

ОДНОМОДОВЕ ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

Останні вимоги, викладені в Рекомендації ІТУ–Т G.657, набули практичної чинності зі створенням одномодового оптичного волокна, нечутливого до згинних втрат. Волокно призначено для ширококутових оптичних мереж доступу й оптимізовано за втратами оптичної потужності на його макрозгинах. Наведено класифікацію одномодових оптичних волокон згідно з новітніми рекомендаціями ІТУ–Т. За результатами аналізу передавальних характеристик волокна класу G.657 та волокна класу G.652, призначеного для загальних мереж зв'язку, складено зведену порівняльну таблицю оптичних характеристик цих волокон, яка дає змогу відстежувати динаміку їх поліпшення протягом кількох останніх років.

Ключові слова: одномодове оптичне волокно, діаметр поля моди, оптична мережа доступу, коефіцієнт загасання, втрати на макрозгинах, коефіцієнт хроматичної дисперсії, дисперсія поляризованої моди.

Вступ

Стратегія розвитку сучасних фіксованих телекомунікаційних мереж базується на використанні фізичного середовища одномодових оптичних волокон (ООВ) та волоконних оптичних кабелів (ВОК), як найбільш ширококутових засобів транспортування усіх видів інформації. На сучасному етапі розвитку суспільства вже побудовані всесвітні та трансконтинентальні волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ). В останні роки активно впроваджуються цілковито оптичні (АОН) мережі доступу.

Оскільки волокно виготовляють з діелектричного матеріалу, то воно є несприйнятливим до електромагнітних впливів з боку навколишніх провідникових кабельних систем або електричного устаткування, яке індукує електромагнітне випромінювання. 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.

Створення нових та модернізація існуючих ВОЛЗ супроводжуються також і підвищенням вимог до самих передавальних характеристик ООВ та систематичного перегляду цих характеристик. ООВ випробовуються за методиками, рекомендованими Міжнародною електротехнічною комісією (ІЕС) та Міжнародним союзом електрозв'язку (сектор Телекомунікації) (ІТУ–Т), включаючи тести з 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. В Рекомендаціях ІТУ–Т Rec.G.652–Rec.G.656, [1, 2, 3, 4, 5], описано вимоги щодо передавальних характеристик 5-ти класів ООВ, призначених для передавання ширококутових сигналів на велику відстань. Ці категорії волокон в 2006–2012 рр доповнено 6-тим класом ООВ для ширококутових мереж доступу; волокна цього класу описано в Рекомендації ІТУ–Т Rec.G.657, [6]. Нижче аналізується передавальні характеристики волокна класу G.657 та волокна класу G.652, призначеного для загальних мереж зв'язку і складено зведену порівняльну таблицю оптичних характеристик цих волокон.

Основна частина

Напрацьовано величезний досвід з інсталяції та експлуатації мереж на основі одномодового волокна та кабелів; їхні характеристики описано в Рекомендації ІТУ–Т G.652

[1]. Проте, особливості використання ООВ в оптичних мережах доступу висувають особливі вимоги до волокна та кабеля. За рахунок високої щільності розподільчої мережі та розгалужувальних кабелів, обмеженого простору в цій частині мережі, вимоги до волокна та кабеля мають бути дещо іншими порівняно з відповідними вимогами до лінійного волокна загальної транспортної мережі. В першу чергу це стосується зниження рівня втрат потужності оптичного випромінювання на макрозгинах волокна, за умови низького радіуса монтажу в приміщеннях устаткування зв'язку і приміщеннях абонентів в багатоквартирних та в окремих житлових будинках. Останні вимоги, викладені в Рекомендації ІТУ–Т G.657 [6], набули практичної чинності зі створенням ООВ, нечутливого до згинних втрат. Волокно призначено для ширококутних оптичних мереж доступу й оптимізовано за втратами оптичної потужності на його макрозгинах.

Втрати на згинах ООВ становлять окремий вид втрат і на практиці виникають практично по всій довжині ООВ, доповнюючи власні втрати волокна. Коли волокно укладається в оптичний модуль кабеля, заповнений гідрофобом, то його довжина, більша за довжину трубки оптичного модуля, – теоретично вважається, що волокно в модулі розміщується по спіральній просторовій лінії. При з'єднанні кабелю або волокна запасна (технологічна) довжина кабелю/волокна змотується в бухту або укладається на оправку з'єднувальної муфти. Зайва довжина з'єднувальних шнурів змотується в технологічні мотки.

