

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАСАННЯ СИГНАЛУ В СПІРАЛЬНО ВИГНУТОМУ ОДНОМОДОВОМУ ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ

Проведено дослідження загасання оптичного сигналу в компенсаторі поляризаційної модової дисперсії зі спірално намотаного одномодового оптичного волокна. Показано, що змінюючи геометричні та оптичні параметри такого компенсатора є можливим суттєво зменшити вносиме ним загасання в оптичний сигнал.

Ключові слова: компенсатор поляризаційної модової дисперсії, оптичне волокно, загасання сигналу.

O.V. BONDARENKO, D.G. BAGACHUK, D.M. STEPANOV, O.M. STASCHUK

Odessa national O.S. Popov academy of telecommunications

RESEARCH OF ATTENUATION IN A HELICALLY BENT SINGLE-MODE OPTICAL FIBER

Research of attenuation of the optical signal in the polarization mode dispersion compensator based on helically wound single-mode optical fiber is given. It is shown that by changing the geometric and optical parameters of the compensator is possible to significantly reduce the attenuation, introduced by the compensator into the optical signal.

Keywords: polarization mode dispersion compensator, optical fiber, attenuation of the signal.

Вступ

На теперішній час одномодове оптичне волокно (ООВ) завдяки невеликим втратам та малій дисперсії світлового імпульсу, а також іншим перевагам є найкращим напрямним середовищем для сучасних систем зв'язку і дозволяє передавати високошвидкісні широкосмугові оптичні сигнали на великі відстані. При розповсюдженні по волоконно-оптичним лініям зв'язку оптичні імпульсні сигнали зазнають спотворення за рахунок загасання та дисперсії, що обмежує, в першу чергу, дальність передачі і потребує застосування лінійних регенераторів або волоконно-оптичних підсилювачів (ВОП) з компенсаторами дисперсії (КД).

Постановка задачі та аналіз досліджень і публікацій

В роботі [1] показана можливість створення компенсатора поляризаційної модової дисперсії (КПМД) на основі використання анізотропних властивостей спірално вигнутих одномодових оптичних волокон (СООВ). Однією з основних технічних характеристик таких пасивних оптичних пристроїв як даний компенсатор, яку обов'язково потрібно враховувати при його застосуванні, є величина вносимого загасання [2]. Оскільки даний КПМД представляє собою котушку з намотаним щільно виток до витка оптичним волокном на діелектричний стрижень, то вносиме компенсатором загасання буде визначатися, в основному, загасанням сигналу на макровигинах волокна укладеному по спіральній лінії навколо осердя компенсатора.

В роботах [3, 4] приведено розрахункові вирази для визначення загасання на макровигинах ООВ, однак вони дозволяють отримати загасання лише на одному вигині оптичного волокна (ОВ), а не для конкретної довжини ОВ намотаного на діелектричне осердя. В [5] приведено значення загасання на макровигинах лише для конкретного радіусу вигину і для певної кількості витків одномодового оптичного волокна.

В роботі [6] приведені графіки залежності загасання на макровигинах одномодових оптичних волокон для різних типів ОВ і для різних радіусів вигину волокна. Також в [6] приведено емпіричну формулу для визначення загасання на макровигинах ООВ. Однак в цій формулі приведено константи, які в роботі не визначені і мають бути підібрані до співпадання отриманих результатів за даною формулою з результатами експерименту, які відображені на графіках, що також представлені в даній роботі. Це значно ускладнює визначення величини загасання на макровигинах одномодових ОВ.

Мета роботи

Очевидно, для доцільного витрачання енергетичного потенціалу ВОСП необхідно визначати вносимі загасання всіх оптичних компонентів лінійного тракту. Таким чином задача визначення втрат оптичного сигналу, вносимих компенсатором дисперсії, представленим в роботі [1], на сьогодні є не вирішеною і являється актуальною. Тому метою даної роботи є проведення дослідження та розрахунок загасання на макровигинах ООВ в компенсаторі ПМД на основі СООВ.

