

КОМПЕНСАЦІЯ ВНУТРІШНЬОМОДОВОЇ ДИСПЕРСІЇ В АНІЗОТРОПНОМУ ФОТОПРУЖНОМУ ОПТИЧНОМУ ВОЛОКНІ

Виконано аналіз можливості використання поляризаційної дисперсії, причиною виникнення якої є подвійне променезаломлювання в одномодовому оптичному волокні, вигнутому в спіральну лінію при кімнатній температурі, для корекції або повної компенсації хроматичної дисперсії. Наведені результати розрахунків параметрів спіралі для реалізації компенсаторів дисперсії.

Analysis of ability of usage polarization dispersion, which appears because of double refraction in spiral cambered monomode optical fiber at room temperature for correction or full compensation of chromatic dispersion, is made. Valuation results of parameters for compensator realization are given.

Ключові слова: оптичне волокно, поляризаційна дисперсія.

Постановка задачі. Останнім часом анізотропні компоненти знаходять широке застосування в волоконно-оптичних системах передачі інформації (ВОСП). До них відносяться розгалужувачі сигналів, частотнобіркові фільтри, самофокуруючі оптичні волокна, компенсатори дисперсії тощо. В основу реалізації даних пристроїв покладено властивості анізотропного середовища: подвійне променезаломлювання, тензорний характер діелектричної проникливості, обмін потужностями між основними звичайною та незвичайною хвилями, поляризаційна дисперсія. Одним із способів отримання анізотропного оптичного волокна (ОВ) є прокладка останнього в охолодженому стані (при кімнатній температурі) в спіральну лінію постійного кроку ρ та радіусу R . При цьому дане ОВ піддається впливу механічних напруг і середовище поширення електромагнітної хвилі вздовж даного волокна є анізотропним, тобто властивості даного середовища є залежними від напрямку поширення електромагнітної хвилі та її поляризації. Особливості анізотропних ОВ, обумовлених фотопружністю на сьогодні всебічно не досліджені та для аналізу можливості виконання в ВОСП пристроїв, принцип дії яких ґрунтується на використанні властивостей анізотропного середовища, необхідно провести роботи по дослідженню залежності елементів тензора діелектричної проникливості, перехідних затухань між звичайною та незвичайною хвилями, поляризаційної дисперсії від впливу фотопружності.

Аналіз публікацій стосовно даної проблеми. Дослідження перехідних затухань при обміні потужностями між основними хвилями з взаємоортогональними кутами поляризації – звичайною HE_{11}^o та незвичайною HE_{11}^e , що виникають внаслідок подвійного променезаломлювання в анізотропному середовищі проведені в роботах [1, 2, 3]. В роботах [4, 5] отримано вирази для розрахунку поляризаційної дисперсії для ОВ, підданих впливу механічних напруг. В роботах [6, 7, 8] проведено вимірювання поляризаційної модової дисперсії, зумовленої вигином ОВ для діапазона довжин хвиль сигналу, що передається 1510 нм – 1645 нм.

Однак у перерахованих роботах відсутня методика визначення конкретних параметрів спіральновигнутих одномодових волоконних світловодів (СОМВС) для досягнення корекції або повної компенсації хроматичної дисперсії, яка складається із матеріальної та хвилеводної дисперсій. Автори даних робіт лише припускають можливість виконання пристроїв на основі фотопружних елементів.

Мета роботи: проведення досліджень залежності поляризаційної дисперсії від різних ступенів впливу фотопружності для різних складів СОМВС та отримання найбільш оптимальних параметрів для реалізації компенсаторів дисперсії. Для досліджень вибраний діапазон довжин хвиль сигналу, що передається четвертого вікна прозорості (1565 мкм – 1625 мкм).

Отримання рівняння компенсації внутрішньомодової дисперсії.

Для характеристики ступеня впливу фотопружності СОМВС вибраний безрозмірний параметр A :

$$A = \frac{\rho}{4\pi R}, \quad (1)$$

де ρ – крок скрутки спіралі, R – радіус спіралі.

При зростанні параметра A зменшується вплив анізотропії (елементи тензора діелектричної проникливості, що розташовані на головній діагоналі дорівнюють значенню діелектричної проникливості ізотропного ОВ, всі інші прямують до нуля).

