

---

---

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

---

---

УДК 681.7.068

В.М. ШАПАР

### ОПТИЧНИЙ ПОГОДЖУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ БАГАТОКАНАЛЬНОГО ОПТИЧНОГО ОБЕРТОВОГО З'ЄДНУВАЧА З ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМИ ДЖГУТАМИ

*Інститут фізики напівпровідників  
ім. В.Є Лашкар'ова НАН України  
Київ, Україна, E-mail: v\_shapar@rambler.ru*

**Анотація.** Дана робота присвячена розробці та дослідженням ефективного оптичного погоджувального пристрою, призначеного для зменшення величини оптичних втрат при передачі оптичних сигналів між багатожильним волоконно-оптичним джгутом і моносвітловодом, які суттєво відрізняються по діаметру. В результаті проведених досліджень на прикладі сферичної кулькової лінзи встановлено, що для кожного заданого кутового розподілу променів на виході джгута при заданому співвідношенні діаметрів та числових апертур кабелю і джгута існує оптимальний радіус кривизни сферичних поверхонь фокусної лінзи (для кулькової лінзи оптимальний діаметр), при якому коефіцієнт оптичного зв'язку між джгутом світловодів та кабелем досягає максимального значення. Показано, що при використанні в оптичному погоджувальному пристрої кулькової лінзи оптимального діаметру коефіцієнт оптичного зв'язку може бути збільшеним в декілька разів, інколи на порядок, по відношенню до використання неоптимальної по діаметру лінзи.

**Abstract.** Present work is concerned with the development and investigation of the effective optical adjusting element intended for the decreasing of the optical losses value during transfer of the optical signals between fiber optic bundle and light waveguide which are sufficiently different in diameter. As a result of the carried out investigations (on the example of the spherical lens) it is established, that for each preset angle distribution of rays and given ratio of the diameters and numerical apertures of bundle and light waveguide the optimal curvature radii of the spherical surfaces of the focusing lens exists (for sphere lens – optimal diameter) for which the coefficient of the optical coupling between light waveguide and bundle of light waveguides is maximal. It is shown, that in the case of the use of spherical lens in the optical adjustment device the coefficient of the optical coupling can be increased in several times, sometimes on an order of magnitude in comparison to the use of the non-optimal on the diameter lens.

**Аннотация.** Данная работа посвящена разработке и исследованию эффективного оптического согласующего элемента, предназначенного для уменьшения величины оптических потерь при передаче оптических сигналов между многожильным волоконно-оптическим жгутом и моносветоводом, существенно отличающихся по диаметру. В результате проведенных исследований на примере оптической шариковой линзы установлено, что для каждого заданного углового распределения лучей на выходе жгута и заданного соотношения диаметров и числовых апертур жгута и моносветовода существуют оптимальные радиусы кривизны сферических поверхностей фокусирующей линзы (для шариковой линзы оптимальный диаметр) для которых коэффициент оптической связи между световодом и жгутом световодов является максимальным. Показано, что при использовании в оптическом согласующем устройстве шариковой линзы оптимального диаметра коэффициент оптической связи может быть увеличен в несколько раз, иногда на порядок, по отношению к использованию неоптимальной по диаметру линзы.

**Ключові слова:** оптичний погоджувальний пристрій, волоконно-оптичний джгут, оптична лінза.

#### ВСТУП

Ціллю цієї роботи являлась розробка ефективного і разом з тим технологічно простого

оптичного погоджувального пристрою для багатоканальних оптичних обертових з'єднувачів (ООЗ) з волоконно-оптичними джгутами.

Як відомо [1], при передачі оптичних сигналів між волоконно-оптичними джгутом світловодів та волоконно-оптичним кабелем, що суттєво відрізняються по діаметру, існує проблема вводу-виводу світлових пучків із волоконно-оптичного джгута в волоконно-оптичний кабель.

Величина додаткових оптичних втрат  $\alpha_d$  при передачі оптичного сигналу від світловоду більшого діаметру  $D_1$  до світловоду меншого діаметру  $D_2$  залежить від співвідношення їх діаметрів і у відповідності до математичної залежності  $\alpha_d = 20 \cdot \log(D_1/D_2)$  може бути суттєвою [1]. Так наприклад, при співвідношенні діаметрів  $5 \div 20$ , що досить часто відображає реальну ситуацію в оптичних та оптоелектронних пристроях з волоконно-оптичними джгутами, таких як, наприклад, волоконно-оптичні вимірювальні перетворювачі фізичних величин [2], або багатоканальні оптичні обертові з'єднувачі (ООЗ), що побудовані на основі світловодних джгутів [3,4], величина оптичних втрат при даному співвідношенні діаметрів становить  $14 \div 26$  дБ. Оскільки величина  $\alpha_N$  оптичних втрат, пов'язаних з неузгодженістю числових апертур світловодів, при передачі сигналу від світловода з більшою числовою апертурою  $NA_1$  до світловода з меншою числовою апертурою  $NA_2$  визначається аналогічною математичною залежністю  $\alpha_{NA} = 20 \cdot \log(NA_1/NA_2)$ , стає зрозумілим, що при використанні в пристроях багатожильних волоконно-оптичних джгутів з числовою апертурою світловодів яка співпадає з числовою апертурою волоконно-оптичного кабелю, застосування традиційних погоджувальних пристроїв (ПП) прямого виграшу не дає, оскільки при стисненні світлового пучка до меншого діаметру пропорційно зростає апертура променів стиснутого світлового пучка.

