

Манько О. О., д.т.н. (Державний університет телекомунікацій)

## ПОЛЯРИЗАЦІЙНА МОДОВА ДИСПЕРСІЯ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА РЕЖИМ ПЕРЕДАЧІ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ МЕРЕЖ ДОСТУПУ

**Манько О. О. Поляризаційна модова дисперсія та її вплив на режим передачі оптичних кабелів мереж доступу.** В роботі розглянуто питання появи поляризаційної модової дисперсії (ПМД). Проаналізовано основні стани поляризації та описано явище диференціальної групової затримки (ДГЗ). Розглянуто величину ПМД як усереднене значення ДГЗ та різні методи усереднення. В роботі описано вплив ПМД на системи передавання та наведено принципи її вимірювання.

**Ключові слова:** мережа доступу, передача даних, волоконний світловод, поляризація, поляризаційна модова дисперсія, диференціальна групова затримка

**Манько А. А. Поляризационная модовая дисперсия и ее влияние на режим передачи оптических кабелей сетей доступа.** В работе рассмотрены вопросы появления поляризационной модовой дисперсии (ПМД). Проанализированы основные состояния поляризации и описано явление дифференциальной групповой задержки (ДГЗ). Рассмотрено величину ПМД как усредненное значение ДГЗ и различные методы усреднения. В работе описано влияние ПМД на системы передачи и приведен принцип ее измерения.

**Ключевые слова:** сеть доступа, передача данных, волоконный световод, поляризация, поляризационная модовая дисперсия, дифференциальная групповая задержка

**Manko O. O. Polarization mode dispersion and its effect on the transmission mode optical cable access networks.** The paper discusses the issues of appearance PMD (PMD). The main polarization states are analyzed and the phenomenon of the differential group delay (DGD) are described. PMD value considered as the average value of DGD and the various methods of averaging. The paper describes the impact of PMD on the transmission system and its measurement principle is shown.

**Keywords:** access network, data transmission, optical fiber, polarization, polarization mode dispersion, differential group delay

**Вступ. Поляризаційна модова дисперсія.** У протяжних неперервних волоконно-оптичних лініях зв'язку, у яких досягається компенсація хроматичної дисперсії волокна, основне лінійне викривлення переданого сигналу пов'язано з поляризаційною модовою дисперсією (ПМД) [1].

Розглянемо спочатку таке явище як поляризація. Така властивість світла залежить від середовища, в якому воно розповсюджується. Розрізняють декілька видів поляризації: лінійну, кругову, еліптичну.

Світло, як відомо, складається з електричного та магнітного полів, які ортогональні (перпендикулярні) одне до одного, та розповсюджується у напрямку, що називається напрям розповсюдження. Для простоти будемо розглядати лише електричну складову та вважатимемо, що промінь світла розповсюджується у такому середовищі, як оптичне волокно. На Рис. 1.а та 1.б зображені лінійно поляризовані хвилі, у яких вектор напруженості електричного поля розміщується в площинах Y-Z та X-Z. Таким чином світло розповсюджується вздовж осі Z. Коли вектор напруженості електричного поля розміщується у площині X-Z, то кажуть, що хвиля горизонтально поляризована тому, що коливання відбуваються у горизонтальній площині. Коли вектор напруженості електричного поля розміщується у площині Y-Z, то кажуть, що хвиля вертикально поляризована тому, що коливання відбуваються у вертикальній площині. Може також бути такий випадок, коли вектор напруженості електричного поля розповсюджується одночасно

у двох площинах. В такому випадку ми маємо справу з сумою векторів у площинах  $Y-Z$  та  $X-Z$ , а результуючий вектор напруженості електричного поля буде орієнтований під кутом  $45^\circ$  чи на інший кут, в залежності від значень напруженості у площинах (Рис. 1.б) [2].