Вираз для розрахунку поляризаційної дисперсії має вигляд [5]:

$$\Delta\tau_1 = - \frac{\lambda^3}{c\lambda_0 \left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} \right]^{3/2}} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \cdot \left[\frac{r}{R} G(A) + \frac{r^2}{2R^2} H(A) \right], \quad (2)$$

де λ – довжина хвилі передаваного сигналу, c – швидкість світла у вакуумі ($3 \cdot 10^8$ м/с), λ_0 – довжина хвилі світла у вакуумі ($1,3 \cdot 10^{-6}$ м), A_i, l_i – коефіцієнти ряду Селмейера, що залежать від складу скла ОВ

(приводяться в [9], Таблиця 10.1), r – радіус ОВ, R – радіус спірального, у яку викладено ОВ, функції $G(A)$ і $H(A)$ залежать від геометрії вигину COMBC та розраховуються за формулами:

$$G(A) = \frac{A^2 + 2A - 1}{(1 + 4A^2)\sqrt{1 + A^2}}; \quad H(A) = \frac{1 - A^2}{2(1 + A^2)(1 + 4A^2)^2}. \quad (3)$$

Залежність поляризаційної дисперсії від параметра A для матеріалу серцевини чистого кварцу ілюструє рис. 1.

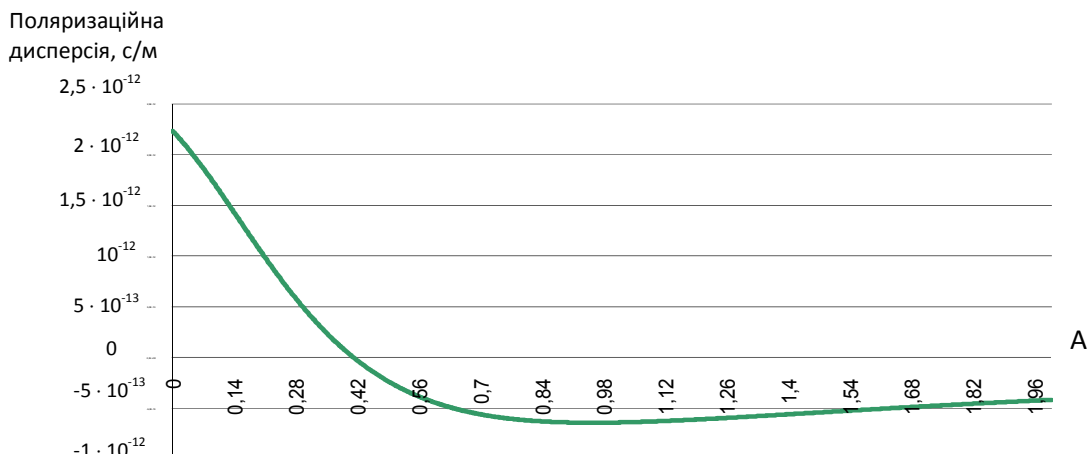


Рис. 1. Залежність поляризаційної дисперсії в COMBC від A при серцевині 100 % SiO_2

Як свідчить графік рис. 1, поляризаційна дисперсія, що залежить від параметра $A = \frac{\rho}{4\pi R}$, може приймати як додатні, так і від’ємні значення, приймає максимальне значення при $A = 0$ (випадок вигнутого по дузі окружності ВС), зменшується при зростанні A . Якщо дана дисперсія дорівнює по модулю, але протилежна за знаком хроматичній дисперсії в COMBC, сумарна дисперсія дорівнює нулю, в такому випадку досягається повна компенсація внутрішньомодової дисперсії.

