

УДК 681.7.068

Котенко М. О., к.т.н.

## СПЕКТРАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЇХНІ ВИМІРЮВАННЯ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ

**Котенко М. О. Спектральні характеристики і їхні вимірювання у волоконно-оптичних системах передачі.** Широке впровадження високошвидкісних систем і DWDM систем вимагає ретельного контролю спектральних характеристик на етапі будівництва й експлуатації. Дана стаття присвячена вимірюванню спектральних характеристик (центральна довжина хвилі, ширина спектральної лінії джерела й ін.) джерел світла систем передачі.

**Ключові слова:** АНАЛІЗАТОР СПЕКТРУ, СПЕКТРАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА, СИСТЕМА ПЕРЕДАЧІ, ДОВЖИНА ХВИЛІ

**Котенко М. А. Спектральные характеристики и их измерение в волоконно-оптических системах передачи.** Широкое внедрение высокоскоростных систем и DWDM систем требует тщательного контроля спектральных характеристик на этапе строительства и эксплуатации. Данная статья посвящена измерению спектральных характеристик (центральная длина волны, ширина спектральной линии источника и т.п.) источника света систем передачи.

**Ключевые слова:** АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА, СПЕКТРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ, ДЛИНА ВОЛНЫ

**Kotenko M. O. Spectral characteristics and their measurement in optical fiber-optics transmission systems.** A wide application of high-speed systems and DWDM systems demands the careful control of spectral characteristics over a building stage and exploitation. Present paper is devoted to measurement of spectral characteristics (the central wavelength, spectral width, etc.) light sources of transmission systems.

**Keywords:** SPECTRUM ANALYZER, SPECTRUM CHARACTERISTICS, TRANSMISSION SYSTEM, WAVELENGTH

Масове впровадження систем передачі зі спектральним розділенням каналів (xWDM) накладає усе більш жорсткі вимоги на відповідність спектральних характеристик джерел світла певним вимогам і нормам. Не відстають у цьому й одноканальні системи, спектральні характеристики передавачів яких сьогодні часто вибираються сумісними з нормованою сіткою частот xWDM. Вихід на ринок систем передачі, що працюють зі швидкістю 40 Гбіт/с (STM-256) вимагає ретельного контролю не тільки центральної довжини хвилі джерела, але й спектральної ширини його випромінювання.

Процедура вимірювання центральної довжини хвилі й спектральна ширина джерела випромінювання описані в стандарті Міжнародної Електротехнічної Комісії (МЕК) IEC 61280-1-3 [1], а також у стандарті американської компанії Telcordia Technologies (колишня Bellcore) GR-468-CORE [2]. В 2010 році вийшла друга редакція стандарту IEC 61280-1-3, у якій по іншому сформульовані методи проведення вимірювань. Також внесені деякі зміни в терміни й визначення. Ми будемо користуватися термінологією й методиками, сформульованими в останній (другий) редакції стандарту, і щоб уникнути плутанини, а також для роз'яснення внесених змін, будемо наводити старі (описані в першій редакції IEC 61280-1-3 [3]) визначення й методики в дужках.

Найчастіше для вимірювання спектральних характеристик джерел світла передавачів і спектральних характеристик сигналу після проходження ними пасивних або активних пристроїв використовують оптичні спектроаналізatori. Застосування спеціалізованих приладів, що вимірюють із великою точністю центральну довжину хвилі виправдано тільки в лабораторних умовах. Зазвичай такі спеціалізовані прилади застосовують на етапі лабораторного тестування дослідних зразків перед початком промислового виробництва, а також при контролі виготовленої продукції. Операторами оптичних мереж використовуються стаціонарні або польові оптичні спектроаналізatori, що дозволяють не тільки одержати графічне представлення сигналу в спектральній області, але й цифрове значення центральної довжини хвилі, спектральної ширини джерела світла, середню потужність сигналу й інші характеристики. На рис. 1 приведена копія екрану оптичного

спектроаналізатора, де показаний спектр лінійного безперервно випромінюючого DWDM лазера, інтерфейс STM-64.

**Оптичний аналізатор спектра.** Незважаючи на те, що оптичні аналізатори спектра являють собою досить складне й дороге обладнання, вимірювання спектральних характеристик є одним з основних видів вимірювань при пусконаладжуванні й експлуатації волоконно-оптичних мереж зв'язку зі спектральним розділенням каналів.

Оптичний аналізатор спектра (рис. 2) – це прилад, що вимірює залежність спектральної щільності потужності сигналу від довжини хвилі.

