

БАГАТОКАНАЛЬНИЙ ОПТИЧНИЙ ОБЕРТОВИЙ З'ЄДНУВАЧ З ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМ КОМПЕНСАТОРОМ

Дана робота присвячена створенню багатоканального оптичного з'єднувача (ООЗ). В роботі приведені важливі конструкторсько-технологічні рішення ООЗ компенсаційної дії на вісім оптичних каналів передачі з волоконно-оптичним компенсатором циліндричної форми, побудованим на основі множини регулярних волоконно-оптичних джгутів, торці яких розташовані по кільцях, причому порядок розташування по кільцю одних торців світловодів вибраний оберненим відносно порядку розташування по кільцю других торців відповідних світловодів. Приведені технічні характеристики ООЗ, отримані шляхом експериментальних досліджень. По інформаційній ємності (кількості фізичних каналів) та отриманій стовідсотковій оптичній ізоляції між каналами створений ООЗ аналогів не має.

Ключові слова: Волоконно-оптичний обертовий з'єднувач, волоконно-оптичний компенсатор.

V.N. Shapar

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NAS of Ukraine, Kiev

A.V. Savchuk

International center "Institute for Applied Optics", NAS of Ukraine, Kiev

MULTI-CHANNEL OPTICAL ROTARY JOINT WITH FIBER-OPTICAL COMPENSATOR

Abstract – This work is devoted to the creation of a multichannel fiber optical rotary joint (FORJ). The important design and technological decisions of the FORJ of compensation action on eight optical channels of transmission with a fiber optic compensator of a cylindrical shape, constructed on the basis of a plurality of regular fiber optic bundle, whose ends are arranged in rings, are presented, in which the order of location on the ring of one end of the fiber optics is chosen as an inverse with respect to the ordering of the location of the other ends of the corresponding fiber bundle. The technical characteristics of FORJ obtained from experimental studies are presented. According to the information capacity (number of physical channels) and the obtained absolute optical isolation between the channels, the created FORJ has no analogues.

Key words: Fiber optic rotary connector, fiber optic compensator.

Вступ

В даний час багатьма вченими провідних країн світу ведуться інтенсивні дослідження в області створення багатоканальних оптичних обертових з'єднувачів (ООЗ), призначених для безконтактної передачі ширококутних сигналів з обертових об'єктів на нерухомі по волоконно-оптичним каналам зв'язку. Актуальність даної проблеми обумовлена, перш за все, недостатньою смугою передачі електричних каналів зв'язку струмознімальних пристроїв, традиційно використовуваних для вирішення подібних завдань, і широким впровадженням на обертові об'єкти волоконно-оптичних датчиків фізичних величин і волоконно-оптичних ліній зв'язку [1,2].

Для створення високоякісних багатоканальних ООЗ вивчаються можливості використання різних фізичних принципів, серед яких з точки зору можливості створення ООЗ на велику кількість незалежних фізичних каналів найбільш перспективним напрямком на сьогодні вважається принцип компенсації [3-6]. Розвитку даного принципу була присвячена робота [7], в якій наведено теоретичне обґрунтування нової концепції щодо здійснення компенсації. В [7] показано, що компенсацію можна досягти шляхом поетапного перетворення кутової швидкості обертання світлових пучків за допомогою спеціальних оптичних перетворювачів і наведені чисельні приклади технічних рішень реалізації цієї ідеї. Серед наведених в [7] технічних рішень компенсаторів і ООЗ, виділяється своєю особливістю конструкція ООЗ з волоконно-оптичним компенсатором, який створений на основі пучка світловодів, одні і другі торці котрого укладені по відповідних кільцях з оберненим порядком слідування торців світловодів по кільцях на протилежних сторонах компенсатора [6,8]. Конструкція має незайнятий простір на осі, що є важливим в багатьох її застосуваннях, оскільки вільний цент на осі пристрою може бути використаним для комплексного вирішення ряду інших завдань, зокрема для передачі електромагнітних хвиль міліметрового та сантиметрового діапазонів на обертову антену в РЛС з підсилювальними клістринами, тощо.

В даній роботі приведено короткий опис конструкції дослідного зразка ООЗ з цим компенсатором та приведені результати його експериментальних досліджень.

1. Принцип дії ООЗ.

Раніше, в роботі [7] була розвинута нова концепція щодо компенсації руху променів, показано що компенсувати обертання променів можливо шляхом поетапного перетворення кутових швидкостей обертання променів за допомогою спеціальних оптичних перетворювачів. Там же, отримане в загальному вигляді рівняння компенсації руху променів, яке виглядає наступним чином

$$\omega_L \cdot \prod_{i=1}^n K_i + \sum_{i=1}^n (1 - K_i) \cdot \omega_i \left[\prod_{i=1}^n K_i / \prod_{l=1}^i K_l \right] = 0, \quad (1)$$

де $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ - коефіцієнти перетворення кутової швидкості променів відповідних перетворювачів;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ - кутові швидкості обертання перетворювачів;

ω_L - кутова швидкість обертання вхідних променів

(оптичного передавача).