Хроматична дисперсія ВС розраховується як сума матеріальної та хвильоводної дисперсії:

$$\Delta\tau = \underbrace{\frac{\lambda}{n_1 c} \left[\sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2 \cdot (3\lambda^2 + l_i^2)}{(\lambda^2 - l_i^2)^3} - \left(-\frac{\lambda}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right)^2 \right]}_{\text{матеріальна дисперсія}} + \underbrace{\left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} + \frac{\lambda^2}{n_1} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right] \cdot \frac{\Delta}{\lambda c}}_{\text{хвильоводна дисперсія}} \cdot \Phi, \quad (4)$$

де n_1, n_2 – діелектричні проникливості матеріалів серцевини та оболонки відповідно, A – відносна різниця показників заломлення серцевини та оболонки, $\Phi = V \frac{\partial^2(Vb)}{\partial V^2}$ – функція, що залежить від профіля

діелектричної проникливості ОВ, визначається за графіком ([9] Рис. 10.8.), $V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ – нормована частота, a – радіус серцевини ОВ.

Таким чином, рівняння компенсації внутрішньомодової дисперсії COMBC матиме вигляд:

$$\underbrace{\frac{\lambda^3}{c \lambda_0 \left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} \right]^{3/2}} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \cdot \left[\frac{r}{R} G(A) + \frac{r^2}{2R^2} H(A) \right]}_{\text{інвертована поляризаційна дисперсія}} = \underbrace{\frac{\lambda}{n_1 c} \left[\sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2 \cdot (3\lambda^2 + l_i^2)}{(\lambda^2 - l_i^2)^3} - \left(-\frac{\lambda}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right)^2 \right]}_{\text{матеріальна дисперсія}} + \underbrace{\left[1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2} + \frac{\lambda^2}{n_1} \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2}{(\lambda^2 - l_i^2)^2} \right] \cdot \frac{\Delta}{\lambda c}}_{\text{хвильоводна дисперсія}} \cdot \Phi \quad (5)$$

Результати досліджень поляризаційної дисперсії в СОМВС.

Розв'язати рівняння (5) можна графічним методом, суть якого полягає в наступному: у декартовій системі координат будується графік залежності хроматичної дисперсії від A та графік залежності поляризаційної дисперсії, помноженої на -1 від A . Інвертована поляризаційна дисперсія сильно залежить від A в межах A від 0 до 2. У випадку перетину двох графіків досягається компенсація внутрішньомодової дисперсії при значенні A , що відповідає точці перетину. Однак точку перетину необхідно досягти при значеннях $A = 0,618$ або $A > 0,94$, так як при цьому, як свідчать результати досліджень в [3], перехідні затухання будуть мінімальними, оскільки напівдовжина діляки биття ξ_1 (довжини СОМВС, після проходження якої напрямок перекачування потужності змінюється на протилежний) при $A = 0,618$ прямує до нескінченності, і, як наслідок, потужність із звичайної хвилі не буде перекачуватись у незвичайну та навпаки, при $A > 0,94$ практично відсутні перехідні затухання. Рис. 2 ілюструє даний метод.

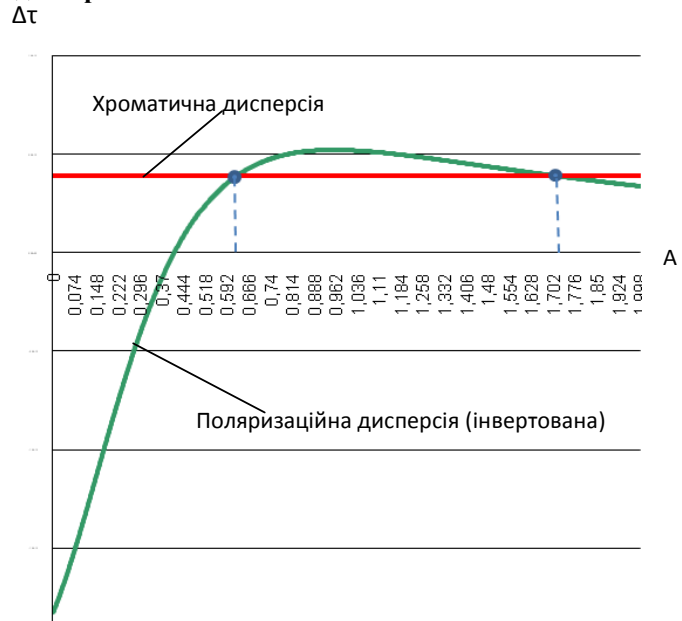


Рис. 2. Розв'язок рівняння компенсації внутрішньомодової дисперсії в СОМВС

Рецепти ОБ, для яких була досягнута повна компенсація хроматичної дисперсії для параметра $A = 0,618$ при довжині хвилі сигналу, що передається 1,565 мкм, а також параметри спіралі СОМВС, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри СОМВС для компенсації внутрішньомодової дисперсії при $\lambda = 1,565$ мкм

