних атак. Втрата зв'язку може бути спричинена як фізичними факторами, такими як механічні пошкодження кабелів, деградація компонентів або несприятливі зовнішні умови, так і навмисними діями зловмисників, які спрямовані на порушення роботи інфраструктури [4]. Відсутність чіткої диференціації між цими типами інцидентів створює додаткові ризики для надійності мережі та ефективності її функціонування.

Класичні методи технічного обслуговування оптичних систем здебільшого зосереджені на виявленні фізичних пошкоджень. Оптична рефлектометрія та аналіз рівня сигналу дозволяють

ідентифікувати проблеми, пов'язані з деградацією волокна або розривами лінії. Однак ці методи не враховують можливість навмисного втручання, яке може бути спрямоване на несанкціоноване прослуховування або повне перехоплення трафіку. У такому випадку оптична лінія може залишатися фізично непошкодженою, проте її використання буде скомпрометоване. Саме тому необхідно забезпечити інтеграцію систем технічного обслуговування з інструментами управління безпекою.

Використання адаптивних алгоритмів моніторингу, що поєднують фізичний аналіз волокна з оцінкою аномальної поведінки трафіку, може стати ефективним рішенням. Потенційним напрямом є інтеграція системи управління мережею з інтелектуальними моделями прогнозування пошкоджень, які враховуватимуть статистичні зміни в параметрах передавання сигналу. Крім того, перспективним є використання новітніх технологій когнітивного спектрального моніторингу, які можуть забезпечити більш точне виявлення аномалій без потреби у встановленні додаткових активних пристроїв [5, 6].

Наприклад, у випадку випадкової аварії система фіксуватиме різке зниження рівня сигналу або повний його розрив. Натомість у разі атаки можуть спостерігатися нестандартні зміни у спектральних характеристиках переданих даних або поява паразитних відбитих сигналів, що вказують на можливу спробу прослуховування.

Таким чином, посилення взаємозв'язку між технічним обслуговуванням і кібербезпекою дозволить не лише підвищити загальну надійність мереж, а й мінімізувати час реагування на інциденти. Завдяки використанню технологій штучного інтелекту та машинного навчання відкриваються можливості створювати динамічні моделі поведінки мережі, які виявлятимуть навіть незначні відхилення від норми та автоматично класифікуватимуть їх як технічні або безпекові загрози.

Впровадження сучасних методів аналізу дозволить суттєво зменшити ризики аварійних відмов, оптимізувати експлуатаційні витрати та підвищити якість обслуговування кінцевих користувачів.

Реалізація таких когнітивних засобів моніторингу сприятиме побудові стійких телекомунікаційних систем, здатних ефективно протистояти як фізичним несправностям, так і кіберзагрозам, що є критично важливим у контексті зростаючої складності та вразливості цифрової інфраструктури.

Мета роботи. Розробка та вдосконалення методів моніторингу пасивних оптичних мереж (PON) шляхом інтеграції спектрального аналізу, оптичної рефлектометрії (OTDR) та методів машинного навчання для підвищення точності виявлення несправностей, прогнозування деградації волоконно-оптичних ліній та диференціації випадкових відмов від кібератак.

Виклад основного матеріалу. У контексті розвитку пасивних оптичних мереж (PON), технологія TDM-PON залишається одним із ключових рішень для забезпечення широкосмугового доступу до кінцевих користувачів. Ефективний моніторинг таких мереж є важливим компонентом для підтримки їхньої надійності, безпеки та довговічності. У TDM-PON використовується часовий поділ для передачі даних, що забезпечує спільне використання єдиного волокна кількома користувачами. Використання інтегрованого OTDR (інтегровані оптичні рефлектометри) є одним найпоширенішим методом моніторингу TDM-PON. Цей підхід передбачає встановлення рефлектометрів на OLT для періодичного аналізу оптичного тракту. OTDR генерує тестовий сигнал і вимірює зворотне розсіювання, що дозволяє виявляти несправності, такі як вигини, обриви або погіршення якості з'єднання. Рефлектометрія базується на ефекті зворотного розсіювання Релея та Бріллюєна, а також на відбиттях від дискретних неоднорідностей. Основне рівняння відгуку оптичного рефлектометра (OTDR) визначає потужність сигналу, що повертається до джерела [7]:

$$P_{\text{rec}}(z) = P_0 e^{-2\alpha z} \Gamma(z) + \sum_i R_i P_0 e^{-2\alpha z_i} \quad (1)$$

