

УДК 621.396.2

Г. Л. Лисенко, Р. В. Просоловський

СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Вступ

З розвитком телекомунікацій проблема захисту оптичного кабелю стає дедалі актуальнішою. Найбільшу увагу контролю якості роботи мережі приділяють найвпливовіші галузі, такі як банківська система (потоки інформації про трансакції коштів і т.і.), мілітарні системи (контроль якості зв'язку зі стратегічними об'єктами, система керування, тощо), магістральні мережі та інше.

Сучасний стан систем контролю оптичного кабелю

Актуальним на сьогодні є необхідність автоматизованого дистанційного моніторингу та виявлення несправностей у волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ). Сама методологія передачі бітів інформації по оптичному волокну, яка полягає у розповсюдженні світлових сигналів вздовж волоконно-оптичного тракту від передавача (здебільшого напівпровідниковий лазер або світлодіод) до приймача (це, як правило, лавинний фотодіод) інформації, дозволяє як проводити контроль оптичної лінії за допомогою тестуючих імпульсів на наявність пошкоджень в ній, так і визначати віддаленість зони, в якій знаходиться причина порушення цілісності оптичного кабелю, а, відтак, і інформації, що передається.

Найчастіше у якості діагностичного та вимірювального приладу використовують оптичний часово-імпульсний рефлектометр — ОЧІР (Optical Time-Domain Reflectometer — OTDR) [1]. Робота пристроїв такого типу полягає у тому, що у волоконно-оптичний тракт запускається тестуючий імпульс, який з мірою поширення у волокні зазнає ряд відбивань, заломлень, розсіювань, загасань і т.і., що викликано неоднорідностями, втратою оптичної потужності на елементах оптичної мережі, на згинах, пошкодженнях, розтягах волокна; релеєвським загасанням, френелівським відбиттям тощо. Частина потужності з тестуючого імпульсу відбивається у зворотному напрямку, тобто назад до установки тестування ОЧІР. Далі, наприклад, за технологією Time-Of-Flight (TOF) [2], значення інтенсивності відбитого випромінювання приймається і аналізується, з подальшим записом в залежності від дискретного значення часу надходження t , що пройшов з моменту запуску контрольного імпульсу у тестоване волокно. Це значення часу є величиною прямопропорційною відстані L , на якій викликано утворення відбитого імпульсу:

$$L = \frac{c \cdot t}{2 \cdot n}, \quad (1)$$

де c — швидкість світла у вакуумі, n — показник заломлення оптичного волокна, і є величиною сталою, яка визначається виробником волоконно-оптичного кабелю. Двійка у знаменнику свідчить про те, що випромінювання пройшло подвійну відстань L (від ОЧІР до завад, та від завад до ОЧІР).

Недоліками цієї системи є недостатня швидкодія (невелика частота імпульсів, які посилаються для контролю оптичного кабелю). Це пояснюється виникненням великого рівня шумів, які заважають отримувати якісну рефлектограму. Другим недоліком є необхідність проведення тестування “темного” волокна (відключеного від передачі інформації по ньому), що є недопустимим у випадку, коли проводиться постійне контрольне тестування магістральних мереж.

Інший варіант, який вирішує проблему діагностики та тестування „темного” волокна, передбачає використання спеціальних блоків контролю потужності та генерації самостимульованого сигналу (БКП та ГСС) [3], які встановлюються по всій лінії волоконно-оптичної мережі. Кожен із таких блоків БКП та ГСС являє собою автоматизовану установку, дещо аналогічну до установки оптичного рефлектометра, але має відмінність у тому, що у тестовану оптичну лінію посилається не просто сигнал, а певний код. Кожен з блоків БКП та ГСС отримує власний код сигналу та проводить тестування на діапазоні волокна, що підключений до його входів та виходів. Блоки БКП та ГСС з'єднуються у єдину віддалену систему контролю, яка проводить постійний автоматичний моніторинг оптичної мережі.