Із вищесказаного випливають наступні загальні рекомендації, якими користуються розробники оптоелектронної апаратури для вирішення цієї проблеми:

- по можливості використовують волоконно-оптичні джгути з мінімальною числовою апертурою світловодів у джгутах, яка має бути меншою за числову апертуру кабелю;
- на виході джгута використовують фокусну оптику, коефіцієнт підсилення якої у найпростішому випадку розраховують виходячи, або з умови узгодження діаметрів світлового пучка і кабелю, або з умови узгодження їх апертур, коли кінцевий пучок променів з аксіально-симетричною структурою розповсюджується по світловоду без він'єтування [5].

На практиці ці прості рекомендації не завжди дають бажаний результат, що обумовлено спрощеною процедурою розрахунків, при проведенні яких не враховують реальну діаграму направленості променів на виході волоконного джгута, вважаючи її ламбертовою. Зрозуміло, що розрахунки оптичного погоджувального пристрою проведені з урахуванням діаграми направленості дозволяють сконструювати більш ефективний погоджувальний пристрій.

В даній роботі зроблено припущення і проведені дослідження впливу на ефективність ПП окрім діаграми направленості, також кривизни поверхні погоджувальної лінзи. Наскільки відомо подібні дослідження в літературі не наведені.

В результаті проведених досліджень на прикладі кулькової лінзи методом комп'ютерного моделювання встановлено, що для кожного заданого кутового розподілу променів на виході джгута при заданому співвідношенні діаметрів та числових апертур кабелю і джгута існує лінза з оптимальною кривизною сферичних поверхонь (для кулькової лінзи з оптимальним діаметром), при використанні якої коефіцієнт оптичного зв'язку між джгутом і кабелем може бути збільшеним в декілька разів, інколи на порядок, по відношенню до лінзи неоптимальної по діаметру.

## 1. ОПТИЧНА СХЕМА ПОГОДЖУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ТА ЙОГО АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ

За для досягнення максимальної технологічності та надійності оптичного з'єднання, в основу розробки погоджувального пристрою покладена найпростіша оптична схема з однією кульковою лінзою із сапфіру (див.рис.1).

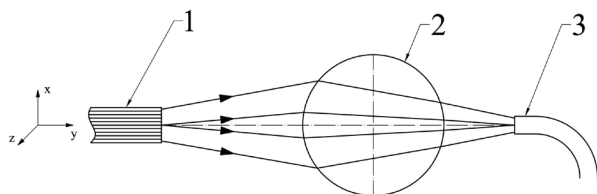


Рис. 1 Оптична схема погоджувального пристрою:  
1 – Волоконно-оптичний джгут;  
2 – кулькова лінза; 3 – приймальний світловод

Кулькова лінза легко центрується, а вибраний матеріал сапфір має високий показник заломлення  $n=1,7$ , причому постійний в широкому спектральному діапазоні довжин хвиль від  $\lambda=0,85\mu\text{м}$  до  $\lambda=3\mu\text{м}$ . Високий показник заломлення  $n$  лінзи дозволяє зменшити габарити погоджувального пристрою, а незалежність  $n$  від  $\lambda$  дозволяє використовувати погоджувальний пристрій одночасно на різних робочих довжинах хвиль (характерні робочі довжини хвиль сучасних ліній зв'язку становлять  $0,85\mu\text{м}$ ,  $1,3\mu\text{м}$  та  $1,55\mu\text{м}$ ), що забезпечує ООЗ більш широкі функціональні можливості, в тому числі дозволяє використовувати техніку спектрального ущільнення каналів зв'язку в ООЗ.

Зупинимось на деяких деталях математичної моделі пристрою. Математична модель ПП розроблена на основі геометричної оптики, в якій враховані практично усі параметри, що впливають на коефіцієнти оптичного зв'язку між волоконно-оптичним джгутом та волоконно-оптичним кабелем, а саме: 1) кутова залежність інтенсивності оптичного сигналу на виході із торця волоконного джгута; 2) волоконна структура торця джгута; 3) діаметри торця джгута і кабелю; 4) радіус кривизни сферичної поверхні лінзи; 5) показник заломлення лінзи; 6) геометрія розташування лінзи по відношенню до торців джгута і кабелю.

Алгоритм проведених розрахунків можна умовно поділити на декілька етапів, до яких можна віднести:

- 1 – вибір системи координат та задання в даній системі координат розташування джгута, кабелю і лінзи, які являються змінними параметрами при моделюванні пристрою, а також математичне описання лінзи з урахуванням фізичних властивостей;
- 2 – визначення початкових координат і направляючих косинусів променів, що випромінюються з торця джгута;
- 3 – визначення математичних рівнянь, що описують хід променів в оптичному пристрої;
- 4 – проведення розрахунків величини оптичних втрат методом числового інтегрування при передачі сигналів від джгута до оптичного кабелю.