Аналізуючи рівняння (1) неважко бачити, що існує безліч його рішень. Серед цих рішень нас цікавлять тільки ті, які забезпечують найпростішу кінематику, тобто з одним перетворювачем, і рішення які дозволяють створити ООЗ без редуційного механізму, що як показано в роботі [], є можливим на базі двох перетворювачів.

У випадку використання в ООЗ тільки одного перетворювача рівняння (1) спрощується і має наступний вигляд

$$K \cdot \omega_L + (1 - K) \cdot \omega = 0, \quad (2)$$

де K и ω - коефіцієнт і кутова швидкість обертання перетворювача;

ω_L - кутова швидкість обертання променів на вході перетворювача.

Рівняння (2) так само, як і рівняння (1) має безліч рішень. Наприклад, рішеннями є: $K = 2, \omega = 2\omega_L$; $K = 1/2, \omega = -\omega_L$; $K = -1, \omega = \omega_L/2$ та інші. Серед цих рішень привертає увагу рішення з коефіцієнтом перетворення $K = -1$, тобто з перетворювачем, що інвертує напрямок обертання променів. Саме це рішення покладене в основу розробки експериментального зразка ООЗ.

Принцип дії пристрою пояснює рис.1. Волоконно-оптичний компенсатор (рис. 1) виконаний у вигляді пучка оптичних світловодів одні і другі торці яких розташовані впритул на відповідних кільцях, причому, порядок слідування по кільцю одних торців світловодів обраний зворотним по відношенню до порядку слідування по кільцю інших торців відповідних світловодів [8]. Компенсатор встановлений в пристрої між обертовою частиною 1 і стаціонарною частиною 2 на спільній з ним осі обертання і механічно з'єднаний з обертовою частиною 1 через редуційний механізм 4 з передавальним відношенням 1:2.

Працює пристрій наступним чином. При повороті частини 1 зі світловодами 5, 6, 7 на кут φ щодо стаціонарної частини 2, компенсатор 3 теж повертається щодо цієї частини на кут $\varphi/2$. При цьому, світлові промені, що випромінюються торцями світловодів 5, 6, 7, повертаються щодо компенсатора на вході компенсатора на кут $+\varphi/2$, а на виході компенсатора на кут $-\varphi/2$. Щодо стаціонарної частини 2, світлові промені залишаються нерухомими, оскільки компенсатор 3, повертаючись відносно стаціонарної частини 2 на кут $-\varphi/2$, одночасно переносить на цей самий кут світлові промені. Пристрій є симетричним, і тому обертова і нерухома частини на рис. 1 вказані умовно, а оптичні канали зв'язку є двонаправленими.

Оптичні характеристики цього ООЗ залежать від конструкції компенсатора і якості його виконання. Вибір конструкції компенсатора визначається з одного боку технологічністю конструкції і можливістю її технічної реалізації за допомогою доступних не дорогих технологій, з іншого боку – вимогами до характеристик пристрою.

Схематично зображений на рис. 1 компенсатор умовно складається із світловодів, розташованих по кільцю в один ряд.

В реальній конструкції для недопущення значних оптичних втрат і модуляційних викривлень амплітуди оптичного сигналу, обумовлених радіальними биттями компенсатора, кількість рядів світловодів на кільцевій поверхні компенсатора має становити декілька десятків, при цьому світловоди мають мати малий діаметр (бажано не більше 30 мкм). Виготовити такий компенсатор технологічно складно. Достатньо технологічною, на наш погляд, є конструкція компенсатора, виконаного на основі багатожильних регулярних волоконно-оптичних джгутів з торцями прямокутного перетину, які розташовані на циліндричній поверхні осі в порядку слідування зазначеному на рис. 1. Така конструкція компенсатора є простотою і водночас дозволяє отримати високі технічні характеристики. Для виготовлення компенсатора

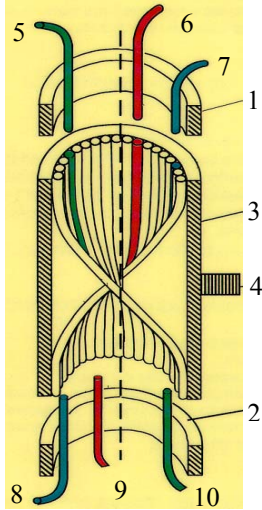


Рис. 1. Принципова схема ООЗ з волоконно-оптичним компенсатором:
1 – обертова частина;
2- стаціонарна частина;
3- волоконно-оптичний компенсатор;
4 – редуційний механізм;5 – 10 – світловоди.

