

УДК 681.7.068.4

Сергієнко І.-В. О., аспірант; Омецінська О. Б., к.ф.-м.н.

(Держ. унів.-т телекомунікацій, Київ. +380 (44) 288 14 81, +380 (93)058 51 46. ivan.sergijenko@gmail.com)

ВИМОГИ ДО ОДНОМODOВИХ СВІТЛОВОДІВ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

Сергієнко І.-В. О., Омецінська О. Б. **Вимоги до одномодових світловодів мереж зв'язку.** Наведено класифікацію одномодових волоконних світловодів (оптичних волокон) згідно з новітніми рекомендаціями ІТУ-Т. Подано узгодження з відповідною класифікацією за стандартом ІЕС. Представлено і проаналізовано формули розрахунку електродинамічних характеристик одномодових оптичних волокон. Систематизовано інформацію щодо особливостей різних категорій одномодових оптичних волокон згідно з рекомендаціями ІТУ-Т і чинними стандартами ІЕС. Представлено регламентовані рекомендаціями ІТУ-Т норми на передавальні характеристики одномодових оптичних волокон. За результатами аналізу волокон різних категорій складено зведену порівняльну таблицю оптичних характеристик цих волокон.

Ключові слова: одномодове оптичне волокно, діаметр поля моди, ефективна площа, коефіцієнт згасання, втрати на макрозгинах, коефіцієнт хроматичної дисперсії, дисперсія поляризованої моди

Сергиенко И.-В. А, Омецинская Е. Б. **Требования к одномодовым светловодам сетей связи.** Приведена классификация одномодовых волоконных светловодов (оптических волокон) по новейшим рекомендациям ІТУ-Т. Представлено согласование с соответствующей классификацией по стандарту ІЕС. Представлены и проанализированы формулы расчета электродинамических характеристик одномодовых оптических волокон. Систематизировано інформацію относительно разных категорий одномодовых оптических волокон согласно рекомендациям ІТУ-Т и действующим стандартам ІЕС. Представлены регламентированные рекомендациями ІТУ-Т нормы на передаточные характеристики одномодовых оптических волокон. По результатам анализа волокон различных категорий составлена сводная сравнительная таблица оптических характеристик этих волокон.

Ключевые слова: одномодовое оптическое волокно, диаметр поля моди, эффективная площадь, коэффициент затухания, потери на макроизгибах, коэффициент хроматической дисперсии, дисперсия поляризованной моди

Sergijenko I.-V. O, Ometsinska O. B. **Requirements for single-mode optical fibers of the communications networks.** The article represents the single-mode optical fibers classification according to the latest ІТУ-Т recommendations. It provides a comparison between this classification and the relevant one that is given in the ІЕС standard. It gives the formulas for calculating dynamic characteristics of the single-mode optical fibers and their analysis. Information on the different categories of single-mode optical fibers was brought within a systematic range according to the ІТУ-Т recommendations and operating ІЕС standards. It also provides the single-mode optical fiber transmission value rates regulated by the ІТУ-Т recommendations. Based on the results obtained from the analysis of different categories of fibers it was compiled a comparative table that summarizes the optical fibers characteristics.

Keywords : single mode optical fiber, mode field diameter, effective area, attenuation coefficient, macrobending loss, chromatic dispersion coefficient, polarization mode dispersion

Вступ. У сучасних мережах зв'язку одномодові волоконні світловоди, або одномодові оптичні волокна (ООВ), використовують як напрямне середовище для передавання широкосмугових сигналів на велику відстань. Оскільки волокно виготовлене з діелектричного матеріалу, то воно є несприйнятливим до електромагнітних впливів з боку навколишніх провідникових кабельних систем або електричного устаткування, яке індукуює електромагнітне випромінювання. Волоконно-оптичний кабель (ВОК) фактично не випромінює в радіодіапазоні, тому передану по ньому інформацію неможливо перехопити, не порушивши прийому-передачі. Системи моніторингу (безупинного контролю) цілісності оптичної лінії зв'язку можуть миттєво відключити канал зв'язку, до якого застосовано стороннє втручання, та надіслати сигнал тривоги. Такі системи застосовуються для побудови урядових, банківських та деяких інших ліній зв'язку у спеціальних службах, які потребують підвищених вимог щодо захисту даних.

Оптичні волокна зазнають виробничих випробувань за рекомендованою ІЕС і ІТУ-Т методикою, що включає в себе тести з найважливіших оптичних характеристик, таких як довжина хвилі відсікання одномодового ОВ, коефіцієнт згасання оптичної потужності та втрати потужності на макрозгинах волокна, діаметр поля моди, характеристики хроматичної

дисперсії, ефективна площа. Процеси створення нових і модернізації наявних волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) супроводжуються підвищенням вимог до передавальних характеристик ООВ, які потребують систематичного перегляду.

Передавальні характеристики ООВ. Як відомо, ОВ має поперечний переріз круглої форми і складається з двох коаксіальних шарів діелектрика: у центрі розташовується серцевина ОВ, оточена оболонкою, виготовленою з однорідного діелектрика, показник заломлення (ПЗ) n_2 якого менший від максимального значення n_1 ПЗ у серцевині. Принцип поширення по волокну модульованого інформаційним сигналом випромінення від оптичного джерела базується на повному внутрішньому відбитті на межі серцевина-оболонка світлових променів, поширюваних уздовж ОВ. При цьому основна частина енергії світлового потоку зосереджується в серцевині волокна.

