

ДОНСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-7023-2076>e-mail: tiger119943@gmail.com**БАРАСЬ СВЯТОСЛАВ**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: barasst03@gmail.com

РАННЄ ВИЯВЛЕННЯ ТА КОНТРОЛЬ НАДІЙНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ У СУЧАСНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

Забезпечення надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) є критично важливим аспектом сучасних телекомунікаційних мереж. Відсутність інформації про механічні та термічні характеристики оптичних волокон (ОВ) у складі оптичних кабелів (ОК) може призвести до непередбачуваних наслідків, таких як зниження якості та терміну служби ВОЛЗ. Одним із найважливіших чинників, що впливає на термін служби ОВ, є механічне навантаження, якого слід уникати під час експлуатації.

Ця робота присвячена актуальним питанням моніторингу волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ), зосереджуючи увагу на сучасних технологіях діагностики та моніторингу оптичних кабелів. Наголошується на важливості ранньої діагностики механічних напружень та інших аномалій у ВОЛЗ для забезпечення їхньої надійності та тривалого терміну служби. Обрано два основні методи моніторингу: Брілюєнівська відбивальна рефлектометрія в часовій області (BOTDR) та відбивальна рефлектометрія в часовій області (OTDR), із детальним описом їхніх переваг та обмежень. BOTDR, завдяки здатності виявляти та вимірювати механічні напруження, забезпечує високу точність та чутливість у моніторингу стану волокон. У свою чергу, OTDR дозволяє виявляти великі дефекти та проблеми у довгих оптичних кабелях.

У роботі також обговорюється інтеграція технологій моніторингу в телекомунікаційні мережі, включаючи автоматизовані системи управління, аналітичні інструменти для обробки даних та інтеграцію з існуючими системами безпеки. Автоматизація процесів управління та моніторингу зменшує вплив людського фактора і підвищує ефективність роботи мереж, а також забезпечує швидку реакцію на виявлені аномалії.

Наводяться приклади систем моніторингу, таких як "ONMSi" компанії "JDSU", що демонструють ефективність сучасних рішень для контролю як діючих, так і "темних" оптичних волокон. У роботі описується, як ці системи дозволяють швидко виявляти пошкодження, аналізувати їхні причини та своєчасно усувати їх.

Проведений аналіз показує, що впровадження сучасних технологій моніторингу є вкрай важливим для забезпечення безпеки та надійності телекомунікаційних мереж. Обговорюються перспективи подальшого розвитку у цій галузі, включаючи вдосконалення існуючих методів та розробку нових технологій, що ще більше підвищать ефективність управління та захисту волоконно-оптичних мереж. У роботі підкреслюється важливість комплексного підходу до моніторингу ВОЛЗ та роль автоматизованих систем у підтримці їх стабільної роботи.

Ключові слова: волоконно-оптичні лінії зв'язку, оптичні волокна, надійність, механічне напруження, брілюєнівська рефлектометрія, несанкціонований доступ, моніторинг.

DONSKYI OLEKSANDR, BARAS SVIATOSLAV

Vinnytsia National Technical University

EARLY DETECTION AND RELIABILITY CONTROL OF FIBER OPTIC CABLES IN MODERN TELECOMMUNICATION NETWORKS

Ensuring the reliability of fiber-optic communication lines (FOCL) is a critically important aspect of modern telecommunication networks. The lack of information about the mechanical and thermal characteristics of optical fibers (OF) within optical cables (OC) can lead to unpredictable consequences such as reduced quality and lifespan of FOCL. One of the most significant factors affecting the lifespan of OF is mechanical stress, which should be avoided during operation.

This paper addresses the relevant issues of monitoring fiber-optic communication lines (FOCL) with a focus on contemporary diagnostic and monitoring technologies for optical cables. The importance of early diagnosis of mechanical stresses and other anomalies in FOCL to ensure their reliability and long service life is emphasized. Two primary monitoring methods are selected: Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) and Optical Time Domain Reflectometry (OTDR), with detailed descriptions of their advantages and limitations. BOTDR, due to its ability to detect and measure mechanical stresses, provides high accuracy and sensitivity in monitoring the state of fibers. In contrast, OTDR allows for the detection of large defects and issues in long optical cables.