Для реалізації спектроаналізатора використовують селективні елементи, що перебудовуються (дифракційні решітки, резонатор Фабрі-Перо). Якщо роздільної здатності такої системи недостатньо, застосовують перетворення частоти з оптичним гетеродином [4]. Від фотоприймача залежить динамічний діапазон спектроаналізатора, точність вимірювання співвідношення сигнал/шум (якщо ця можливість присутня в приладі), лінійність за оптичною потужністю. Для переналаштування селектора використовується прецизійна механічна система, що визначає крок приладу за довжиною хвилі і точність, з якою вона фіксується, та швидкість сканування заданого діапазону вимірювань. По закінченні чергового циклу сканування механічна система повертається у вихідне положення для проведення наступного циклу сканування.

Сигнал з фотоприймача через малoshумлячий підсилювач надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), а потім у систему цифрової обробки сигналу, після чого виводиться на екран або інший реєструвальний пристрій. Система обробки сигналу, блок управління спектроаналізатором, система відображення – як правило, виконані з використанням вбудованого комп'ютера [5]. Є прилади, у яких окремо виконаний вимірювальний блок передбачає підключення зовнішнього комп'ютера, на екрані якого відображається спектрограма. У спектроаналізатор може бути вбудоване еталонне джерело для калібрування приладу. Оптичний спектроаналізатор, як і інше вимірювальне устаткування, повинен бути відкалібрований і повірений. Спосіб калібрування спектроаналізатора описаний у стандарті МЕК ІЕС 62129 [6].

Щодо параметрів спектроаналізатора стандарт ІЕС 61280-1-3 говорить наступне – роздільна здатність і діапазон сканування при аналізі світлодіодів повинні бути не гірше 1 нм

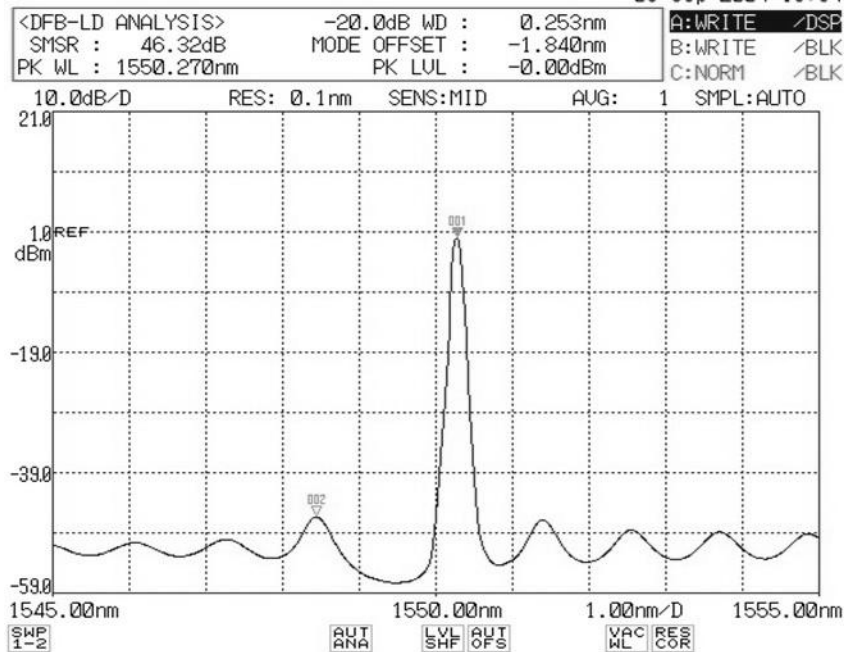


Рис. 1. Спектр випромінюючого DWDM лазера

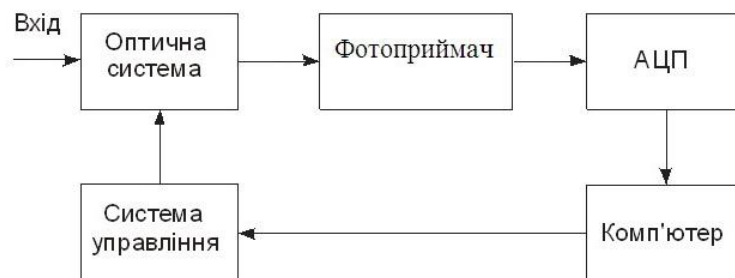


Рис. 2. Блок-схема оптичного аналізатора спектру

і 200 нм відповідно. При аналізі MLM лазерів роздільна здатність 0,2 нм, для SLM лазера 0,1 нм діапазон сканування не менш 50 нм для обох типів лазерів.