потрібні світловодні джгути з прямокутними торцями високої точності. Лабораторна технологія виробництва таких джгутів була успішно вирішена на початку 2000 років при виконанні науково-технічного проекту УНТЦ №1446 (керівник проекту Шапар В.М.).

Як видно з рис. 2, компенсатор, побудований на основі волоконних джгутів з прямокутними торцями має недоліки в щільності розташування світловодів на осі, що впливає на передаточну характеристику пристрою.

Між прямокутними торцями світловодів на кільцевій оптичній поверхні компенсатора є V-подібні щілини, через що інтенсивність оптичного сигналу переданого через компенсатор залежить від азимутального положення світлового пучка і при переміщенні світлового пучка по кільцю періодично змінюється від максимального значення до мінімального з частотою кратній кількості джгутів в компенсаторі.

З метою визначення впливу на рівень модуляції сигналу різних конструктивних чинників в роботі [6] була розроблена фізико-математична модель пристрою і проведено дослідження його поведінки методом комп'ютерного моделювання. Для наочності нижче наведені співвідношення, за якими проведено моделювання пристрою з ідеальним по геометрії компенсатором, тобто компенсатором у якого волоконні джгути виконані з абсолютно точними розмірами і мають перетин у формі ідеального квадрата. При цьому, прийнято, що прямокутні торці волоконних джгутів ідеально розташовані на циліндричній поверхні осі і утворюють прилеглими до циліндричної поверхні осі сторонами правильний рівносторонній багатогранник (див. креслення на рис. 2).

Можна показати, що в разі світлового пучка круглого перетину, залежність коефіцієнта передачі від азимутального положення світлового пучка для ідеального по геометрії компенсатора описується наступними математичними співвідношеннями:

$$K = 1 - \frac{c\sqrt{r^2 - c^2} + r^2 \arcsin \frac{c}{r} + d\sqrt{r^2 - d^2} + r^2 \arcsin \frac{d}{r}}{\pi \cdot r^2}, \quad (3)$$

$$c = (R + b) \sin(\vartheta - \varphi) - a/2, \quad (4)$$

$$d = (R + b) \sin(\vartheta + \varphi) - a/2, \quad (5)$$

$$\vartheta = \arctg(a/2\rho), \quad (6)$$

де a - розмір сторони торця світловода;
 R - радіус циліндричної поверхні осі;
 r - радіус світлового пучка на вході компенсатора;
 b - відстань центру світлового пучка від циліндричної поверхні осі компенсатора;
 φ - кутове положення центру світлового пучка щодо радіальної лінії, що проходить через точку дотику між торцями світловодів в площині рисунку (рис. 2).

Розраховані з виразів (3-6) залежності коефіцієнта передачі $K = f(\varphi)$ для різних значень R/a і r/a наведені на рис. 3.

З рис. 3 видно, що використовуючи в компенсаторі значну кількість волоконних джгутів можна знизити величину амплітудної модуляції сигналу при його проходженні через компенсатор до рівня кращих світових зразків ООЗ, побудованих на основі призматичних

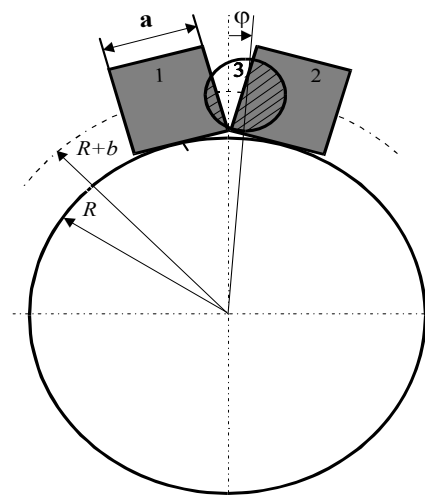


Рис. 2. Схема розташування прямокутних торців світловодів на циліндричній осі компенсатора: 1, 2 – торці світловодів; 3 – світловий пучок