The paper also discusses the integration of monitoring technologies into telecommunication networks, including automated management systems, analytical tools for data processing, and integration with existing security systems. Automation of management and monitoring processes reduces the human factor and enhances network efficiency, as well as ensures prompt response to detected anomalies.

Examples of monitoring systems such as "ONMSi" by "JDSU" are provided, demonstrating the effectiveness of modern solutions in controlling both live and dark optical fibers. The paper describes how these systems enable rapid detection of damage, analysis of its causes, and timely remediation.

The analysis conducted shows that the implementation of modern monitoring technologies is critically important for ensuring the security and reliability of telecommunication networks. Future development prospects in the field are discussed, including the improvement of existing methods and the development of new technologies that will further enhance the effectiveness of fiber-optic network management and protection. The paper highlights the importance of a comprehensive approach to FOCL monitoring and the role of automated systems in maintaining their stable operation.

Keywords: fiber-optic communication lines, optical fibers, reliability, mechanical stress, Brillouin Optical Time Domain Reflectometry, unauthorized access, monitoring.

Вступ

Сучасні телекомунікаційні системи все більше покладаються на волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) [1] як на основний засіб передавання інформації. Основною перевагою ВОЛЗ є їхня висока пропускна здатність та низький рівень затухання сигналу на великих відстанях. Проте забезпечення тривалої та надійної роботи таких мереж вимагає ретельного контролю стану оптичних волокон (ОВ) [2], що використовуються у складі оптичних кабелів (ОК). Неправильне укладання або експлуатація кабелів можуть спричинити механічні пошкодження волокон, що значно знижує термін їх служби та підвищує ризик виходу з ладу всієї системи.

Крім того, значну загрозу для ВОЛЗ становить можливість несанкціонованого доступу (НСД) до оптичних кабелів. Зловмисники можуть створювати фізичний контакт з ОВ, що веде до витоку інформації. Для запобігання таким загрозам розробляються різноманітні методи моніторингу та діагностики стану ОВ, які дозволяють вчасно виявляти аномалії та попереджати можливі поломки.

Метою роботи є: дослідження сучасних технологій моніторингу ВОЛЗ, аналіз їхньої ефективності та виявлення оптимальних рішень для забезпечення надійності та безпеки оптичних мереж. Особливу увагу приділено методам бріллюенівської рефлектометрії (BOTDR) та оптичній рефлектометрії в часі (OTDR), їхнім перевагам та обмеженням. Досліджуються також питання інтеграції систем моніторингу у телекомунікаційні мережі, автоматизації процесів управління та їхня роль у захисті від несанкціонованого доступу.

Аналіз досліджень

Вплив механічного напруження на надійність волоконно-оптичних ліній зв'язку

Механічне напруження є одним із основних чинників, що впливають на тривалість служби оптичних волокон. Під час експлуатації ВОЛЗ можуть виникати ситуації, коли оптичні волокна піддаються додатковим навантаженням, наприклад, під час прокладання кабелів або внаслідок термічних змін. Дослідження показали [3], що перевищення допустимого рівня напруги в волокнах може призвести до значного скорочення терміну служби кабелів. Наприклад, при перевищенні поздовжньої напруги понад 0,3%, термін служби волокна зменшується з 25 років до 5–10 років. Якщо ж напруга досягає 1%, то служба такого волокна може скоротитися до менш ніж одного року.

Вплив світлового сигналу на волокна, які піддаються надмірному поздовжньому напруженню, може посилювати утворення мікротріщин у кварцовому склі, з якого виготовлені волокна. Ці тріщини збільшуються під час експлуатації ВОЛЗ, що врешті-решт призводить до деградації волокна та передчасного виходу з ладу.