Визначення загасання на макровигинах ОВ

Одним з основних параметрів, що впливають на загасання при макровигині одномодового ОВ є діаметр модового поля (ДМП) $d_{\text{мп}}$. Відомо, що енергія основної моди в ООВ розповсюджується не тільки в осерді, а й частково в оболонці, охоплюючи її приграничну область. Саме тому параметр $d_{\text{мп}}$ більш точно оцінює розміри поперечного розподілу енергії основної моди сигналу. Згідно до [3] радіус поля моди W_0 в мікрометрах визначається при відомих значеннях нормованої частоти V і радіуса осердя ООВ a відповідно до виразу:

$$W_0 = a(0,65 + 1,62V^{-3/2}), \quad (1)$$

де W_0 – радіус поля моди, мкм; a – радіус осердя ОВ, мкм; V – нормована частота.

Тоді значення діаметра модового поля буде дорівнювати

$$d_{\text{мп}} = 2W_0, \quad (2)$$

Наступним важливим параметром, що впливає на величину загасання на макровигині одномодових ОВ є довжина хвилі відсікання. Це мінімальна довжина хвилі, при якій в оптичному волокні може розповсюджуватись тільки одна мода. Відповідно до [3] для ООВ зі східчастим профілем показника заломлення вона визначається за виразом виду:

$$\lambda_k = 2\pi a \frac{NA}{2,405}, \quad (3)$$

де λ_k – критична довжина хвилі, мкм; a – радіус осердя ОВ, мкм; NA – числова апертура.

Загасання на макровигині ОВ залежить від діаметру модового поля і довжини хвилі відсікання, причому їх відношення називають *MAC* параметром [6]:

$$MAC = \frac{d_{\text{мп}}}{\lambda_k}, \quad (4)$$

Очевидно, що зі зменшенням *MAC* параметру зменшується чутливість оптичного волокна до макровигинів, що обумовлено невеликим значенням діаметру модового поля і великим значенням довжини хвилі відсікання.

Згідно до [6] загасання на макровигинах ООВ може бути розраховане за наступною емпіричною формулою:

$$\alpha_{\text{мв}} = \exp(K1 - K2 \cdot D_b \left(\frac{1}{\lambda \cdot MAC}\right)^3), \quad (5)$$

де $\alpha_{\text{мв}}$ – загасання на макровигинах ООВ, дБ/м; $K1, K2$ – константи; D_b – діаметр вигину ООВ, мкм; λ – довжина хвилі оптичного сигналу, мкм; *MAC* – параметр, що враховує діаметр модового поля і довжину хвилі відсікання.

Константи $K1$ і $K2$ визначаються методом підбору, таким чином щоб розраховані значення $\alpha_{\text{мв}}$ співпадали з експериментально вимірними для оптичних волокон з різним величинами параметру *MAC*. Порівнюючи розраховані значення з результатами вимірювання загасання на макровигинах, приведеними в роботі [6], були підібрані значення констант $K1$ і $K2$, таким чином, щоб графіки залежності $\alpha_{\text{мв}}$ від параметру *MAC* для різних значень радіусу вигину ОВ D_b співпадали з графіками вимірних значень.

Результати досліджень

В даній роботі, використовуючи вирази (1) – (5), були проведені розрахунки та дослідження загасання на макровигинах ООВ, що укладене в КПМД, при цьому було прийнято: діаметри вигину ОВ – 10 мм, 15 мм, 20 мм, 30 мм; радіуси осердя ОВ – 3,5 мкм, 4 мкм, 4,5 мкм, 5 мкм; довжини хвиль – 1,31 мкм, 1,53 мкм, 1,55 мкм, 1,56 мкм. Хімічні склади досліджуваних одномодових оптичних волокон: 1. Осердя – 100% SiO₂, оболонка – 1% F, 99% SiO₂. 2. Осердя – 3,1% GeO₂, 96,9% SiO₂, оболонка – 100% SiO₂. 3. Осердя – 4,1% GeO₂, 95,9% SiO₂, оболонка – 2,2% GeO₂, 3,3% B₂O₃, 94,5% SiO₂. 4. Осердя – 9,1% P₂O₅, 90,9% SiO₂, оболонка – 7% GeO₂, 93% SiO₂.

Під час дослідження загасання на макровигинах ООВ було встановлено, що для усіх вихідних даних, наведених вище, співпадання експериментальних кривих згідно [6] з одержаними в даній роботі і приведеними на рис. 1, досягається при значеннях коефіцієнтів $K1 = 5,1$ і $K2 = 550$.