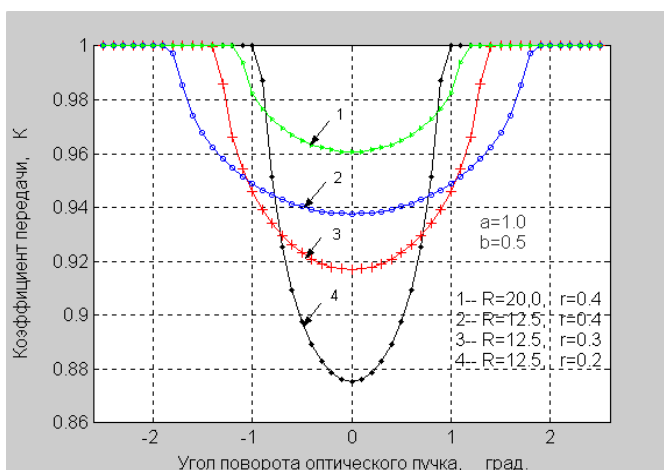


Рис. 3. Сімейство залежностей коефіцієнта передачі $K = f(\varphi)$, розрахованих для різних значень R/a і r/a компенсатора

компенсаторів. Але при цьому вимоги до точності виготовлення механізму, зокрема до торцевих биттів компенсатора, зменшуються порівняно з призматичними компенсаторами в десятки разів. Наприклад, якщо волоконно-оптичний компенсатор виготовити з розмірами торців джгутів 1x1 мм розташованих на осі діаметром 40 мм, то у випадку використання джерела світла з діаметром світлового пучка 0,8 мм, амплітудна модуляція сигналу не перевищить 4% при допустимих торцевих биттях компенсатора в 1°. В пристроях з оптичними призми для забезпечення вказаної величини амплітудної модуляції сигналу механізм має забезпечити торцеві биття призми на рівні кількох кутових секунд.

Зрозуміло, що при проектуванні пристрою потрібно шукати оптимум між ціною пристрою і його характеристиками. Як бачимо, пристрій з кращими характеристиками потребує більшої кількості джгутів з прецизійними торцями і більше затрат часу на його виготовлення, а отже є дорожчим. Тому при розробленні ООЗ нами було прийнято рішення створити експериментальний зразок, який би задовольняв обом вимогам. Конструкція створеного компенсатора і технологічні особливості його виготовлення приведені нижче.

2. Конструкція волоконно-оптичного компенсатора.

Зірне креслення волоконно-оптичного компенсатора зі світловодами приведено на рис. 4. Компенсатор складається із 42 волоконно-оптичних регулярних джгутів прямокутного перетину з розмірами торців $1,07 \times 2,18^{\pm 0,02}$ мм, які укладені на циліндричній осі широкою стороною до осі.

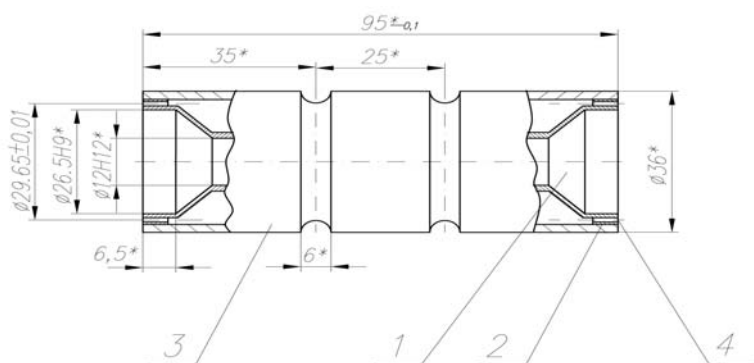


Рис. 4. Збірне креслення

волоконно-оптичного

компенсатора:

1 – вісь, 2 – тонкостінна втулка,

3 – корпус, 4 – світловоди

Разом з циліндричною віссю джгути встановлені в полий циліндр (корпус), на кінцях якого мають високоточні посадочні місця для установки компенсатора в корпус ООЗ.

Для виготовлення волоконно-оптичних джгутів з прецизійними розмірами торців була розроблена спеціальна установка для прецизійної різки світловодів за допомогою алмазних дисків. Джгути виготовлялись в два етапи. На першому етапі шляхом розпили регулярної волоконно-оптичної заготовки виготовлялись джгути з розмірами торців, які на декілька десятків мікрометрів перевищували номінальні розміри. Такий допуск необхідний щоб не пошкодити частини світловодів в джгуті розташованих на периферії джгута при розпилі заготовки на джгути. На другому етапі проводилась доводка розмірів торців світловодів до номінальних за допомогою сколювання торців світловодів плоским лезом із сапфіру під мікроскопом.

Торці світловодів укладались впритул на циліндричній поверхні осі і кріпились кільцевою тонкостінною втулкою (позиція 2 на рис. 4), внутрішній діаметр D_b якої вибирався із умови

$$D_b = \frac{a}{\sin[\arctg(a/2 \cdot (R + c))]} \quad (7)$$

де R – радіус циліндричної поверхні осі;

a – розмір сторони прямокутного торця світловода, що прилягає до циліндричної поверхні осі;

c – розмір сторони торця світловода, перпендикулярної до сторони a .