Напрямувані моди даного ОВ – тип електромагнітних монохроматичних хвиль, які поширюються вздовж осі внутрішнього світлопровідного матеріалу волокна в усталеному режимі. Кожна мода існує лише на довжинах хвиль, менших від певного критичного значення – довжини хвилі відсікання цієї моди. Зі зменшенням довжини хвилі зростає кількість напрямлюваних мод. Кожна з мод має характерну саме для неї спектральну залежність коефіцієнта фази і, відповідно, фазової та групової швидкостей, а також і свій власний розподіл напруженості електричного та магнітного полів у поперечному перерізі волокна, тобто, притаманну лише їй поляризацію поля моди. Математичний опис залежності векторів зазначених полів від часу та просторових координат для напрямлюваних мод світловоду, поширюваних у напрямку його осі z , має такий вигляд:

$$\mathbf{e} = (e_r, e_\phi, e_z) \exp[-i(\omega t - \beta z - m\phi)], \quad \mathbf{h} = (h_r, h_\phi, h_z) \exp[-i(\omega t - \beta z - m\phi)], \quad (1)$$

де \mathbf{e} , \mathbf{h} – комплексні вектори, що відповідають фізичним величинам \mathbf{E} , \mathbf{H} напруженості електричного і магнітного полів; r , ϕ , z – поточні координати точки в циліндричній системі координат; e_r , e_ϕ , e_z і h_r , h_ϕ , h_z – залежні лише від радіальної координати $r \geq 0$ компоненти амплітуд напруженості електричного і магнітного полів; ω і $\beta > 0$ є відповідно задана частота та залежний від неї коефіцієнт фази моди; m – задане азимутальне число ($m = 0, 1, 2, \dots$), постійне для кожної моди.

Довжина хвилі відсікання одномодового ОВ. Конструктивна структура ООВ забезпечує перенесення оптичного випромінення в діапазоні робочих довжин хвиль тільки однією модою – основною. Для ООВ відрізняють довжину хвилі відсікання основної моди і довжину хвилі відсікання одномодового волокна, а саме:

– довжина хвилі відсікання певної моди, зокрема й основної, – найбільше значення довжини хвилі, на якій ООВ все ще напрямляє цю моду;

– довжина хвилі відсікання одномодового ОВ – найменша довжина хвилі (критична довжина хвилі ООВ), понад яку в ООВ поширюється лише основна мода. Відповідне значення дорівнює довжині хвилі відсікання цієї моди волокна, що з'являється після основної при зменшенні довжини хвилі оптичного випромінення, яке поширюється вздовж волокна (тут і далі під довжиною хвилі розуміють її довжину у вакуумі, $\lambda = cT = 2\pi c/\omega$).

Значення цих двох величин задають теоретичні межі одномодовості ОВ, відповідаючи двом найменшим кореням рівняння частот відсікання напрямлюваних світловодом мод (або довжинам хвиль відсікання основної та першої старшої моди). Рівняння частот відсікання мод впливає з характеристичного рівняння світловоду $\Phi(\omega, \beta) = 0$ – аналітичної умови узгодженості електричного та магнітного полів мод на межі серцевина-оболонка.

Коефіцієнт згасання оптичної потужності. При перенесенні вздовж ОВ сигналу у вигляді послідовності оптичних імпульсів енергія імпульсів спадає внаслідок поглинання енергії оптичної хвилі на електронних і атомних резонансах діелектрика, з якого

виготовляється ОВ (багатокомпонентне скло на основі плавленого кварцу, хімічна формула SiO_2), а також і розсіювання енергії оптичного випромінювання на мікронеоднорідностях із геометричними розмірами, меншими за довжину оптичної хвилі (розсіювання Релея). Ці втрати становлять найвагомішу частину загальних втрат оптичної потужності, що призводять до згасання оптичного сигналу під час його проходження по волокну на велику відстань (власні втрати ОВ). Що ж до погонних втрат в ОВ під впливом інших чинників, таких як мікрозгини внаслідок геометричної і фізичної недосконалості граничної поверхні між серцевиною і оболонкою, поздовжня нерегулярність волокна, а також і регулярні згини волокна в оптичному кабелі (ОК), то вони становлять малу (меншу від 0,03 дБ/км) частку загальних погонних втрат. Додаткові втрати оптичної потужності у волокну виникають на зварних з'єднаннях ОВ і в роз'ємних з'єднувачах. Проте успіхи сучасної технології дозволили істотно зменшити ці втрати, і сьогодні вони перебувають на рівні близько 0,01 дБ на одне з'єднання та 0,05 дБ на роз'єм. На Рис.1 показано внесок у загальні погонні втрати в ООВ таких явищ, як поглинання енергії на резонансах та розсіювання Релея (суцільна лінія).