Після того як були визначені значення констант $K1$ і $K2$ можна записати остаточну формулу для визначення загасання на макровигинах оптичного волокна в компенсаторі ПМД на основі СООВ у вигляді:

$$\alpha_{\text{мв}} = \exp(5,1 - 550 \cdot D_b \left(\frac{1}{\lambda \cdot MAC}\right)^3) \quad (6)$$

На рис. 2 показана залежність загасання на макровигинах ООВ $\alpha_{\text{мв}}$ від діаметру вигину волокна D_b для різних значень довжин хвиль λ оптичного випромінювання. Розрахунок загасання проводився для оптичного волокна з радіусом осердя $a = 4,5$ мкм та хімічним складом: осердя – 100% SiO₂, оболонка – 1% F 99% SiO₂.

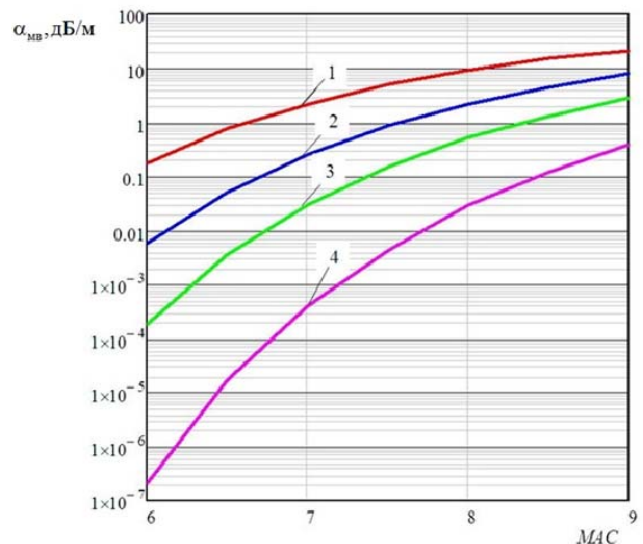


Рис. 1. Залежність загасання на макровигинах ООВ $\alpha_{\text{мв}}$ від параметру *MAC* для різних діаметрів вигину волокна: 1 – $D_b = 10$ мм, 2 – $D_b = 15$ мм, 3 – $D_b = 20$ мм, 4 – $D_b = 30$ мм.

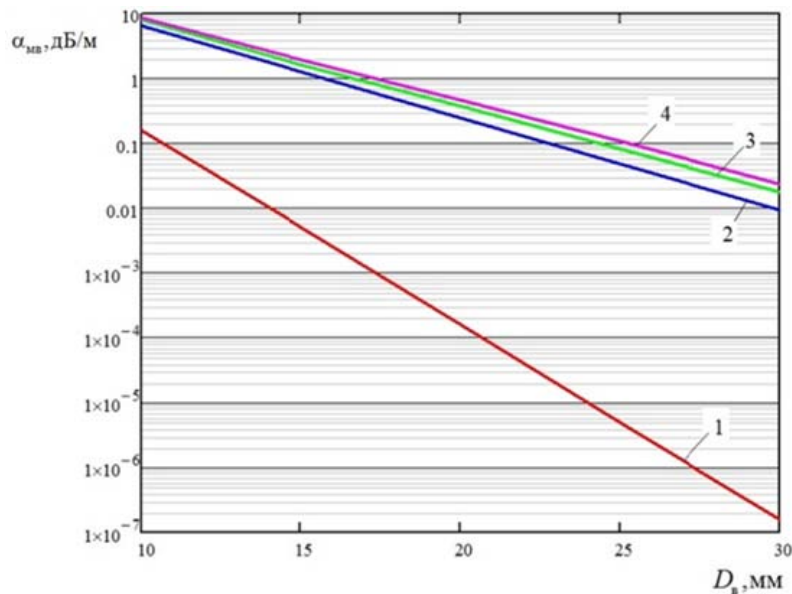


Рис. 2. Залежність загасання на макровигинах ООВ α_{MB} від радіусу вигину волокна D_B для різних значень довжин хвиль λ оптичного випромінювання:
1 – $\lambda = 1,31$ мкм, 2 – $\lambda = 1,53$ мкм, 3 – $\lambda = 1,55$ мкм, 4 – $\lambda = 1,56$ мкм.