Не дивлячись на те, що вищеописаним пристроєм вирішується проблема “темного” кабелю, його

недоліками залишаються недостатня швидкодія, що пояснюється великим часом обирання коду та його аналізу кожним із блоків БКП та ГСС; та необхідність використання додаткової мережі, через яку ці блоки з'єднуються з віддаленою системою контролю, що в свою чергу викликає додаткові затрати, додаткове зниження швидкодії та, знову ж таки, можливість несанкціонованого доступу, наприклад, вже до цієї мережі. Таким чином, необхідно вирішити такі проблеми проведення тестування лінії за допомогою ОЧП:

- підвищення швидкодії тестування оптоволоконної лінії, яка залежить від багатьох факторів: виникнення різного роду шумів та завад (релеївські розсіювання, френелівські відбивання тощо), та параметрів електроніки самого приладу ОЧП (це можуть бути “мертві” (ще називають “сліпі”) зони рефлектометра, які визначаються “засвіченістю” фоточутливого елемента; швидкістю аналого-цифрового перетворення; швидкістю запису у пам'ять (буферизація), швидкістю обміну інформацією, що передається, та інше);
- підвищення рівня захисту контрольованого оптоволоконного тракту, що пов'язано як з швидкістю проведення тестування лінії, так і з методами та алгоритмами його проведення.

Вдосконалена система ОЧП

Для вирішення поставлених задач пропонується вдосконалений ОЧП. Система складається з блоку керування (БК) 1 (рис. 1), який з'єднаний з блоком ОЧП 2. Оптичні вихід та вхід блоку ОЧП 2 під'єднані відповідно до прямого входу та зворотного виходів оптического направленного відгалужувача 7. Прямий вихід відгалужувача 7 разом із основними (корисними) волокнами 8 потрапляє на один із входів оптического мультиплексора 9. Оптичний мультиплексор/демультиплексор (MUX/DEMUX) 9 через контрольоване одномодове оптичне волокно 10 з'єднується з оптичним мультиплексором/демультиплексором (MUX/DEMUX) 11, виходи якого відповідно під'єднуються до основних (корисних) волокон 12 та атенюатора тестуючої довжини хвилі випромінювання 13.

Блок ОЧП 2 може бути або спеціально підбраною базовою моделлю (наприклад, універсальна система тестування EXFO “FTB-300” [4], Syrus System “CMA5000-OTDR” [5] тощо), або дещо спрощеним з метою економії, окремо сконструйованим блоком (рис. 2). Такий блок ОЧП 2 має імпульсний лазерний діод (ЛД) 5, однонаправлений вихід якого подається до направленного відгалужувача 7; однонаправлений вхід від направленного відгалужувача на фотоприймач у виконанні лавинного фотодіода (ЛФ) 6. ЛФ 6 з'єднується зі швидким аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) 4, вихід якого з'єднується з оперативним запам'ятовувальним пристроєм (ОЗП) 3. Блок ОЧП 2 має також двонаправлений електричний вхід, через який з'єднується з БК 1.

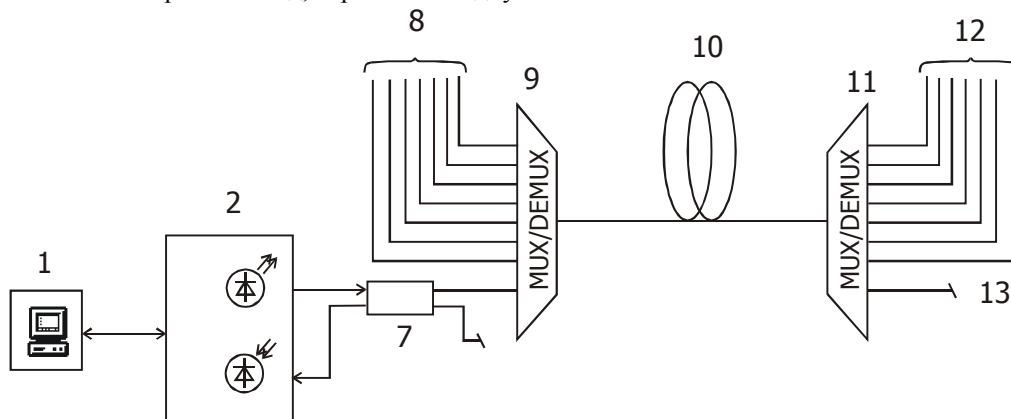


Рис. 1. Структурна схема системи контролю оптичного кабелю

Принцип роботи системи контролю оптичного кабелю

Система працює наступним чином (рис. 3). БК 1, маючи сигнал готовності і роботи лінії, подає в оптичний рефлектометр ОЧП 2 через шину керування (ШК) на вхід ЛД 5 імпульс тривалістю τ , а також одночасно починає відлік часу t . У відповідності до цього імпульсу ЛД 5 випромінює когерентний пучок променів тривалістю τ на прямий вхід направленного оптического відгалужувача 7. Відгалужувач 7 направляє випромінювання з прямого виходу на вхід MUX/DEMUX 9. Відповідно до використовуваної технології ущільнення (WDM або DWDM) [6], випромінювання разом із корисними сигналами 8