Склад ОБ	Радіус спіралі R, мм	Параметр A	Радіус серцевини, мкм	Поляризаційна дисперсія, с/м	Хроматична дисперсія, с/м
1. Серцевина – 7 % GeO ₂ , 93 % SiO ₂ , оболонка – 3,5 % B ₂ O ₃ , 96,5 % SiO ₂	5	0,618	2,279	-3,874·10 ⁻¹³	3,874·10 ⁻¹³
2. Серцевина – 4,1 % GeO ₂ , 95,9 % SiO ₂ , оболонка – 1 % F, 99 % SiO ₂	5	0,618	2,101	-5,674·10 ⁻¹³	5,674·10 ⁻¹³
3. Серцевина – 3,5 % GeO ₂ , 96,5 % SiO ₂ , оболонка – 3 % B ₂ O ₃ , 97 % SiO ₂	5	0,618	2,143	-4,737·10 ⁻¹³	4,737·10 ⁻¹³
4. Серцевина – 13,5 % GeO ₂ , 86,5 % SiO ₂ , оболонка – 1 % F, 99 % SiO ₂	5	0,618	1,787	-4,1302 · 10 ⁻¹³	4,1302 · 10 ⁻¹³
5. Серцевина – 9,1 % P ₂ O ₅ , 90,9 % SiO ₂ , оболонка – 3,5 % B ₂ O ₃ , 96,5 % SiO ₂	5	0,618	1,756	-4,84 · 10 ⁻¹³	4,84 · 10 ⁻¹³
6. Серцевина – 9,1 % GeO ₂ , 7,7 % B ₂ O ₃ , 83,2 % SiO ₂ , оболонка – 2,2 % GeO ₂ , 3,3 % B ₂ O ₃ , 94,5 % SiO ₂	5	0,618	2,132	-4,9332 · 10 ⁻¹³	4,9332 · 10 ⁻¹³
7. Серцевина – 4,03 % GeO ₂ , 9,7 % B ₂ O ₃ , 86,27 % SiO ₂ , оболонка – 1 % F, 99 % SiO ₂	5	0,618	2,015	-4,7446 · 10 ⁻¹³	4,7446 · 10 ⁻¹³
8. Серцевина – 5,8 % GeO ₂ , 94,2 % SiO ₂ , оболонка – 1 % F, 99 % SiO ₂	5	0,618	1,992	-4,9511 · 10 ⁻¹³	4,9511 · 10 ⁻¹³
9. Серцевина – 7,9 % GeO ₂ , 92,1 % SiO ₂ , оболонка – 13,5 % B ₂ O ₃ , 86,5 % SiO ₂ (загартований)	5	0,618	1,918	-4,8801 · 10 ⁻¹³	4,8801 · 10 ⁻¹³
10. Серцевина – SiO ₂ (з гасильними домішками), оболонка – 13,3 % B ₂ O ₃ , 86,7 % SiO ₂	5	0,618	2,148	-4,7583 · 10 ⁻¹³	4,7583 · 10 ⁻¹³

Висновок. Як показали проведені дослідження, шляхом налаштування параметра A є можливість досягти необхідного значення поляризаційної дисперсії при передачі оптичного сигналу по СОМВС в четвертому вікні прозорості, оскільки в даному діапазоні довжин хвиль поляризаційна дисперсія значно зростає та стає одного порядку з хроматичною дисперсією. Результати досліджень можуть бути використані для розробки компенсаторів дисперсії, частотновибіркового фільтрів, направлених відгалужувачів та інших пристроїв ВОСПІ.