**Процедура вимірювань.** У стандарті IEC 61280-1-3 рекомендується проводити вимірювання за нормальних умов навколишнього середовища, за винятком температури, що повинна бути  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , якщо інше не обумовлено. Необхідно перед проведенням вимірювань прогріти вимірювальний прилад і вимірюване джерело випромінювання відповідно до паспортних даних. Також, якщо джерело передбачає пряму модуляцію, то необхідно подати на нього модулюючий сигнал з відповідними параметрами.

Подаваний на спектроаналізатор оптичний сигнал повинен бути достатнім за рівнем, але при цьому не перенавантажувати вхід спектроаналізатора. Необхідно вибрати потрібний масштаб по відображенню рівня потужності й скануємому діапазону довжин хвиль. Ширина обраного діапазону сканування по довжині хвилі повинна бути достатньою для визначення всіх необхідних характеристик. Відображення по потужності повинне бути таким, щоб максимальний пік повністю помістився на екрані, але при цьому були б видні всі необхідні бічні піки. Необхідно зазначити, що спектр лазерів і світлодіодів залежить від умов навколишнього середовища. Зокрема лазерні джерела світла для DWDM систем термостабілізовані, щоб мінімізувати зміну центральної довжини хвилі й інші спектральні характеристики. Тому під час проведення вимірювань спектральних характеристик, особливо при сертифікаційних або приймальних випробуваннях, потрібен жорсткий контроль умов навколишнього середовища. Крім того, світловипромінююча структура повинна працювати в паспортному режимі за струмом накачування й вихідною потужністю.

Якщо перевіряється передатчик, що не містить захисту від зворотного відбиття (це часто має місце в передавачах з довгої хвилі 850 нанометрів), ці відбиття можуть спотворити результати вимірювань.

У стандарті визначені два методи проведення вимірювань. Метод А більш новий, метод В – це метод описаний у першій редакції [3]. Обсяг журнальної статті не дозволяє докладно описати ці методи (для цього див. сам стандарт), тому приведемо лише основні моменти.

**Метод А.** Метод розроблений для широкоживаних аналізаторів спектра й дозволяє проводити швидке вимірювання спектрів з 1 000 або більше відліків за довжиною хвилі. Метод застосовується не тільки до джерел з значно вираженим піком основної моди.

Переваги методу – більш простий автоматизований аналіз і краще представлення вузьких спектрів, типу спектра лазерів VCSEL. Метод використовують для контролю, при виробництві таких лазерів

**Метод В.** Фактично це метод, описаний у першій редакції IEC 61280-1-3 [3], і залишений для сумісності з нею. Метод розрахований на проведення вимірювань з числом відліків за довжиною хвилі, значно меншим, ніж Метод А.

**Визначення.** Говорячи про спектральні характеристики джерел світла необхідно внести ясність у термінологію й визначення. З огляду на досить складний і несиметричний характер спектральної картини щодо довжини хвилі максимуму потужності центрального піка випромінювання, практично всіх джерел світла – МЕК рекомендує використовувати наступні спектральні характеристики [1]:

*Центральна довжина хвилі (centre wavelength),  $\lambda_0$  ( $\lambda_{\text{centre}}$  [3])* – це середнє значення найближчих до основного піка довжин хвиль сягаючі половини потужності піка.

*Довжина хвилі половинної потужності (half-power wavelength),  $\lambda_{3\text{dB}}$  ( $\lambda_3$  [3])* – довжина хвилі, що відповідає половині значення пікової потужності оптичного спектра.

*Середня довжина хвилі (centroidal wavelength),  $\lambda_c$  ( $\lambda_{\text{avg}}$  [3])* – середня довжина хвилі оптичного спектру.

*Пікова довжина хвилі (peak wavelength),  $\lambda_p$*  – довжина хвилі відповідного максимуму потужності оптичного спектру.

*Ширина спектру на рівні  $n$  дБ від максимуму ( $n$ -dB-down width)  $\Delta\lambda_{n\text{-dB}}$  ( $\Delta\lambda_n$  [3])* – Позитивне значення діапазону найближчих до пікового довжин хвиль розташованих ліворуч і праворуч від довжини хвилі головного піка, у межах якого спектральна щільність потужності на  $n$  децибел менше потужності відповідній довжині хвилі головного піка.