За менших втрат на згинах ОВ стає можливим зменшити розміри оправок з'єднувальних муфт та мінімальні діаметри технологічних бухт і мотків, що в свою чергу призводить до зменшення розмірів муфт, кабельних шаф та стійок. Це особливо важливо для бортових ВОЛЗ та структурованих кабельних мереж. З розвитком пасивних оптичних мереж доступу проблема зменшення кабельного обладнання набуває особливого значення.

Для розрахунку потужності, що випромінюється на згині, можна використати наближену модель ООВ, згідно з якою зігнений світловід вважається струмовою антеною нескінченно малої товщини, що випромінює в необмежене середовище з показником заломлення (ПЗ), який дорівнює ПЗ оболонки волокна. Частина випроміненої з петлі потужності, що втрачається на одиниці довжини, без урахування загасання локальної моди вздовж антени, або коефіцієнт загасання потужності внаслідок випромінення, $\gamma_{випр}$, знаходиться з виразу, [7]:

$$\gamma_{випр} = \sqrt{\frac{\pi V^8}{16aR_{зг}W^3}} \exp\left(-\frac{4R_{зг}\Delta W^3}{3aV^2}\right) \frac{\left(\int_0^\infty (1-f(\rho))\sqrt{I(\rho)}\rho d\rho\right)^2}{\int_0^\infty I(\rho)\rho d\rho}, \quad (1)$$

де $R_{зг}$ – радіус згину; a – радіус серцевини воокна; $\rho=r/a$ –радіальна координата точки в поперечному перерізі волокна; $f(\rho)$ – функція профілю ПЗ; $\Delta=1-n_2/n_1$ відносний показник заломлення волокна, n_1 та n_2 – максимальне значення ПЗ в серцевині та відповідно значення ПЗ в однорідному склі оболонки; $V = 2akn_1\sqrt{2\Delta}$ – безрозмірна частота, $k=\omega/c$ – хвильове число у вакуумі; $W = a\sqrt{\beta^2 - n_2^2k^2}$ – фазовий параметр оболонки, β –коефіцієнт фази моди; $I(\rho)$ – радіальний розподіл інтенсивності випромінювання електромагнітного поля моди, у наближенні лінійно поляризованих мод (при $\Delta \ll 1$) величина інтенсивності пропорційна квадрату поперечної хвильової функції, якій пропорційні поперечні компоненти поля моди.

Основою апроксимації вигнутого світловоду нескінченно тонкою проволокою є представлення поля такого світловоду суперпозицією диполів, розташованих на його осі. Тому вираз для коефіцієнта загасання потужності $\gamma_{випр}$ не враховує ефекти, зумовлені скінченними розмірами поперечного перерізу серцевини. Якщо врахувати розподіл

щільності струму антени в деякому об'ємі, це дозволить знайти поправку-множник, [7], до виразу (1):

$$A = \left[\frac{\int_0^{\infty} (1-f(\rho)) \sqrt{I(\rho)} I_0(W\rho) \rho d\rho}{\int_0^{\infty} (1-f(\rho)) \sqrt{I(\rho)} \rho d\rho} \right]^2, \quad (2)$$

де $I_0(x)$ – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку.

Частина випроміненої з петлі потужності, що втрачається на одиниці довжини, з урахуванням скінченних розмірів поперечного перерізу серцевини волокна, визначається виразом (1), разом з поправкою-множником (2):

$$\gamma_{випр} = \sqrt{\frac{\pi V^8}{16aR_{3z}W^3}} \exp\left(-\frac{4W^3R_{3z}}{3V^2a}\Delta\right) \frac{\left(\int_0^1 (1-f(\rho)) \sqrt{I(\rho)} I_0(W\rho) \rho d\rho\right)^2}{\int_0^{\infty} I(\rho) \rho d\rho}, \quad (3)$$

або $\alpha_{випр} = 10^6 \left[10 \lg \frac{1}{1-\gamma_{випр}} \right] \approx 0,4343 \cdot 10^7 \gamma_{випр} \left[1 + \frac{\gamma_{випр}}{2} \right]$, дБ/м,

де $[\gamma_{випр}] = \text{мкм}^{-1}$ і наближена рівність справедлива при $\gamma_{випр} \ll 1$.