мультиплексується і направляється через вихід MUX/DEMUX 9 у тестоване одномодове оптичне волокно 10. З розповсюдженням сигналів (корисних та тестуючого) по волоконно-оптичному тракті, випромінювання загасає, заломлюється, відбивається від неоднорідностей (за законом Френеля) тощо, в наслідок чого виникають зворотні розсіювання як корисних так і тестуючого сигналу. Далі ці сигнали потрапляють на вхід MUX/DEMUX 11, де розділяються на корисні вихідні канали та канал тестування. Тестуюче випромінювання загасає на оптичному атенуаторі 13.

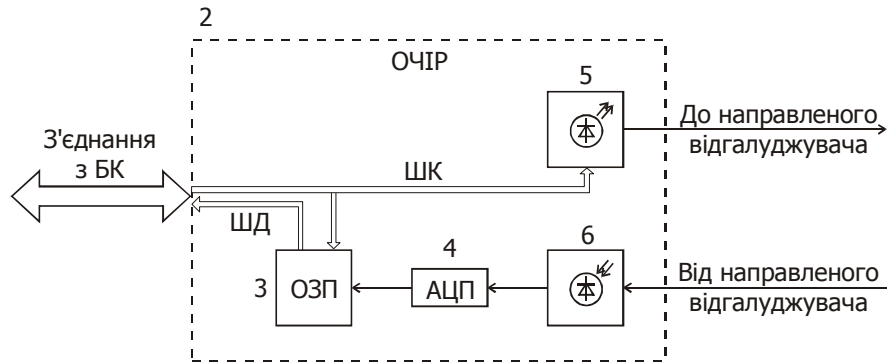


Рис. 2. Конструкція ОЧІР 2

Та частина випромінювання, що відбилася на неоднорідностях оптичного волокна 10 повертається на вхід MUX/DEMUX 9 і відбирається на зворотний вхід направлено відгалужувача 7. Далі випромінювання заломлюється на однонаправлений вхід блоку ОЧІР 2 і потрапляє в ЛФ 6, викликаючи виникнення струму, аналогове значення якого перетворюється швидким АЦП 4 в цифрове і записується в ОЗП 3 в залежності від часу t , який пройшов від початку проведення тестування. Аналогічних відбивань у лінії 10 виникає безліч, і вони продовжують проходити вищеописаний шлях і, таким чином, потрапляти у вигляді цифрового значення струму на ЛФ 6 в ОЗП 3 в залежності від часу приходу t . Таким чином, формується таблиця значень інтенсивності відбитого випромінювання (перша колонка) і часу їх надходження (друга колонка). Ця таблиця і є інтерпретацією рефлектограми, де перша колонка є рівнем загасання у волокні α , дБ, а друга — віддаленість цього загасання, яка визначається за формулою 1. Чим більша кількість рядків утвореної у ОЗП 3 матриці даних, тим якісніше вимірювання за рахунок більшої роздільної здатності рефлектограми. Значення кількості рядків матриці даних залежить від функціональних можливостей пристроїв, що використовуються в схемі (електроніка, параметри ЛФ 6 тощо).

Аналіз отриманої рефлектограми виконується програмно в БК 1 шляхом порівняння отриманих даних з допустимими значеннями. У разі, якщо рефлектограма задовольняє діапазон значень, ОЗП 3 рефлектометра очищується від даних. Очікується час $t \geq T$ (час затримки між імпульсами), далі значення t обнуляється і знову починається відлік часу t з одночасно посланим сигналом на ЛД 5. Знову відбувається вищеописаний цикл контролю до того моменту, поки значення рефлектограми буде незадовольняти діапазон допустимих значень. Тоді БК 1 за необхідності дає сигнал про припинення передачі корисних даних 8 (у випадку, коли важливо зберегти конфіденційність інформації), визначає віддаленість місця пошкодження волокна L , визначає характер пошкодження, оповіщає персонал про поломку та її віддаленість та проводить інші необхідні функції.