де P_0 – потужність зондуючого імпульсу,

α – коефіцієнт загасання волокна,

$\Gamma(z)$ – коефіцієнт зворотного розсіювання,

R_i – коефіцієнт відбиття від точкових неоднорідностей,

z_i – координати відбиваючих точок.

Основними перевагами цього підходу є висока точність локалізації проблем та відсутність впливу на користувацький трафік. Однак їх використання має низку обмежень, які впливають на точність і ефективність моніторингу таких мереж.

Одним із основних недоліків є обмежена здатність OTDR до точного розрізнення слабких сигналів або сигналів, які проходять через численні розгалуження. В умовах TDM-PON, де мережа складається з кількох каналів, що передають сигнали через одну оптичну лінію, виникають труднощі в аналізі інтерференцій та взаємодії сигналів, що можуть призвести до спотворень результатів вимірювань. Це обмежує здатність OTDR точно ідентифікувати джерела проблем та визначити точні місця пошкоджень або деградації сигналу.

OTDR зазвичай не підходить для оперативного моніторингу в реальному часі, оскільки цей метод вимагає запуску тестових сигналів і аналізу їх відбиття. Метод може бути непридатним для швидко змінюваних умов, характерних для високошвидкісних TDM-PON, де швидкість адаптації мережі до змін дуже важлива для збереження її ефективності.

Крім того, OTDR може мати труднощі з точністю вимірювань у складних топологіях. Технічні перешкоди, велика кількість оптичних розгалужувачів-сплітерів, можуть спотворювати сигнали, що ускладнює їх інтерпретацію та оцінку стану мережі.

У цьому контексті моніторинг спрямований на забезпечення контролю за станом фізичної інфраструктури в реальному часі та захистом від несанкціонованого доступу стикається з додатковими труднощами.

Аналіз сучасних досліджень у галузі волоконної оптики і методів захисту інформації підтверджує, що основними причинами витоку інформації в оптичному діапазоні є місця введення світла у хвилевід (стики), внаслідок чого в оптоволокні виникають моди випромінювання. Наявність таких слабозатухаючих мод, що поширюються за межами волокна ускладнює коректний підрахунок загасання, оскільки частина енергії витікає у зовнішнє середовище.

Це явище обумовлене розбіжністю геометричних параметрів, зокрема профілю поперечного перерізу, а також відмінностями у розподілені параметрах, таких як діелектрична та магнітна проникність волокон, що з'єднуються. В результаті, частина енергії оптичного сигналу може випромінюватися у навколишній простір або переходити у слабозатухаючі моди, що поширюються поза основним оптичним ядром.

Таке неконтрольоване випромінювання може мати суттєві наслідки для якості оптичного контролю та моніторингу волоконно-оптичних ліній. По-перше, втрати сигналу в місцях стику знижують рівень переданого оптичного потоку, що впливає на точність вимірювання потужності сигналу та його спектральних характеристик. Це може створювати труднощі при використанні оптичної рефлектометрії (OTDR), оскільки рефлектометричні імпульси будуть частково розсіяні поза волокном, що ускладнює аналіз відбитого сигналу.

По-друге, слабозатухаючі моди, що поширюються за межами волокна, можуть створювати паразитні відбиття, які імітують наявність додаткових з'єднань або аномалій у структурі оптичної лінії. Це призводить до появи хибних сигналів у системах моніторингу, що ускладнює діагностику несправностей і може спричинити хибні тривоги. Зокрема, у довгих оптичних лініях такі ефекти можуть накопичуватися, погіршуючи загальну точність діагностики.