Методи вимірювання величини згинних втрат описано в Рекомендації ІТУ–Т Rec.G.651.1, [8].

Відповідно до Рекомендацій ІТУ–Т Rec.G.652–Rec.G.657 [1-6], 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.

Нормування згинних втрат для ООВ за останніми ІТУ-Т Rec. G.652 – G.656, [1 - 5] надається для 100 витків радіусом 30 мм кожен. Для волокон спеціальних типів згасання за рахунок макрозгинів може нормуватись за інших радіусів згинів, а саме: для ООВ мереж доступу – для 1 витка радіусом 15, 10 чи 7,5 та 5 мм залежно від підкатегорії волокна [6].

Регламентовані норми передавальних характеристик для ООВ класів G.652 та G.657 згідно з новітніми Рекомендаціями ІТУ–Т, систематизовано в порівняльній табл. 1.

Таблиця 1

Систематизація оптичних характеристик одномодових оптичних волокон згідно з Рекомендаціями ІТУ-Т: G.652, G.657

Характеристика	Волокно класу G.652 Рек. ІТУ-Т G.652 (11/2009 р.)				Волокно класу G.657 Рек. ІТУ-Т G.657 (10/2012 р.)	
	A	B	C	D	A	B
Довжина хвилі відсікання ООВ (у складі кабелю), нм	≤ 1260				≤ 1260	
Оптичний діапазон можливого застосування, нм	O; C	O; C; L	1260÷1625 (O; E; S; C; L)		Діапазони: O (1260...1360); E (1360...1460); S (1460...1530); C (1530...1565); L(1565...1625)	
Діаметр поля моди на довжині хвилі λ, мкм	λ=1310 нм: (8,6÷9,5) ± 0,6				λ=1310 нм: (8,6÷9,5) ± 0,4	

Коефіцієнт загасання ООВ у складі кабелю (на довжині хвилі λ , нм), дБ/км	$\lambda=1310$	$\leq 0,50$	$\leq 0,40$	–	–												
	$\lambda=1550$	$\leq 0,40$	$\leq 0,35$	$\leq 0,30$	$\leq 0,30$												
	$\lambda=1625$	–	$\leq 0,40$	–	–												
	В діапазоні λ 1310... 1625 нм ¹⁾	–			$\leq 0,40$	$\leq 0,40$											
	$\lambda=(1383\pm 3)$ ²⁾	–			$\leq 0,40$	$\leq 0,40$											
Макрозгинні втрати: число витків / радіус в мм	100 / 30				G.657 A1			G.657 A2 ⁴⁾			G.657 B2			G.657 B3			
					10/15	1/10	10/15	1/10	1/7,5	10/15	1/10	1/7,5	1/10	1/7,5	1/5		
$\lambda=1550$ нм, дБ	$\leq 0,1$	–			0,25	0,75	0,03	0,1	0,5	0,03	0,1	0,5	0,03	0,08	0,15		
$\lambda=1625$ нм, дБ	–	$\leq 0,1$			1,0	1,5	0,1	0,2	1,0	0,1	0,2	1,0	0,1	0,85	0,45		
Коефіцієнт ПМД _Q (M=20 кабельних секцій; ймовірність Q=0,01%), пс/км ^{1/2}	$\leq 0,5$	$\leq 0,2$	$\leq 0,5$	$\leq 0,2$	$\leq 0,2$						$\leq 0,5$						
Коефіцієнт хроматичної дисперсії D, пс/(нм·км)	Середнє значення ³⁾ : $D_{1550} \cong 17$				Середнє значення ³⁾ : $D_{1550} \cong 17$						–						
Довжина хвилі λ_0^* нульової дисперсії, нм	Від 1300 до 1324				Від 1300 до 1324						Від 1250 до 1350						
Крутизна дисперсії, $dD/d\lambda$: $S_{1550} = \text{пс}/(\text{нм}^2 \cdot \text{км})$	Типове значення $\cong 0,056$				Типове значення $\cong 0,056$						–						
$S_0 = S(\lambda_0^*)$, пс/(нм ² ·км)	$\leq 0,092$				$\leq 0,092$						$\leq 0,11$						

Примітки:

¹⁾ Ця смуга може бути розширена до 1260 нм додаванням до втрат при $\lambda = 1310$ нм значення 0,07 дБ/км, спричиненого розсіюванням Релея. В цьому випадку довжина хвилі відсікання одномодового волокна в складі кабеля не повинна перевищувати 1250 нм.