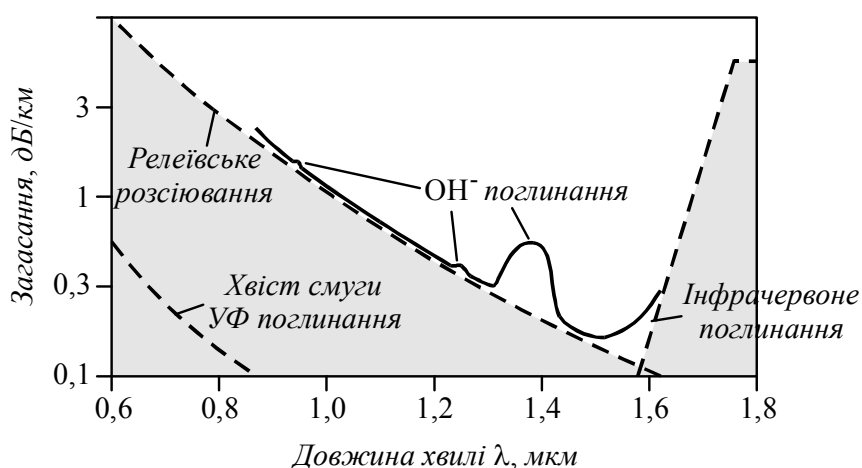


Рис. 1. Розсіювання Релея та поглинання енергії на електронних і атомних резонансах

Типову криву погонних втрат оптичної потужності в ООВ у різних діапазонах довжини λ оптичної хвилі від діапазону О до діапазону U подано на Рис. 2.

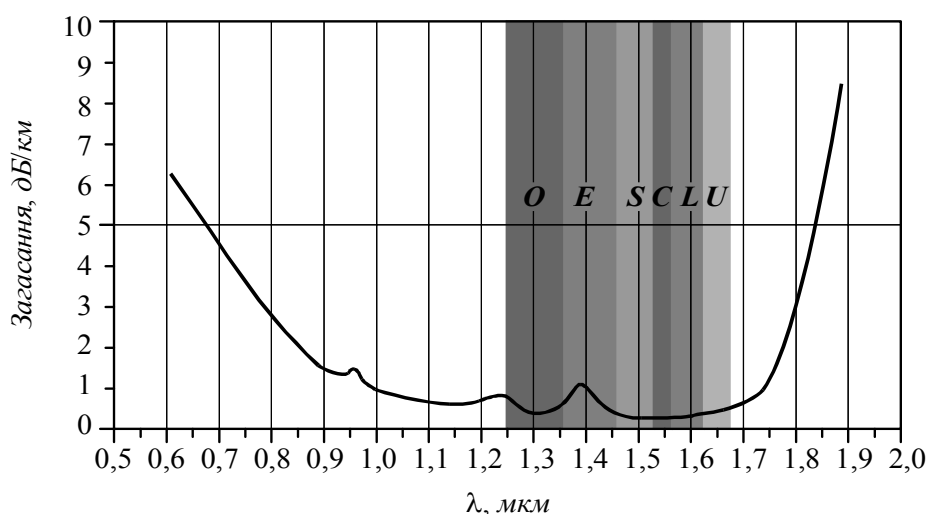


Рис. 2. Типова спектральна крива погонних втрат оптичної потужності в ООВ

Класифікацію оптичних діапазонів для волоконно-оптичного зв'язку, запропоновану Дослідницькою комісією ДК-15 ІТУ-Т, наведено в Табл.1, де зазначено також і

відповідність цих діапазонів **вікнам прозорості** – діапазонам довжин хвиль із найменшим згасанням.

Перші ВОЛЗ із багатомодовим оптичним волокном (БОВ) працювали на довжинах хвиль в околі 850 нм, тобто в *першому вікні прозорості* (760...860 нм), де коефіцієнт згасання для сучасних БОВ становить 2–3 дБ/км. Іноді це вікно використовують і досі на невеликих відстанях передавання. **Діапазони довжин хвиль 1-, 2- та 3-го вікон прозорості відповідають локальним мінімумам втрат на поглинання в матеріалі, з якого виготовлено ОВ.** Перші два вікна прозорості, що містяться відповідно в околі довжин хвиль 850 нм і 1310 нм, розташовані між піками поглинання на гідроксилах ОН⁻. Третє вікно міститься в околі довжин хвиль 1550 нм, причому праворуч від піку зазначених втрат на резонансній довжині хвилі поглинання 1383 нм (див. Рис. 1 і 2). Це вікно відповідає локальному мінімуму втрат, утвореному спектральними кривими втрат розсіювання Релея та втрат за рахунок поглинання на резонансній довжині хвилі 9,0 мкм, що відповідає характерному періоду коливань у міжатомному зв'язку окису Si–O. “Хвіст” цього поглинання з інфрачервоної області заходить у 3-тє вікно (С-діапазон), тоді як “хвіст” смуги ультрафіолетового поглинання на електронних резонансах лише незначною мірою потрапляє в це вікно.

