

УДК 621.396

Манько О.О., к.т.н. (Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій)

## ПРИНЦИПИ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ РЕФЛЕКТОГРАМ ТА ШУМОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОПТИЧНИХ ТРАКТІВ

**Манько О.О. Принципи числового моделювання оптичних рефлектограм та шумових властивостей оптичних трактів.** В роботі розглянуто принципи числового моделювання оптичних рефлектограм на базі статистичних методів розрахунку. Запропоновано методи розрахунку шумових властивостей оптичних трактів. Визначено співвідношення сигнал-шум в лінії в залежності від параметрів оптичного волокна.

**Ключові слова:** ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, РЕФЛЕКТОГРАМА, ШУМОВІ ВЛАСТИВОСТІ, ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ

**Манько А.А. Принципы численного моделирования оптических рефлектограмм и шумовых свойств оптических трактов.** В работе рассмотрены принципы численного моделирования оптических рефлектограмм на базе статистических методов расчета. Предложены методы расчета шумовых свойств оптических трактов. Определено соотношение сигнал-шум в линии в зависимости от параметров оптического волокна.

**Ключевые слова:** ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО, РЕФЛЕКТОГРАММА, ШУМОВЫЕ СВОЙСТВА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

**Manko O.O. Principles of numerical modeling of optical reflectograms and noise properties of optical tracts.** In the work considered the principles of numerical modeling of optical reflection based on statistical methods of calculation. The methods for calculating the noise properties of optical tracts are proposed. The ratio of the signal-to-noise in the line, depending on the parameters of the optical fiber is specified.

**Keywords:** OPTICAL FIBER, OPTICAL REFLECTION, NOISE PROPERTIES, NUMERICAL MODELING, STATISTICAL METHODS

**Вступ.** Необхідність оперативного контролю стану ВОЛЗ в процесі експлуатації вимагає створення ефективних систем контролю ліній передачі і, як наслідок, вирішення цілого ряду складних проблем, зокрема, знаходження шляхів моделювання і методів рефлектометричних вимірювань ВОЛЗ великої протяжності, що мають оптичні підсилювачі, для дослідження їх в лабораторних умовах, а також розробки нових методів тестування волоконно-оптичних мереж.

Рефлектометричні методи вимірювання ВОЛЗ вже зараз дозволяють вирішувати цілий ряд важливих проблем, що стосуються втрат у лінійному тракті і його елементах, визначення відстані до місця пошкодження оптичного волокна, вимірювання затухання. Сучасні оптичні рефлектометри є одними з найбільш потужних апаратних засобів для інсталяції і технічного обслуговування ліній передачі зі структурою "точка-точка". Вони забезпечують можливість проведення вимірювань тільки з одного кінця ВОК, визначають пошкодження і параметри компонентів ВОЛЗ по всій довжині волокна, надають наглядну інформацію про стан ліній зв'язку. Проте іноді навіть підготовлений, досвідчений оператор оптичного рефлектометра може зустрітися з труднощами при розшифровці рефлектограм волокна. Бувають випадки, коли майже неможливо точно визначити вид події на рефлектограмі чи втрати за результатами одного вимірювання. В деяких надзвичайних випадках, щоб одержати необхідні результати, необхідно протестувати волокно з іншими параметрами настроювання або з обох кінців. Під час вимірювань можна спостерігати підсилення сигналу на невідбиваючій події, появу помилкових сигналів внаслідок багаторазових відбиттів, наявність невідбиваючих обривів. Тому важливого практичного значення набуває питання аналізу оптичних рефлектограм для адекватної інтерпретації їх результатів.

З цією метою в даній роботі було проведено створення математичної моделі волоконного світловоду з урахуванням втрат на поглинання і розсіювання, виконано розробку методики розрахунку розповсюдження квантів у волокні методом Монте-Карло, числове моделювання рефлектограм з локальними і розподіленими неоднорідностями і відрізками волокна з різними параметрами.

