

УДК 621.372.8

В.Б. Дудикевич<sup>1</sup>, І.Р. Опірський<sup>1</sup>, О.Р. Глушак<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний університет «Львівська Політехніка», Львів<sup>2</sup>Західно-регіональний навчально-науковий центр захисту інформації, Львів

## МОДЕЛЬ ВПЛИВІВ ФІЗИЧНИХ, ТЕХНІЧНИХ І НСД ФАКТОРІВ НА КОНТРОЛЬ ЗАХИЩЕНОСТІ І ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВОЛЗ

В роботі представляється сумарна модель впливів фізичних, технічних складових та дій з несанкціонованого доступу на захищеність і працездатність волоконно-оптичних ліній зв'язку. В основу моделі покладені математичні співвідношення усіх факторів впливу на захист інформації в оптичному волокні з точки зору фізичних характеристик та технологічного процесу передачі інформації, а також з дій які може проводити порушник для знімання інформації з оптичного волокна. На підставі моделі можна приступати до дослідження методів несанкціонованого доступу і на основі нього розробляти системи захисту інформації.

**Ключові слова:** оптико-волокно, дисперсія, втрати сигналу в оптичному волокні, несанкціонований доступ, загальне загасання, мікро(макро) - вигини, модель впливу.

### Вступ

В результаті аналізу літератури [1 – 3] параметрів впливу на контроль захищеності сигналу у ВОЛЗ при НСД модель втрат має містити наступні складові:

- загасання ОВ, обумовлене фізичними особливостями ОВ, яке відповідно складається з:

- втрат на поглинання;
- втрат на розсіювання;
- втрат кабелю.
- загасання ОВ, обумовлене навмисними діями на ОВ потенційного порушника –  $\alpha_{НСД}$  (НСД).
- втрати з фізичною дією на ОК;
- втрати без фізичної дією на ОК.
- загальне загасання ВОЛЗ, обумовлене технічними втратами.

### Результати досліджень

Втрати на поглинання ( $\alpha_{погл}$ ) і на розсіювання ( $\alpha_{роз}$ ) разом визначаються як власні втрати ( $\alpha_{влас}$ ), а кабельні втрати ( $\alpha_{каб}$ ) і втрати, зв'язані з несанкціонованим доступом (НСД) через їх фізичну природу можна назвати додатковим втратами ( $\alpha_{дод}$ ).

Таким чином, повне загасання в ОВ з урахуванням НСД можна представити в такому вигляді:

$$\alpha = \alpha_{влас} + \alpha_{дод} = \alpha_{погл} + \alpha_{роз} + \alpha_{каб} + \alpha_{НСД}. \quad (1)$$

Власне внутрішнє поглинання матеріалу є втратами, викликаними тільки чистим кремнієм, тоді як зовнішні втрати – це втрати, викликані наявністю домішок в ОВ. У кожному конкретному матеріалі, завдяки його молекулярній структурі, існує поглинання сигналу визначених довжин хвиль.

Втрати на поглинання ( $\alpha_{погл}$ ) складаються з втрат в кварцовому склі, які визначаються, як ультрафіолетове і інфрачервоне поглинання, а також з

втрат, пов'язаних з поглинанням оптичної енергії на домішках ( $\alpha_{доміш}$ ). Втрати в кварцовому склі викликаються власним поглинанням атомами оптичного матеріалу – кварцу ( $\alpha_{кв.скл}$ ) і поглинанням атомними дефектами у складі скла ( $\alpha_{дефект}$ ):

$$\alpha_{погл} = \alpha_{кв.скл} + \alpha_{доміш} + \alpha_{дефект}. \quad (2)$$

Поглинання на домішках (забрудненнях)  $\alpha_{доміш}$  виникає переважно від іонів металу і від ОН (водяних) іонів. Домішки металу обумовлюють втрати від 1 до 10 дБ/км. Зовнішні втрати поглинання привносять домішки ОВ [3]. Сучасні технології виробництва зменшили внесок від цих втрат до дуже низького рівня. До цієї групи втрат належать наступні домішки: залізо, мідь, нікель, магній і хром, які створюють істотні джерела поглинання у вікнах прозорості. У сучасному процесі виробництва вміст цих металів був понижений до значень менших однієї міліярдної частки, і, отже, вони роблять дуже малий внесок до загальних зовнішніх втрат поглинання. На відміну від них, втрати за рахунок наявності залишкових гідроксильних іонів (ОН) створюють лінію поглинання 2730 нм, її гармоніки і комбінаційні складові становлять 1390, 1240 і 950 нм, всі вони роблять істотний внесок до загальних зовнішніх втрат поглинання. Ці втрати викликані наявністю води у волокні, що залишилася в процесі виробництва. Рівень іонів ОН в ОВ повинен бути понижений до значень менших однієї стомільйонної частки, для того, щоб підтримувати втрати волокна на належному рівні. Навіть така мала концентрація ОН, як одна мільйонна, здатна викликати втрати 50 дБ в районі «водяного піку» – 1390 нм.