Класифікація оптичних діапазонів

Табл. 1

Назва діапазону		Діапазон довжин хвиль, нм	Вікно прозорості
англійська	українська		
O (Original)	основний	1260...1360	2-ге
E (Extended)	розширений	1360...1460	–
S (Short wavelength)	короткохвильовий	1460...1530	5-те
C (Conventional)	стандартний	1530...1565	3-тє
L (Long wavelength)	довгохвильовий	1565...1625	4-те
U (Ultra-long wavelength)	наддовгохвильовий	1625...1675	–

Із пригніченням піка втрат на довжині хвилі 1383 нм, зумовленого поглинанням фотонів присутніми в кварці гідроксилами ОН⁻, уможливилось використання 4-го розширеного діапазону Е (5-го вікна прозорості) та діапазону S. Пік цих втрат для сучасних ООВ більшості виробників становить 0,4...0,6 дБ/км, (для деяких типів волокон – 0,31 дБ/км), а це менше від значення питомих втрат у кварцовому волокні на довжині хвилі 1310 нм із діапазону О. Такі волокна можуть бути використані у діапазоні довжин хвиль 1280...1650 нм.

Втрати оптичної потужності на макрозгинах волокна. Локальні втрати на макровигинах ОВ враховуються окремо. При вкладанні волокна в заповнений гідрофобом оптичний модуль кабеля довжина волокна більша від довжини трубки оптичного модуля, адже волокно в модулі вкладається по спіральній просторовій лінії. При з'єднанні кабеля або волокон запасна довжина кабеля чи волокна змотується в бухту або вкладається в оправку з'єднувальної муфти. Залишкова довжина змотується в технологічні мотки. Завдяки меншим втратам на згинах ОВ вдається зменшувати розміри оправок з'єднувальних муфт та мінімальні діаметри технологічних бухт і мотків.

Діаметр поля моди. Діаметр поля моди (ДМП) – це діаметр круга, рівновеликого за площею тій частині поперечного перерізу ООВ, через яку проходить потік оптичного випромінювання, що поширюється вздовж волокна. Надто мале значення ДМП спричинює втрати потужності при введенні світла у волокно, а також труднощі при стикуванні ООВ. Утім за великих значень ДМП збільшуються втрати оптичної потужності на макрозгинах ООВ.

Для розрахунку значення ДМП застосовують формулу сканування ближнього поля, мкм:

$$w = 2a \sqrt{\frac{2 \int_0^{\infty} \rho I(\rho) d\rho}{\int_0^{\infty} \rho \left[\frac{d\sqrt{I(\rho)}}{d\rho} \right]^2 d\rho}}, \quad (1)$$

де $2a$ – конструктивний діаметр сердцевини; $\rho=r/a$ – локальне значення радіальної координати точки в поперечному перерізі волокна; $I(\rho)$ – радіальний розподіл інтенсивності випромінювання поля моди.

У наближенні лінійно-поляризованих мод (LP-мод) інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди вектора \mathbf{E} напруженості електричного поля моди.

Характеристики хроматичної дисперсії. Випромінювання оптичного джерела, модульоване за амплітудою інформацією – послідовністю бітів, надалі переноситься вздовж ОВ у вигляді послідовності імпульсів, що мають обмежену тривалість і ненульову ширину спектра.

Зазначимо, що з вимогою мінімального спотворення оптичного імпульсу при його русі вздовж світловоду пов'язаний такий важливий чинник як *хроматична дисперсія*. Вона виникає в результаті того, що для даної моди світловоду на різних частотах з околу центральної (носійної) частоти імпульсу коефіцієнт фази різний (відповідно до спектральної характеристики $\beta=\beta(\omega)$ моди), а через це різні як фазові швидкості, так і групові швидкості. У межах кожної моди різні складові спектра імпульсу поширюються світловодом з різними груповими швидкостями, що призводить до змін тривалості імпульсу. Спричинене дисперсією розширення імпульсу після проходження ним відстані L по одномодовому ОВ (за умови нехтування додатковою частотною модуляцією генерованого передавачем оптичного імпульсу) розраховується за формулою, пс:

$$\sigma_{\Delta t}(L) = \sqrt{\sigma_t(L)^2 - \sigma_{t0}^2} = \sqrt{D^2 + \frac{1}{2} \left[S + 2 \frac{D}{\lambda_0} \right]^2} \sigma_{\lambda}^* \cdot \sigma_{\lambda}^* \cdot L. \quad (2)$$

Тут σ_{t0} та $\sigma_{\Delta t}$ – середньоквадратичне значення тривалості імпульсу відповідно на вхідному кінці волокна та після проходження ним ділянки волокна довжиною L ; λ_0 – довжина носійної хвилі у вакуумі, що відповідає носійній частоті ω_0 ; $\lambda_0=cT=2\pi c/\omega_0$; σ_{λ}^* – середньоквадратичне значення (у термінах довжин хвиль) ширини спектра модульованого передавача, яка відповідає ефективній смузі частот, що враховує дві смуги частот – спектра оптичного джерела і модуляції (пропорційної до швидкості передавання бітів); D – обчислений на довжині λ_0 носійної хвилі коефіцієнт хроматичної дисперсії ОВ, пс/(нм·км):

$$D(\lambda) = \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2(\beta/k)}{d\lambda^2}, \quad (3)$$