Різні типи поляризації можуть утворюватись не тільки за рахунок суми векторів, на це також впливає зсув фаз між хвилями, що розповсюджуються у різних площинах ( $Y-Z$  та  $X-Z$ ). Так наприклад, коли зсув фаз складає  $90^\circ$ , ми отримуємо кругову поляризацію. Орієнтація кругової поляризації може бути за годинниковою чи проти годинникової стрілки, в залежності також від зсуву фаз. Результуюча хвиля має кругову поляризацію за годинниковою стрілкою (чи право кругову поляризацію), коли зсув фаз складає  $-90^\circ$  (хвиля у площині  $X-Z$  відстає від хвилі у площині  $Y-Z$  на  $90^\circ$ ). Результуюча хвиля має кругову поляризацію проти годинникової стрілки (чи ліво кругову поляризацію), коли зсув фаз складає  $90^\circ$  (хвиля у площині  $X-Z$  випереджає хвилю у площині  $Y-Z$  на  $90^\circ$ ). У тому випадку, коли зсув фаз складатиме іншу величину, ми отримаємо еліптичну поляризацію.

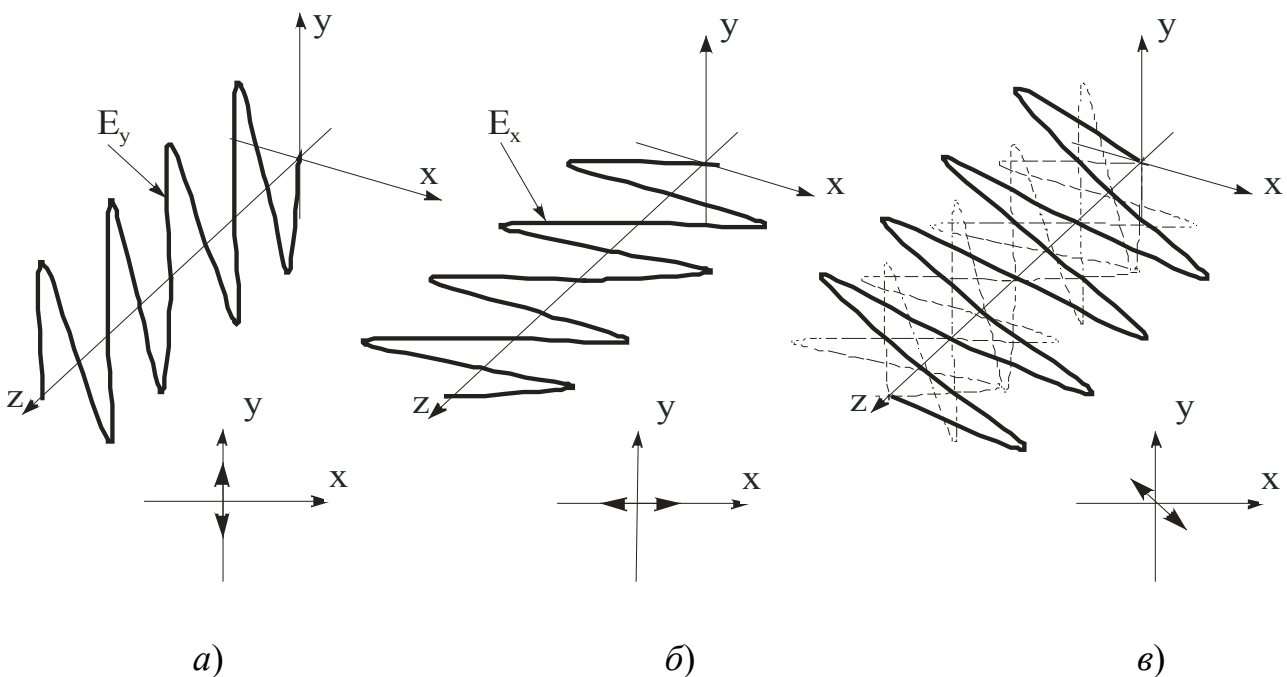


Рис. 1. Поляризація світла

Отже, в ідеальному волокні, у якому відсутні неоднорідності з геометрії, дві ортогонально поляризовані моди поширювалися б з однією і тією ж швидкістю. Але на практиці, волокна мають не ідеальну геометрію, в результаті чого кожна поляризована мода поширюється з різною швидкістю, приводячи до виникнення різниці у часі розповсюдження поляризованих мод та з'являється, так званий, диференційний груповий час затримки  $\Delta\tau$ . Поява ДГЗ призводить до розширення імпульсу.