Будова даної системи враховує використання направлено оптичного відгалужувача 7. Такий відгалужувач повинен бути спеціальним, оскільки є досить важливим у конструкції для того, щоб не викликати "засвічення" ЛФ 6 відбитим від початку волокна тестуючим променем (стрибок 14 на рефлектограмі, рис. 4, а). Такі "засвічення" ЛФ 6 вимагають часу, для того, щоб інерційний ЛФ 6 був здатний продовжувати тестування. Очевидно, що у випадку тестування лінії з затримкою між тестуючими імпульсами $T=1$ мкс з їх тривалістю $\tau=10-100$ нс ЛФ 6 не буде чутливим до картини рефлектограми. З іншого боку, відгалужувач 7 повинен повністю подавати зворотне випромінювання (те, що повернулось з тестованої лінії) на ЛФ 6, без його потрапляння на однонаправлений вихід ЛД 5, щоб не викликати появу самостимульованого випромінювання ЛД 5, яке у даному випадку буде шкідливим. Використання направлено оптичного відгалужувача, запропонованого у [7] або інших відгалужувачів, які використовують поляризацію випромінювання дозволить уникнути даної проблеми.

Оптичний атенуатор 13, поставлений в умовному кінці тестованої лінії дозволяє проводити затухання оптичного випромінювання на довжині хвилі, що використовується для тестування лінії (згідно з WDM- або DWDM-технологією ущільнення). Таке затухання необхідне для того, щоб

уникнути піку в рефлектограмі 16 на кінці досліджуваної лінії, що додатково дозволить зменшити кількість помилкових (шкідливих) сигналів на отриманій рефлектограмі (рис. 4, а, б).

Детальний програмний аналіз рефлектограми (рис. 3) полягає у порівнянні отриманих значень затухання 15 в тестованому волокні з діапазоном допустимих відхилень значень затухання 18.

Модель роботи системи контролю оптичного кабелю

Швидкості реакції ОЧІР, що представлений у [1] в першу чергу не достатньо за рахунок того, що сама технологія не передбачає швидкість тестування більшу за мінімальну віддаленість подвійної відстані до кінця лінії. Значення подвійної відстані до кінця лінії встановлюється формулою (1), і з довжиною ділянки контрольованого оптичного кабелю в 120 км становить значення від 4 мс, що є достатньо великим значенням для проведення надійного та швидкого контролю оптичного кабелю.

Запропонована система контролю оптичного кабелю дозволяє збільшити частоту тестування оптоволоконної лінії до 1 МГц, або до інтервалу часу в $T=1$ мкс з тривалістю імпульсу в 1 нс, за рахунок того, що пріоритетним є посилення тестуючих імпульсів у волоконно-оптичний тракт, а не детальний аналіз картини рефлектограми (рис. 5), такий аналіз доцільно робити вже після виявлення сигналу про виявлення пошкодження або підозри про пошкодження волоконно-оптичного тракту.

На рис. 5а умовно зображено оптичне волокно, яке складається з двох ділянок рівних його довжині L . Ці дві ділянки відповідають двом напрямкам розповсюдження оптичного випромінювання у волокні (в прямому та зворотному напрямку). Припустимо, що перша ділянка 20-23 має незначне пошкодження 21, та пошкодження 22, яке викликане несанкціонованим доступом. Аналогічно, при зворотному розповсюдженні випромінювання, яке відбулося від умовного кінця лінії на відстані L , на ділянці волокна 24-27 знаходяться відповідно пошкодження 25 та 26.

На рис. 5б зображено графік залежності оптичних імпульсів, що подаються ЛД 5 у оптичне волокно. Затримка між імпульсами складає T .

На рис. 5, в зображено графік відображених імпульсів, що надходять на ЛФ 6 впродовж тестування лінії системою контролю оптичного кабелю (рефлектограма з тестованого оптичного волокна).

У випадку, якщо б використовувалась установка ОЧІР [1], то сигнал тривоги з'явився б із затримкою в $2 \cdot T_1$ після посилення імпульсу, що може бути надзвичайно великою величиною. Натомість, запропонована система контролю оптичного кабелю виявить подію пошкодження кабелю з максимальною затримкою в тривалість затримки між імпульсами T , яка на декілька порядків нижча за вищенаведене значення. Для даної системи є пріоритетним аналіз рефлектограми на наявність перевищення її значень в допустимому діапазоні між рівнем шумів (α_n) та статистично встановленим максимальним значенням амплітуди сигналу (α_{max}), що повертається з тестованої лінії. Виявлення події пошкодження з точністю T можливе лише при безперервному послідовному тестуванні лінії.