Методи ранньої діагностики стану оптичних волокон

Однією з основних проблем у забезпеченні надійності ВОЛЗ є раннє виявлення механічних напружень в оптичних волокнах. Стандартні методи діагностики, такі як оптична рефлектометрія (OTDR), не завжди дозволяють вчасно виявити проблеми, оскільки вони здатні фіксувати лише значні зміни в параметрах сигналу. Для вирішення цієї проблеми розробляються новітні методи, зокрема бріллюенівська рефлектометрія (BOTDR) [4], яка дозволяє вимірювати рівень напруги та виявляти проблемні ділянки на ранніх стадіях.

Бріллюенівська рефлектометрія базується на аналізі зміни частоти бріллюенівського розсіювання світла, що дозволяє точно визначати рівень механічного напруження в оптичних волокнах. Використання BOTDR у поєднанні з іншими методами діагностики дозволяє забезпечити високу точність і ефективність моніторингу стану ВОЛЗ.

Загрози несанкціонованого доступу до оптичних кабелів

Не менш важливою проблемою для ВОЛЗ є можливість несанкціонованого доступу (НСД) до оптичних кабелів. Незважаючи на високий рівень захисту, який забезпечується фізичними принципами поширення оптичного сигналу, можливість НСД все ж існує. Для створення каналу витоку інформації необхідний фізичний контакт із волокном, що може бути досягнуто через порушення цілісності зовнішньої оболонки ОК.

Різні методи НСД, такі як пасивні, активні та компенсаційні, по-різному впливають на параметри сигналу. Пасивні методи характеризуються високою прихованістю, оскільки вони лише трохи змінюють параметри сигналу, але мають низьку чутливість. Активні методи можуть створювати значні зміни параметрів сигналу, які легко виявляються під час моніторингу. Компенсаційні методи поєднують переваги попередніх двох, але є технічно складними в реалізації.

Для підвищення захисту ВОЛЗ від НСД рекомендується використовувати системи безперервного моніторингу, такі як бріллюенівська рефлектометрія. Вона дозволяє виявляти спроби НСД на ранніх стадіях, що підвищує загальну ефективність захисту інформації.

Бріллюенівська рефлектометрія (BOTDR) є ефективним інструментом для ранньої діагностики та моніторингу стану ВОЛЗ, що дозволяє забезпечити надійну роботу.

Технології та інструменти для моніторингу оптичних кабелів

Сучасні технології моніторингу та діагностики для оптичних кабелів дозволяють ефективно виявляти проблеми та забезпечувати їх своєчасне усунення. Окрім бріллюенівської рефлектометрії (BOTDR), існують й інші методи, такі як оптична рефлектометрія в часі (OTDR) [5], що використовуються для визначення розташування пошкоджень в кабелях.

1. Оптична рефлектометрія в часі (OTDR): Цей метод дозволяє визначати втрачені сигнали та фіксувати відбиття сигналу на різних відстанях від джерела. OTDR є корисним для виявлення великих дефектів і пошкоджень, але має обмеження у виявленні дрібних аномалій або в умовах сильних зовнішніх впливів.

2. Бріллоенівська рефлектометрія (BOTDR): Як вже зазначалося, цей метод дозволяє здійснювати точний моніторинг механічного напруження в оптичних волокнах за рахунок аналізу зміни бріллоенівського розсіяння [6]. BOTDR забезпечує високу точність та чутливість, що робить його ефективним інструментом для раннього виявлення аномалій і попередження можливих проблем.

3. Реєстрація температурних змін: Температурні зміни можуть впливати на характеристики волокон, змінюючи їхню чутливість до механічних напружень. Для моніторингу температури використовують спеціалізовані сенсори, які дозволяють забезпечити додатковий рівень контролю та прогнозування можливих проблем.

4. Автоматизовані системи моніторингу: Системи безперервного моніторингу використовують комбінацію різних технологій для забезпечення постійного спостереження за станом ВОЛЗ. Вони можуть інтегрувати дані з різних сенсорів і надавати детальну інформацію про стан оптичних кабелів у реальному часі.