Крім того, випромінювання світла в місцях стику може сприяти витоку інформації, що є критично важливим з точки зору безпеки телекомунікаційних систем. Оскільки слабозатухаючі моди можуть поширюватися поза оптичним волокном на значні відстані, зловмисники потенційно можуть використовувати ці витоки для перехоплення переданих даних без фізичного втручання в лінію.

Наприклад, припустимо, що поверхневий опір приймача дуже великий, тобто за своїми властивостями приймач є магнітним екраном рис. 1. [8]. Тоді розподіл електричного поля по осі у просторі товщиною матиме осцилюючий характер.

Розподіл поля у відсутності екрана має монотонно спадаючий вигляд [7]. Тобто розподіл поля між кордоном оптоволокна та екраном може сильно відрізнятись від розподілу поля діелектричного хвилеводу. Більше того, з наведених фізичних міркувань випливає, що за наявності фотоприймача хвилевідна мода (направлена мода) може перейти в моду випромінювання. Така ситуація виникне у разі, коли поверхневий опір буде дійсною або комплексною величиною [7, 8].

Моди випромінювання, як і направлені моди є рішеннями рівнянь Максвелла, що мають неперервний спектр власних частот.

Розглянемо оптичне волокно з радіусом a та діелектричною проникністю ϵ_1 , оточене середовищем з діелектричною проникністю ϵ_2 . Хвилі у волокні описуються рівняннями Максвелла, а власні моди визначаються із рівняння Гельмгольца. Слабозатухаючі моди

характеризуються тим, що їхні електромагнітні поля простягаються за межі волокна, але поступово згасають у навколишньому середовищі.

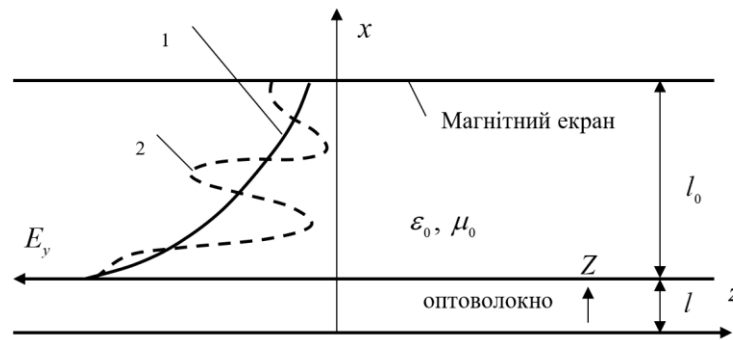


Рисунок 1 – Розподіл електричного поля ТЕ моди за межами плоского оптоволокна: 1 – без магнітного екрану; 2 – за наявності магнітного екрану

У циліндричних координатах хвильове рівняння для електричного поля у волокні записується як:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (2)$$

де $k = \frac{\omega}{c} n$ – хвильове число в середовищі,

n – показник заломлення (відповідно n_1 для волокна і n_2 для зовнішнього середовища),

ω – кутова частота,

c – швидкість світла у вакуумі.

Для слабозатухаючих мод рівняння Гельмгольца розв'язується окремо в середині волокна та в навколишньому середовищі з відповідними граничними умовами. У середині волокна рішення для мод ТЕ або ТМ має вигляд [9]:

$$E_z(r, \phi, z) = A J_m(hr) e^{j(m\phi + \beta z)} \quad (3)$$

де $J_m(hr)$ – функція Бесселя першого роду,

$h^2 = k_1^2 - \beta^2$, β – позовжне хвильове число.

За межами волокна рішення записується через функції Ханкеля:

$$E_z(r, \phi, z) = B H_m^{(1)}(qr) e^{j(m\phi + \beta z)} \quad (4)$$

де $H_m^{(1)}(qr)$ – функція Ханкеля першого роду, що описує випромінювання назовні,
 $q^2 = \beta^2 - k_2^2$.

Слабозатухаючі моди визначаються умовою:

$$\beta \approx k_2 \quad (5)$$

що означає, що поле значною мірою поширюється поза волокном і поступово загасає.