*Ширина спектра на рівні половини від максимуму (full-width at half-maximum),  $\Delta\lambda_{\text{fwhm}}$*  – окремих випадок  $\Delta\lambda_{n\text{-dB}}$  при  $n = 3$ .

*Середньоквадратична ширина спектра (root-mean square width)  $\Delta\lambda_{\text{rms}}$*  – квадратний корінь другого моменту розподілу потужності Середньої довжини хвилі (ширина спектра, розрахована за середньоквадратичним законом).

*Коефіцієнт придушення бічної моди (Side-mode suppression ratio) SMSR* – співвідношення найбільшого піка оптичного спектра до другого по величині піку, для номінально SLM-Спектра. У дужках дані позначення наведені в ІЕС 61280-1-3

**Розрахунок спектральних характеристик.** Більшість спектральних характеристик сучасні спектроаналізатори визначають автоматично, для цього необхідно правильно вказувати тип джерела випромінювання й відповідно задавати діапазон спектрального аналізу.

Середня довжина хвилі розраховується згідно наступних формул:

$$\lambda_c = \frac{1}{P_0} \sum_{i=1}^N p_i \lambda_i, \quad (1); \quad P_0 = \sum_{i=1}^N p_i \quad (2)$$

де  $\lambda_i$  і  $p_i$  – довжина хвилі й відповідна їй потужність в  $i$ -тій точці.

Середньоквадратична ширина спектра розраховується згідно (1) і (2):

$$\Delta\lambda_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{P_0} \sum_{i=1}^N p_i (\lambda_i - \lambda_c)^2}. \quad (3)$$

Коефіцієнт подавлення бічної моди знаходиться з виразу  $\text{SMSR} = 10 \lg \left( \frac{M_1}{M_2} \right)$ ,

де  $M_1$  і  $M_2$  – рівні потужності основної моди й максимального бічного піку, відповідно.

**Спектральні характеристики світловипромінюючих діодів.** Світловипромінюючі діоди або світлодіоди в основному застосовуються для передавачів локальних мереж і мають досить велику ширину спектральної лінії (від 20 до 80 нм) що обумовлює їхнє застосування на лініях з відносно невисокою швидкістю передачі (100 Мбіт/с) і багатомодовим волокном, як фізичним середовищем поширення сигналу.

Відхилення центральної довжини хвилі залежно від температури в інтервалі від  $-6$  до  $+48$  градусів Цельсія може досягати 20 нм а зміну ширини спектральної лінії 10 нм. Тому при перевірці спектральних характеристик світлодіодів необхідно точно фіксувати умови навколишнього середовища, особливо якщо такі пристрої призначені для роботи в не обслуговуваному режимі.

Спектр світлодіода, як правило, має безперервний характер без яскраво виражених бічних піків (рис. 3). Для світлодіода визначають пікову довжину хвилі  $\lambda_p$ , центральну довжину хвилі,  $\lambda_0$ , середню довжину хвилі  $\lambda_c$  і середньоквадратичну ширину спектра  $\Delta\lambda_{\text{rms}}$ . Також може визначатися ширина спектра на рівні половини

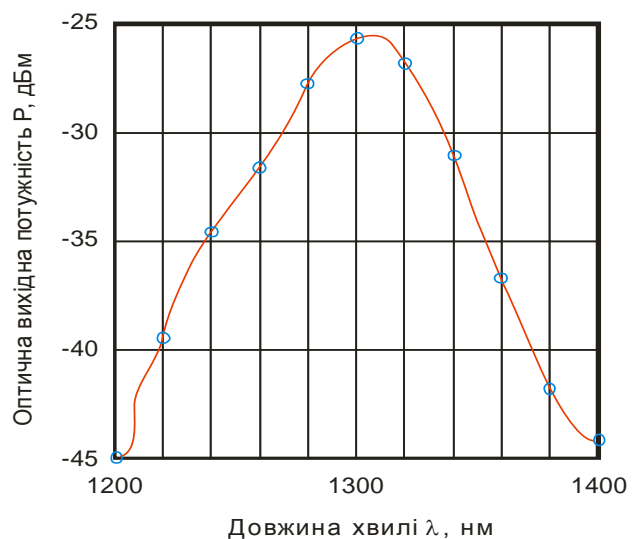


Рис. 3. Спектр світлодіода із точками для розрахунку  $\lambda_c$  і  $\Delta\lambda_{\text{rms}}$

від максимуму  $\Delta\lambda_{3-дБ}$ . Точки, зазначені на рис. 2, визначають у такий спосіб – ліворуч і праворуч від максимуму вибирають дві довжини хвилі, рівень потужності на яких на 20 дБ (якщо не обумовлено інше значення) менше пікової потужності. Потім цей діапазон ділять мінімум на 10 рівних інтервалів, одержуючи таким чином 11 точок які й використовують для обчислень по формулах (1)... (3).