### 1.1 НАПРАВЛЯЮЧІ КОСИНУСИ ВХІДНИХ ПРОМЕНІВ

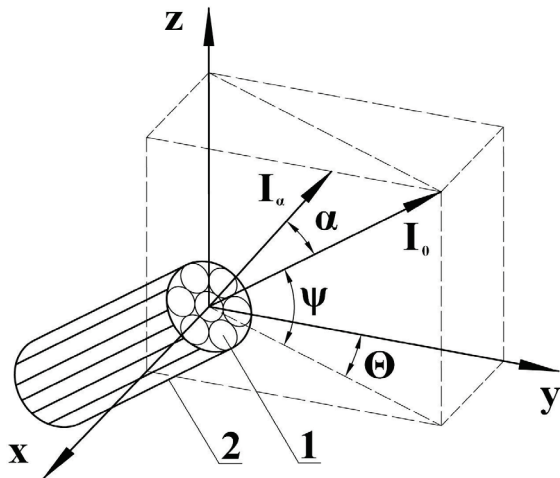


Рис. 2. Схема розташування торця волоконно-оптичного джгута в вибраній системі координат: 1 – одиночний світловід; 2 – джгут світловідів;  $I_0$  – промінь, що розповсюджується вздовж оптичної осі виходу світловода;  $I_\alpha$  – промінь який описує світловий конус навколо осі;  $I_0$  виходу світловода

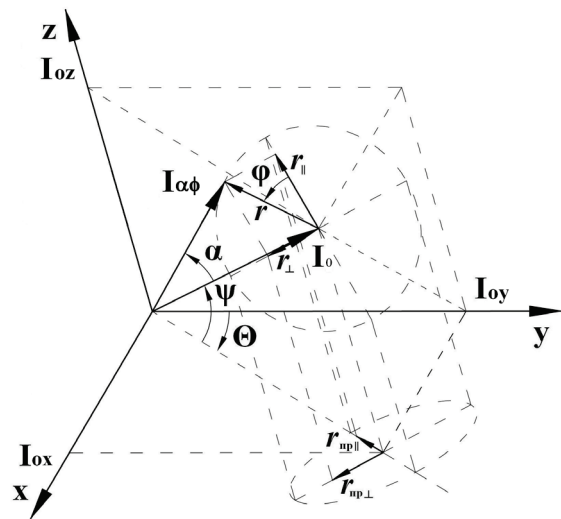


Рис.3. Хід променів на виході торця світловода і їх проекції в прямокутній системі координат:  $I_0$  – промінь, що розповсюджується вздовж осі виходу світловода зі скошеним торцем;  $I_{\alpha,\phi}$  – промінь який описує світловий конус навколо осі виходу світловода  $I_0$

При створенні математичної моделі та написанні комп'ютерної програми для проведення розрахунків подібних оптичних пристроїв, першочерговим являється оптимальний вибір системи координат та визначення в даній системі за допомогою математичних рівнянь направляючих косинусів вхідних променів і їх координат. Для оптичної схеми, показаної на рис.1, вибрана прямокутна система

координат з початком на торці волоконно-оптичного джгута (див. рис.2). Для визначення направляючих косинусів вхідних променів в даній системі скористаємось допоміжним рисунком 3, на якому наглядно зображено хід променів і їх проекції на відповідні осі вибраної системи координат.

В загальному випадку вхідний та вихідний торці світловода мають скоси по відношенню до осі світловода. При наявності скосів у торців, промінь який розповсюджується всередині світловода вздовж його осі, на вході та виході світловода розповсюджується під деяким кутом до осі в напрямках які іменуються в літературі віссю входу та віссю виходу світловода [5]. На рис. 2 віссю виходу світловода є промінь  $I_0$ . Решта промінів на виході світловода утворюють вихідний світловий конус, який має номінальну апертуру, що залежить від числової апертури світловода та кута скосу торця світловода. На рис. 3 світловий конус на виході світловода зображений за допомогою променя  $I_{\alpha\varphi}$ .

Асиметрія конусів входу і виходу відносно осей не дозволяє ідеально узгоджувати круглі зніці випромінюючої та приймальної систем зі світловодом, через що має місце або часткова втрата енергії в світловоді, або лише часткове заповнення світлом периферійних часток приймача [5]. Для того щоб цього не стало необхідно точно знати кути скосу торців і точно орієнтувати світловоди в просторі по відношенню до оптичного джерела світла, що відноситься до складної процедури налагодження і суттєво ускладнює пристрій. Тому на практиці стараються використовувати джгути і окремі світловоди з прямими торцями.

У випадку світловодів з прямими торцями при перпендикулярному падінні світлового пучка на вхідний торець світловода, напрямок  $I_0$  вихідного променя співпадає з нормаллю до вихідного торця світловода. При цьому промінь  $I_{\alpha\varphi}$  описує твірну прямого конуса з центром на осі  $I_0$  (див. рис. 3), а його інтенсивність залежить тільки від кута  $\alpha$  (має місце аксіальна симетрія просторового розподілу інтенсивності світлового пучка на виході світловода).