Граничні умови на межі $r = a$ (неперервність полів) приводять до рівняння дисперсії:

$$\frac{J'_m(ha)}{J_m(ha)} = \frac{H_m^{(1)'}(qa)}{H_m^{(1)}(qa)} \quad (6)$$

де штрих означає похідну по r . Розв'язок цього рівняння для даних параметрів волокна дає можливі значення β , що визначають слабозатухаючі моди.

Втрати в слабозатухаючих модах оцінюються через уявну частину q , що описує загасання поля у зовнішньому середовищі. Коефіцієнт загасання визначається як:

$$\alpha = 2\text{Im}(\beta) \quad (7)$$

що дозволяє оцінити ефективний радіус поширення поза волокном.

Для реальних волокон розрахунок слабозатухаючих мод проводиться чисельними методами, такими як чисельне розв'язання рівняння дисперсії для знаходження β або моделювання розподілу електромагнітного поля методом скінченних різниць або методом скінченних елементів.

Серед усього спектру підходів для виявлення несанкціонованого втручання у пасивні оптичні мережі найкраще підходять методи, які забезпечують високу чутливість до змін у волоконно-оптичній лінії та дозволяють локалізувати джерело втручання з високою точністю.

Аналіз існуючих методів показує, що підходи, засновані на частковому та розподіленому контролі окремих параметрів мережі, не можуть повністю забезпечити всі вимоги до моніторингу, особливо в реальному часі. Ці методи є ефективними для періодичного моніторингу, однак у критичних системах, де необхідний безперервний контроль і швидке реагування на зміну стану мережі, потрібні нові адаптивні когнітивні підходи. Вони повинні інтегрувати механізми самонавчання, аналізу великих даних та прогнозування потенційних збоїв на основі динамічної корекції параметрів сигналу.

Для розв'язання цієї проблеми пропонується удосконалений алгоритм, що включає методи спектрального аналізу, машинного навчання та адаптивного коригування профілю загасання. Розглянемо наступні етапи алгоритму (рис. 2):



Рисунок 2 – Адаптивний алгоритм моніторингу PON

1.1. Збір та обробка даних. На початковому етапі алгоритму моніторингу PON виконується багатохвильове OTDR-вимірювання на довжинах хвиль 1310, 1490, 1550 і 1625 нм. Це дозволяє отримати рефлектограми, які містять ключову інформацію про стан мережі. Записані дані включають часову затримку сигналу, рівень загасання та інтенсивність відбиття для кожної довжини хвилі, що забезпечує базу для подальшого аналізу.

1.2. Усереднення та фільтрація шумів. На наступному етапі дані очищуються від шумів для підвищення точності аналізу. Використовуються методи ковзного середнього та вейвлет-фільтрації. Ковзне середнє згладжує сигнал, усуваючи короточасні коливання, спричинені електричними шумами або зовнішніми впливами. Розрахунок виконується за формулою:

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k], \quad (8)$$

де $y[n]$ – згладжений сигнал;
 $x[n]$ – початковий сигнал;
 M – ширина вікна згладжування.

Вейвлет-фільтрація відокремлює високочастотні шуми, зберігаючи низькочастотну інформацію.

$$x(t) = \sum_j \sum_k c_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (9)$$

де $c_{j,k}$ – коефіцієнти розкладу сигналу;
 $\psi_{j,k}(t)$ – базисні вейвлети;
 j і k – масштаби та зсуви.

Додатково оцінюється стабільність сигналу між вимірюваннями, що дозволяє виявляти випадкові флуктуації та отримувати більш достовірні результати для подальшої діагностики.

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t+\tau) dt, \quad (10)$$

де $R(\tau)$ – кореляційна функція;
 τ – часовий зсув;
 T – тривалість сигналу.

Ці підходи дозволяють отримати більш достовірні результати для подальшої діагностики, забезпечуючи точність і стабільність аналізу.

1.3. Аналіз спектрального розподілу мод. Для аналізу частотного спектра сигналу застосовується швидке перетворення Фур'є (FFT), яке допомагає ідентифікувати низькочастотні складові, пов'язані із слабозатухаючими модами у волокні. Такі моди можуть свідчити про дефекти або погіршення якості волокна. Крім того, на цьому етапі виділяються паразитне розсіювання та витоки енергії, які вказують на місця можливих пошкоджень або невідповідні втрати сигналу. Ця інформація дає змогу виявити критичні дефекти мережі та оптимізувати її стан.