На рис. 3 показана залежність загасання на макровигинах ООВ α_{MB} від діаметру вигину волокна D_B для різних значень радіуса осердя ОВ a . Розрахунок загасання проводився на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм для оптичного волокна з хімічним складом: осердя – 100% SiO_2 , оболонка – 1% F 99% SiO_2 .

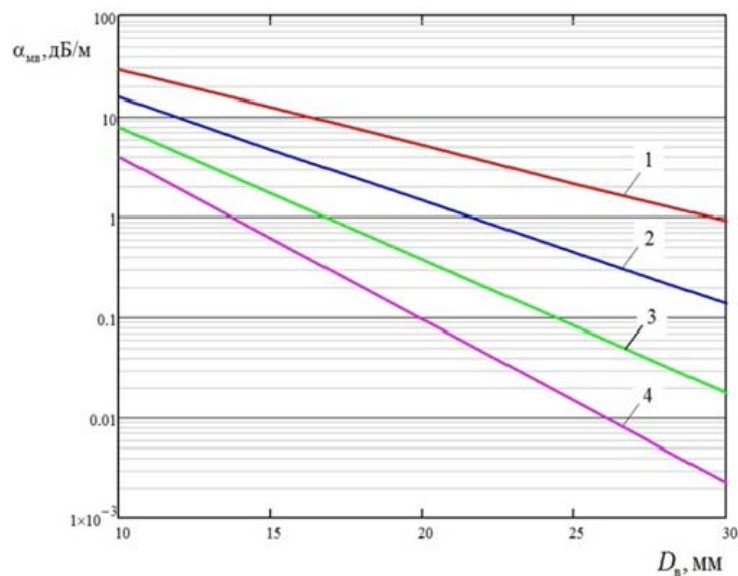


Рис. 3. Залежність загасання на макровигинах ООВ α_{MB} від радіусу вигину волокна D_B для різних значень радіуса осердя ОВ a :
1 – $a = 3,5$ мкм, 2 – $a = 4$ мкм,
3 – $a = 4,5$ мкм, 4 – $a = 5$ мкм.

На рис. 4 показана залежність загасання на макровигинах ООВ α_{MB} від діаметру вигину ОВ D_B для оптичних волокон різного хімічного складу. Розрахунок загасання проводився на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм для волокна з радіусом осердя $a = 4,5$ мкм.

В результаті проведених розрахунків величини вносимого загасання компенсатором ПМД на основі спіральньо вигнутого ООВ при різних значеннях параметру MAC , радіусу осердя ОВ, довжини хвилі оптичного випромінювання та різних хімічних складах волокна встановлено, що:

- збільшення параметру MAC оптичного волокна призводить до збільшення загасання на макровигинах ОВ;
- зі збільшенням довжини хвилі оптичного випромінювання збільшується загасання на макровигинах оптичного волокна;

- при збільшенні радіусу осердя ОВ загасання на макровигинах зменшується;
- усі волокна з різним хімічним складом мають зменшення $\alpha_{\text{мв}}$ із збільшенням діаметру вигину ОВ.

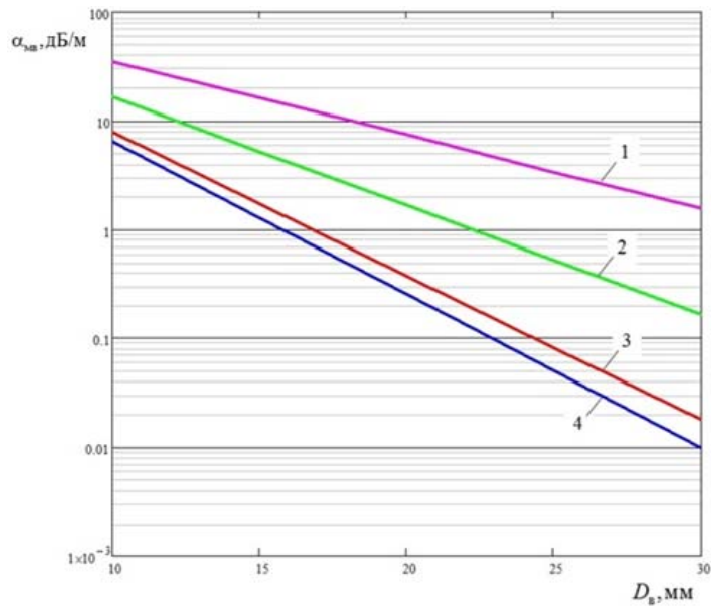


Рис. 4. Залежність загасання на макровигинах ООВ $\alpha_{\text{мв}}$ від діаметру вигину