Виражаючи напрямок променя  $I_0$  через кути  $\theta$  і  $\psi$  нахилу променя до площини XOY і YOZ, а напрямок променя  $I_\alpha$  через кут  $\alpha$  між променем  $I_\alpha$  і променем  $I_0$  і через азимутальний кут  $\varphi$  обертання променя  $I_\alpha$  навколо променя  $I_0$  можна знайти направляючі косинуси l, m, n променя на виході світловода.

Для визначення направляючих косинусів для загального випадку введемо додатковий вектор  $r$ , який проведемо з кінця вектора  $I_0$  перпендикулярно до  $I_0$ . При цьому вектор  $I_\alpha$  дорівнює сумі векторів  $I_0$  і  $r$ . Проекції вектора  $I_\alpha$  на осі координат знаходимо як суму проекцій векторів  $I_0$  і  $r$  на відповідні осі координат. З рис. 3 неважко бачити, що проекції вектора  $I_0$  визначаються наступними рівняннями:

$$\begin{cases} I_{ox} = I_0 \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta \\ I_{oy} = I_0 \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta \\ I_{oz} = I_0 \cdot \sin \psi \end{cases} \quad (1)$$

Для визначення проекцій  $r_x$ ,  $r_y$ ,  $r_z$  вектора  $r$  на осі координат розкладемо даний вектор на дві складові:  $r_{\parallel}$  - проекцією вектора  $r$  на площину в якій лежить вектор  $I_0$  і вісь OZ, та  $r_{\perp}$  - проекцію вектора  $r$  на площину перпендикулярну до вище вказаної (вектор  $r_{\perp}$  паралельний площині XOY).

По побудові з рис.3 неважко бачити, що проекції вектора  $r$  на осі координат виражаються через задані кути  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  наступними рівняннями:

$$\begin{cases} r = I_0 \cdot \tan \alpha \\ r_{\perp} = r \cdot \sin \varphi \\ r_{\parallel} = r \cdot \cos \varphi \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} r_{np\perp} = r \cdot \sin \varphi \\ r_{np\parallel} = r \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_x = r \cdot \sin \varphi \cdot \cos \Theta - r \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \sin \Theta \\ r_y = -r \cdot \sin \varphi \cdot \sin \Theta - r \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos \Theta \\ r_z = r \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi \end{cases} \quad (4)$$

Після складання відповідних проекцій векторів  $I_0$  і  $r$  на осі координат знаходимо координати  $x_1$ ,

$y_1, z_1$  проєкцій вектора  $I_\alpha$  :

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + I_0 \cdot \cos \psi \cdot \sin \Theta + I_0 \cdot \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \cos \Theta - I_0 \cdot \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \sin \Theta \\ y_1 = y_0 + I_0 \cdot \cos \psi \cdot \cos \Theta + I_0 \cdot \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \Theta - I_0 \cdot \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos \Theta \\ z_1 = z_0 + I_0 \cdot \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi + I_0 \cdot \sin \psi \end{cases} \quad (5)$$

де  $x_0, y_0, z_0$  - координати виходу світлового променя із світловода. На рис.3 координати  $x_0, y_0, z_0$  співпадають з початком вибраної системи координат.

Виключивши  $I_0$  із системи рівнянь (5), знаходимо в загальному випадку направляючі косинуси світлового променя на вході оптичного погоджувального пристрою, які виглядають наступним чином:

$$\begin{cases} m = 1 \\ l = \frac{\cos \psi \cdot \sin \Theta + \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \cos \Theta - \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \sin \Theta}{\cos \psi \cdot \cos \Theta - \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \Theta - \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos \Theta} \\ n = \frac{\tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi + \sin \psi}{\cos \psi \cdot \cos \Theta - \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \Theta - \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos \Theta} \end{cases} \quad (6)$$

Значення кутів  $\varphi, \theta, \psi, \alpha$  та їх знаки при проведенні розрахунків ПП визначаються із наступних міркувань.

Кут  $\varphi$  обертання променя  $I_\alpha$  навколо  $I_0$  становить  $360^\circ$ . За початок відліку кута  $\varphi$  взята площина, в якій лежить вектор  $I_0$  та його проєкція на площину координат XOY.

Кути  $\theta$  і  $\psi$  визначають похибку кутового положення торця волоконно-оптичного джгута відносно оптичної осі погоджувального пристрою у двох площинах. В джгутах з прямими торцями, встановлених в ООЗ з високою точністю, значення кутів  $\theta, \psi$  не перевищують  $0,2^\circ$  і практично не впливають на результат розрахунків. Отже значеннями кутів  $\theta, \psi$  можна знехтувати, а рівняння (6) можна спростити.

Кут  $\alpha$  завжди позитивний. Його граничне значення вибирається із діаграми направленості променів на виході світловода з умови, що в напрямках кутів, які перевищують деякий граничний кут, випромінюється незначна кількість енергії якою можна знехтувати, наприклад менше 1% від усієї енергії. Для діаграми направленості показаної на рис.4 значення граничного кута  $\alpha$  вибрано  $7,5^\circ$ .