Відповідно [3, 4] у загальному виді втрати на розсіювання визначаються наступним виразом

$$\alpha_{роз} = \alpha_{роз} + \alpha_{мі} + \alpha_{\Sigma виг} + \alpha_{\Sigma стик} + \alpha_{скр} + \alpha_{зрбн}. \quad (3)$$

де  $\alpha_{рад}$  – втрати, обумовлені релеївським розсіюванням. Причиною релеївського розсіювання є те, що атоми в склі ( $SiO_2$ ) мають випадковий просторовий розподіл, і локальні зміни в складі приводять до локальної зміни індексу заломлення, що і викликає розсіювання оптичної енергії. Хвилі малої довжини більше розсіюються і мають вищі втрати, ніж хвилі з більшою довжиною. Цей тип втрат є внутрішнім і викликається флуктуаціями миттєвої густини і варіаціями молекул за рахунок недосконалості внутрішньої структури волокна: повітряних бульбашок, неоднорідностей і тріщин, або недосконалістю направляючого хвилеводу, викликаною загальною нерегулярністю системи «осердя-оболонка» [3]. Існує точка на кривій поглинання в районі 1550 нм, де поглинання інфрачервоних і ультрафіолетових хвостів мінімальні. Навколо цієї точки релеївське розсіювання є головною складовою загальних втрат. Релеївське розсіювання обернено пропорційне довжині хвилі. Із зростанням довжини хвилі розсіювання зменшується. На довжинах хвиль вище 1600 нм інфрачервоне поглинання стає домінуючим.

$\alpha_{мі}$  – втрати, обумовлені Мі-розсіюванням. Даний тип лінійного розсіювання виникає на іонах домішки, розмір яких є сумірним з довжиною хвилі. У високоякісних ОВ такі втрати відсутні.

$\alpha_{\Sigma виг}$  – сумарні втрати, обумовлені мікро ( $\alpha_{мікро}$ ) і макро ( $\alpha_{макро}$ ) вигинами ОВ, що визначаються виразом:

$$\alpha_{\Sigma виг} = \alpha_{мікро} + \alpha_{макро}. \quad (4)$$

Мікрівигини виникають в процесі виготовлення ОВ і при формуванні пластикового конверту в процесі виготовлення оптичного кабелю. Макровигини виникають в процесі прокладки оптичного кабелю і є функцією від радіусу вигину ОВ. Тоді втрати на макровигинах можна представити виразом:

$$\alpha_{макро} = 2\alpha_{н.л} + \alpha_{з.д.} + \alpha_{н.м.}, \quad (5)$$

де  $\alpha_{н.л}$  – втрати, обумовлені переходами від прямої ділянки світлопроводу до зігнутої, а також від зігнутого до прямої ділянки;  $\alpha_{з.д.}$  – втрати на зігнутій ділянці ОВ;  $\alpha_{н.м.}$  – втрати, обумовлені наявністю мікротріщин.

$\alpha_{\Sigma стик}$  – сумарні втрати, обумовлені стиковкою ОВ і визначувані внутрішніми ( $\alpha_{стик}$ ) і зовнішніми ( $\alpha_{зовн}$ ) втратами згідно виразу:

$$\alpha_{\Sigma стик} = \alpha_{стик} + \alpha_{зовн}. \quad (6)$$

Внутрішні втрати визначаються важко контрольованими чинниками – парною варіацією діаметрів осердя, показниками заломлення, числовими апертурами, ексцентриситетів «осердя-оболонка», концентричності осердь у волокнах, що сполучаються. Можна отримати випадкові зміни перерахо-

ваних чинників, оскільки вони залежать не від конструкції з'єднувача, а від технології виробництва ОВ. Геометрія скла описує кінцеві розмірні характеристики ОВ. Геометрія (і це вже давно зрозуміли) є головним чинником, що визначає втрати в зростку і відсоток вдало виконаних зростків. Головна мета виробника ОВ отримати точнішу геометрію волокна. Волокно, отримане з дотриманням жорсткіших умов на його геометрію, легше і швидше зростити і при цьому бути упевненим у високій якості зростка і передбачуваності отриманих характеристик.