Детальний аналіз типу пошкодження та його віддаленості, подібно до технології установки ОЧІР [1] можна проводити в режимі тривоги, що описано в блок-схемі на рис. 3, з попереднім відключенням лінії.

Режими роботи системи контролю оптичного кабелю

Як вже відзначалось раніше, наведена система контролю оптичного кабелю має два режими роботи:

1. Режим неперервного послідовного тестування. Це вважається основним режимом роботи системи контролю оптичного кабелю. В даному режимі виконується перша частина блок-схеми роботи, що наведена на рис. 3. Система з інтервалом в T надсилає тестуюче оптичне випромінювання тривалістю τ . В цей же момент система проводить попередній швидкий аналіз рефлектограми на предмет її збереження у допустимих межах. У випадку, якщо рефлектограма не задовольняє встановлений діапазон, система переходить у другий режим роботи.
2. Режим тривоги і детального аналізу рефлектограми. У цьому режимі система працює у випадку, якщо картина рефлектограми не задовольняє допустимі межі. БК 1 системи забороняє подальшу передачу корисних даних 8 по волокну та проводить аналіз пошкодження з виявленням його типу та його віддаленості.

Підготовка роботи системи контролю оптичного кабелю

Для вищепов'язаної повноцінної роботи системи контролю оптичного кабелю важливу роль відіграє підготовка її роботи, тобто вірно визначений діапазон допустимих значень рефлектограми (рис.6).

Для визначення діапазону значень рефлектограми, отриманої з досліджуваного оптичного волокна рис. 6, а, необхідно при встановленні запропонованої системи контролю оптичного кабелю провести її роботу у другому режимі, тобто, у режимі детального аналізу даних. У цьому випадку вважатиметься, що

контрольоване волокно є готовим до проведення контролювання і на ньому відсутні будь-які пошкодження або несанкціоновані доступи, які варті уваги системи. Далі система проводить послідовний збір даних у вигляді послідовності детальних рефлектограм рис. 6, б, які матимуть певні стрибки в умовних точках 30, 31, 32 та 33, які, наприклад, є відповідно початком тестованої лінії, двома її незначними пошкодженнями (згинами, або іншими присутніми на лінії пристроями, які вносять певні відображення світлового сигналу) та кінець лінії. Рефлектограми збираються та аналізуються БК 1 системи контролю оптичного кабелю. БК 1 на основі отриманих даних створює картину діапазону допустимих значень 34 рефлектограми (рис 5, в). Далі БК 1 проводить множення діапазону заданих значень 34 рефлектограми у відповідності до обраної частоти проведення тестування лінії Т і таким чином формує кінцевий діапазон допустимих значень 36.

Система з часом може виявляти „фальшиву” тривогу, що може пояснюватись розширенням оптичної мережі, зміни характеристик волокна з часом тощо, але цьому можливо запобігти, якщо проводити перевизначення діапазону значень рефлектограми з часом, або після розширення оптичної мережі.