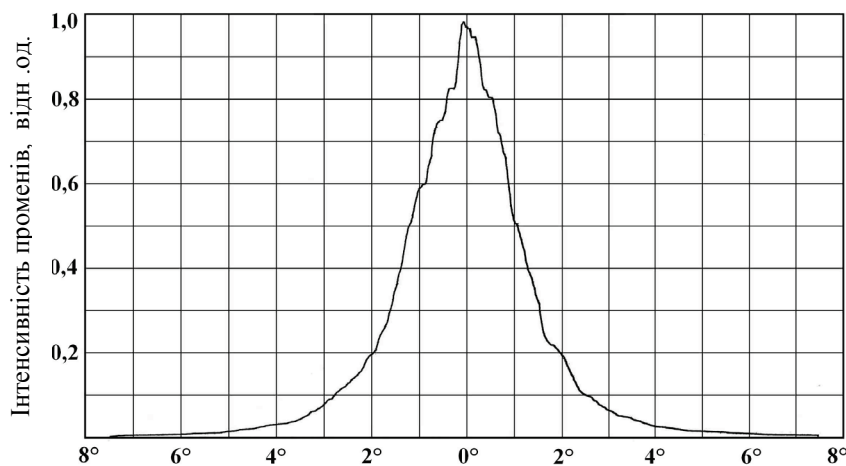


Рис.4. Індикатриса світлопропускання волоконно-оптичного джгута в паралельних вхідних пучках променів

Діаграма направленості на рис. 4 отримана експериментальним шляхом для волоконно-оптичного джгута гексагональної упаковки при опроміненні вхідного торця джгута колімованим пучком світла. Вимірювання діаграми направленості проведені на гоніометрі ГС-2 по стандартній методиці.

## 1.2 ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ВХІДНИХ ПРОМЕНІВ

При гексагональній упаковці світловодів в волоконно-оптичному джгуті координати розташування центрів торців світловодів  $X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}$  на торці джгута можна визначити із наступних рівнянь

$$\begin{cases} x_{ij} = x_0 + i \cdot D_f & \text{- для парних значень } j; \\ x_{ij} = x_0 + D_f / 2 + i \cdot D_f & \text{- для непарних значень } j; \\ y_{ij} = 0 \\ z_j = z_0 + j \cdot D_f \cdot \sqrt{3} / 2 \end{cases} \quad (7)$$

де  $j$  – номер ряду розташування світловодів вздовж осі  $OZ$ ;  $i$  – номер світловоду, розташованого в заданому ряді вздовж осі  $OX$ ;  $D_f$  - діаметр світловодів в джгуті.

В системі рівнянь (7) рядам світловодів, що розташовані вздовж осі  $OX$  над площиною  $XOY$  присвоєний знак плюс, а рядам світловодів, що знаходяться під площиною  $XOY$  знак мінус. Світловодам, що розташовані в кожному ряді в позитивному напрямку осі  $OX$  присвоєний знак плюс, а світловодам які розташовані в негативному напрямку осі  $OX$  знак мінус. **З урахуванням** сказаного індексам  $i, j$  присвоєні значення:

$$i = -m_i \div m_i; \quad j = -n_j \div n_j \quad (8)$$

При заданому діаметрі джгута максимальна кількість  $m_i$  рядів світловодів в джгуті і максимальна кількість  $n_j$  світловодів в центральному ряді джгута залежать від діаметру  $D_b$  волоконно-оптичного джгута і діаметру  $D_f$  світловода у джгуті, і визначаються як ціле число із рівнянь:

$$m_i = \frac{D_b - D_f}{\sqrt{3} \cdot D_f}; \quad n_j = \frac{D_b - D_f}{2 \cdot D_f} \quad (9)$$

Для волоконно-оптичного джгута з круглим торцем до уваги беруться тільки ті значення  $m_i$  і  $n_j$ , для яких виконується додаткова умова

$$\sqrt{(x_{ij})^2 + (z_j)^2} \leq \frac{D_b - D_f}{2} \quad (10)$$

Умова (10) виключає можливість виникнення в розрахунках похибки, зв'язаної з відсутністю в реальному джгуті з круглим торцем деякої частини світловодів розташованих на периферії джгута, які фізично не можуть вміститися в отворі наконечника діаметром  $D_b$ .

При визначенні координат світловодів можливі два випадки: на діаметрі джгута розміщується парна, або непарна кількість світловодів. Замітимо, що така неоднозначність в структурі торця призводить до неоднозначного визначення координат торців світловодів у джгуті за допомогою системи рівнянь (7). Для зняття цього питання комп'ютерна програма написана таким чином, щоб автоматично встановлювати центр торця джгута в началі системи координат і в залежності від співвідношення діаметрів джгута і світловодів у джгуті автоматично визначати яка кількість світловодів знаходиться на діаметрі джгута і якщо на діаметрі джгута  $D_b$  при  $i=0; j=0$  розміщується непарна кількість світловодів, в рівняннях (7) приймається значення  $x_0 = 0$ , при парній кількості світловодів приймається значення  $x_0 = D_f / 2$ .