Наявність великої кількості систем дистанційного та безперервного моніторингу ВОЛЗ [7] потребує правильного вибору системи RFTS [10], залежно від топології мережі, вимог надійності, а також вартості системи для всієї запланованої мережі та її подальшого розвитку.

Розглянемо як приклад функціонування RFTS "ONMSi" компанії "JDSU", узагальнену схему якої наведено на рисунку 1.

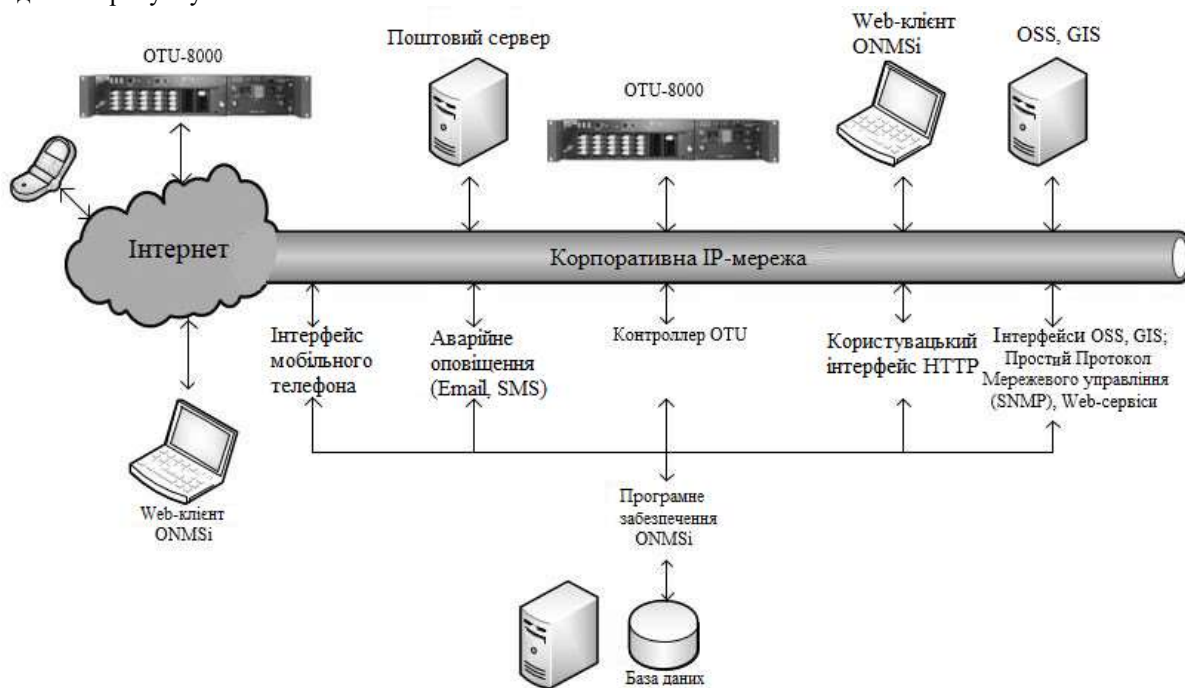


Рис.1. Загальна схема системи моніторингу ВОЛЗ ONMSi

Видалені тестери RTU (OTU-8000) встановлюються у певних точках по всій ВОЛЗ. Блок RTU містить оптичний комутатор для з'єднання з окремими ОВ та один або два OTDR. Інформація, що отримується від усіх блоків RTU, надходить до бази даних.

RFTS "ONMSi" дозволяє контролювати як світлі, так і темні ОВ. Тестування «темних» ОВ також здійснюється на довжині хвилі 1625 нм (як і для «світлих» ОВ), що дозволяє уніфікувати частину обладнання системи. Усі пошкодження реєструються на центральному сервері, який розсилає аварійні повідомлення електронною поштою, SMS тощо відповідним операторам, кожен з яких має свої привілеї. ONMSi підтримує різні інтерфейси та може бути інтегрована з іншими системами.