Головною причиною появи ПМД є відхилення геометричної форми ВС від ідеально круглого циліндра, асиметрія профілю показника заломлення серцевини та пов'язана з механічним напруженим станом у волокні оптична анізотропія, що призводять до двоприменезаломлення у волокні. Ці ефекти обумовлені різними причинами:

- в процесі виготовлення волокна, через недосконалість процесу;
- при виготовленні кабелю оптичні волокна отримують залишкові механічні деформації (деформації стиснення, скручування та згинання);

- при прокладанні ОК виникають механічні деформації (вигини і т.п.);
- температурні зміни та інші впливи довкілля.

Крім того, фактори, що спричиняють появу ПМД, можна поділити на ті, що мають тривалу дію та тимчасову. Так наприклад, вигини ОК, що з'являються через ожеледицю та різкі пориви вітру, мають тимчасову дію, а ті, що з'являються при прокладанні кабелю та укладанні волокон в кабель, мають тривалу дію.

Ефекти за рахунок відхилень серцевини волокна від ідеально круглої форми подібні тим, що мають місце для волокна з еліптичною формою серцевини. Для останнього у разі малого значення ексцентриситету відповідна пара мод уже не є виродженою: існують два взаємно перпендикулярні напрямки в площині перерізу серцевини такі, що лінійно поляризоване в одному із цих напрямків (байдуже якому) уведене у волокно світло зберігає свою поляризацію, але поширюється вздовж волокна зі швидкістю, величина якої залежить від обраного напрямку поляризації. Ця властивість називається двопронезаломленням мод, а відповідні взаємно перпендикулярні напрямки визначають швидку та повільну осі поляризації волокна (відповідно швидку і повільну моди). Якщо на вході такого волокна напрямок поляризації випромінювання утворює кут  $45^\circ$  з осями поляризації, то воно розщепиться на два імпульси, тобто в поширенні світла братимуть участь обидві моди, і початкова поляризація відновлюється на довжині биття, величина якої обернено пропорційна різниці постійних поширення швидкої та повільної мод. Між модами не відбувається обміну енергією, а розширення імпульсу визначається довжиною пройдені ним ділянки волокна і різницею групових швидкостей мод. Аналогічний ефект двопронезаломлення в кристалічних речовинах, наприклад в кварці, є результатом регулярної структури кристалу.

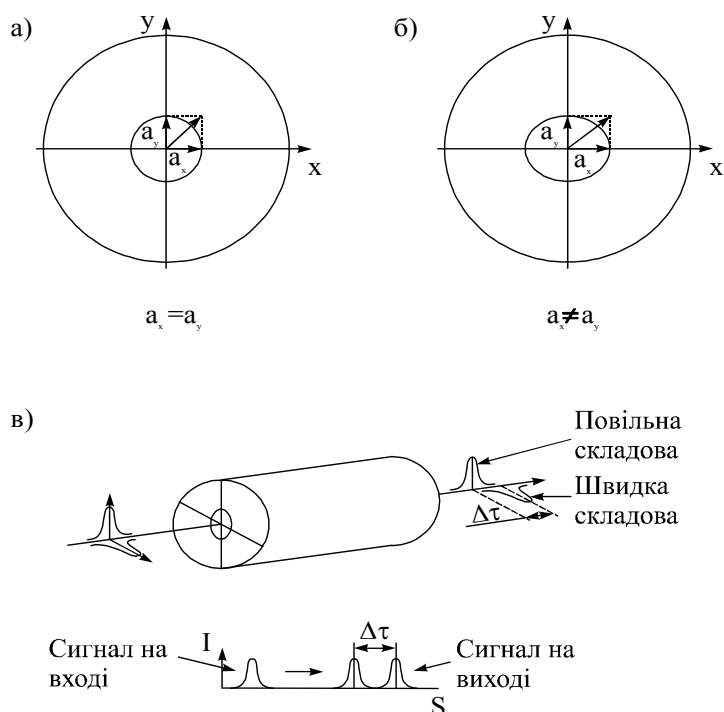


Рис. 2. Виникнення поляризаційної модової дисперсії

Таким чином, в реальних оптичних волоконних світловодах (ОВС) має місце двопронезаломлення мод, але через нерегулярність вищезазначених чинників вздовж волокна та їх нестаціонарність положення швидкої і повільної осей змінюється локально

вздовж волокна та в часі, а через локальні неоднорідності у волокні, наявність стикувань волокон і вигинів, температурні та інші впливи довкілля, між модами відбувається обмін енергією – змішування (взаємодія) мод. Оскільки двоприменезаломлення мод та процес змішування мод піддаються випадковим впливам, спричинена цими факторами ПМД має стохастичний характер.

Волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) є складною системою з'єднаних послідовно сегментів волокон. З'єднання волокон-сегментів можуть бути виконані за допомогою, наприклад, зварки. Та хоч яким чином зроблено з'єднання, у кожній з цих точок відбувається неконтрольована зміна осей “швидкого” та “повільного” розповсюдження для поляризованої хвилі. Вздовж протяжної ділянки лінії ВОЛЗ відбувається перерозподіл енергії на початку кожного нового сегмента, так що стосовно ВОЛЗ ми маємо справу із зв'язаними модами.

Вклад у ПМД можуть вносити не тільки волокна, а й інші компоненти оптичної мережі, це і ретранслятори, і конектори, і розгалужувачі та ізолятори. ПМД оптичних компонентів може спричинюватися двоприменезаломленням їх складових структур, які скажімо, містять кварцові елементи, чи сегменти асиметричного волокна [3, 4].

**Основні стани поляризації та диференціальна групова затримка.** За введення в ОВС лінійно поляризованого світла воно розщеплюється на два імпульси із взаємно ортогональною поляризацією, що поширюються з різною груповою швидкістю, обмінюючись енергією. Напрямки поляризації та розподіл енергії між імпульсами змінюються вздовж волокна та в часі і визначають так звані основні стани поляризації (ОСП). Різниця групових затримок у часі для двох ОСП на виході із ОВС називається диференціальною груповою затримкою (ДГЗ).

Заміряні для конкретного волокна в певному діапазоні довжин хвиль миттєві значення ДГЗ змінюються хаотично в часі та з довжиною хвилі. Статистичний розподіл ДГЗ визначається середньою довжиною взаємодії мод, усередненою мірою двоприменезаломлення та мірою когерентності джерела. Для ОВС у складі кабелю з довжиною, яка значно більша довжини взаємодії мод, що має місце практично завжди, відбувається інтенсивне змішування поляризованих мод. В цьому випадку розподіл щільності ймовірності ДГЗ відповідає розподілу Максвелла:

$$f(\Delta\tau) = \frac{3}{\sqrt{\pi/6}} \frac{(\Delta\tau)^2}{\alpha^3} \exp\left(-\frac{3}{2}(\Delta\tau/\alpha)^2\right).$$

Розподіл випадкової величини  $\Delta\tau$  характеризується єдиним параметром  $\alpha$ , значення якого збігається із середньоквадратичним значенням випадкової величини:

$$\alpha = (M(\Delta\tau^2))^{1/2} = \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2},$$

а її математичне сподівання (середнє спостережуване або середнє арифметичне значення) та середньоквадратичне відхилення (стандарт відхилення) пов'язані з величиною  $\alpha$  формулами:

$$M(\Delta\tau) = \langle \Delta\tau \rangle = \sqrt{8/3\pi} \alpha \approx 0,92\alpha,$$

$$\sigma(\Delta\tau) = \sqrt{1 - \frac{8}{3\pi}} \alpha \approx 0,389\alpha.$$

Ймовірність  $n$ -кратного перевищення можливим значенням випадкової величини  $\Delta\tau$  її середньоквадратичного значення обчислюється за формулою:

$$P(\Delta\tau > n \cdot \langle \Delta\tau^2 \rangle^{1/2}) = 1 + (2k \cdot \exp(-k^2)) / \sqrt{\pi} - \operatorname{erf}(k),$$

де  $\operatorname{erf}(k)$  є величина функції помилок при значенні параметра  $k = \sqrt{1,5} n$ .