Після встановлення світловодів на осі і закріплення їх втулкою, останні проклеювались оптичним клеєм ОК-72ФТ і встановлювались в корпус компенсатора. Після затвердіння клею шліфувались разом з корпусом і полірувались з дотриманням вимоги



Рис. 5. Торць волоконно-оптичного компенсатора

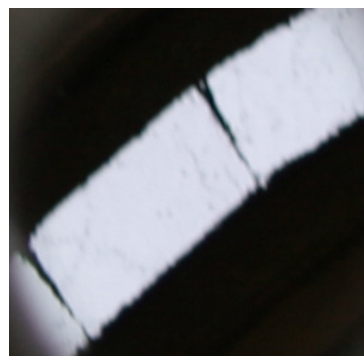


Рис. 6. Фрагмент торця волоконно-оптичного компенсатора

перпендикулярності торців світловодів до геометричної осі компенсатора.

Фотокартка торця виготовленого компенсатора приведена на рис. 5. На рис. 6 приведена фотокартка фрагменту торця компенсатора у збільшеному вигляді, на якому зображено розташування прямокутних торців світловодів на циліндричній осі.

Величину оптичних втрат в компенсаторі визначали як співвідношення інтенсивності світлового



Рис. 7. Фотокартка оптичного обертового з'єднувача

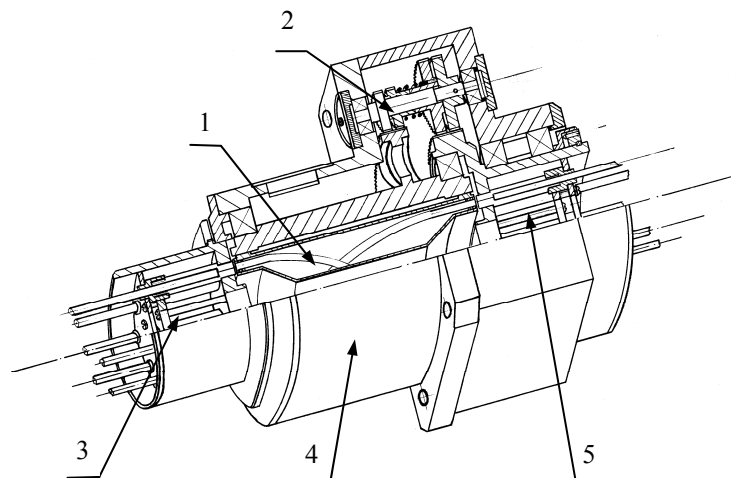


Рис. 8. Загальний вигляд оптичного обертового з'єднувача в аксонометричній проекції: 1 – компенсатор; 2 – редукційний механізм; 3, 5 – оптичні роз'єднання; 4 - корпус

потoku на виході компенсатора до інтенсивності світлового потоку на його вході. Для вводу світлового потоку в компенсатор використовувались спеціально розроблені для цих цілей волоконно-оптичні коліматори з чвертьхвильовою градієнтною лінзою діаметром 1 мм. Діаметр світлового пучка на виході лінзи становив приблизно 0,8 мм.

3. Конструкція оптичного обертового з'єднувача.

На рис. 7 і 8 показані фотокартка оптичного обертового з'єднувача та його загальний вигляд в аксонометричній проекції. На рис. 9 приведені збірне креслення конструкції ООЗ.

