

УДК 535.345.67

Ніколов К.О. аспірант(Тел.: +380 (44) 249 25 21. E-mail: nikolka_@ukr.net)

(Державний університет телекомунікацій, м.Київ)

РЕФЛЕКТОМЕТРИЧНІ МЕТОДИ ОЦІНКИ СТАНУ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН НА МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ

Ніколов К. О. Рефлектометричні методи оцінки стану оптичних волокон на мережах зв'язку. Показано, що застосування технологій передачі на основі спектрального розділення каналів накладає підвищені вимоги до надійності оптичного волокна у складі оптичного кабелю. Наведено розрахунки, результати яких підтверджують залежність часу життя оптичного волокна від натягу після прокладання. Показано, що рівень зворотного розсіяння в оптичному волокні залежить також від наявності в ньому мікротріщин. Надано рекомендації, згідно з якими пропонується визначати ділянки волокна з підвищеним натягом за рахунок вимірювання рівня зворотного розсіяння на них.

Ключові слова: оптичне волокно, натяг, прокладання, надійність, спектральне розділення каналів, рефлектометр

Николов К. А. Рефлектометрические методы оценки состояния оптических волокон на сетях связи. Показано, что использование технологий передачи на основе спектрального разделения каналов предъявляет повышенные требования к надежности оптического волокна в составе оптического кабеля. Приведены расчеты, которые подтверждают зависимость времени жизни оптического волокна от натяжения после прокладки. Показано, что уровень обратного рассеяния в оптическом волокне зависит также от наличия немикротрещин. Даны рекомендации, в соответствии с которыми предлагается определять участки волокна с повышенным натяжением за счет измерения уровня обратного рассеяния на этих участках.

Ключевые слова: оптическое волокно, натяжение, прокладка, надежность, спектральное разделение каналов, рефлектометр

Вступ. Розвиток сучасних телекомунікаційних мереж постійно йде по шляху збільшення їхньої інформаційної ємності. Незмінно зростаюча потреба в збільшенні швидкості передачі даних призводить до появи й становлення нових волоконно-оптичних технологій, що дозволяють передавати сигнали з більш високою швидкістю на далекі відстані. На сучасному етапі розвитку комунікаційних технологій все більш інтенсивного впровадження набувають технології спектрального розділення каналів (СРК) [1], які максимально використовують інформаційно-пропускну здатність оптичного волокна. Основний зміст технології СРК полягає в тому, що в одному оптичному волокні на різних довжинах хвиль створюється ряд паралельних інформаційних каналів. Так, за останнє десятиріччя кількість каналів в системах з СРК зросла на порядок і досягає більше трьохсот [2].

Стрімке зростання інформаційно-пропускну здатності оптичного волокна внаслідок застосування новітніх технологій призводить до посилення вимог до таких параметрів, як надійність волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Враховуючи пов'язане з цим збільшення втрат інформації, що передається, за час відмови на лінії, необхідно понизити значення такого параметру, як інтенсивність відмов, що припадають на одиницю довжини лінії за одиницю часу. З однієї сторони, з метою врахування людського фактору, це вимагає посилення охоронно-роз'яснювальної роботи серед населення та організацій, що можуть проводити земляні роботи в охоронній зоні лінійно-кабельних споруд. З іншої сторони, необхідно розробити заходи з підвищення надійності оптичного волокна.

Постановка задачі. Як показують результати досліджень, надійність оптичного волокна, що описується ймовірністю його відмови, залежить від навантаження, яке діяло на нього, а також від постійно діючого в процесі експлуатації навантаження на оптичне волокно [3]. Згідно з [3], надійність та безвідмовність оптичного волокна, що знаходиться під натягом, визначається теорією росту мікротріщин, які мають місце у волокні. Враховуючи це, все волокно при виготовленні проходить випробування на натяг для виявлення тріщин та інших пошкоджень. Цей тест називається Proofstest (випробування на міцність), і означає, що волокно підлягає певному натягу на протязі приблизно однієї секунди [4]. При цьому

тріщини у волокні можуть викликати його відмову (обрив). В роботі [3] було розглянуто передбачення відмов великих довжин оптичного волокна, які базуються на результатах випробувань оптичного волокна на міцність. Оптичне волокно, що міститься в оптичному кабелі (ОК), після прокладання постійно перебуває під певним натягом, і це є однією з важливих причин, які призводять до його відмов на протязі експлуатації. Рівень натягу визначається конструкцією ОК та розміщенням і положенням ОВ, як елемента конструкції.