Три параметри роблять найбільший вплив на характеристики зростка: концентричність перетинів осердя і оболонки, допуск на діаметр оболонки і власний вигин волокна.

Концентричність осердя і оболонки дає зрозуміти наскільки добре осердя волокна центрується в склі оболонки. Поліпшення цієї характеристики при виробництві волокна зменшує шанс неточного розташування осердя, що сприяє отриманню зростків з меншими втратами.

Зовнішній діаметр оболонки визначає розмір волокна. Чим жорсткішою є специфікація діаметру оболонки, тим менше шансів, що партії волокна матимуть різні діаметри. Допуск на діаметр оболонки особливо важливий, коли використовуються наконечники, що калібруються, або здійснюється зчленування роз'ємних з'єднувачів в польових умовах. Всі ці з'єднувачі розраховані за діаметром оболонки в місці вирівнювання волокон для з'єднання.

Власний вигин волокна вказує на значення кривизни волокна уздовж деякої довжини волокна. Велике значення власного вигину може привести до дуже великого зсуву волокна при зварюванні або вирівнюванні кінця волокна в V-подібній канавці, що може привести до зростків з великими втратами.

Причинами зовнішніх втрат є недосконалість конструкції з'єднувача, а також процесу складання ОВ і з'єднувача.

Зовнішні втрати залежать від механічного нестикування (кутовий, радіальний і осьовий зсув), шорсткості на торці осердя, чистоти ділянки і наявності зазору між торцями з'єднаних ОВ. Наявність зазору приводить до появи френелівського відбиття через утворення середовища з показником заломлення, відмінним від показника заломлення ОВ[5]:

$$\alpha_{зовн} = \alpha_{кут} + \alpha_{рад} + \alpha_{ось} + \alpha_{обр}, \quad (7)$$

де  $\alpha_{кут}$  – втрати, викликані кутовим зсувом світлопроводів;  $\alpha_{рад}$  – втрати, викликані радіальним зсувом осей ОВ;  $\alpha_{ось}$  – втрати, викликані осьовим зсувом торців ОВ;  $\alpha_{обр}$  – втрати, обумовлені зворотним френелівським відбиттям.

З врахуванням викладеного, вираз (7) прийме наступний вигляд:

$$\alpha_{\Sigma \text{стик}} = \alpha_{\text{екун}} + \alpha_{\text{кун}} + \alpha_{\text{рад}} + \alpha_{\text{осць}} + \alpha_{\text{обр}}. \quad (8)$$

Сумарні втрати, обумовлені стикуванням ОВ, також називають втратами, що вносяться.  $\alpha_{\text{екр}}$  – втрати, обумовлені вимушеним комбінаційним розсіюванням.  $\alpha_{\text{ербм}}$  – втрати, обумовлені вимушеним комбінаційним розсіюванням. – втрати, обумовлені вимушеним розсіюванням Мандельштама-Бріллюена.

Отже підсумовуючи рівняння 2-8, на основі рівняння 1 ми отримуємо загальний математичний вираз повного загасання оптичного сигналу у ВОЛЗ з урахуванням НСД:

$$\alpha = \alpha_{\text{осов}} + \alpha_{\text{дод}} = \alpha_{\text{з.о.м}} + \alpha_{\text{доміш}} + \alpha_{\text{дефек}} + \alpha_{\text{рел}} + \alpha_{\text{ні}} + \alpha_{\text{мікро}} + 2\alpha_{\text{н.л}} + \alpha_{\text{з.д.}} + \alpha_{\text{н.м.}} + \alpha_{\text{екун}} + \alpha_{\text{кун}} + \alpha_{\text{рад}} + \alpha_{\text{осць}} + \alpha_{\text{обр}} + \alpha_{\text{екр}} + \alpha_{\text{ербм}} + \alpha_{\text{хаб}} + \alpha_{\text{нсд}}. \quad (9)$$