**Величина ПМД як усереднене значення ДГЗ та різні методи усереднення.** Заміряну для конкретного ОВС в заданому діапазоні довжин хвиль (чи діапазоні часу) залежність ДГЗ від довжини хвилі (від часу), інакше кажучи, реалізацію випадкової величини, не може бути відновлено за повторення вимірювань. Єдиним відтворюваним параметром в багатократних вимірюваннях є усереднене значення  $\Delta\tau_{\text{гмд}}$  диференціальних групових затримок  $\Delta\tau$ , замірйаних, наприклад, в певному діапазоні довжин хвиль або на певному проміжку часу за фіксованої довжини хвилі, значення якого і слугує числовою мірою ПМД ОВС. Залежно від методу вимірювання це усереднене значення може відповідати величині  $\langle \Delta\tau \rangle$  математичного очікування випадкової величини  $\Delta\tau$  або її середньоквадратичному значенню. За сильної взаємодії мод, що спостерігається для протяжних ділянок лінії зв'язку (довжина прокладених кабелів переважно більша 2 км), величина ПМД в пікосекундах наростає із довжиною ділянки  $L$  не лінійно, а згідно закону:

$$\Delta\tau = D_{\text{гмд}} \cdot \sqrt{L}, \quad \text{де } D_{\text{гмд}} \text{ – коефіцієнт ПМД, } \text{нс/км}^{1/2}.$$

Значення коефіцієнтів ПМД для одного і того ж ОВС, взятого у складі ОК (закладеного в ОК) та взятого окремо, можуть істотно різнитися. Прокладання та встановлення кабелю також змінюють величину ПМД, оскільки механічні деформації впливають на двоприменезаломлення у волокні.

**Вплив ПМД на систему передавання.** Виникнення диференціальної групової затримки звичайно викликає ряд спотворень інформаційного сигналу, включаючи збільшення тривалості імпульсу. У цьому відношенні вплив ПМД подібний із впливом хроматичної дисперсії, але є й істотна різниця. Так, хроматична дисперсія являє собою відносно стабільне явище, що дозволяє визначити її вплив на систему передачі шляхом додавання дисперсії окремих ділянок лінії передачі і, як наслідок, може бути скомпенсована відповідним розташуванням компенсаторів. На відміну від хроматичної дисперсії, ПМД на будь-якій довжині хвилі сигналу одномодового оптичного волокна не є стабільною, що, природно, вимагає проведення статистичної оцінки і не дозволяє здійснити пасивну компенсацію її впливу. Таким чином, ПМД є фундаментальною характеристикою одномодових волоконно-оптичних компонентів, у яких енергія сигналу однієї довжини хвилі ділиться на дві ортогонально поляризовані моди, що поширюються з різною швидкістю.

Як показали дослідження, ПМД робить дуже істотний вплив на високошвидкісні системи передачі, у зв'язку з чим стає актуальним питання її корекції на лініях зв'язку. Так, у промислових оптичних кабелях коефіцієнт ПМД, як правило, не перевищує  $0,5 \text{ нс/км}^{1/2}$ , що обмежує смугу частот передачі значенням 40 ГГц на 100 км. Кабелі, установлені декілька років тому часто мають більш високу ПМД, що робить проблематичним перехід

до більш високих бітових швидкостей. Крім того, ПМД може впливати на функціонування аналогових волоконно-оптичних систем, у тому числі систем кабельного телебачення з високою ємністю каналів, у яких шляхом керування струмом лазера з розповсюдженим зворотним зв'язком у передавачі створюється частотно-модульований сигнал, що має фіксований стан поляризації. Враховуючи вплив ПМД на параметри передачі є важливим проведення вимірювань її значення.

**Метод сканування довжини хвилі.** Схему вимірювання наведено на рис.3. У даному методі для вимірювання ПМД середнє значення диференціальної групової затримки визначається статистично, виходячи з кількості максимальних і мінімальних значень потужності на виході аналізатора в міру сканування довжини хвилі [5].

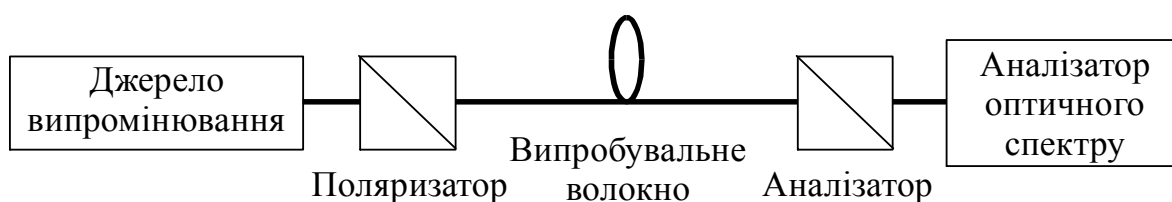


Рис. 3. Схема вимірювання ПМД аналізатором оптичного спектру

При підрахунку екстремальних значень, що мають місце при скануванні довжини хвилі в діапазоні від  $\lambda_1^1$  до  $\lambda_2^N$ , середнє значення диференціальної групової затримки  $\langle \Delta\tau \rangle$  волокна може бути визначене відповідно з виразом:

$$\langle \Delta\tau \rangle_\lambda = \frac{kN_e \lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot c},$$