Положення запропонованої в [3] теорії дозволяють визначити взаємозв'язок між прикладеним навантаженням в часі та ймовірністю відмови оптичного волокна. При цьому повинні бути враховані такі параметри, як характеристики росту тріщини n , та фактор критичного навантаження.

Згідно з дослідженнями, сумарна ймовірність відмов F оптичного волокна довжиною L , що знаходиться під натягом σ надається виразом:

$$F = 1 - \exp[-LN(\sigma)],$$

де $N(\sigma)$ – сукупна кількість тріщин на одиницю довжини.

Враховуючи, що початкова міцність S_i відповідає розподіленню Вейбула, має місце наступне рівняння:

$$N(S_i) = \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^m,$$

де S_0 та m – константи, що відносяться до початкового розподілення міцності. Величина m представляє нахил щодо розподілення Вейбула.

Враховуючи ці вирази, а також з використанням інших положень вищеназваної теорії в роботі [3] були отримані співвідношення, які дозволяють оцінити строк функціонування оптичного волокна.

Передбачення ймовірності відмов спиралось на результати тестування на міцність оптичного волокна. Для оцінки початкового розподілення міцності в роботі було запропоновано тест щодо натягу великих довжин оптичного волокна. На додаток до цього, величину N_p – ймовірність відмови волокна під час тесту на міцність також легко оцінити підрахунком кількості розривів за час тестування.

За результатами досліджень було отримано співвідношення для розрахунку допустимих умов натягу:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_p} = \left[\frac{n-2}{m} \frac{F_s}{LN_p} \frac{t_p}{t_s} \right]^{\frac{1}{n}}, \quad (1)$$

де σ_p – натяг, що прикладається до волокна під час тесту на міцність (%);

σ_s – статично діючий на волокно натяг за межами тесту на міцність;

t_p – тривалість тесту на міцність;

t_s – час дії статичного натягу;

F_s – ймовірність відмови волокна.

Величина n може бути оцінена за допомогою тесту динамічного старіння [5]. А от значення m – параметру початкового розподілу міцності визначити для волокон великої довжини набагато важче. З цією метою в [3] було запропоновано проведення повторного тесту на міцність для визначення величини m .

Якщо σ_{p1} , t_{p1} та σ_{p2} , t_{p2} відповідно натяги та час при проведенні першого та другого тесту, має місце співвідношення для визначення $(n-2)/m$:

$$\frac{n-2}{m} = \frac{\lg(1 + \sigma_{p2}^n t_{p2} / \sigma_{p1}^n t_{p1})}{\lg(1 + N_{p2} / N_{p1})}. \quad (2)$$

Таким чином, може бути розрахована надійність оптичного волокна лише за кількістю відмов, виміряних під час тестування на міцність.

Отримане в роботі співвідношення (1) дозволяє оцінити допустимий натяг оптичного волокна у складі кабелю з точки зору його довговічності. Так, в [6] було отримано діаграму передбачення допустимого натягу після тесту на міцність для забезпечення довгострокової надійності оптичного волокна.

Результати вимірювання міцності стандартних одномодових волокон наведено в [7]. Волокно розривається у вузькому діапазоні значень натягу при напрузі у волокні порядку $\sigma_p \cong 4.8$ ГПа. Відносне видовження при цьому складає 6,7%. Це значення необхідно враховувати та вибрати метод прокладання, який мінімізує натяг під час прокладання оптичного кабелю.

З результатів, наведених в [6], випливає, що для забезпечення терміну функціонування оптичного волокна порядку 40 років залишковий натяг волокна після прокладання оптичного кабелю не повинен перевищувати 0,20...0,21%.

Таким чином, для підвищення надійності ВОЛЗ з СРК, необхідно мінімізувати зусилля натягу під час прокладання кабелю та, відповідно, забезпечити мінімальний залишковий натяг волокна після закінчення цього процесу і можливість його контролю. На цей час можливість контролю натягу прокладеного оптичного волокна забезпечується за рахунок використання спеціальних методів, та приладів - Брилюєнівських рефлектометрів, що мають складну схемо-технічну та конструктивну побудову та високу вартість [8]. При цьому на мережах зв'язку має місце широке застосування оптичних імпульсних рефлектометрів, які мають порівняно невелику ціну поряд з високими технічними характеристиками [7]. Таким чином представляється перспективною можливість використання широко поширених приладів для контролю стану оптичного волокна на оптичних мережах зв'язку.