**Принципи побудови програми для проведення числового моделювання рефлектограм.** Принципи побудови програми для числового моделювання рефлектограм базуються на випадковому характері розсіювання або поглинання світлових квантів в

матеріалі волоконного світловоду, тобто цей процес можна моделювати за допомогою методу Монте-Карло [1, 2]. В цьому випадку коефіцієнт релеевського розсіювання або коефіцієнт поглинання відрізка волокна може бути визначений як усереднений параметр на базі ймовірності розсіяння або поглинання кванту при проходженні цього відрізка. Таким чином, знаючи погонне загасання оптичного волокна та погонний коефіцієнт релеевського розсіяння, можна визначити ймовірність розсіяння або поглинання світлового кванту на відрізка оптичного волокна.

**Числове моделювання рефлектограм.** При моделюванні рефлектограм методом Монте-Карло враховані два види неоднородностей волоконного світловоду (локальні і розподілені) та два види втрат - втрати за рахунок релеевського розсіювання і втрати за рахунок поглинання [3]. Втрати на нелінійне перетворення не враховувались. Модель для розрахунків розроблена з урахуванням принципу дії оптичного рефлектометра.

При розрахунках відрізок волоконного світловоду було розділено на ряд елементарних відрізків, у межах яких задавалася ймовірність поглинання або розсіювання квантів під час проходження даного відрізка. Дальній кінець відрізка відповідно до моделі розрахунків був підключений до узгодженого навантаження. Світловий імпульс на вході оптичного волокна представлений у вигляді  $\delta$ -імпульса, що складається з набору квантів. Розрахунки шляху проходження вздовж волоконного світловоду проводились для кожного із них, а потім здійснювалась статистична обробка результатів.

Для визначення загасання на обраному відрізка волоконного світловоду проводився розрахунок загального числа квантів на вході дальнього кінця світловоду. При цьому значення загасання відрізка оптичного волокна  $\alpha$  було визначено згідно зі співвідношенням

$$\alpha = 10 \lg \left( \frac{N_{IN}}{N_{OUT}} \right), \quad (1)$$

де  $N_{IN}$  – число квантів на вході оптичного волокна;  $N_{OUT}$  – число квантів, що досягли його виходу.

**Моделювання однорідного відрізка оптичного волокна.** Оптичний рефлектометр, який дозволяє вимірювати коефіцієнт відбиття методом поєднання прямого і відбитого випробовуючих сигналів, оснований на використанні явища зворотнього розсіювання світла, що виникає в оптичному волокну. Частина світла, що надходить, при проходженні вздовж волокна буде відбита назад. Відбите світло досягне вхідного кінця волокна. Відбиття є результатом релеевського розсіювання і френелівського відбиття. Релеевське розсіювання – це розсіювання, викликане зміною показника заломлення через флуктуації густини і складу матеріалу серцевини волокна, що з'являються при виготовленні волокон. Можна вважати, що в якісному волокну розсіяне світло рівномірно розподіляється по всій довжині волокна. Відбиття Френеля виникає через зміну індексу відбиття в місцях з'єднання, зрощування і на кінцях волокна. Частина світла, розсіяного в результаті релеевського розсіювання і відбиття Френеля, досягає вхідного кінця волокна як зворотньо-відбите світло.

На рис. 1 представлені рефлектограми однорідних оптичних волокон з різними значеннями затухання поглинання  $\alpha_a$  і розсіювання  $\alpha_r$ .

Як видно з рефлектограми, повне загасання волоконного світловоду  $\alpha_s$ , визначене згідно з даними статистичної обробки результатів зворотнього розсіювання, приблизно в 2 рази вище загасання  $\alpha$ , визначеного із співвідношення (1). Це пояснюється подвійним проходженням одного і того ж відрізка розсіяними світловими квантами і подвійними втратами, викликаними цією причиною.

#### **Моделювання відрізків ліній з локальними неоднородностями**

Релеевське розсіювання утворюється через різні густину і склад ОВ, які є природними продуктами при існуючій технології виробництва. В ідеалі чисте скло має однорідну молекулярну структуру, отже, однакову густину по всій довжині. В існуючому склі густина

не повністю однакова, внаслідок чого з'являється розсіювання. Розсіювання зворотно пропорційне четвертій степені довжини хвилі ( $1/\lambda^4$ ), тому воно швидко зменшується на великих довжинах хвиль. Розсіювання представляє собою нижню теоретичну межу загасання - 2,5 дБ на 820 нм, 0,24 дБ на 1300 нм та 0,012 дБ на 1550 нм.