**Спектральні характеристики багатомодових лазерів.** Через широку смугу посилення напівпровідникові лазери з резонатором Фабрі-Перо працюють у режимі генерації багатьох (декількох) поздовжніх мод (Multilongitudinal Mode-MLM) [7]. Конструктивно такий лазер виконаний на одинарній гетероструктурі. Резонатор Фабрі-Перо сформований на гранях лазерного кристала. Якщо діапазон довжин хвиль, підтримуваних у резонаторі, малий, то лазер працює в одномодовому режимі, в іншому випадку – в багатомодовому режимі. Спектр лазера складається із центрального піка й розбіжних від нього піків бічних мод, які підтримуються резонатором.

Спектр лазера містить виразний пік і згруповані навколо нього піки бічних мод. Така спектральна картина найпоширеніша й говорить про якісно виконану напівпровідникову структуру й нормальний режим роботи лазерного діода. Однак, у деяких випадках може спостерігатися другий побічний пік з різницею рівня основного й побічного – менш 3 дБ. Побічних піків може бути й більше двох, і вони можуть бути як окремими, так і накладатися на основний модовий набір спектра. Подібна спектральна картина може свідчити про брак лазерного діода (наприклад, дефекти в активному шарі напівпровідникової структури). Наявність побічного піка або накладеної групи мод може служити надійним індикатором, що говорить про старіння лазера, виході зі штатного режиму роботи (за струмом або температурою й т.д.). Наявність побічних модових складових, безумовно, позначиться на центральній довжині хвилі й спектральній ширині лазерного випромінювання.

Зазвичай, для MLM лазерів визначають середню довжину хвилі  $\lambda_3$  і середньоквадратичну ширину спектра  $\Delta\lambda_{rms}$ . Стандарт ІЕС 61280-1-3 рекомендує проводити 10 циклів вимірювань для кожного модового піка, включаючи центральний, після чого усереднювати довжини хвиль і відповідні їм потужності, вносячи їх у таблицю, заголовок якої показаний на рис. 4.

Після цього відповідно до даних, занесених в таблицю, розраховують  $P_0$  (2), потім  $\lambda_3$  (1), після чого заповнюють дві останні колонки таблиці й розраховують

	$\lambda_i$ , нм	$P_i$ , дБм	$p_i$ , нВт	$p_i\lambda_i$	$p_i(\lambda_i - \lambda_c)^2$

Рис. 4. Заголовок таблиці параметрів для розрахунку  $\lambda_3$  і  $\Delta\lambda_{rms}$

$\Delta\lambda_{rms}$  (3). Стандарт рекомендує перевірити дані всіх 10 циклів вимірювань для кожного модового піку  $i$ , якщо максимальна різниця довжин хвиль для даного модового піку буде більше 0,2 нм або максимальна різниця абсолютних потужностей для цього набору буде більше 10%, те вимірювання не можуть вважатися точними.

При проведенні вимірювань виникає питання – скільки модових піків вимірювати? ІЕС 61280-1-3 так відповідає на це питання: – необхідно враховувати всі бічні моди, потужність яких на піковій довжині хвилі на 20...25 дБ нижче потужності головного піка. GR-468-CORE говориться, що необхідно враховувати моди, потужність яких на 20 дБ (або 13 дБ за взаємною згодою виробника лазера й покупця) нижче потужності головного піка.

Може також визначатися ширина спектра на рівні половини від максимуму  $\Delta\lambda_{fwhm}$ . Для цього, необхідно на спектрограмі побудувати обвідну лінію, провівши її через крапки максимуму всіх мод, що враховуються, включаючи основну. Після цього по огинаючій лінії визначити значення відповідно до визначення. Спектральні характеристики лазерів з однією поздовжньою модою. При швидкостях передачі інформації  $B = 2,5$  Гбіт/с і вище використовують лазери з розподіленням зворотним зв'язком (РЗЗ-Лазери) або лазери з розподіленими брегівськими відбивачами (РБВ), у яких забезпечується режим однієї поздовжньої моди (Single Longitudinal Mode-SLM), що дозволяє одержати ефективну селекцію мод і звуження спектру випромінювання [7].