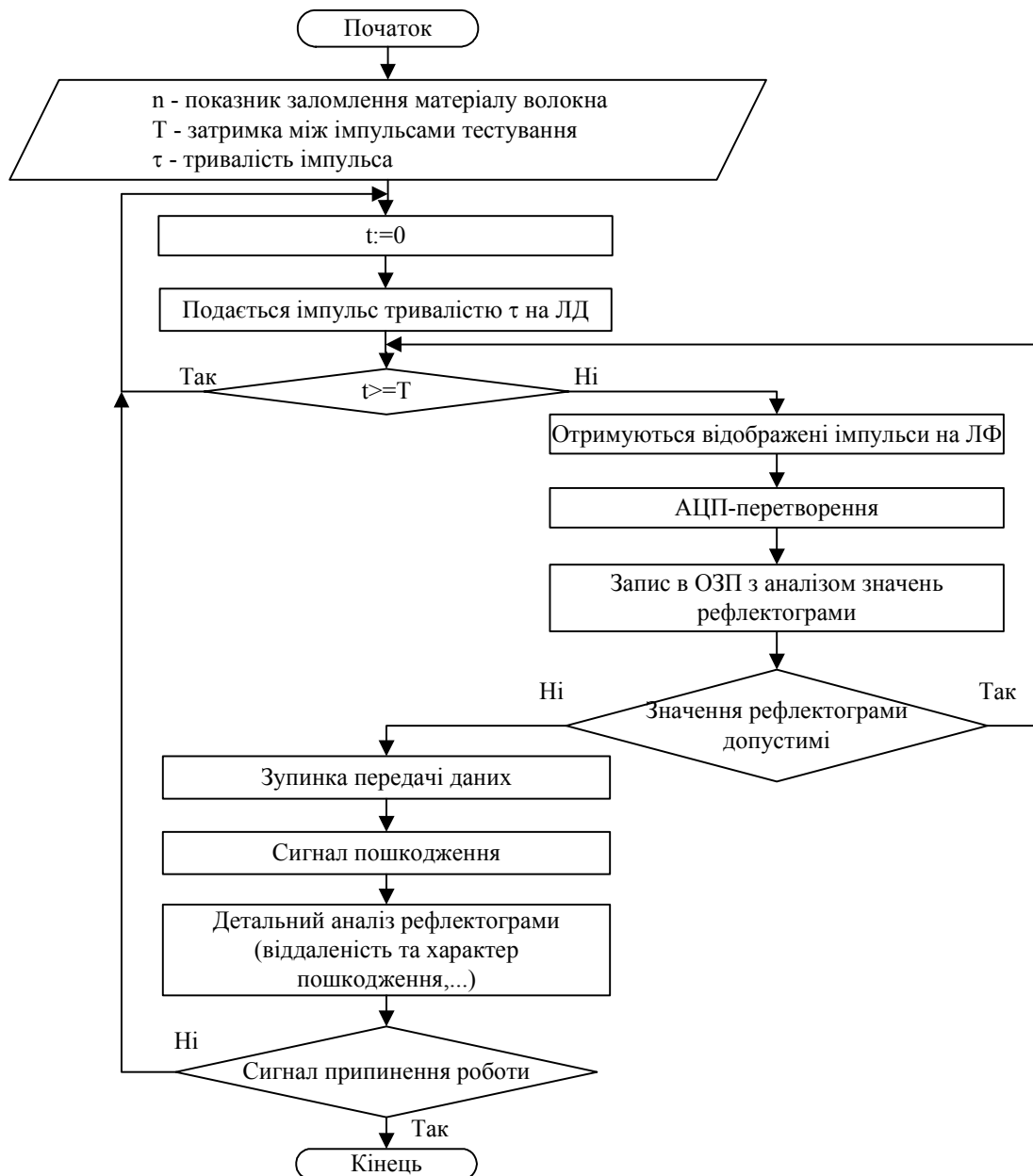


Рис. 3. Блок-схема запропонованого алгоритму тестування оптичного кабелю

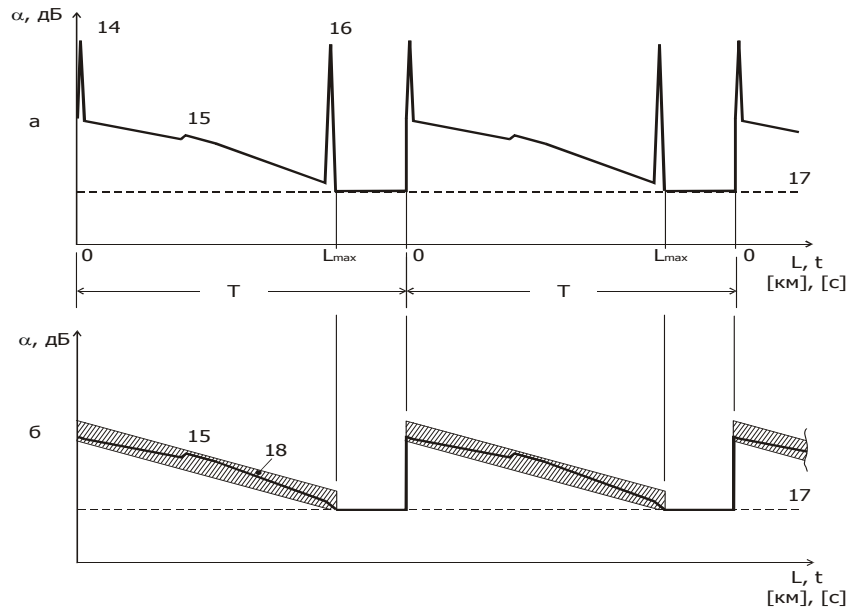


Рис. 4. Приклади типових рефлектограм, отриманих при тестуванні оптичного волокна
 а – типова рефлектограма відомого прототипу, б – типова рефлектограма, отримана при
 проведенні тестування досліджуваної (контрольованої) лінії вдосконаленим ОЧР