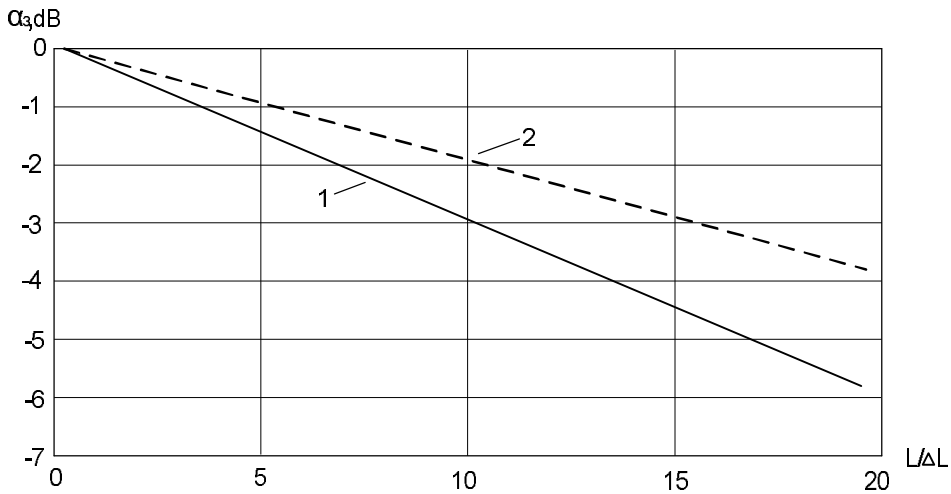


Рис. 1. Рефлектограма однорідних відрізків волокна:  
**1** –  $\alpha_a=1,0$  дБ,  $\alpha_R=2,0$  дБ,  $\alpha_\Sigma=3,0$  дБ; **2** –  $\alpha_a=1,0$  дБ,  $\alpha_R=0,9$  дБ,  $\alpha_\Sigma=1,9$  дБ

Поглинання – процес, при якому домішки у волокні поглинають оптичну енергію і розсіюють невелику кількість тепла. Світло втрачає інтенсивність. Ділянки ОВ з великими втратами утворюються за наявності вологи, де гідроксильні молекули поглинають світло у великих кількостях. До інших домішок, які є причиною поглинання, відносяться іони заліза, міді, кобальта, ванадіума і хрому. Щоб підтримувати низькі втрати, виробники ОВ повинні підтримувати кількість цих іонів менше однієї частини на мільярд. Нові технології виробництва, включаючи виробництво волокна в надчистих умовах, дозволяють контролювати кількість домішок і зменшити поглинання в порівнянні з тим, що було декілька років тому. На рис. 2 представлена рефлектограма ОВ, що містять локальні неоднорідності з рівнем загасання  $\alpha$ . Як видно з кривих, рівень загасання локальних неоднорідностей, визначений методом зворотнього розсіювання, також приблизно в 2 рази перевищує заданий. Аналогічні висновки можна зробити про повне загасання відрізка оптичного волокна.