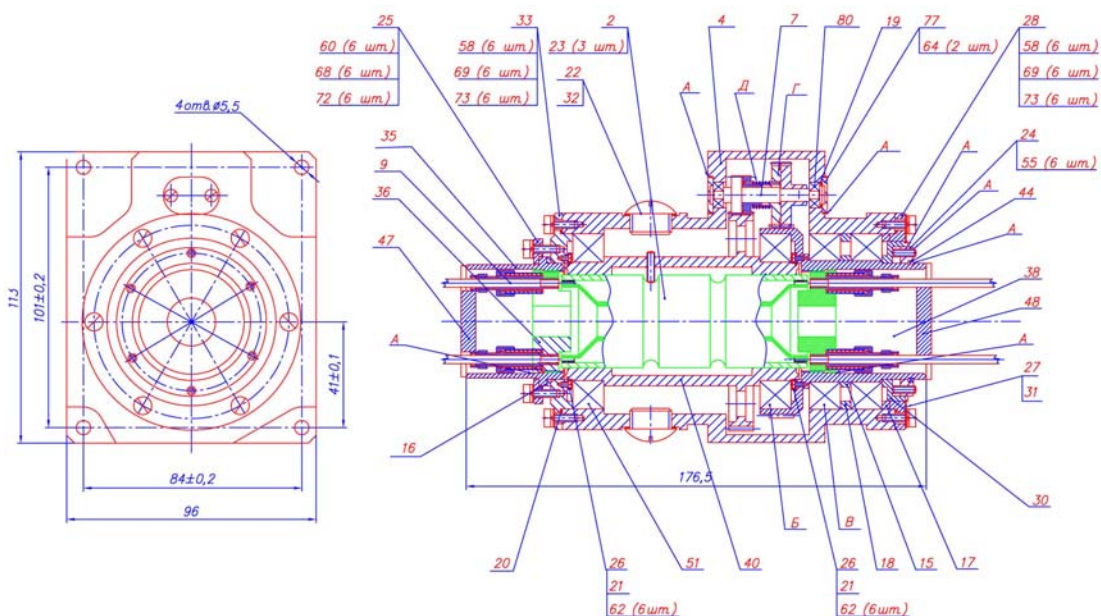


Рис. 9. Збірне креслення оптичного обертового з'єднувача

Конструкція ООЗ (див. рис. 9) складається із наступних збірних одиниць: стаціонарної частини 35 і рухомої частини 44, розташованих в корпусі 4 та встановленого між ними співвісно компенсаційного вузла 40 з волоконно-оптичним компенсатором 2. Компенсатор встановлений в корпус ООЗ, з обох сторін якого

розміщені передавальний та приймальний блоки з волоконно-оптичними лініями (волоконно-оптичними кабелями), в яких встановлені спеціалізовані оптичні роз'єднання 9 з оптичними елементами для фокусування або колімації оптичних пучків. На рис. 9 показані в якості фокусних та коліматорних елементів градієнтні четвертьхвильові лінзи. Конструкція ООЗ представляє собою прецизійний механізм з передачею обертового руху з рухомої частини на компенсаторний вузол з редукцією 1:2. Передача обертового руху забезпечується двома парами циліндричних зубчатих колес ланцюга редуктора 7. Збірне креслення ланцюга редуктора приведене на рис.10. Останній складається із трибки 1, колес циліндричних прямо зубчатих 3, 4, 5 та пружини 2.

З ціллю мінімізації значень мертвого ходу зубчастого колеса кожної пари маються люфтовибірні колеса. Заведення люфтовибірних колес перевищує на 6 значень приведений момент інерції рухомої

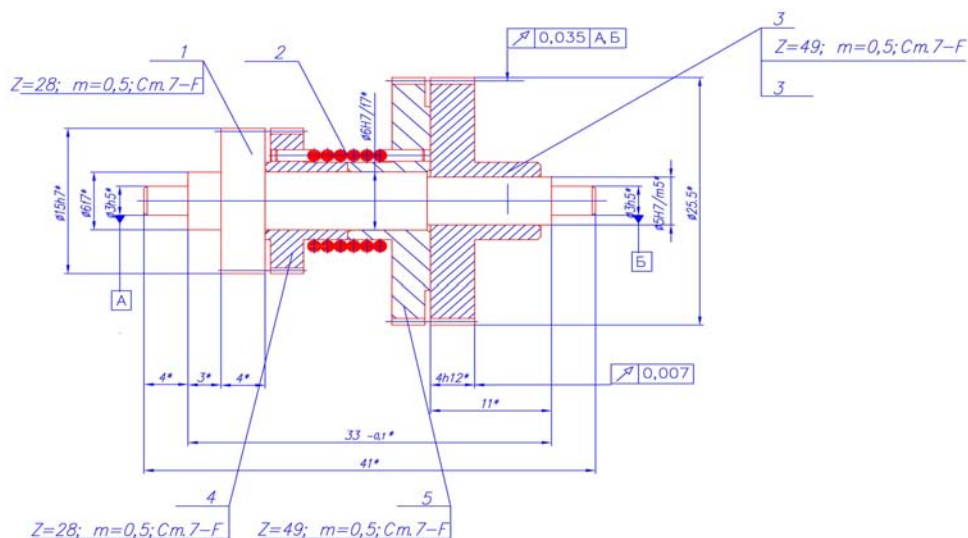


Рис. 10 Збірне креслення ланцюга редуктора

частини.

Осьові люфти рухомої частини мінімізовані за допомогою прокладок, які забезпечують осьовий натяг підшипників 30 мкм.

Механізм виконаний в вигляді закінченого блоку, який може бути встановлений в місцях, де потрібно передавати інформацію з рухомої частини на нерухому, і навпаки. Для кріплення передбачено чотири отвори $\phi 6$ мм. Передбачено захисні шайби і ущільнення з ціллю виключення попадання пилу і забруднення в зону проходження оптичних променів. Оптичні з'єднання волоконно-оптичних кабелів зв'язку встановлюються в висококласні посадочні місця.