волокна $D_{\text{в}}$ для оптичних волокон різного хімічного складу:

1. осердя – 9,1% P_2O_5 , 90,9% SiO_2 , оболонка – 7% GeO_2 , 93% SiO_2 .
2. осердя – 4,1% GeO_2 , 95,9% SiO_2 , оболонка – 2,2% GeO_2 , 3,3% B_2O_3 , 94,5% SiO_2 .
3. осердя – 100% SiO_2 , оболонка – 1% F, 99% SiO_2 .
4. осердя – 3,1% GeO_2 , 96,9% SiO_2 , оболонка – 100% SiO_2 .

В табл. 1 приведено величини вносимого загасання компенсатором ПМД на основі СООВ в залежності від величини дисперсії, що компенсується $\Delta\tau$, радіусу осердя компенсатора $R_{\text{к}}$ і довжини волокна в компенсаторі $L_{\text{вк}}$ у відповідності до виразу (6).

З результатів розрахунків, наведених в табл. 1, видно, що величина загасання на макровигинах ООВ $\alpha_{\text{мв}}$, для досліджуваних хімічних складів оптичного волокна на довжині хвилі 1,55 мкм при зміні радіусу осердя компенсатора $R_{\text{к}}$, від 0,005 м до 0,015 м при величині компенсації ПМД $\Delta\tau$ від 1 пс до 10 пс знаходиться в межах (0,02...31,42) дБ.

Висновки

Як відомо, коефіцієнт загасання в ООВ, що укладене в осерді оптичного кабелю не повинен перевищувати 0,3 – 0,35 дБ/км для довжин хвиль третього вікна прозорості, [5] Враховуючи невелику довжину волокна в компенсаторі (до декількох десятків метрів), це значення набагато менше за значення втрат на макровигинах ОВ в компенсаторі, наведених в табл. 1. Тому загасання в компенсаторі ПМД буде визначатися, в основному, лише додатковими втратами за рахунок макровигинів оптичного волокна. Крім того, як видно з результатів, наведених в табл. 1, при одному й тому ж значенні дисперсії, що компенсується, є можливість зменшити загасання КПМД на основі СООВ за рахунок збільшення радіусу його осердя та довжини волокна на ньому. Так, наприклад, при компенсації 10 пс поляризаційної модової дисперсії та збільшенні радіусу осердя компенсатора від 0,005 м до 0,015 м значення загасання зменшується на 99,3 %.

Проведені дослідження загасання в компенсаторі поляризаційної модової дисперсії зі спірально намотаного одномодового оптичного волокна дозволили встановити, що:

- загасання в компенсаторі ПМД на основі СООВ визначається, в основному, лише додатковими втратами за рахунок макровигинів оптичного волокна;

Значення загасання на макровигинах ООВ в КПМД на основі СООВ в залежності від довжини волокна в ньому, радіуса осердя компенсатора та величини компенсації ПМД