де  $N_e$  – кількість екстремальних значень;

$c$  – швидкість світла;

$k$  – безрозмірний коефіцієнт, що називається коефіцієнтом взаємодії мод і дорівнює 0.824 для волокна з довільним зв'язком мод і 1.0 – для виродженого волокна.

Порядковий індекс  $\lambda$  у  $\langle \Delta\tau \rangle$  вказує, що диференціальна групова затримка визначена для інтервалу довжин хвиль.

Якщо початкову і кінцеву довжини хвиль інтервалу складають довжини хвиль першого  $\lambda_1^1$  й останнього  $\lambda_2^N$  екстремумів, кількість змін довжин хвиль кінцевих точок зменшується на одну. У випадку, коли вимірюючий пристрій показує відсутність зв'язку мод, фактор взаємодії приймається рівним одиниці ( $k = 1$ ), а аналіз ґрунтується на першому й останньому екстремумах, то має місце вираз:

$$\langle \Delta\tau \rangle_\lambda = \frac{N_e \lambda_1^1 \lambda_2^N}{2(\lambda_2^N - \lambda_1^1) \cdot c}.$$

Цей вираз варто використовувати для вимірювань волокон, що підтримують поляризацію, а також таких оптичних компонентів, як ізолятори і хвильові пластини.

На Рис. 4 наведений приклад вимірювання ПМД одномодового волокна на ділянці 10 км.

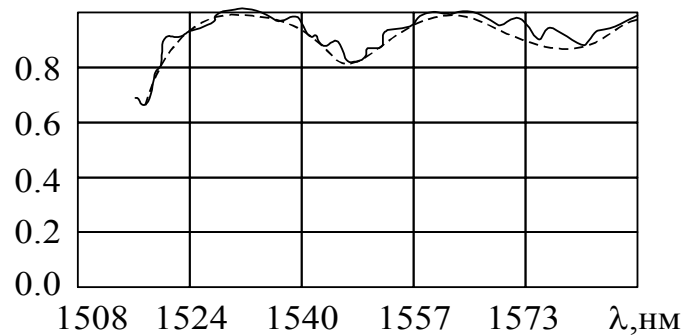


Рис. 4. Приклад вимірювання ПМД

Для цього прикладу має місце співвідношення:

$$\langle \Delta\tau \rangle_{\lambda} = \frac{3 \cdot 1532 \cdot 10^{-9} \cdot 1589 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 57 \cdot 10^{-9}} = 0.213 \text{ пс},$$

а коефіцієнт ПМД дорівнює:

$$D_{\text{ПМД}} = \frac{\langle \Delta\tau \rangle_{\lambda}}{\sqrt{L}} = \frac{0.213 \cdot 10^{-12}}{\sqrt{10}} = 0.067 \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}.$$

Тут слід зазначити можливість появи помилкових максимальних і мінімальних значень, що можуть бути викликані залежністю потужності оптичного джерела від довжини хвилі, і це звичайно викликає необхідність в еталонному вимірюванні.

**Висновки.** Таким чином, поляризаційна модова дисперсія є важливим параметром оптичного волокна, який обов'язково треба брати до уваги для швидкостей передавання 10 Гбіт/с і більше при розрахунках довжини регенераційної ділянки.

### Література

1. Скляр О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи : учебное пособие / О. К. Скляр. – СПб.: Издательство “Лань”, 2010. – 272 с.
2. Lightwave Test and Measurement Reference Guide. – Canada.: 1999 EXFO Electro-Optical Engineering, Inc, 2000.
3. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
4. Манько О. О. Особливості та вплив поляризаційної модової дисперсії на розповсюдження сигналів в оптичних світловодах / О. О. Манько, О. М. Скубак // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – №1(17). – С. 35–41.
5. Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres // ITU-T Recommendation G.650 (2000),