Надійність роботи пристрою в умовах широкого температурного діапазону забезпечується точним виконанням механізму і використанням термостійкого оптичного клею марки ОК-72фт ГОСТ 14887 для склеювання оптичних деталей.

4. Результати експериментальних досліджень ООЗ в складі коротких волоконно-оптичних та електричних ліній зв'язку.

В процесі розроблення ООЗ попередньо був розроблений та виготовлений лабораторний зразок пристрою (прототип експериментального зразка) та проведені його дослідницькі іспити. Лабораторний

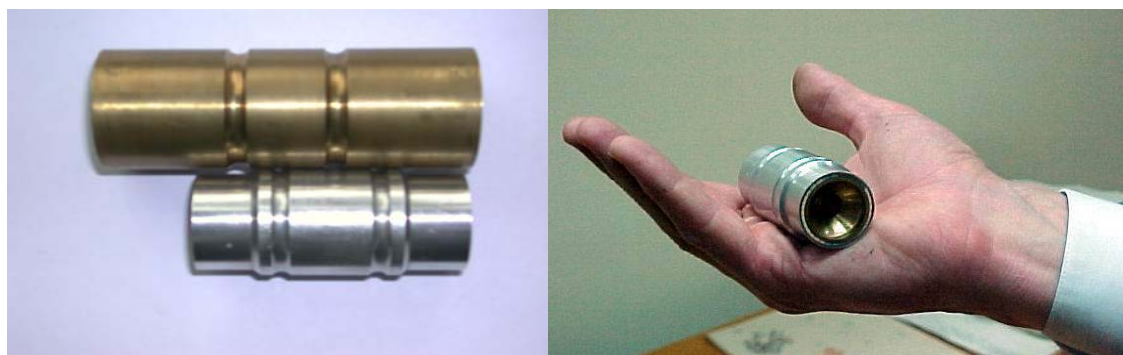


Рис. 11. Фотографії волоконно-оптичних компенсаторів

зразок відрізнявся меншими розмірами компенсатора (див. порівняльний рис. 11) та меншою точністю

виготовлення механізму для ООЗ.

Метою проведення дослідницьких іспитів являлось визначення реальних параметрів і характеристик пристрою, виконаного у вигляді макету, що наближається по своїм технічним характеристикам до експериментального зразка.

На етапі розробки експериментального зразка були проведені такі іспити лабораторного зразка:

1 - дослідження величини оптичних втрат в тракці передачі з ціллю визначення геометрії конструкції оптичного погоджувального пристрою для вводу-виводу оптичних сигналів із ООЗ;

2 - дослідження величини амплітудної модуляції оптичного сигналу з ціллю оптимізації конструкції



Рис. 12. Блок-схема установки для вимірювання величини оптичних втрат та амплітудно-кутової характеристики коефіцієнта передачі компенсатора.

компенсатора і механізму ООЗ;

3 - вимірювання рівня перехресної перешкоди між оптичними каналами з ціллю визначення мінімальної відстані між входами оптичних каналів пристрою, розташованих по кільцю.

Дослідження проводились при нормальних умовах по стандартній методиці за допомогою оптичного тестера. Для вимірювання величини перехресної перешкоди і рівня оптичних втрат між оптичними каналами передачі в ООЗ використовувались оптичні тестери ОМКЗ-76, які задовольняють вимогам 2.746.616. ТУ. Похибка вимірювань не перевищувала 5%.

Величина амплітудної модуляції визначалась шляхом вимірювання потужності оптичного сигналу на оптичних виходах ООЗ в різних кутових положеннях обертової частини в межі кутів повороту 360°.

В експериментальному зразку ООЗ були досліджені такі основні оптичні характеристики ООЗ: величина оптичних втрат, величина амплітудної модуляції оптичного сигналу при обертанні ротору відносно статору, а також частотна смуга каналів передачі.

Структурна схема установки для вимірювання величини оптичних втрат і рівня модуляції оптичної потужності сигналу показана на рис. 12.

В якості джерела світла в вимірювальній установці використовувались напівпровідникові лазери оптичного тестера ОМКЗ-76 з довжиною хвилі 0,85 мкм та 1,3 мкм і лазерні модулі ЛФО-65-d видимого діапазону випромінювання ($\lambda=0,65$ мкм) виробництва «ФТІ Оптронік» (С-Петербург, Росія) та ЛПМ-СТ виробництва НДІ «Поліус» (Москва, Росія) з довжиною хвилі випромінювання $\lambda=0,67$ мкм. В якості фотоприймачів використовувались калібровані кремнієві фотодіоди ФД-24К з підсилювачем фотоструму, виконаним по схемі перетворення «струм-напруга» на базі операційних підсилювачів фірми «Analog Devices», гарантуючих точність вимірювання величини фотоструму на рівні 0,1%.