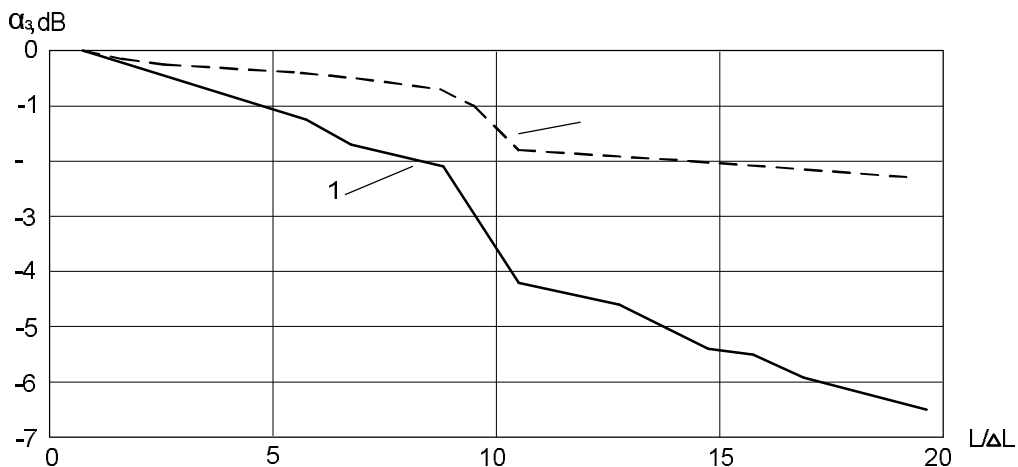


Рис.2. Рефлектограма відрізків ОВ, що містять локальну неоднорідність;  
**1** –  $\alpha_a=2,0$  дБ,  $\alpha_R=0,5$  дБ,  $\alpha_l=1,0$  дБ,  $\alpha_\Sigma=3,4$  дБ; **2** –  $\alpha_a=0,5$  дБ,  $\alpha_R=0,25$  дБ,  $\alpha_l=0,5$  дБ,  $\alpha_\Sigma=1,22$  дБ

На рис.3 приведена рефлектограма оптичного волокна, визначена для випадку відбиваючої локальної неоднородності всередині оптичного волокна.

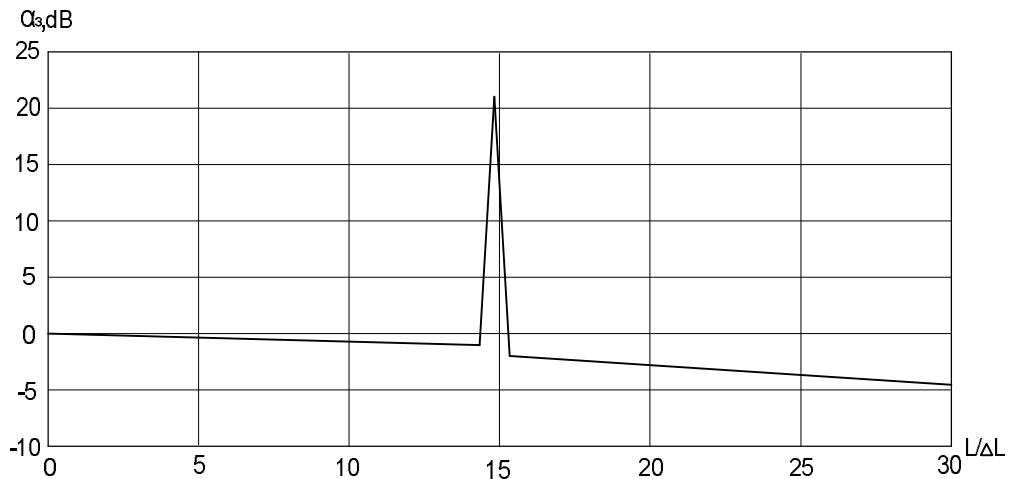


Рис.3. Рефлектограма відрізків оптичного волокна, що містить локальну відбиваючу неоднорідність

Рівень відбиття був визначений отриманою величиною загасання сигналу після проходження місця неоднородності – ця величина дорівнює 1,0 дБ в обох напрямках (прямому і зворотньому); рівень сигналу, розсіяного у зворотньому напрямку, рівний +20,4 дБ. Такий результат пояснюється тим, що рівень сигналу, розсіяного у зворотньому напрямку, для ближнього відрізка волокна використовувався як нульовий рівень для розрахункового сигналу. Релеєвське розсіювання характеризується цим рівнем в існуючому волокні.

**Моделювання відрізків ліній з розподіленими неоднорідностями.** На рис. 4 приведені результати розрахунків оптичного волокна, яке містить розподілену неоднорідність, представлену відрізком волокна (відрізок 2) з меншим коефіцієнтом загасання. Ділянки 1 і 3 мають однаковий коефіцієнт загасання. Як показують діаграми, результати дозволяють однаково визначати коефіцієнт загасання для кожного відрізка, що містить розподілену неоднорідність.