| ПМД, що компенсується в компенсаторі, Δt , пс | Значення загасання на макровигинах оптичного волокна в компенсаторі | | | | |
|---|---|--------------|-------------|-------------|--------------|
| | ПМД $\alpha_{\text{мв}}$, дБ / довжина волокна в ньому $L_{\text{вк}}$, м | | | | |
| | Радіус осердя компенсатора $R_{\text{к}}$, м | | | | |
| | 0,005 | 0,0075 | 0,01 | 0,0125 | 0,015 |
| 1 | <u>3,14</u> | <u>1,03</u> | <u>0,3</u> | <u>0,08</u> | <u>0,02</u> |
| | 0,403 | 0,603 | 0,804 | 1,005 | 1,205 |
| 2 | <u>6,28</u> | <u>2,05</u> | <u>0,59</u> | <u>0,16</u> | <u>0,043</u> |
| | 0,806 | 1,207 | 1,608 | 2,009 | 2,41 |
| 3 | <u>9,42</u> | <u>3,08</u> | <u>0,89</u> | <u>0,24</u> | <u>0,065</u> |
| | 1,208 | 1,81 | 2,412 | 3,014 | 3,616 |
| 4 | <u>12,56</u> | <u>4,1</u> | <u>1,19</u> | <u>0,32</u> | <u>0,087</u> |
| | 1,611 | 2,414 | 3,216 | 4,018 | 4,821 |
| 5 | <u>15,71</u> | <u>5,13</u> | <u>1,49</u> | <u>0,4</u> | <u>0,108</u> |
| | 2,014 | 3,017 | 4,02 | 5,023 | 6,026 |
| 6 | <u>18,85</u> | <u>6,15</u> | <u>1,78</u> | <u>0,48</u> | <u>0,13</u> |
| | 2,417 | 3,62 | 4,824 | 6,028 | 7,231 |
| 7 | <u>21,99</u> | <u>7,18</u> | <u>2,08</u> | <u>0,56</u> | <u>0,152</u> |
| | 2,819 | 4,224 | 5,628 | 7,032 | 8,437 |
| 8 | <u>25,13</u> | <u>8,21</u> | <u>2,38</u> | <u>0,64</u> | <u>0,17</u> |
| | 3,222 | 4,827 | 6,432 | 8,037 | 9,642 |
| 9 | <u>28,27</u> | <u>9,23</u> | <u>2,68</u> | <u>0,72</u> | <u>0,195</u> |
| | 3,625 | 5,43 | 7,236 | 9,042 | 10,847 |
| 10 | <u>31,42</u> | <u>10,26</u> | <u>2,97</u> | <u>0,8</u> | <u>0,217</u> |
| | 4,028 | 6,034 | 8,04 | 10,046 | 12,052 |

- значення величини загасання в компенсаторі, як і величина ПМД, яку він компенсує, значно залежать від радіуса осердя компенсатора $R_{\text{к}}$ та довжини волокна $L_{\text{вк}}$, укладеному в ньому, а саме для зменшення загасання в компенсаторі необхідно збільшувати радіус його осердя та довжину волокна на ньому;

- отримані результати роботи можуть використовуватися у виробництві на етапі розробки пасивних оптичних компенсаторів ПМД на основі СООВ з метою одержання їх оптимальних оптичних і геометричних характеристик.

Література

1. Багачук Д.Г. Компенсатор поляризационной модовой дисперсии на основе спирально изогнутого одномодового оптоволокна // Научно-технический журнал «Технология и конструирование в электронной аппаратуре». – 2013. – № 5. – С. 8 – 12.
2. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Убайдуллаев Р.Р. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 300 с.
3. Волоконно-оптические кабели: Теоретические основы, конструирование и расчет, технология изготовления и эксплуатация: монография / [Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В. Дашенко А.Ф., Усов А.В.]. – Одесса: Астропринт, 2000. – 323 с.
4. Каток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку / Каток В.Б. – К., 1999. – 501 с.
5. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. – ITU-T Study Group 15, 2005. – 22 p.
6. Bend loss in single-mode optical fiber // Fibertronix AB. – <http://www.fibertronix.com/bend-loss-single-mode-optical-fiber>, 2012.

References

1. Bagachuk, D.G. Kompensator polarizatsionnoy modovoy dispersii na osnove spiralno izognutogo odnomodovogo optovolokna // Nauchno-tehnicheskij zhurnal «Tehnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature». – 2013. – № 5. – S. 8 – 12.
2. Ubaydullaev R.R. Volokonno-opticheskie seti / Ubaydullaev R.R. – M.: Eko-Trendz, 2001. – 300 s.
3. Volokonno-opticheskie kabeli: Teoreticheskie osnovy, konstruirovaniye i raschet, tehnologiya izgotovleniya i ekspluatatsiya: monografiya / [Iorgachev D.V., Bondarenko O.V. Daschenko A.F., Usov A.V.]. – Odessa: Astroprint, 2000. – 323 s.
4. Katok V.B. Volokonno-optichni sistemi zv'yazku / Katok V.B. – K., 1999. – 501 s.
5. ITU-T Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre and cable. – ITU-T Study Group 15, 2005. – 22 p.
6. Bend loss in single-mode optical fiber // Fibertronix AB. – <http://www.fibertronix.com/bend-loss-single-mode-optical-fiber>, 2012.

Рецензія/Peer review : 25.2.2016 p.

Надрукована/Printed : 24.3.2016 p.