1. Макаров Т. В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. Часть I // Праці УНДІРТ. – Одеса, 2004. – Вип. 2 (38). – С. 23-28.
2. Макаров Т. В. Невзаимные влияния волн и сигналов в спиральных одномодовых волоконных световодах. Часть II // Праці УНДІРТ. – Одеса, 2004. – Вип. 2 (38). – С. 29-34.
3. Одинцов Н. Н., Стащук О. М. Исследование некоторых параметров волоконных световодов, изогнутых по спирали // Наукові праці ОНАЗ ім О. С. Попова. – Одеса, 2008. – Вип. 1. – С. 63 – 66.
4. Макаров Т. В. Передаточные характеристики изогнутых волоконных световодов // Праці УНДІРТ. – Одеса, 1998. – № 1 (13). – С. 13-23.
5. Одинцов Н. Н., Стащук О. М. Исследование поляризационной дисперсии волоконных световодов, изогнутых по спирали // Наукові праці ОНАЗ ім О. С. Попова. – Одеса, 2009.
6. Смеликова И. Н., Юрченко А. С. Научно-технические проблемы транспорта, промышленности и образования: Труды Всероссийской научной конференции, 22 – 24 апреля 2008 г. / Под общ. ред. В. С. Шварцфельда. – 6, 2008. – С. 51-55.
7. Прокопович М. Р., Резак Е. В. Инновационные технологии – транспорту и промышленности // Труды 45-й Международной научно-практической конференции ученых транспортных узлов, инженерных работников и представителей академической науки, 7 – 9 ноября 2007 г. / Под ред. Ю. А. Давыдова. – 2007. – № 2. – С. 146-148.
8. Прокопович М.Р., Резак Е.В., Смеликова И.Н. Влияние изгиба оптического волокна на значение поляризационной модовой дисперсии: Международный оптический конгресс «Оптика XXI век». – Санкт-Петербург, 20 – 24 октября, 2008. – С. 278-281.
9. Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П. Оптические системы передачи. – К.: Техніка, 1994. – 388 с.

Надійшла 7.9.2009 р.

УДК 621.314.222.8

А.М. ЗАЛІЗЕЦЬКИЙ, В.В. ГАЙ
Хмельницький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ

В статті розглянуто проблему, що пов'язана з врахуванням впливу дійсних похибок на метрологічні характеристики трансформаторів напруги задля підвищення точності вимірювання напруги, а отже, і обліку електричної енергії.

In article it is contemplated a problem which is connected with the account of influence of the valid errors on metrological characteristics of transformers of voltage for the sake of increase of accuracy of measurement of pressure, and so, and the account of electric energy.

Ключові слова: трансформатори напруги, метрологічні характеристики.

Постановка проблеми

Споживання електроенергії висуває все більш високі вимоги до точності її обліку, а відповідно, і до точності вимірювальних трансформаторів напруги (ТН). Одним із шляхів підвищення точності, що не потребує збільшення маси, габаритних розмірів, вартості ТН, пов'язаний з врахуванням їх дійсних похибок в реальних умовах роботи. Дослідженням контролю дійсних похибок ТН задля підвищення точності вимірювання напруги, а отже, і обліку електричної енергії присвячена дана стаття.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомо, що похибка по напрузі f і кутова похибка δ залежать від впливаючих факторів: вхідної напруги, потужності вторинного кола S_2 , коефіцієнта потужності навантаження $\cos \varphi$ і температури t [1]. В зв'язку з цим дійсна похибка в умовах експлуатації відрізняється від номінальних значень похибок, визначених факторами: $U_1 = U_{1ном}$; $S_2 = S_{2ном}$; $\cos \varphi = 0,8$; $t = 20^\circ\text{C}$.

Похибки ТН розраховуються за формулами [1]:

$$f_p = \{-R_1P - X_1Q - [(R_1 + R'_2)\cos \varphi + (X_1 + X'_2)\sin \varphi]S_2\}U_1^{-2}, \quad (1)$$

$$\delta_p = \{-R_1Q - X_1P + [(R_1 + R'_2)\sin \varphi + (X_1 + X'_2)\cos \varphi]S_2\}U_1^{-2}, \quad (2)$$

де $P = pt$; $Q = q_1t + q_2S_m$; p – питома потужність втрат, Вт/кг;

q_1, q_2 – питомі намагнічуючі потужності, з розмінностями відповідно В·А/кг і В·А/см²;