Для дистанційного контролю ОВ призначений модуль OTDR E81162C ("JDSU"), який визначає фізичні характеристики ОВ та забезпечує локалізацію несправностей. За допомогою OTDR E81162C можна виявити зварні з'єднання, конектори, макровигини, сплітери, а також визначити втрати на неоднорідностях, відбиття та згасання. Модуль OTDR E81162C містить фільтр для моніторингу світлих ВВ.

Розглянемо функціонування системи моніторингу ВОЛЗ "ONMSi" за аварійної ситуації.

На рисунку 2 представлена рефлектограма (еталонна) у нормальному режимі роботи.

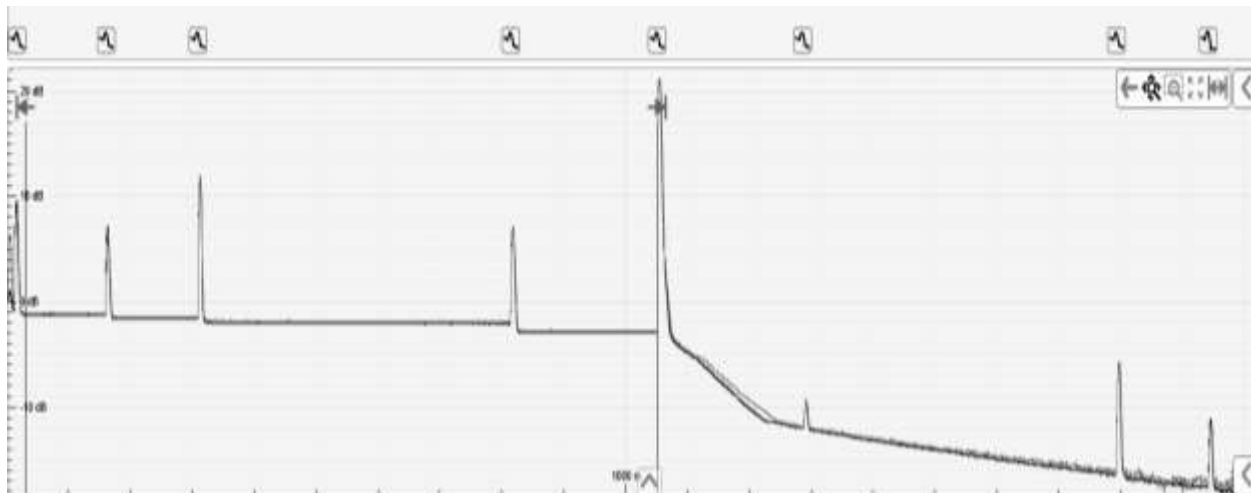


Рис.2. Рефлектограма у нормальному режимі роботи ВОЛЗ

На одній із ділянок ВОЛЗ виникла аварійна ситуація: в одному із конекторів погіршився контакт із патч-кордом. Після виявлення цієї події RFTS видала повідомлення в службу контролю про аварійну ситуацію, в якому містилася інформація про місце пошкодження, можливу причину, що спричинила аварію; відстані до місця ушкодження, зміні згасання порівняно з еталонною рефлектограмою та згасання в лінії. У повідомленні наведено також файли з аварійними рефлектограмами наведені на рисунку 3.