## 1.3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКІВ ВЕЛИЧИНИ ОПТИЧНИХ ВТРАТ

Після написання відповідних математичних рівнянь і визначення ходу променів, ефективність оптичного погоджувального пристрою розраховувалась як відношення кількості світлових променів, що потрапили на торець приймального світловода в апертурному куті вхідного світлового конуса світловода, до всієї кількості променів, що випромінюються торцем волоконно-оптичного джгута з урахуванням кутового розподілу елементарних променів по інтенсивності.

Для визначення інтенсивності одного елементарного променя зробимо деякі спрощення. Розглядаючи структуру торця волоконного джгута неважко бачити, що торець джгута, як джерело світла, складається з матриці дискретних випромінювачів, кожен з яких представляє собою торець окремого світловода. При співвідношенні діаметрів торця джгута до торця світловода в джгуті більше ніж 20 разів (в розрахунках прийнято  $D_b = 0,8$  мм,  $D_f = 0,024$  мм), розмірами торців світловодів можна знехтувати, прийнявши кожен із світловодів як точкове джерело світла, що випромінює гомоцентричний пучок променів, сумарна інтенсивність яких відповідає загальній інтенсивності випромінювання з усієї поверхні торця світловода в усіх можливих просторових напрямках. Дане спрощення дозволяє суттєво скоротити час проведення розрахунків без особливої втрати точності проведених розрахунків.

Визначені як гомоцентричні оптичні пучки кожного із світловодів, були в подальшому поділені на  $n$  конічних пучків з шагом  $\Delta\alpha$  при вершині плоского кута круглого конуса, кожен з яких в свою чергу був додатково поділений на  $g$  азимутальних секторів. Після розбиття по вище описаній процедурі загального оптичного конічного пучка на елементарні пучки, була отримана інтенсивність одного елементарного променя, як сумарна інтенсивність усіх променів що випромінюються з торця світловода в межах заданого елементарного тілесного кута в напрямку центрального променя цього елементарного тілесного кута.

Перед тим як вирахувати інтенсивність такого елементарного променя  $P_{elem}$ , вираховувалась загальна інтенсивність  $P_{ik}$  усіх променів, що розповсюджуються між двома конічними поверхнями з кутами при вершині  $\alpha_i$  і  $\alpha_k$  з наступної математичної залежності [6]:

$$P_{ik} = 2\pi \cdot I_{ik} \cdot [\cos(\alpha_i) - \cos(\alpha_k)], \quad (11)$$

де  $\alpha_i$  і  $\alpha_k$  - плоскі кути при вершині відповідних конусів;  $I_{ik}$  - інтенсивність світлового потоку вздовж твірної конуса, заданого кутами  $\alpha_i$  і  $\alpha_k$  як середнє арифметичне від значення цих кутів.

Інтенсивність одного променя вираховувалась шляхом ділення загальної інтенсивності  $P_{ik}$  пучка променів що випромінюються в заданому конусі на кількість секторів  $g$ , на які поділений світловий конус, з наступної математичної залежності

$$P_{elem} = P_{ik} / g \quad (12)$$

При достатньо дрібному розбитті гомоцентричних пучків на світлові конуси, а конусів на елементарні сектори, точність розрахунків коефіцієнта передачі теоретично може бути скільки завгодно високою. Методом ітерацій встановлено, що на практиці для отримання точності розрахунків на рівні 1% достатньо вибрати  $g=72$ ,  $\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_k = 0,2^\circ$ .

При проведенні розрахунків були використані експериментальні дані кутової залежності інтенсивності світла на виході волоконно-оптичного джгута (див. рис. 4), отримані для випадку опромінення вхідного торця джгута паралельним світловим пучком при нормальному падінні променів на торець. В джгуті використовувались світловоди з діаметром  $D_f = 0,024$  мм. Кожен з торців світловодів в джгуті приймався як точкове джерело випромінювання з координатами розташування в центрі торця. Шаг розбиття плоского кута діаграми направленості становив  $0,2^\circ$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Опираючись на значення направляючих косинусів вхідних світлових променів, розрахованих за допомогою рівнянь (6), та значення початкових координат променів, розрахованих для торця джгута гексагональної структури за допомогою рівнянь (7), були проведені розрахунки коефіцієнту оптичного зв'язку між торцем волоконно-оптичного джгута та торцем волоконно-оптичного кабелю для різних діаметрів лінзи  $d$ , волоконно-оптичного джгута  $D_b$ , і приймального кабелю  $D_c$ .

Змінними параметрами при комп'ютерному моделюванні пристрою були відстань  $F_1$  від випромінюючого торця волоконно-оптичного джгута до задньої поверхні лінзи та відстань  $F_2$  від передньої поверхні лінзи до приймального торця волоконно-оптичного кабелю.

На рис. 5 приведені розраховані залежності коефіцієнту оптичного зв'язку для лінз діаметром  $d=1,75$  мм та  $d=3,5$  мм від відстані  $F_2$  для заданого значення  $F_1=1$  мм і  $F_1=2$  мм відповідно. Діаметр джгута прийнятий 0,8 мм. Розрахунки проведені для двох випадків: з урахуванням числової апертури кабелю при  $NA=0,19$ , та без урахування числової апертури кабелю ( $NA=1$ ), тобто для випадку коли до уваги приймається тільки сам факт фокусування променів на торець волоконно-оптичного кабелю.