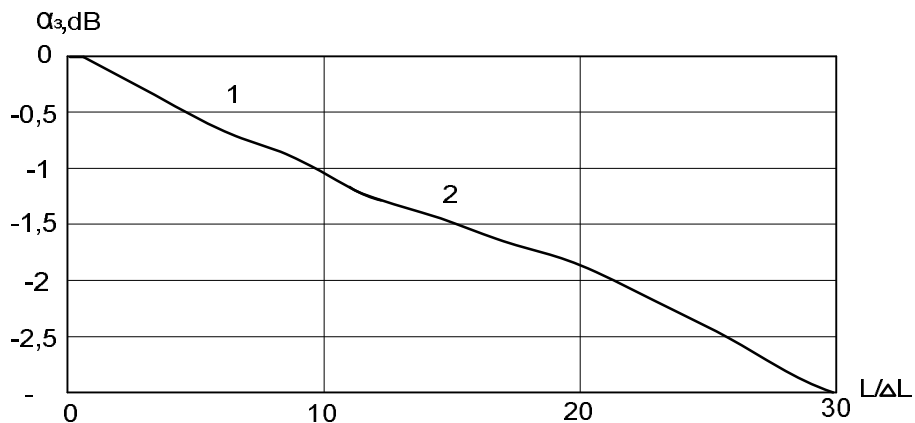


Рис. 4. Рефлектограма ділянки оптичного волокна;  $\alpha_1 = \alpha_3 = 2,0$  дБ/Л,  $\alpha_2 = 1,0$  дБ/Л

**Моделювання співвідношення сигнал-шум волоконно-оптичної лінії.** З урахуванням того, що розсіювання квантів а оптичному середовищі з флуктуаціями показника заломлення носить ймовірностний характер в розрахунках були використані принципи статистичного моделювання, в тому числі метод Монте-Карло [1].

При цьому розраховувалась ймовірностним методом траекторія руху кожного кванту аж до його розсіювання, поглинання або виходу за межі волокна. Після чого проводилась операція усереднення.

Для квантів, що повністю пройшли оптичне волокно і вийшли з нього на дальньому кінці проводилась операція по визначенню часу з метою селекції квантів, що складають інформаційний сигнал, і шумових квантів. Розрахунки проводились для різних співвідношень між втратами на поглинання і розсіювання, а також для різних значень повного загасання в оптичній лінії [3].

На рис.5 представлені результати розрахунку співвідношень потужності сигнал/шум на виході волоконно-оптичної лінії з інтегральним значення загасання в лінії  $\alpha_{int}=20$ дБ. Розрахунок проводився для різних співвідношень загасань розсіювання  $\alpha_r$ , і поглинання  $\alpha_l$ .

Як видно із рисунка, зі збільшенням частки втрат на розсіювання в загальних втратах в лінії зменшується співвідношення сигнал/шум на виході лінії, що може вплинути на ріст коефіцієнта помилок.

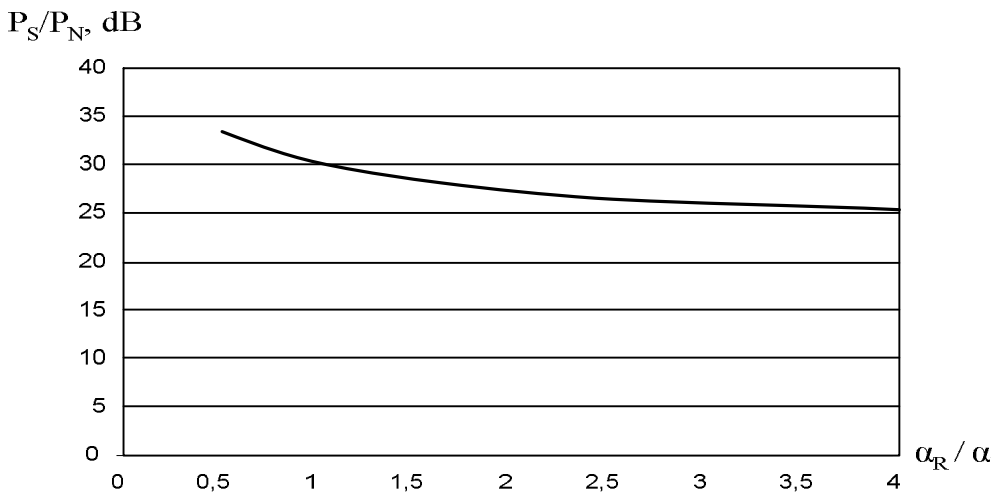


Рис. 5. Залежність співвідношення сигнал/шум від співвідношення складових втрат коефіцієнта загасання при загальних втратах в лінії  $\alpha_{int}=20$ дБ