Визначення системою контролю оптичного кабелю характеру пошкодження лінії

Важливим елементом системи контролю оптичного кабелю є характер пошкодження, адже від типу пошкодження (чи то злам, чи то згин, чи то вібрація, чи то несанкціонований доступ тощо) залежить швидкість та ефективність його усунення, що є основними параметрами в оптичних мережах з високим рівнем захищеності.

Встановлення характеру та віддаленості пошкодження контрольованого оптичного кабелю здійснюється в другому режимі роботи системи контролю оптичного кабелю (рис. 3), коли ввімкнено сигнал тривоги і проводиться послідовний детальний аналіз рефлектограм, які продовжують надходити з тестованого волокна. При цьому, БК 1 системи контролю оптичного кабелю за характером зміни кривої даних рефлектограми програмно визначає тип пошкодження та його віддаленість за формулою (1). Пошкодження можуть бути або типовими, що зберігаються у пам'яті БК 1, або статистично зібраними за аналогією до попереднього пункту по підготовці до роботи системи контролю оптичного кабелю: проводяться примусові згини, злами та втручання в контрольоване оптичне волокно з подальшим отриманням діапазону значень рефлектограми та описом типу пошкодження. Такий підхід робить систему контролю оптичного кабелю більш гнучкою в аналізі типу пошкодження яке може виникнути на лінії.

Висновок

Запропонований варіант системи контролю оптичного кабелю можна використовувати у якісних та швидких оптичних мережах обміну інформації, де першочергово важливою є конфіденційність інформації, що передається. У разі виникнення несанкціонованого доступу, БК 1 припиняє будь-яку передачу даних і оповіщає персонал про пошкодження лінії, про характер даного пошкодження та про його віддаленість. Установка проводить тестування лінії з затримкою в 1 мкс, тому у разі несанкціонованого доступу, якщо доступ у кращому випадку тривав 1 мкс, то з оптичного волокна, інформація по якому передається на швидкості 10 Гбіт/с, буде зчитано 10 кбіт корисної інформації, що становить допустимі значення.