де $\tau(\lambda)$ – групова затримка у волокні довжиною 1 км складової λ спектра імпульсу; $\tau(\lambda)=1/v_{gp}(\lambda)$ ($v_{gp}(\lambda)$ – групова швидкість моди на довжині хвилі λ , пс/км); β/k – ефективний показник заломлення напрямлюваної світловодом моди; $k=\omega/c$ – хвильове число у вакуумі; $(S+2D/\lambda_0)\sigma_{\lambda}^*/2^{1/2}$ – величина, що враховує дисперсію 2-го порядку, пс/(нм·км); S – крутизна кривої дисперсії, обчислена на довжині λ_0 носійної хвилі, пс/(нм²·км),

$$S(\lambda) = \frac{dD(\lambda)}{d\lambda}. \quad (4)$$

Виробник волокна в технічній документації на ООВ має вказати коефіцієнт D хроматичної дисперсії і/або значення опосередковано пов'язаних із ним параметрів – довжини хвилі λ_0^* нульової дисперсії та крутизни $S_0=S(\lambda_0^*)$ дисперсії на довжині хвилі λ_0^* .

У разі нехтування дисперсією старшого порядку формула (2) для середньоквадратичного значення $\sigma_{\Delta t}$ розширення імпульсу, пс, набуває вигляду:

$$\sigma_{\Delta t}(L) \approx D \cdot \sigma_{\lambda}^* \cdot L . \quad (5)$$

Отже, коефіцієнт D хроматичної дисперсії одномодового ОВ дорівнює середньоквадратичному значенню збільшення тривалості імпульсу, що припадає на одиницю середньоквадратичного значення ширини спектра модульованого передавача (1 нм), внаслідок проходження імпульсом ділянки волокна одиничної довжини (1 км).

Ефективна площа. Необхідність контролю ефективної площі постає тоді, коли вздовж волокна розповсюджується сигнал з високою густиною потужності, наприклад у разі групового сигналу, утвореного об'єднанням каналних сигналів у мультиплексорі волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) зі спектральним розділенням каналів (СРК). Це призводить до виникнення нелінійних ефектів, спричинених залежністю ПЗ світлопровідної серцевини ОВ від інтенсивності поля моди.

Значення ефективної площі ОВ, мкм², визначається згідно з формулою:

$$A_{ef} = 2\pi a^2 \frac{\left(\int_0^{\infty} \rho I(\rho) d\rho \right)^2}{\int_0^{\infty} \rho I^2(\rho) d\rho} \quad (6)$$

Для зниження густини оптичної потужності в разі зростання повної потужності необхідно збільшити значення A_{ef} ефективної площі, підвищивши в такий спосіб потужність групового сигналу у ВОСП із СРК та послабивши вплив деяких нелінійних ефектів. Зрештою все це дасть змогу поліпшити відношення “сигнал-шум” і збільшити відстань між підсилювачами.

Дисперсія поляризованої моди. Реальні ООВ мають незначну асиметрію форми (“еліптичність” поперечного перерізу) внаслідок асиметрії заготовок, з яких витягується волокно. Асиметрію профілю ПЗ та оптичну анізотропію зумовлює також статична механічна напруга у волокні, що виникає в процесі його витягування. До асиметрії призводять також і зовнішні механічні впливи в поєднанні з напруженістю у волокні внаслідок залишкових деформацій стиснення, скручування та згинання після його закладання в оптичний кабель і прокладання ОК. Тому в ООВ спостерігається явище двопроменезаломлення мод. Проте через нерегулярність зазначеної асиметрії вздовж ОВ та нестаціонарність умов довкілля положення швидкої і повільної осей змінюється в часі і вздовж ОВ. Локальні неоднорідності, наявність стикувань волокон і вигинів, температурні та інші впливи умов довкілля призводять до обміну енергією між швидкою і повільною модами. Тому при введенні в ООВ лінійно поляризованого світла воно розщеплюється на два імпульси зі взаємно ортогональною поляризацією, які поширюються з різною груповою швидкістю.

Диференціальною груповою затримкою (ДГЗ) називають різницю Δt групових затримок у часі для повільної та швидкої поляризованих мод на виході із ООВ, пс. Для конкретного ООВ миттєві значення ДГЗ змінюються хаотично в часі та з довжиною хвилі. Статистичний розподіл ДГЗ визначається середньою довжиною взаємодії мод, усередненою мірою двопроменезаломлення ООВ та мірою когерентності джерела.

Для ООВ у складі ОК із довжиною, значно більшою від довжини взаємодії мод, що маємо практично завжди, відбувається інтенсивне змішування поляризованих мод. У такому разі розподіл імовірностей випадкової величини Δt є максвеловим із густиною, пс⁻¹,

$$f(\Delta\tau) = \frac{32 (\Delta\tau)^2}{\pi^2 \langle \Delta\tau \rangle^3} \exp\left(-\left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \Delta\tau / \langle \Delta\tau \rangle\right)^2\right), \quad (7)$$

що характеризується єдиним параметром $\langle \Delta\tau \rangle$ – математичним сподіванням випадкової величини $\Delta\tau$, тобто середнім арифметичним спостережуваних значень ДГЗ.

Заміряну для конкретного ООВ у заданому діапазоні довжин хвиль залежність ДГЗ від довжини хвилі не можна відновити при повторенні вимірювань.

Єдиний відтворюваний параметр – це усереднене значення ДГЗ, здобуте, наприклад, за результатами вимірювань у певному діапазоні довжин хвиль (або на певному проміжку часу для фіксованої довжини хвилі). Саме воно і слугує числовою мірою дисперсії поляризованої моди.