Рефлектометричний контроль оптичного волокна. Одним з факторів, що викликають втрати в оптичному волокні є релеевське розсіювання, яке викликане неоднорідностями щільності скла [7]. Релеевське розсіювання залежить від оптичної щільності волокна і варіацій густини у волокні, які є природним побічним продуктом виробництва. В ідеалі, чисте скло має досконалу молекулярну структуру і, отже, рівномірну щільність. У звичайному склі щільність не є абсолютно однорідною. В результаті відбувається розсіювання. Враховуючи той факт, що розсіювання зворотно-пропорційне четвертій степені довжини хвилі ($1/\lambda^4$), воно швидко зменшується при великих довжинах хвиль. Внаслідок релеевського розсіювання, потужність сигналу знижується через втрати на розсіюванні.

Ось чому цей ефект може бути описаний величиною рівня затухання α_R , за рахунок розсіювання. Ця складова частина загального загасання робить внесок у загальні втрати, і впливає на нахил рефлектограми. Таким чином, рівень релеевського розсіювання визначає рівень розсіяного у зворотному напрямку світла.

З іншої сторони, мікротріщини, які утворюються в оптичному волокні за рахунок його натягу, є неоднорідностями, які також викликають розсіювання у зворотному напрямку. Це викликано орієнтацією площини тріщин перпендикулярно осі волокна. Рівень цього розсіювання залежить від кількості мікротріщин на одиницю довжини волокна та їх глибини. Таким чином, оцінюючи рівень зворотного розсіювання різних ділянок оптичного волокна, можна провести порівняльний аналіз щодо рівня остаточного натягу в прокладеному волокні з метою виявлення потенційно ненадійних ділянок.

Ділянки лінії, де рівень релеевського розсіювання вищий, зміщені вгору, в порівнянні з іншими ділянками рефлектограми. При цьому, перепади загасання можуть спостерігатися в початковій і кінцевій точці ділянки. Ці перепади залежать від величини релеевського розсіювання сусідніх ділянок лінії.

Таким чином, визначення різниці між рівнями проаналізованої ділянки і ділянки з певним рівнем розсіювання Релея, представляє інтерес. Після цього можна визначити рівень розсіювання ділянки, що аналізується [9].

Для моделювання рефлектограми з різними ділянками оптичного волокна були застосовані методи, наведені у [10...12]. З їх використанням було проведено моделювання рефлектограм, що містять відрізки оптичного волокна з різним рівнем релеєвського розсіювання.

На Рис. 1 наведено рефлектограму частини лінії з 3 ділянками оптичного волокна, які мають різний рівень релеєвського розсіювання. Центральна ділянка з $\alpha_{R1} = 1$ дБ поміщається між ділянками з $\alpha_{R2} = 0,9$ дБ. Центральна частина рефлектограми вище, ніж сусідні частини через високий рівень сигналу зворотного випромінювання, яке викликане розсіюванням.

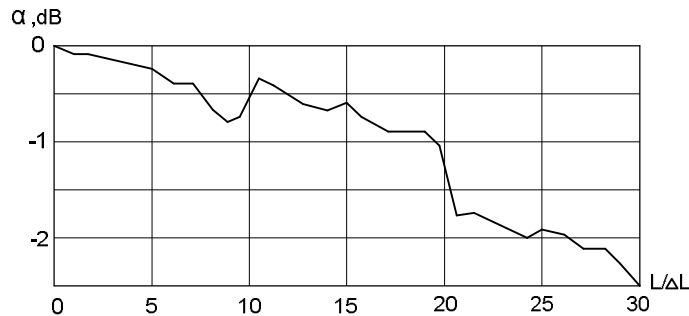


Рис. 1. Рефлектограма волоконно-оптичної лінії з рівнем релеєвського розсіювання центральної секції 1 дБ і рівнем розсіювання сусідніх секцій 0,9 дБ

Беручи до уваги той факт, що значення сигналу зворотного випромінювання визначається рівнем розсіювання (по параметру α_R), різниця загасання в точці з'єднання ділянок волокна може бути визначена у відповідності з наступним співвідношенням:

$$\Delta\alpha = 10 \lg (\alpha_{R1}/\alpha_{R2}) \approx 0,46 \text{ dB}, \quad (3)$$

де α_R – згасання, що обумовлено розсіюванням.

Ця різниця підтверджується ходом рефлектограми. На Рис. 2 наведено протилежний варіант, коли центральна ділянка включає в себе волокно з низьким рівнем розсіювання $\alpha_{R1} = 0,9$ дБ і розташовується між ділянками з $\alpha_{R2} = 1$ дБ.