²⁾ Вказане середнє значення коефіцієнта згасання на цій довжині хвилі повинне бути не більшим від специфікованої на довжині хвилі $\lambda=1310$ нм величини для волокна категорії B1.3 після водневого старіння згідно із стандартом 60793-2-50, [9].

³⁾ Для волокон категорій G.652, G.657.A граничні значення коефіцієнта хроматичної дисперсії на довжині хвилі λ розраховуються за значеннями мінімальної і максимальної довжини хвилі нульової дисперсії, λ_{0min} і λ_{0max} , та значенням S_{0max} максимального нахилу дисперсії на довжині хвилі нульової дисперсії, λ_0 , згідно із співвідношенням

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

яке базується на апроксимації тричленною залежністю Селмейера, заміряних групових затримок в залежності від довжини хвилі (згідно з ITU-T Rec.G.652). Якщо це наближення недостатнє при екстраполяції на діапазон від 1500 до 1625 нм, то величина D оцінюється в цьому діапазоні з використанням, наприклад, п'ятичленною залежністю Селмейера. Середнє значення коефіцієнта дисперсії для $\lambda = 1550$ нм, розраховане по вказаній двохсторонній нерівності, приведено в таблиці.

⁴⁾ На відміну від волокон категорії G.657.A2 волокна класу G.652 можуть мати втрати на макрозгинах величиною декілька децибел на 10 витках радіусом 15 мм кожний, на довжині хвилі 1625 нм.

Волокна категорії G.657.A призначено для використання в O, E, S, C і L-оптичних діапазонах (1260...1625 нм). Вони є підмножиною волокон G.652.D і для них чинні ті самі вимоги до передавальних характеристик, за винятком суттєвого зменшення макрозгинних втрат. Це волокно може використовуватись як в мережах доступу, так і в інших частинах загальної мережі.

Характеристики волокна категорії G.657.B не обов'язково збігаються з характеристиками волокна категорії G.652, але властивість низьких значень втрат на

макрозгинах при найменших радіусах згину є домінуючою, і тому воно переважно призначається для використання всередині приміщень, а також безпосередньо в околі цих приміщень. Ці волокна застосовують в О, Е, S, С і L-оптичних діапазонах для обмежених дистанцій передачі. При прокладанні кабеля між поверхами і кабеля абонентського розведення допускається використання кабеля з волокнами підкатегорій G.657A1, G.657A2.

Висновки

Наведено класифікацію одномодових волоконних світловодів на базі новітніх рекомендацій ІТУ–Т. За результатами порівняльного аналізу волокон класу G.652 та класу G.657, складено зведену таблицю оптичних характеристик цих волокон, яка дає змогу відстежувати динаміку їх поліпшення протягом кількох останніх років.

Література

1. Characteristics of a single-mode optical fibre cable // ITU-T Recommendation G.652. – 2009.
2. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable // ITU-T Recommendation G.653. – 2010.
3. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable // ITU-T Recommendation G.654. – 2012.
4. Characteristics of a non-zero-dispersion shifted single-mode optical fibre cable // ITU-T Recommendation G.655. – 2009.
- 5 Characteristics of a fibre and cable with non-zero dispersion for wideband optical transport // ITU–T Recommendation G.656. – 2010.
6. Characteristics of a bending loss insensitive single mode optical fibre and cable for the access network // ITU–T Recommendation G.657. – 2012.
7. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов: Пер. с англ. / Под ред. Дианова Е.М., Шевченко В.В. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
8. Definitions and test methods for linear, deterministic attributes of single-mode fibre and cable // ITU-T Recommendation G.650.1 – 2010.
9. Optical fibres // IEC 60793-2-50 ed.3.0. Optical fibres – Part 2-50: Product specifications – Sectional specification for class B single-mode fibres. – 2008.

Надійшла 17.04.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Манько О.О.