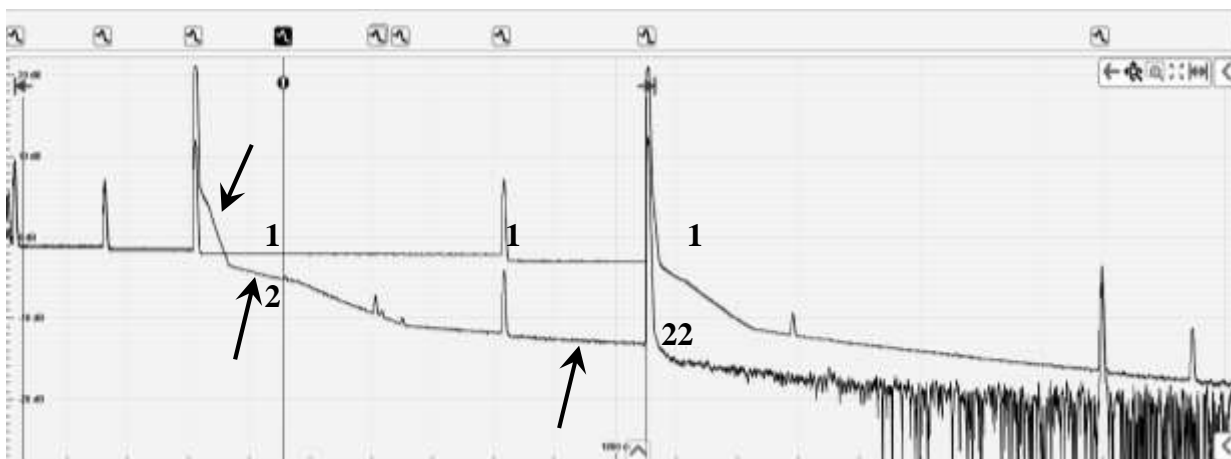


Рис.3. «Еталонна» та «аварійна» рефлектограми OTDR

Представлена рефлектограма у «проблемному місці» в даний момент часу (при аварії – «2»), а також рефлектограма (еталонна – «1») лінії, що нормально працює (момент часу, що передує аварії).

По рефлектограмі видно, що аварія є критичною. Оскільки OTDR вимірює саме оптичну відстань у ОВ, для усунення пошкодження необхідно провести розрахунок фізичної довжини ОВ та визначити конкретне місце ушкодження ВОЛЗ. Відомості про згасання та відображення на певних ділянках ОВ (зварювання, механічне з'єднання, вигин, кінець волокна тощо) зберігаються в таблицях подій.

Після усунення несправності ВОЛЗ (підключення патч-корду було відновлено) у службу контролю RFTS надіслала повідомлення про усунення аварійної ситуації, в якому також міститься рефлектограма поточного стану ОВ ВОЛЗ, аналогічна до представленої на рисунку 2. З цієї рефлектограми видно, що ВОЛЗ знову працює у нормальному режимі. Слід зазначити також, що RFTS значно підвищує інформаційну безпеку мережі – багато способів несанкціонованого доступу (НСД) до ОВ ВОЛЗ неминуче спричиняють додаткові втрати чи нові «події» в ОВ, що може бути своєчасно виявлено та зафіксовано системою.

Інтеграція технологій моніторингу у телекомунікаційні мережі

Впровадження систем моніторингу у телекомунікаційні мережі є важливим кроком для забезпечення їхньої надійності та безпеки. Інтеграція таких систем дозволяє не тільки вчасно виявляти проблеми, а й аналізувати їхні причини та розробляти ефективні стратегії для їх усунення.

1. Автоматизовані системи управління: Впровадження автоматизованих систем управління, які обробляють дані моніторингу та виконують автоматичні дії у разі виявлення аномалій, дозволяє знижувати людський фактор та підвищувати ефективність роботи мереж.

2. Аналітичні інструменти: Використання аналітичних інструментів для обробки даних моніторингу допомагає виявляти тренди та патерни, що можуть вказувати на потенційні проблеми або загрози. Це дозволяє прогнозувати можливі дефекти та приймати превентивні заходи.

3. Інтеграція з існуючими системами безпеки: Важливо забезпечити інтеграцію нових систем моніторингу з існуючими системами безпеки, щоб забезпечити комплексний підхід до захисту інформації та забезпечення надійності мереж.

4. Розробка стратегій реагування на інциденти: Розробка чітких стратегій реагування на інциденти, що виникають внаслідок виявлених аномалій, є критично важливою для забезпечення оперативного усунення проблем та мінімізації впливу на функціонування мереж.