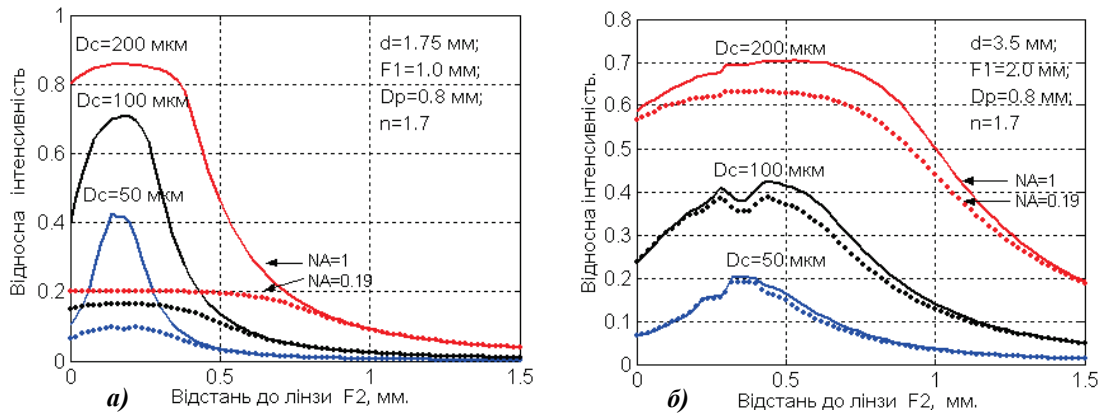


Рис.5. Сімейство залежностей коефіцієнту оптичного зв'язку між волоконно-оптичним джгутом діаметром 0,8 мм та кабелями різного діаметру  $D_c=0,05$  мм; 0,1 мм; 0,2 мм від відстані  $F_2$  між лінзою і торцем кабелю:

а) для лінзи діаметром  $d=1,75$  мм; б) для лінзи діаметром  $d=3,5$  мм

Для кожної з кривих, представлених на рис. 5 були визначені максимальні значення відносної інтенсивності опромінення, що падає на торець кабелю і інтенсивності яка вводиться в кабель для різних діаметрів сердечини кабелю, 0,05 мм, 0,1 мм, 0,2 мм, після чого були проведені аналогічні розрахунки для інших значень змінного параметру  $F_1$  і на основі отриманих результатів побудовані криві залежності максимально можливого значення  $K$  коефіцієнту оптичного зв'язку для лінзи заданого діаметру від відстані  $F_1$ .

Для прикладу на рис. 6а) і 6б) приведені залежності  $K=f(F_1)$  максимального коефіцієнту оптичного зв'язку від відстані  $F_1$  для двох значень діаметру лінзи  $d=4,5$  мм, та  $d=1,75$  мм.

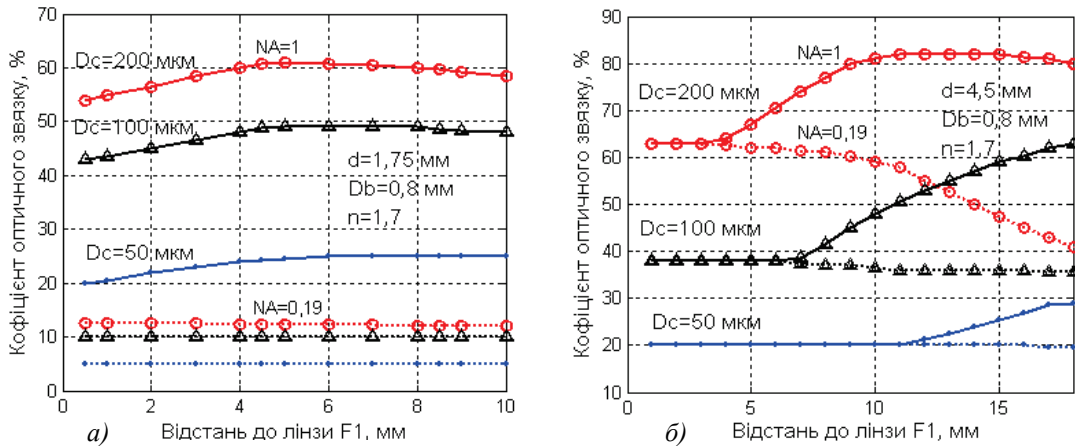


Рис. 6. Розраховані криві залежності максимального коефіцієнту оптичного зв'язку між торцем волоконно-оптичного джгута та торцем волоконно-оптичного кабелю від відстані  $F_1$  між торцем джгута і краєм кулькової лінзи:

а) – діаметр лінзи  $d=1,75$  мм; б) - діаметр лінзи  $d=4,5$  мм

З рисунків 6а), 6б) неважко бачити, що в залежності від діаметру лінзи максимально можливий коефіцієнт оптичного зв'язку суттєво відрізняється. Використовуючи лінзу діаметром 4,5 мм в кабель діаметром  $D_c=100$  мкм з числовою апертурою  $NA=0,19$  можна ввести до 48% від усієї енергії що випромінюється торцем джгута, в той час як лінза діаметром 1,75 мм дозволяє досягти максимальної ефективності вводу тільки 10%.