За умови сильної взаємодії мод, що спостерігається для протяжних ділянок лінії зв'язку (довжина прокладених кабелів переважно більша від 2 км), дисперсія поляризованої моди зростає з довжиною ділянки за законом

$$\text{ДПМ}_L = \text{ДПМ} \cdot \sqrt{L}, \quad (8)$$

де ДПМ – коефіцієнт дисперсії поляризованої моди, пс/(км)^{1/2}; L – довжина ООВ, км.

Вимоги встановлюються щодо значення коефіцієнта ДПМ ділянки лінії зв'язку, складеної з M кабельних секцій. Значення цього коефіцієнта розраховують на базі статистики для набору ОК, послідовно з'єднаних у ділянку лінії зв'язку, даючи наближену його оцінку як середньоквадратичне значення із виміряних коефіцієнтів ДПМ для ОВ у складі цих ОК. Виробник ОК має вказати розраховане значення ДПМ_Q – верхню довірчу межу коефіцієнта ДПМ можливої ділянки лінії зв'язку з M кабельних секцій. Значення ДПМ_Q знаходять з допомогою гістограми статистичного розподілу коефіцієнта ДПМ такої ділянки, використовуючи наперед задане мале значення Q ймовірності того, що коефіцієнт ДПМ перевищить значення ДПМ_Q. Гістограма розраховується в межах можливих комбінацій контактування волокон кабельних секцій. При цьому беруться до уваги різні ОВ у межах кабельної секції.

Стандартизоване значення верхньої довірчої межі ДПМ_Q=0,5 пс/(км)^{1/2} (чи 0,2 пс/(км)^{1/2}) здобуто з міркувань його еквівалентності ймовірності перевищення можливими значеннями ДГЗ певного граничного значення, заданого при розробці проекту лінії зв'язку.

Еквівалентна ймовірність для ДГЗ становить $6,5 \cdot 10^{-8}$ і базується на аналізі різних змін в конфігураціях системи, зокрема й додаткових внесків у ДПМ від інших можливих компонентів ліній зв'язку.

Перевищення миттєвим значенням ДГЗ граничного показника призводить до погіршення передавання сигналу в даний момент часу і на даній довжині хвилі.

Класифікація ООВ та норми на передавальні характеристики волокон. Відповідно до Стандарту ІЕС 60793-2-50 [1] та Рекомендацій ІТУ-Т Rec.G.652–Rec.G.657 [2...7], ООВ поділяються на класи за робочими діапазонами довжин хвиль і хроматичною дисперсією. У межах кожного класу можливий поділ на категорії залежно від значень погонного згасання і втрат потужності на макрозгинах волокна та дисперсії поляризованої моди.

У Табл. 2 систематизовано інформацію щодо особливостей різних категорій ООВ згідно з чинними вже на протязі багатьох років рекомендаціями ІТУ-Т і стандартами ІЕС. Як видно з цієї таблиці, в поділі волокон даного класу на категорії за рекомендаціями ІТУ-Т і за стандартом ІЕС є деякі відмінності.

Регламентовані норми на передавальні характеристики для різних категорій ООВ згідно з новітніми рекомендаціями ІТУ-Т систематизовано в Табл. 3, яка дає також змогу відстежувати стрімке підвищення вимог до передавальних характеристик ООВ, що відбувається останніми роками.