Висновки

Успішне управління волоконно-оптичними лініями зв'язку потребує комплексного підходу, що включає ранню діагностику, моніторинг та захист від можливих загроз. Механічні напруження, що впливають на оптичні волокна, можуть суттєво скоротити їх термін служби, тому важливо використовувати сучасні технології для їх виявлення та контролю.

Бріллюенівська рефлектометрія (BOTDR) є однією з найбільш ефективних технологій для моніторингу стану оптичних кабелів, забезпечуючи високу точність у визначенні рівня механічних напружень. Інтеграція сучасних систем моніторингу у телекомунікаційні мережі дозволяє забезпечити їхню надійність і захист від несанкціонованого доступу. Подальший розвиток технологій діагностики та впровадження автоматизованих систем управління є важливими напрямками для підвищення загальної ефективності та безпеки оптичних мереж.

Перспективи розвитку у цій галузі включають удосконалення існуючих методів моніторингу, розробку нових технологій діагностики, а також інтеграцію інноваційних рішень в систему управління мережами. Це дозволить забезпечити ще більшу надійність і безпеку телекомунікаційних інфраструктур у майбутньому.

Література

1. Агравал Г. П. Волоконно-оптичні системи зв'язку // Wiley. – 2012. – С. 2–16.
2. Хехт, Дж. Розуміння волоконної оптики // Pearson. – 2002. – С. 16–21.
3. Керсі, А. Д., Девідсон, Дж. Н. Волоконно-оптичні датчики та системи // CRC Press. – 2000. – 495 с.
4. Лю Ю. та Пан Дж. Волоконно-оптичне зондування та моніторинг // Springer. – 2017. – Section 2.
5. Слайн, М., Чжан, Х. Оптична рефлектометрія у часовій області (OTDR): принципи та застосування // Академічна преса. – 2015. – С. 9–12.
6. Сан Ю. та Чен Х. Бріллюенівське розсіювання в оптичних волокнах // Wiley. – 2019. – С. 25–26.
7. Тіттел, Ф. К., Джордано, М. Волоконно-оптичні датчики: принципи та застосування // Elsevier. – 2011. – 3691 с.
8. Ван Дейл П. та Бастіенсен С. Передові волоконно-оптичні системи та мережі зв'язку. Springer. – 2014. – С. 13–16.
9. Венгсаркар, А. М., і Венгсаркар, С. Моніторинг та технічне обслуговування волоконно-оптичних мереж. Wiley. – 2005. – С. 34–39.
10. Чжан, К., Чжао, К. Інтегровані системи моніторингу оптичних мереж // CRC Press. – 2020.

References

1. Agrawal, G. P. Fiber-optic communication systems // Wiley. – 2012. – P. 2–16.
2. Hecht, J. Understanding Fiber Optics // Pearson. – 2002. – P. 16–21.
3. Kersey, A. D., & Davidson, J. N. Fiber Optic Sensors and Systems // CRC Press. - 2000. - 495 c.
4. Liu, Y., & Pan, J. Fiber-optic sensing and monitoring // Springer. – 2017. – Section 2.
5. Slyne, M., & Zhang, H. Optical Time Domain Reflectometry (OTDR): Principles and Applications // Academic Press. – 2015. – P. 9–12.
6. Sun, Y., & Chen, H. Brillouin scattering in optical fibers // Wiley. – 2019. – pp. 25–26.
7. Tittel, F. K., & Giordano, M. Fiber-optic sensors: principles and applications // Elsevier. - 2011. - 3691 c.
8. Van Daele, P., & Bastiaensen, S. Advanced Fiber Optic Systems and Communication Networks. Springer. – 2014. – P. 13–16.
9. Vengsarkar, A. M., & Vengsarkar, S. Monitoring and Maintenance of Fiber Optic Networks. Wiley. – 2005. – P. 34–39.
10. Zhang, Q., & Zhao, C. Integrated optical network monitoring systems // CRC Press. - 2020.