Наступним кроком при проведенні розрахунків було визначення діаметру лінзи, при якому досягається найвища ефективність вводу опромінення від джгута світловодів в волоконно-оптичний кабель. Для цього були проведені розрахунки оптичного погоджувального пристрою з лінзами різного діаметру від 1 мм до 10 мм. Визначивши для кожної лінзи максимальні значення коефіцієнту оптичного зв'язку при оптимальному розташуванні лінзи відносно торців джгута і кабелю, будувались криві залежності цих значень від діаметру лінзи.



На рис.7 приведено сімейство розрахованих характеристик максимально можливої ефективності вводу променів в волоконно-оптичний кабель в залежності від діаметру лінзи для трьох значень діаметру кабелю 0,05 мм, 0,1 мм та 0,2 мм, та двох значень числової апертури кабелю  $NA=1$  і  $NA=0,19$ .

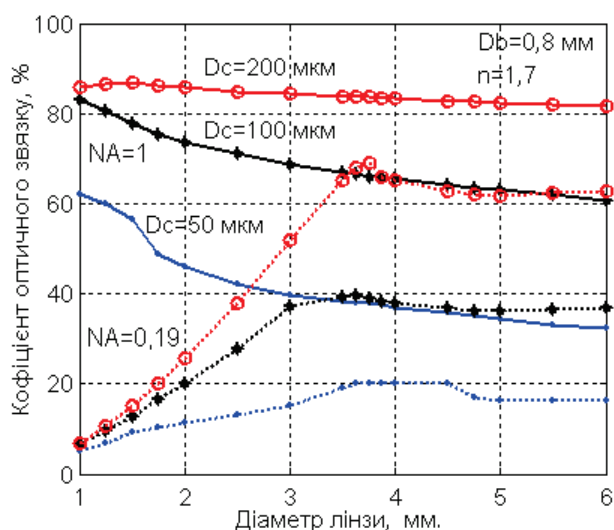


Рис. 7. Сімейство залежностей максимального можливого коефіцієнту оптичного зв'язку між джгутом світловодів та волоконно-оптичним кабелем від діаметру кулькової лінзи, розрахованих для різних діаметрів  $D_c$  серцевини волоконно-оптичного кабелю

З рис. 7 неважко бачити, що в залежності від діаметру вибраної фокусної лінзи для розглянутої на рис. 4 діаграми напрямленості випромінювання на виході торця волоконного джгута і заданого співвідношення діаметрів і числових апертур джгута і кабелю різниця в ефективності використання оптичного погоджувального пристрою на основі кулькової лінзи може відрізнятись для кабелю діаметром 0,05 мм в чотири рази, а для кабелю діаметром 0,2 мм більш як в 10 разів, якщо вибрати кульки діаметром 4 мм і 1 мм.

## ВИСНОВКИ

1. В оптичному погоджувальному пристрої, призначеному для виводу-вводу оптичних сигналів з багатожилного волоконно-оптичного джгута в волоконно-оптичний кабель, побудованому на основі геометричної оптики, для кожного заданого кутового розподілу променів на виході волоконно-оптичного джгута та заданого співвідношення діаметрів і числових апертур джгута і кабелю існує фокусна лінза з оптимальною кривизною сферичних поверхонь (для кулькової лінзи з оптимальним діаметром), при використанні якої коефіцієнт оптичного зв'язку між джгутом і кабелем є максимальним.

2. При використанні в оптичному погоджувальному пристрої кулькової лінзи оптимального діаметру коефіцієнт оптичного зв'язку між джгутом світловодів і моносвітловодом може бути збільшеним в декілька разів, інколи на порядок, по відношенню до використання фокусної лінзи неоптимальної по діаметру.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Manfred Kaiser "Optische Stecker" // Elektronik, 1979. N8, s. 90-96.
2. Даниелян Г.Д., Федін Ю.Н. "Волоконно-оптические датчики микроперемещений" // Приборы и системы управления, 1998. №8, с.28-30
3. Шапар В. М., Свечніков С.В. "Малогабаритний багатоканальний оптичний обертовий з'єднувач з волоконно-оптичним кільцевими перетворювачами." // Космічна наука і технологія, Додаток. 2003. Т.9, № 2, с. 36-40.
4. Шапар В. Н., Свечніков С.В., Олексенко П.Ф., "Многоканальный оптический вращающийся соединитель для РЛС космического базирования" // Космічна наука і технологія. Додаток.. 2003. Т 9, № 2, с. 30-35.
5. Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К. Оптика световодов. Л., "Машиностроение", 1977.-320 с.
6. Эпштейн М. И. Измерения оптического излучения в электронике. М., "Энергоатомиздат

Надійшла до редакції 25.05.2008р.

**ШАПАР В. М.** – старший науковий співробітник, інститут фізики напівпровідників ім.В.Є.Лашкарьова НАН України, Київ, Україна.