Відповідно вираз (9) без урахування НСД є виразом загасання оптичного сигналу (ОС) у ВОЛЗ, обумовленим фізичними особливостями оптичного волокна:

$$\alpha = \alpha_{\text{осов}} + \alpha_{\text{дод}} = \alpha_{\text{з.о.м}} + \alpha_{\text{доміш}} + \alpha_{\text{дефек}} + \alpha_{\text{рел}} + \alpha_{\text{ні}} + \alpha_{\text{мікро}} + 2\alpha_{\text{н.л}} + \alpha_{\text{з.д.}} + \alpha_{\text{н.м.}} + \alpha_{\text{екун}} + \alpha_{\text{кун}} + \alpha_{\text{рад}} + \alpha_{\text{осць}} + \alpha_{\text{обр}} + \alpha_{\text{екр}} + \alpha_{\text{ербм}} + \alpha_{\text{хаб}}. \quad (10)$$

Як ми вже зазначали, загасання ОС, обумовлене навмисними діями на ОВ потенційного порушника має містити в собі втрати пов'язані з фізичними діями на оптичне волокно і втрати без фізичної дії на ОВ (11).

$$\alpha_{\text{нсд}} = \alpha_{\text{ф.д.}} + \alpha_{\text{б.ф.д.}}, \quad (11)$$

де  $\alpha_{\text{ф.д.}}$  – втрати викликані фізичною дією на ОК,  $\alpha_{\text{б.ф.д.}}$  – втрати викликані без фізичної дії на ОК.

$$\alpha_{\text{ф.д.}} = \alpha_{\text{т.л.нсд}} + \alpha_{\text{с.л.нсд}} + \alpha_{\text{ск.п.нсд}} + \alpha_{\text{т.д.нсд}} + \alpha_{\Sigma \text{виг.нсд}}, \quad (12)$$

де  $\alpha_{\text{т.л.нсд}}$  – втрати створені мікро і макротріщинами при врізанні пристрою НСД у кабель;  $\alpha_{\text{с.л.нсд}}$  – втрати викликані спайкою ОК у місцях підключення пристрою НСД або в місцях спроби зняття інформації;  $\alpha_{\text{ск.п.нсд}}$  втрати викликані сколюванням ОК при НСД;  $\alpha_{\text{т.д.нсд}}$  – втрати викликані термічною деформацією ОК для підключення пристроїв НСД;  $\alpha_{\Sigma \text{виг.нсд}}$  – втрати викликані вигинами ОК для НСД.

Мікро і макротріщини створюються в результаті підключення пристрою НСД до ОК, ці дії переважно несуть за собою деструктивну дію на ОК яка з часом приводить до повного обриву лінії.

Сумарні втрати створені мікро і макротріщинами при НСД:

$$\alpha_{\text{т.л.нсд}} = \alpha_{\text{міт}} + \alpha_{\text{мат}}, \quad (13)$$

де  $\alpha_{\text{міт}}$  – втрати викликані мікротріщинами при НСД,

$\alpha_{\text{мат}}$  – втрати викликані макротріщинами при НСД.

Втрати, викликані вигинами ОК є відповідними, що і при загальному виразі фізичного загасання але складаються відповідно вже з втрат НСД при мікро  $\alpha_{\text{нів}}$  і макровигинах  $\alpha_{\text{нав}}$ . Ці втрати необхідні для збільшення моди сигналу за межі оболонки ОК з метою перехоплення ОС пристроєм НСД. Відповідно пристрій НСД має мати досить велику чутливість.

$$\alpha_{\Sigma \text{виг.нсд}} = \alpha_{\text{нав}} + \alpha_{\text{нів}}. \quad (14)$$

Втрати викликані НСД без фізичної дії на ОК можна представити таким чином:

$$\alpha_{\text{б.ф.д.}} = \alpha_{\text{п.в.}} + \alpha_{\text{з.о.}} + \alpha_{\text{і.в.}}, \quad (15)$$

де  $\alpha_{\text{п.в.}}$  – втрати, викликані підключення відвіглювачів чи розгалужувачів до пристроїв передачі ОС,  $\alpha_{\text{з.о.}}$  – втрати викликані зняттям захисної оболонки ОК,  $\alpha_{\text{і.в.}}$  – загасання викликані іонізуючим впливом на кабель з метою НСД.