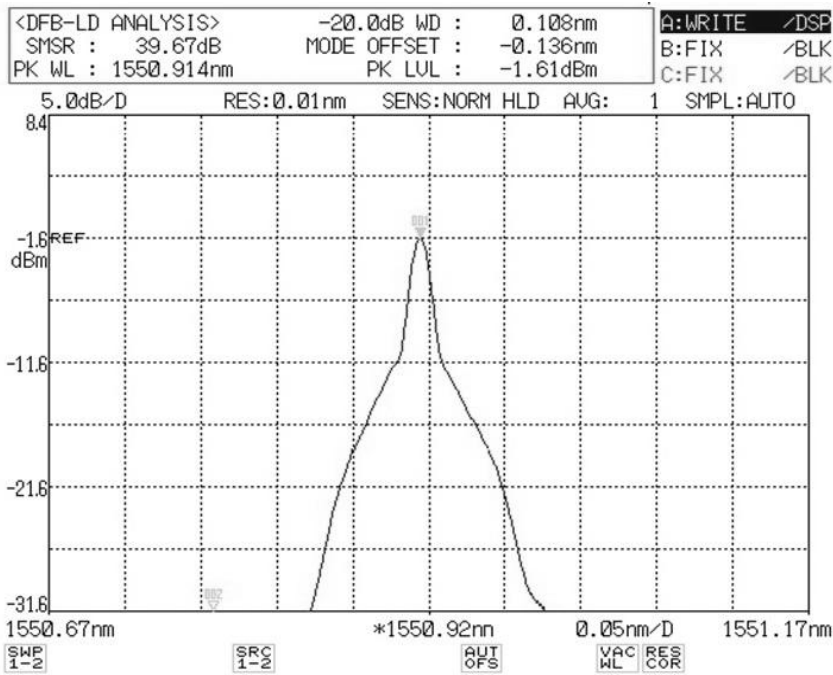


Рис. 5. Спектр SLM лазера

Рівень бічних мод у таких лазерах значно менше, ніж рівень основної моди (рис. 5, копія екрана).

Для SLM лазера визначають пікову довжину хвилі  $\lambda_p$ , або центральну довжину хвилі,  $\lambda_{\text{centre}}$ . Ширина спектра визначається на рівні меншому на 20 дБ  $\Delta\lambda_{N=20}$ . Також визначається коефіцієнт придушення бічної моди SSR. Спектральні характеристики SLM лазера (за винятком коефіцієнта подавлення бічних мод (SSR)) не вимагають обчислень і визначаються безпосередньо зі спектрограми.

**Спектральні характеристики безперервно випромінюючих лазерів.** Безперервно випромінюючі лазери виконані з використанням високодобротних резонаторів, мають дуже вузьку спектральну лінію й працюють із зовнішнім модулятором. Такі лазери дозволяють передавати інформацію на швидкостях 10 Гбіт/с і більше [7]. У деяких випадках спектральні характеристики такого лазера досить критичні. Наприклад, коли спектральна лінія дуже вузька випромінювання має високу спектральну щільність потужності, що може викликати розсіювання Манделштама-Бриллюена. Якщо дозволяють можливості вимірювального приладу, то для лазерів з безперервним спектром визначають ті ж характеристики що й для світлодіодів. Лазери з безперервним спектром зазвичай використовуються у високошвидкісних інтерфейсах STM-64, STM-256 і як лазери лінійного сигналу DWDM систем.

### Література

1. IEC 61280-1-3 Ed. 2. Fibre optic communication subsystem basic test procedures – Part 1-3: Test procedures for general communication subsystems – Central wavelength and spectral width measurement. – 2010.
2. GR-468-CORE. Generic Reliability Assurance Requirements for Optoelectronic Devices Used in Telecommunications Equipment. – 2004.
3. IEC 61280-1-3. Fibre optic communication subsystem basic test procedures – Part 1-3: Test procedures for general communication subsystems – Central wavelength and spectral width measurement. – 1998.
4. Спектроанализатор с рекордным разрешением // Lightwave Russian Edition. – 2005. – №1. – 43 с.
5. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / А. Б. Иванов. – М.: Сайрус системс, 1999. – 671 с.
6. IEC 62129. Calibration of optical spectrum analyzers.
7. Наний О. Е. Оптические передатчики / О. Е. Наний // Lightwave Russian Edition. – 2003. – №2, – С. 48-51.