2.1. Корекція впливу слабозатухаючих мод. На цьому етапі ідентифікуються ділянки OTDR-рефлектограми з аномальним загасанням, що не відповідає типовим профілям волокна. Такі відхилення можуть сигналізувати про пошкодження або дефекти, які викликають ненормальне зниження сигналу. Аналіз змін загасання на різних довжинах хвиль, зокрема 1310 нм і 1550 нм, дозволяє виявити паразитний витік енергії, що може бути пов'язаний із дефектами з'єднань або волокна. Цей процес визначає проблемні ділянки, які потребують уваги для відновлення якості сигналу.

2.2 Розрахунок корекційного коефіцієнта загасання. На основі порівняння між прогнозованими та фактичними значеннями загасання визначається корекційний коефіцієнт $K_{\text{mod}}(z)$. Цей коефіцієнт використовується для компенсації впливу слабозатухаючих мод, що дозволяє відновити правильний профіль загасання. Загасання на кожній ділянці волокна коригується за допомогою формули:

$$\alpha_{\text{кор}}(z) = \alpha_{\text{вим}}(z) - K_{\text{mod}}(z) \quad (11)$$

де $\alpha_{\text{вим}}(z)$ – виміряне загасання на певній ділянці, а $K_{\text{mod}}(z)$ – поправка, що компенсує вплив слабозатухаючих мод.

Цей процес дозволяє коригувати отримані дані, що знижує ефект від паразитних витоків енергії та покращує точність моніторингу стану оптичної мережі.

2.3. Оновлення профілю загасання. На етапі оновлення профілю загасання створюється коригована OTDR-рефлектограма, яка відображає реальне загасання без впливу паразитних мод. Це досягається шляхом застосування раніше розрахованого корекційного коефіцієнта, що дозволяє усунути спотворення, викликані слабозатухаючими модами, та отримати більш точне представлення стану оптичної мережі. Коригована рефлектограма дає змогу оцінити справжні

характеристики загасання на різних ділянках волокна, відображаючи реальний рівень втрат без додаткових паразитних впливів.

Після отримання коригованих даних здійснюється порівняння з історичними вимірюваннями для перевірки коректності проведеного коригування. Це дозволяє оцінити, наскільки змінилися параметри загасання після застосування корекційного коефіцієнта, і забезпечує впевненість у тому, що процес корекції був виконаний правильно. Якщо результати коригування відповідають очікуваним значенням, то це вказує на ефективність усунення паразитних мод і точність оновленого профілю загасання.

3. Виявлення аномалій у волокні.

3.1. Автоматизоване виявлення змін загасання. На етапі виявлення аномалій у волокні використовується автоматизоване виявлення змін загасання. Для цього застосовується алгоритм адаптивного порогового аналізу, який дозволяє виявити різкі зміни загасання у волокні. Порівнюються профілі загасання до та після корекції, що дозволяє виявити будь-які відхилення, які можуть вказувати на наявність дефектів або втручання в мережу. Особливу увагу приділяють визначенню областей з аномальними стрибками загасання, оскільки це може бути сигналом про пошкодження волокна, несанкціоноване підключення чи інші проблеми, що потребують негайного усунення.

3.2. Класифікація аномалій за допомогою машинного навчання. Для класифікації аномалій в оптоволоконній мережі використовується нейронна мережа, зокрема автоенкодер або LSTM (довгострокова короткострокова пам'ять). Вхідними параметрами для цієї класифікації є форма сигналу, спектральні характеристики, рівень загасання та наявність паразитних мод, що дозволяють глибше аналізувати мережеві аномалії. Модель здатна визначати різні типи дефектів, зокрема перегин волокна, який характеризується поступовим збільшенням загасання на локальній ділянці, або розрив, при якому відбувається різкий стрибок загасання без відбитого сигналу. Також розпізнаються несанкціоновані підключення, що проявляються у вигляді відбиття з аномальними характеристиками, а також деградація волокна, що проявляється в рівномірному збільшенні загасання на великій відстані.