Отже загальне рівняння втрат, викликаних пристроями НСД при врахуванні (13) – (15), можна представити таким виразом:

$$\alpha_{\text{нсд}} = \alpha_{\text{міт}} + \alpha_{\text{мат}} + \alpha_{\text{с.л.нсд}} + \alpha_{\text{ск.п.нсд}} + \alpha_{\text{т.д.нсд}} + \alpha_{\text{нав}} + \alpha_{\text{нів}} + \alpha_{\text{п.в.}} + \alpha_{\text{з.о.}} + \alpha_{\text{і.в.}}. \quad (16)$$

Для забезпечення працездатності ВОЛЗ необхідно, щоб для повного загасання  $\alpha_{\text{т}}$  при технологічних втратах сигналу у ВОТ виконувалися наступні умови:

$$\alpha_{\text{т}} = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} - P_{\text{ε}} \text{нр} P_{\text{пр}} \geq P_{\text{пр.мін}}, \alpha_{\text{зрм}} \leq P_{\text{ε}}, \quad (17)$$

де  $P_{\text{пер}}$  – потужність випромінювання оптичного передавача (дБ);  $P_{\text{пр}}$  – потужність на вході фотоприймача (ФП) (дБ);  $P_{\text{пр.мін}}$  – номінальна потужність ФП (дБ);  $P_{\text{ε}}$  – експлуатаційний запас ВОЛЗ (дБ);  $\alpha_{\text{зрм}}$  – градієнт загасання у тракті при зміні температури від 233 до 313 К.

Таким чином, значення втрат потужності  $P_1$  в довільній точці визначається розв'язком системи рівнянь:

$$P_1 = \begin{cases} P_0 e^{-(\alpha_{\text{полл}} + \alpha_{\text{рел}} + \alpha_{\text{ні}} + \alpha_{\Sigma \text{згис}} + \alpha_{\Sigma \text{стик}} + \alpha_{\text{екр}} + \alpha_{\text{врик}} + \alpha_{\text{нсд}})L}, & L > 0; \\ P_0, & L = 0. \end{cases} \quad (18)$$

## Висновки

Проведені розрахунки складають модель (математичну) впливів фізичних, технічних і НСД факторів на контроль захищеності і працездатності ВОЛЗ і її графічне інтерпретація представлена на рис. 1.

На підставі запропонованої вище моделі можна приступати до побудови дослідження методів НСД і на основі нього до розробки системи захисту інформації.



Рис. 1. Графічне представлення моделі впливів фізичних, технічних і НСД факторів на контроль захищеності і працездатності ВОЛЗ

### Список літератури

1. Каток В.Б. Аналіз втрат, що виникають в процесі монтажу оптичних кабелів зв'язку / В.Б. Каток, І.Е. Руденко. – Зв'язок. 1996. – № 2. – С. 19 – 26.
2. The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronic Terms, 6th ed. – New York: IEEE, 1996.
3. Каток В.Б. Прокладка і монтаж оптичних кабелів зв'язку / В.Б. Каток, І.Е. Руденко, А.П. Тарасенко. – К.: ИВЦ МС України, 1993. – 19 с.

4. Laferriere J. Guide to Fiber Optic Measurements / J. Laferriere, R.Taws, S. Wolszczak. – Wavetek, 1998.

Надійшла до редколегії 30.08.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.О. Кузнецов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЙ ФИЗИЧЕСКИХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И НСД ФАКТОРОВ НА КОНТРОЛЬ ЗАЩИЩЕННОСТИ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВОЛС

В.Б. Дудикевич, И.Р. Опирский, О.Р. Глушак

В работе представляется суммарная модель воздействий физических, технических составляющих и действий по несанкционированному доступу на защищенность и работоспособность волоконно-оптических линий связи. В основу модели положены математические соотношения всех факторов влияния на защиту информации в оптическом волокне с точки зрения физических характеристик и технологического процесса передачи информации, а также из действий которые может производить нарушитель для съема информации с оптического волокна.

**Ключевые слова:** оптоволокно, дисперсия, потери сигнала в оптическом волокне, несанкционированный доступ, общее затухание, микро (макро) - изгибы, модель влияния.

### IMPACT MODEL PHYSICAL, TECHNICAL AND TAMPER CONTROL FACTORS ON SECURITY AND PERFORMANCE FIBER OPTIC

V.B. Dudikevich, I.R. Oprisky, O.R. Gluschak

The paper is the total model effects of physical, technical components and actions to the data being compromised on the security and performance of fiber-optic communication lines. Computations are based on mathematical relations of all the factors of influence on the security of information in an optical fiber in terms of physical characteristics and process information, as well as of the actions that may make the offender to reading information from an optical fiber.

**Keywords:** optical fiber, dispersion, loss of signal in optical fiber, unauthorized access, the total attenuation, micro (macro) - curves, the model of influence.