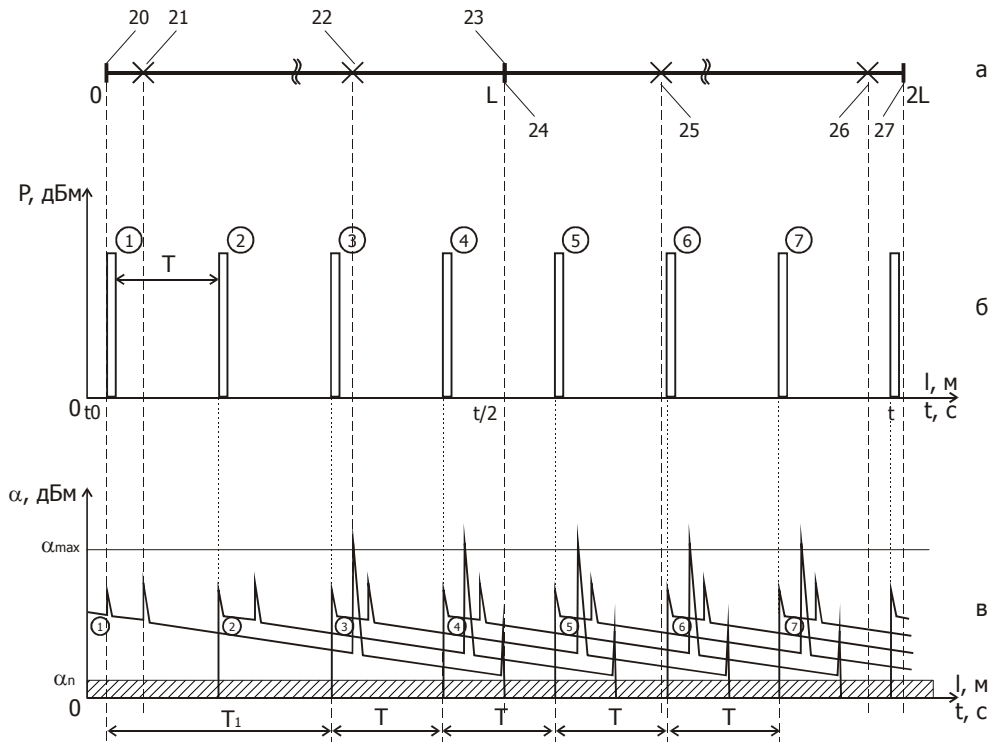


Рис. 5. Модель роботи системи контролю оптичного кабелю

а – тестоване оптичне волокно з подвійною довжиною (прямий та зворотній напрям поширення оптичного пучка);
 б – графік залежності імпульсів, що подаються ЛД 5 у оптичне волокно від часу їх посилання;
 в – графік відображених імпульсів, що надходять на ЛФ 6 впродовж тестування лінії системою контролю оптичного кабелю.

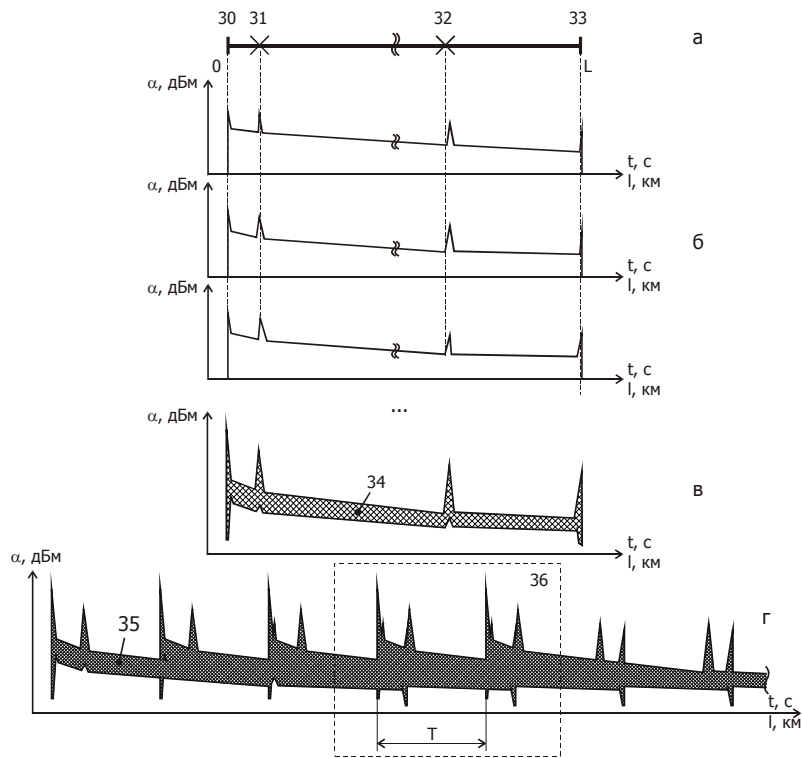


Рис. 6. Приклад визначення діапазону допустимих значень рефлектограми:

а – контрольоване оптичне волокно довжиною L ; б – рефлектограми, отримані при тестуванні контрольованого оптичного волокна; в – діапазон даних рефлектограм з урахуванням періодичності T посилання тестуючих ліній імпульсів.

Список літератури

1. Иванов А.Б. Волоконная Оптика: компоненты, системы передачи, измерения. — М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999, 671с.
2. US Patent. 5,745,437 Method and apparatus for coherent burst ranging. Wachter , et al. (April 28, 1998).
3. US Patent. 5,859,716 Self-stimulation signal detection in an optical transmission system. O'Sullivan , et al. (January 12, 1999).
4. <http://www.adp.ru/KATALOG/EXFO/>
5. <http://www.sygus.ru/>
6. Р.Р.Убайдулаев Волоконно-оптические сети. — М.: Эко-Трендз, 2001, 267с.
7. US Patent. 4,746,184 Light coupler for optical reflectometry. Gang. (May 24, 1988).

Лисенко Геннадій Леонідович, заступник проректора з навчальної та науково-методичної роботи Вінницького національного технічного університету, к.т.н., доцент кафедри ЛОТ, 8(0432)447678
E-Mail: lgl@vstu.vinnica.ua

Просоловський Руслан Васильович, студент гр. ЛОТ-01 кафедри Лазерної та оптоелектронної техніки ІнАЕКСУ Вінницького національного технічного університету.