Особливості різних категорій ООВ

Табл. 2

Назва ООВ даного класу	Категорія ООВ		Оптичний діапазон, нм	Примітка
	ITU-T	IEC		
1. ООВ із незміщеною дисперсією (стандартне) Волокно оптимізовано за погонними втратами оптичної потужності в діапазоні довжин хвиль з околу 1310 нм; нуль хроматичної дисперсії і довжина хвилі відсікання одномодового ОВ поблизу 1300 нм; в околі 1550 нм коефіцієнт дисперсії становить близько 16...18 пс/(нм·км)	G.652.A	B1.1	1260÷1360 & 1530÷1565	–
	G.652.B			Зменшена дисперсія поляризованої моди (ДПМ)
	G.652.C	B1.3	1260÷1625 (згладжено пік втрат на гідроксилах OH ⁻)	–
	G.652.D			Зменшена ДПМ
2. ООВ зі зміщеною дисперсією Волокно з нулем дисперсії, зміщеним в окіл довжини хвилі 1550 нм, та з монотонно зростаючим за зростання довжини хвилі коефіцієнтом хроматичної дисперсії, яке оптимізовано для використання в діапазоні довжин хвиль 1525...1575 нм; виконано деякі умови для передавання на менших (до 1460 нм) та на більших (до 1625 нм) довжинах хвиль; у деяких випадках може бути використано також і в околі 1310 нм	G.653.A	B.2	1525÷1575	–
	G.653.B		1460÷1625	Зменшена ДПМ
3. Одномодове оптичне волокно зі зміщеною довжиною хвилі відсікання Волокно має нульову дисперсію поблизу довжини хвилі 1300 нм, із мінімізованими втратами і зі зсувом відсікання одномодового ОВ до довжин хвиль поблизу 1550 нм; волокно оптимізовано в діапазоні 1530...1625 нм і може використовуватися для цифрової передачі даних у діапазоні С на великі відстані; в околі 1550 нм коефіцієнт хроматичної дисперсії становить близько 20 пс/(нм·км)	G.654.A	B.1.2-a	1530÷1625	–
	G.654.B	B.1.2-b		Зменшена ДПМ; збільшений діаметр поля моди
	G.654.C	B.1.2-c		
	G.654.D	–		
4. ООВ з ненульовою зміщеною дисперсією Волокна всіх категорій, окрім волокна категорії D, у всьому діапазоні довжин хвиль їхнього можливого використання мають ненульову хроматичну дисперсію, причому знак її не змінюється; волокна категорій А, В, С оптимізовано для використання в діапазоні довжин хвиль 1530...1565 нм; для волокон категорій В і С виконано деякі умови для використання також і у довгохвильовій області L; волокна категорій D та E дозволяють вести передавання в діапазоні довжин хвиль 1460...1625 нм)	G.655.A	B.4-a	1530÷1565	–
	G.655.B	B.4-b	1530÷1565 & 1565÷1625	–
	G.655.C	B.4-c		Зменшена ДПМ
	G.655.D	B.4-d	1460÷1550 & 1550÷1625	Дисперсія D може бути від'ємною при $\lambda < 1514$; зменшена ДПМ
	G.655.E	B.4-e		Дисперсія D додатна; зменшена ДПМ
5. ООВ з ненульовою дисперсією для ширококутвого оптичного переносу	G.656.A	–	1460÷1625	Дисперсія D додатна
6. Нечутливе до згинних втрат ООВ для мереж доступу Волокна категорії А – підмножина волокон G.652.D, але макрозгинні втрати значно менші; для волокон категорії В переважає здатність до низьких значень втрат на макрозгинах за найменших радіусів згину	G.657.A	B.6-a	1260÷1625	Зменшені втрати оптичної потужності на макрозгинах
	G.657.B	B.6-b	1260÷1360 & 1530÷1625	

Систематизація оптичних характеристик: одномодових ОВ згідно з Рекомендаціями ITU-T: G.652–G.656¹⁾ Табл. 3

Характеристика	G.652			G.653			G.654			G.655			G.656 ¹⁾				
	A	B	C	D	A	B	A	B	C	D	A	B		C	D	E	
Довжина хвилі відсікання ООВ (у складі ОВ), нм	Рек. ITU-T 11/2009 р. ≤ 1260			Рек. ITU-T 11/2010 р. ≤ 1270			Рек. ITU-T 10/2012 р. ≤ 1330			Рек. ITU-T G.655 від 11/2009 р. ≤ 1430			07/2010р ≤ 1450				
Діаметр поля моли на довжні хвилі λ , мкм	$\lambda=1310$ нм: (8,6+9,5) $\pm 0,6$			$\lambda=1550$ нм: 7,8+8,5 (7,8+8,5) $\pm 0,8$			$\lambda=1550$ нм: 9,5+10,5 (9,5+10,5) $\pm 0,7$			$\lambda=1550$ нм: 9,5+10,5 (9,5+10,5) $\pm 0,7$			$\lambda=1550$ нм: (8,0 + 11,0) $\pm 0,6$		$\lambda=1550$ нм: (7,0+11,0) $\pm 0,7$		
	$\lambda=1310$ нм $\leq 0,50$ $\leq 0,40$			$\lambda=1550$ нм $\leq 0,35$			$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,22$			$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,20$			$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,35$		$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,40$		
Коефіцієнт згасання ОВ у складі кабелю (на довжні хвилі λ), дБ/км	$\lambda=1310$ нм $\leq 0,40$ $\leq 0,35$			$\lambda=1550$ нм $\leq 0,35$			$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,22$			$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,20$			$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,35$		$\lambda=1550$ нм: $\leq 0,40$		
Макрозгинні втрати: кількість вигибів / радіус у мм	$\lambda=1550$ нм, дБ			$\lambda=1625$ нм, дБ													
	$\leq 0,1$			$\leq 0,1$			$\leq 0,50$			$\leq 2,0$			$\leq 0,50$				
Коефіцієнт ДПМ ₀ (M=20) кабельних секцій; ймовірність Q=0,01%, пс/км ²	$\leq 0,5$ 0,2 0,5 0,2			$\leq 0,5$ 0,2 0,5 0,2			$\leq 0,5$ 0,2 0,5 0,2			$\leq 0,2$ 0,5 0,2 0,5			$\leq 0,5$ 0,2 0,5 0,2				
	$\leq 0,5$ 0,2 0,5 0,2			$\leq 0,5$ 0,2 0,5 0,2			$\leq 0,5$ 0,2 0,5 0,2			$\leq 0,2$ 0,5 0,2 0,5			$\leq 0,2$ 0,5 0,2 0,5				
Хроматична дисперсія: Оптичний діапазон довжні хвилі можливого застосування, нм	1260+ 1360; C			1260+1625 1575 C			1525+ 1575 C			1460+ 1625 S; C; L			1530+1565 C			1460+1550&1550+1625 S; C; L	
	Середнє значення ²⁾ : $D_{1550} \approx 17$			$ D \leq 33,5$			$D_{1550} \leq 20,0$			$D_{1550} \leq 22,0$			$D_{1550} \leq 20,0$			$D_{1550} \leq 23,0$	
знак D	-			-			-			-			-			-	
	$\lambda_{\text{чист}} \text{, нм}$			$\lambda_{\text{чист}} \text{, нм}$			$\lambda_{\text{чист}} \text{, нм}$			$\lambda_{\text{чист}} \text{, нм}$			$\lambda_{\text{чист}} \text{, нм}$			$\lambda_{\text{чист}} \text{, нм}$	
Довжина хвилі, λ_0 , нульової дисперсії, нм	-			-			-			-			-			-	
	-			-			-			-			-			-	
Кривизна дисп., $dD/d\lambda$; S ₁₅₅₀ , пс/(нм ² ·км)	-			-			-			-			-			-	
	-			-			-			-			-			-	
S ₀ =S(λ_0), пс/(нм ² ·км)	-			-			-			-			-			-	
	-			-			-			-			-			-	