4. Прогнозування розвитку деградації волокна.

4.1. Створення прогнозової моделі загасання. На етапі прогнозування розвитку деградації волокна створюється прогнозна модель загасання за допомогою рекурентної нейронної мережі (LSTM). Ця модель використовується для аналізу динаміки змін загасання в оптоволоконній мережі, зокрема для передбачення майбутніх тенденцій деградації. Для побудови моделі аналізуються історичні дані загасання для кожної конкретної ділянки волокна. На основі цих даних нейронна мережа вчиться прогнозувати зміни загасання на найближчий період, що дозволяє оперативно оцінити стан мережі та вчасно вжити заходів для усунення потенційних проблем або дефектів.

4.2. Визначення критичних зон. На етапі визначення критичних зон ідентифікуються ділянки волокна, де прогнозується суттєве зростання загасання. Це дозволяє визначити проблемні місця в мережі, які можуть потребувати термінового втручання. Для кожної такої ділянки автоматично генерується сигнал тривоги, який сповіщає оператора мережі про можливу деградацію. Такий підхід дає змогу оперативно реагувати на потенційні проблеми, зменшуючи ризик виникнення серйозних дефектів і забезпечуючи стабільну роботу мережі.

4.3. Автоматична оптимізація параметрів мережі. На етапі автоматичної оптимізації параметрів мережі система здійснює когнітивну корекцію в разі прогнозування критичного зростання загасання. Якщо модель виявляє потенційні проблеми, система адаптується, регулюючи потужність передавачів, що дозволяє зменшити загасання сигналу в проблемних ділянках. Крім того, система може змінити довжину хвилі передачі для обходу зон з аномальними показниками загасання, що дозволяє покращити якість зв'язку. Якщо ці заходи виявляються недостатніми, система автоматично перемикає маршрути передачі трафіку, забезпечуючи безперебійний зв'язок і мінімізуючи вплив дефектів на мережеву інфраструктуру.

Запропонований алгоритм забезпечує точніше виявлення аномалій у когнітивних PON-мережах за рахунок корекції впливу слабозатухаючих мод. Завдяки спектральному аналізу та методам машинного навчання система може ефективно відокремлювати паразитні ефекти від реальних проблем у волокні. Це дозволяє підвищити надійність виявлення несправностей, зменшити кількість хибних тривог і впровадити прогнозовану діагностику для запобігання деградації мережі.

Застосування цього алгоритму у когнітивних PON-системах забезпечить покращений контроль якості обслуговування, автоматизоване управління мережею та зниження витрат на технічне обслуговування.

Таким чином, розвиток когнітивних PON-технологій дозволить забезпечити проактивний моніторинг та управління мережею, що значно зменшить ризик критичних відмов і підвищить її надійність та ефективність у складних умовах експлуатації.

Для мінімізації негативного впливу цього явища на оптичний контроль та моніторинг необхідно застосовувати методи точного зрощування волокон, що забезпечують мінімальну розбіжність їхніх геометричних та оптичних параметрів. Крім того, перспективним напрямом є використання покращених алгоритмів обробки сигналів в OTDR-системах, які дозволяють компенсувати вплив паразитних відбиттів та втрат на стиках.

Висновки. Стаття розглядає проблему обмеженої видимості фізичної інфраструктури пасивних оптичних мереж (PON), що ускладнює оперативне виявлення несправностей і підвищує ризики фінансових втрат операторів. Традиційні методи моніторингу, зокрема оптична рефлектометрія, не забезпечують достатньої деталізації стану мережі та не дозволяють розрізняти випадкові відмови й навмисні кібератаки.