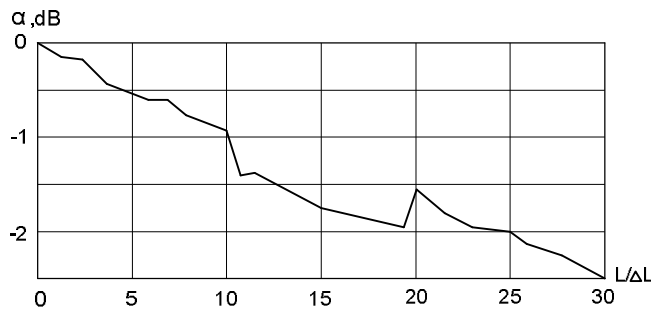


Рис. 2. Рефлектограма волоконно-оптичної лінії з рівнем релеєвського розсіювання центральної ділянки 0,9 дБ і рівнем розсіювання сусідніх ділянок 1 дБ.

Завдяки більш низькому рівню розсіювання центральна частина рефлектограми нижча, ніж сусідні частини. При цьому, різниця рівня затухання в точці з'єднання цих двох секцій: $\Delta\alpha \approx -0,46$ дБ.

На Рис. 3 наведено рефлектограму з рівнем релеєвського розсіювання центральної ділянки $\alpha_{R1} = 0,3$ дБ, і рівнем розсіювання сусідніх ділянок, що дорівнює $\alpha_{R2} = 0,2$ дБ.

Розрахункове значення різниці рівнів рефлектограми в точці з'єднання двох ділянок може бути визначена у відповідності з наступним співвідношенням:

$$\Delta\alpha = 10 \lg (\alpha_{R1}/\alpha_{R2}) \approx 1,76 \text{ dB} \quad (4)$$

Як видно з рисунка, існує збіг результатів моделювання і розрахункового значення $\Delta\alpha$. При цьому різниця між рівнями ділянок з α_{R1} і α_{R2} , яка дорівнює $\Delta\alpha$ є постійною, як для наведеного прикладу, так і для наступного.

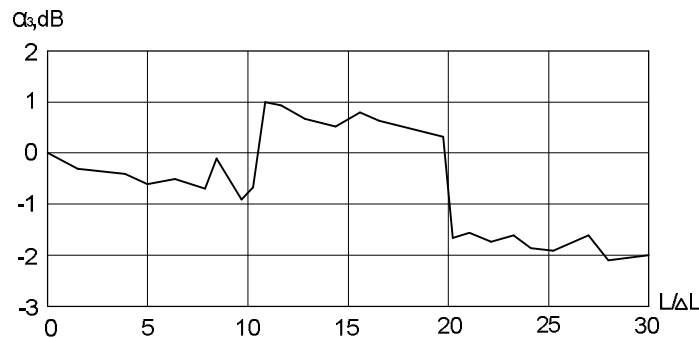


Рис. 3. Рефлектограма волоконно-оптичної лінії з рівнем релеєвського розсіювання центральної ділянки 0,3 дБ і рівнем розсіювання в сусідніх ділянках 0,2 дБ

Цей факт підтверджується результатами, наведеними на Рис. 4, де показана рефлектограма для $\alpha_{R1}=0,6$ дБ і $\alpha_{R2}=0,4$ дБ, тобто для в два рази більшого рівня релеєвського розсіювання у порівнянні з попереднім випадком. Отримана різниця має однакою величину як для змодельованої рефлектограми, так і для розрахункового значення 1,76 дБ.

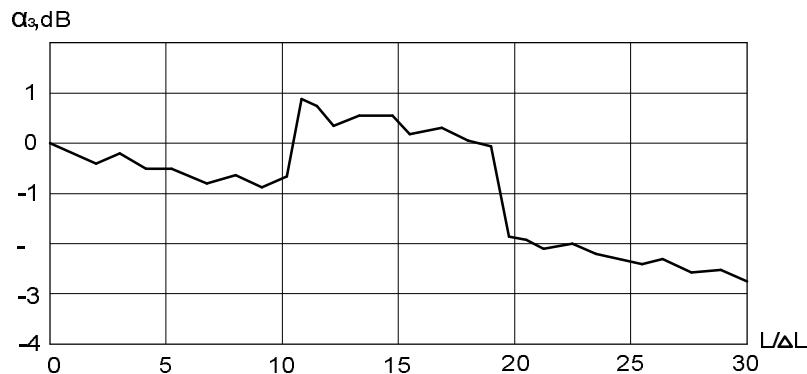


Рис. 4. Рефлектограма волоконно-оптичної лінії з рівнем релеєвського розсіювання центральних ділянок 0,6 дБ і рівнем розсіювання сусідніх ділянок 0,4 дБ.