На рис. 6 представлені залежності співвідношення сигнал/шум на виході оптичної лінії від інтегральних втрат в лінії при різних значеннях співвідношення втрат розсіювання і поглинання в лінії. Штрихова крива характеризує хід залежності у випадку, якщо  $\alpha_r / \alpha_l = 1/2$ , суцільна крива – для співвідношення  $\alpha_r / \alpha_l = 2/1$ .

Із рисунка видно, що із зростанням інтегральних втрат в лінії зменшується співвідношення сигнал/завада. При цьому для більших значеннях співвідношення  $\alpha_r / \alpha_l$  це співвідношення менше при інших рівних умовах.

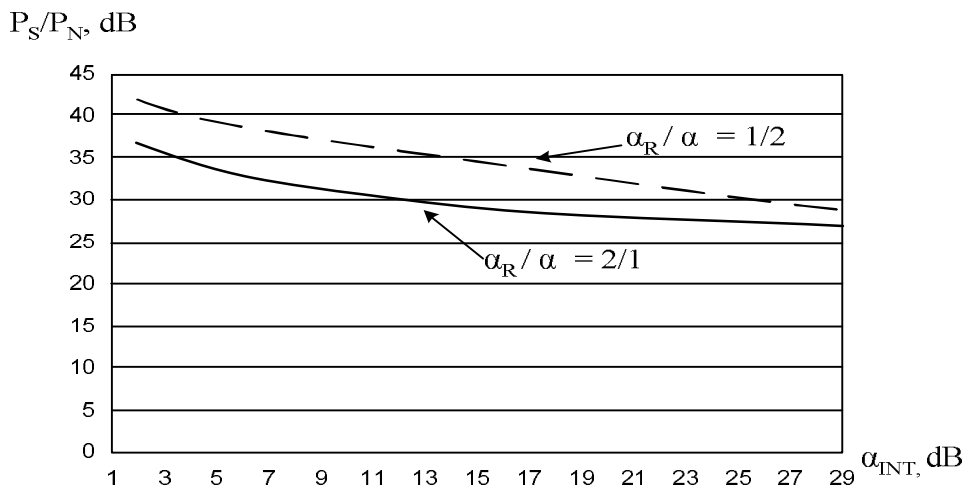


Рис. 6. Залежність співвідношення сигнал/завада від інтегральних втрат в лінії

**Висновки** Таким чином, явище релеєвського розсіювання призводить до появи потоку шумових квантів, який рухається в напрямку інформаційного сигналу. Враховуючи той факт, що коефіцієнт помилок оптичної лінії зв'язку значною мірою залежить від співвідношення сигнал/шум на вході оптичного приймача, в роботі було досліджено залежність співвідношення сигнал/шум від параметрів втрат оптичного волокна. На даний час ведуться роботи по покращенню технологій виготовлення оптичного волокна. При цьому зменшується загасання в волокні за рахунок зменшення частки втрат на поглинання в загальних втратах. Це призводить до збільшення частки в загальному загасанні втрат на розсіювання. Так, наприклад, при досягнутих значеннях загасання на рівні 0,21 дБ/км на довжині хвилі 1,55мкм частка втрат на розсіювання складає згідно (1), 0,14дБ/км. Тобто справедливе співвідношення  $\alpha_r / \alpha_l = 2/1$ . Співвідношення сигнал/шум ( $P_s / P_n$ ) в оптичній лінії, при інших рівних умовах, при цьому зменшується, і це необхідно враховувати при проектуванні нових ліній. Оскільки зменшення співвідношення сигнал/шум може призвести до погіршення якості передачі.

### Література

1. Горинштейн А.М. Практика решения инженерных задач на ЭВМ / А.М. Горинштейн. – М.: Радио и связь, 1984. – 232 с.
2. Манько В.А. Статистический метод моделирования тонкопленочных оптических фильтров / В.А. Манько // Радиотехника : всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2006. – Вып.144. – С. 193-197.
3. 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.