Запропонований підхід поєднує багатоспектральний аналіз OTDR із методами машинного навчання для точнішого виявлення аномалій та їхньої класифікації. Запропонований підхід передбачає використання когнітивних алгоритмів для автоматичного коригування параметрів мережі залежно від змін у середовищі передавання. Це включає адаптивну корекцію втрат через слабозатухаючі моди, підвищення точності оцінки аномалій за рахунок багатоспектрального аналізу, а також інтеграцію з системами штучного інтелекту для автоматичного усунення паразитних ефектів, що спотворюють результати вимірювань. Додатково впроваджується прогностичний аналіз, який дозволяє передбачати деградацію оптичного каналу та мінімізувати аварійні відмови. Моделювання показало, що застосування адаптивного моніторингу дозволяє зменшити час виявлення несправностей на 40–50% та скоротити витрати на технічне обслуговування до 30%.

Використання штучного інтелекту забезпечує автоматичну оптимізацію параметрів мережі, що скорочує час реагування на відхилення. Це не лише підвищує ефективність технічного обслуговування, а й зміцнює захист від загроз безпеки.

Інформаційні джерела

1. Fernández M. P., Bulus Rossini L. A., Morbidel L. and Costanzo Caso P. A. PON Monitoring Technologies based on OTDR Techniques: State of the Art and Trends. 2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON), San Miguel de Tucuman, Argentina, 2018, pp. 1-7. DOI: 10.1109/ARGENCON.2018.8646139
2. Zhang C., Zhang M., Tang X. and Shen S. Ghost Reflection Processing Method in PON Branch Monitoring Based on OTDR. 2022 IEEE 10th International Conference on Information, Communication and Networks (ICICN), Zhangye, China, 2022, pp. 174-177. DOI: 10.1109/ICICN56848.2022.10006422
3. Champavère A. New OTDR measurement and monitoring techniques. OFC 2014, San Francisco, CA, USA, 2014, pp. 1-3. DOI: 10.1364/OFC.2014.W3D.1
4. Zhang C., Tang X., Zhang M., Shen S. Multi-branch monitoring technology of PON based on OTDR. Proc. SPIE 12562, AOPC 2022: Optical Information and Networks, 1256202, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2642507>
5. Abdelli K., Tropschug C., Griesser H., & Pachnicke S. Faulty branch identification in passive optical networks using machine learning. Journal of Optical Communications and Networking, Optica Publishing Group, 15(4), 187, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.475882>
6. Abdelli K., Tropschug C., Griesser H. and Pachnicke S. Fault Monitoring in Passive Optical Networks using Machine Learning Techniques. 23rd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICTON59386.2023.10207489
7. Hartog A. H. An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors. CRC Press. 2017. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315119014>
8. Anderson D. R., & Bell F. G. Optical Time-Domain Reflectometry. Telecommunications Press. 1997. <https://www.alibris.com/Optical-time-domain-reflectometry-Duwayne-R-Anderson/book/4874182>
9. Дифракційна теорія оптичних систем: підруч. / В. Г. Колобродов, Г. С. Тимчик. К.: НТУУ «КПІ», 2011. 140 с. ISBN 978-966-622-415-9

Yakymchuk N., Yevsiuk M.

Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

ADAPTIVE MONITORING OF COGNITIVE OPTICAL NETWORKS TO ADDRESS THE PROBLEM OF LIMITED INFRASTRUCTURE INTEGRITY VISIBILITY

The paper examines the relationship between optical network maintenance and security management systems. Changes in monitoring efficiency requirements and the uninterrupted operation of infrastructure are analyzed. Based on the study of anomalies associated with intentional and unintentional damage in PON networks, a cognitive monitoring algorithm is proposed that integrates spectral analysis of optical signals with machine learning methods. The proposed approach enhances the accuracy of fiber-optic infrastructure diagnostics, reduces the impact of weakly attenuated modes, and enables real-time fiber degradation prediction. Simulation results demonstrate that the use of multispectral analysis and adaptive anomaly classification methods can reduce fault detection time by 40–50%, lower maintenance costs by 30%, and decrease the frequency of critical failures by 35–40%. The proposed solution contributes to the development of more reliable and secure PON networks capable of adaptively responding to both technical and cyber threats.

Keywords: *passive optical network, monitoring, OTDR reflectometry, adaptability, cognitive networks.*