Примітки до Табл. 3.

¹⁾ Таблиця не містить норм на ООВ, що відповідає Рекомендації ІТУ–Т G.657. Стислий опис цього волокна подано в Табл. 2. Волокно призначено для широкосмугових оптичних мереж доступу і оптимізовано за втратами оптичної потужності на його макрозгинах.

²⁾ Для ОВ категорій **G.652** середнє значення обчислено за граничними значеннями дисперсії, що розраховуються згідно з двосторонньою нерівністю

$$\frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\max}}{\lambda} \right)^4 \right] \leq D(\lambda) \leq \frac{\lambda S_{0\max}}{4} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{0\min}}{\lambda} \right)^4 \right].$$

³⁾ Для волокон категорії **G.653.B** величина $D(\lambda)$ для кожного значення довжини хвилі з діапазону 1460...1625 нм міститься між парою ламаних ліній, кожна з яких складається з двох ланок:

$$D_{\min}(\lambda) \leq D(\lambda) \leq D_{\max}(\lambda).$$

Маємо такі значення:

у діапазоні 1460...1525 нм $D_{\min}(\lambda) = 0.085(\lambda - 1525) - 3.5$;

у діапазоні 1525...1625 нм $D_{\min}(\lambda) = 3.5(\lambda - 1600)/7.5$;

у діапазоні 1460...1575 нм $D_{\max}(\lambda) = 3.5(\lambda - 1500)/7.5$;

у діапазоні 1575...1625 нм $D_{\max}(\lambda) = 0.085(\lambda - 1575) + 3.5$.

⁴⁾ Значення $D(\lambda)$, що задовольняють нерівності $D_{\min}(\lambda) \leq D(\lambda) \leq D_{\max}(\lambda)$, у діапазонах 1460...1550 нм & 1550...1625 нм такі:

– для волокна категорії **G.655.D**

$$D_{\min}(\lambda) = 7.00(\lambda - 1460)/90 - 4.20 \text{ \& } D_{\min}(\lambda) = 2.97(\lambda - 1550)/75 + 2.80,$$

$$D_{\max}(\lambda) = 2.91(\lambda - 1460)/90 + 3.29 \text{ \& } D_{\max}(\lambda) = 5.06(\lambda - 1550)/75 + 6.20;$$

– для волокна категорії **G.655.E**

$$D_{\min}(\lambda) = 5.42(\lambda - 1460)/90 + 0.64 \text{ \& } D_{\min}(\lambda) = 3.30(\lambda - 1550)/75 + 6.06,$$

$$D_{\max}(\lambda) = 4.65(\lambda - 1460)/90 + 4.66 \text{ \& } D_{\max}(\lambda) = 4.12(\lambda - 1550)/75 + 9.31;$$

– для волокна категорії **G.656**

$$D_{\min}(\lambda) = 2.60(\lambda - 1460)/90 + 1.00 \text{ \& } D_{\min}(\lambda) = 0.98(\lambda - 1550)/75 + 3.60,$$

$$D_{\max}(\lambda) = 4.65(\lambda - 1460)/90 + 4.60 \text{ \& } D_{\max}(\lambda) = 4.72(\lambda - 1550)/75 + 9.28.$$

Висновок

Наведено класифікацію одномодових волоконних світловодів на базі новітніх рекомендацій ІТУ–Т і подано узгодження з відповідною класифікацією за стандартом ІЕС. Систематизовано формули розрахунку електродинамічних характеристик ООВ. За результатами аналізу волокон різних категорій складено зведену таблицю оптичних характеристик цих волокон, яка дає змогу відстежувати динаміку їх поліпшення протягом кількох останніх років.

Література

1. Optical fibres - Part 2-50: Product specifications - Sectional specification for class B single-mode fibres // ІЕС 60793-2-50 (2012);
2. Characteristics of a single-mode optical fibre cable // ІТУ–Т Recommendation G.652.
3. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable // ІТУ–Т Rec. G.653.
4. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable // ІТУ–Т Rec. G.654.
5. Characteristics of a non-zero-dispersion shifted single-mode optical fibre cable // ІТУ–Т Rec. G.655.
6. Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport // ІТУ–Т Rec. G.656
7. Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and cable for the access network // ІТУ–Т Recommendation G.657 .