Таким чином, різниця затухання на рефлектограмах в місцях з'єднання ділянок волокон з різними рівнями релеєвського розсіювання визначається відношенням їх рівнів, але не їх абсолютними значеннями.

При цьому, у відповідності з наступним співвідношенням, можливо визначити рівень розсіювання на одній з ділянок волокна, коли визначений рівень релеєвського розсіювання сусідньої ділянки [9]:

$$\alpha_{Rx} = \alpha_{R2} 10^{\Delta\alpha/10} \quad (5)$$

де α_{R2} – певний рівень розсіювання на одній з ділянок волокна;

$\Delta\alpha$ – перепад рівня в точці стику двох ділянок;

α_{Rx} – рівень релеєвського розсіювання, який повинен бути визначений.

На практиці цей метод може бути застосований, коли є ділянка волокна з певним рівнем розсіювання. Для вимірювання необхідно зробити наступне: зразкову ділянку оптичного волокна з'єднати з ділянкою, що аналізується і провести рефлектометричне вимірювання. Після цього, з виразу (5) і з результатів вимірювань, визначити рівень розсіювання проаналізованої ділянки.

Важливо, що в точках з'єднання ділянок волокна необхідно звести до мінімуму втрати під час зварювання. При цьому точність вимірювань визначається рівнем втрат в точках з'єднання. Цей рівень становить 0,05 дБ, якщо використовуються автоматичні зварювальні апарати.

Результати моделювання оптичних рефлектограм доводять можливість визначення рівня релеєвського розсіювання в досліджуваному оптичному волокні, коли надано ділянку оптичного волокна з визначеним рівнем розсіювання.

Висновки. Впровадження на мережах зв'язку сучасних оптичних технологій, що забезпечують високий рівень інформаційно-пропускної здатності оптичних волокон, ставить завдання відповідного підвищення їх надійності. При цьому оцінку надійності волокон та попереднє відбирання їх за цим критерієм можливо проводити ще на етапі виробництва оптичного кабелю. Подальші заходи щодо збереження досягнутого рівня надійності полягають у контролі прокладеного оптичного кабелю на відсутність надмірного натягу на базі порівняльного аналізу ділянок оптичного волокна за результатами рефлектометричного контролю методом імпульсної рефлектометрії.

Література

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – Москва: Техносфера, 2003. – 440 с.
2. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи: учебное пособие / О. К. Скляр. – Санкт-Петербург: Издательство «Лань» 2010. – 272 с.
3. Yutaka Mitsunaga. Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing / Yutaka Mitsunaga, Yutaka Katsuyama, Hirokazu Kobayashi, Yukinori Ishida // Journal of Applied Physics. – 1982. – Vol.53, №7. – P.4847-4853.
4. Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable // ITU-T Recommendation G.650.1(06/2002).
5. Пестриков В.М. Длительная прочность оптических волокон в условиях старения материала / В. М. Пестриков // Физика и химия стекла. – 2000. – Т.26, №2. – С. 244-257.
6. Манько О. О. Вимоги до надійності ВОЛЗ на етапі впровадження технологій зі спектральним розділенням каналів / О. О. Манько, К. О. Ніколов, О. М. Скубак // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №2(30). – С. 47-50.
7. Листвин А. В. Оптические волокна для линий связи / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков. – Москва: ЛЕСАРпт, 2003. – 288 с.
8. Теселкин А.В. Реализация метода бриллюэновской рефлектометрии / А. В. Теселкин // Инфосфера. – 2012. – №53. – С.5–7.
9. Katok V. The measurements of Rayleigh Scattering level in a fiber using reflectometric principles/ V. Katok, A. Manko, E. Koshman // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2005. – Т.3, №3,4. – С. 118-120.
10. Глебов А. К. Принципи моделювання рефлектометричних методів дослідження оптичних трактів / А. К. Глебов, Л. Ю. Гонтаренко, О. О. Манько, К. О. Ніколов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2014. – Вип 2(30). – С. 132-135.
11. Манько О. О. Дослідження параметрів і характеристик оптичних волокон та трактів методом числового моделювання / О. О. Манько // Сучасний захист інформації. – 2013. – №3. – С. 45-49.
12. Манько О. О. Принципи числового моделювання оптичних рефлектограм та шумових властивостей оптичних трактів / О. О. Манько // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – №1(25). – С.112-117.

Дата надходження в редакцію: 8.12.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. О. Манько