Лазерні промені подавались на вхід компенсатора через одномодовий волоконно-оптичний кабель зі стандартним оптичним роз'єднанням типу ST і оптичним коліматором на вихідному кінці, виготовленим на основі четвертьхвильових градієнтних лінз, що забезпечили світовий потік з малим розходженням променів на виході кабелю (біля 0,7°).

Для дослідження величини модуляції оптичного сигналу в ООЗ був вмонтований датчик кута повороту, електричний сигнал з виходу якого подавався на один із входів чотирьохканального аналого-цифрового перетворювача, на інші входи якого подавались сигнали з виходів фотоелектричних перетворювачів.

Типова амплітудно-кутова залежність величини оптичного сигналу в каналах передачі на виході експериментального зразка ООЗ, що була виміряна в відносних одиницях по даній методиці, приведена на рисунку 13. Максимуми і мінімуми на даній характеристиці відповідають положенням оптичного пучка напроти торців світловодних джгутів в компенсаторі і відповідно напроти зазорів між торцями.

Визначена з даної характеристики величина амплітудної модуляції сигналу не перевищує 20%, що відповідає розрахованому значенню, якщо прийняти величину зазору між торцями світловодів 25 мкм, а кут скошу торців на рівні 1°. Значення діаметру світлового пучка і відстань b центру світлового пучка від циліндричної поверхні осі, які були використані при розрахунках, отримані експериментальним шляхом і

становили 0,8 мм і 0,6 мм відповідно.

Візуальні спостереження торця компенсатора під мікроскопом показали, що величина зазору між торцями світловодів знаходилась між 10 мкм та 30 мкм, а кут скосу торців частини світловодів становив біля 1° .

Величину оптичних втрат в компенсаторі визначали як співвідношення інтенсивності світлового потоку на виході компенсатора до інтенсивності світлового потоку на його вході (на виході коліматорної лінзи, за допомогою якої здійснювався ввід випромінювання в компенсатор з торця волоконно-оптичного кабелю).

Максимальна величина вимірних оптичних втрат в компенсаторі склала 3 дБ.

Вимірювання величини перехресної перешкоди між каналами проводилось шляхом подачі сигналу на один із входів і спостереженням за величиною сигналу в сусідніх каналах. На рівні чутливості вимірних пристроїв 80 дБ перехресна перешкода не була зафіксована.

Оптичні втрати вводу-виводу сигналу в кабель з діаметром сердцевини 100 мкм і числовою апертурою $NA=0,34$ становили 1,5 дБ. При використанні кабелю з діаметром сердцевини 50 мкм і числовою апертурою $NA=0,21$ оптичні втрати становили 7,5 дБ.

Дослідний зразок ООЗ досліджувався також на пропускання коротких ширококутових імпульсів тривалістю 20 нс з переднім та заднім фронтами тривалістю 6 нс. Спостереження форми імпульсів на стробоскопічному осцилографі типу С1-71 показали, що імпульси тривалістю 20 нс проходять оптичний тракт ООЗ практично без викривлень ($\tau < 1,5$ нс). Отже швидкість передачі цифрових сигналів в ООЗ становить не менше 500 Мбіт/с.

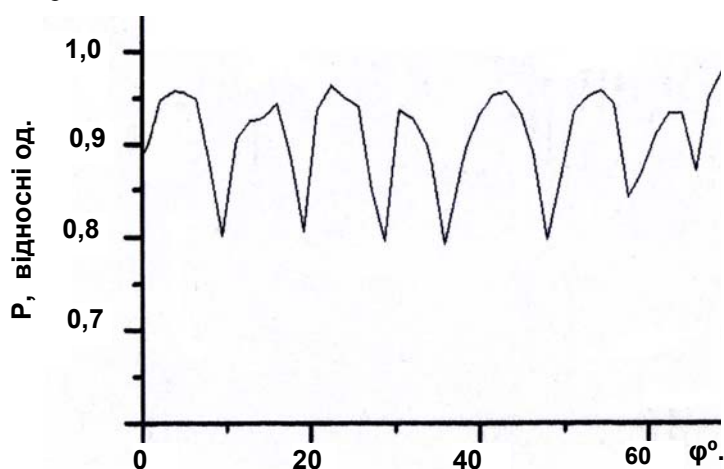


Рис. 13. Амплітудно-кутова залежність інтенсивності світлового потоку на виході експериментального зразка ООЗ в відносних одиницях

Висновки

На основі отриманих результатів досліджень експериментального зразка восьмиканального оптичного обертового з'єднувача з волоконно-оптичним компенсатором можна зробити такі висновки:

1. Основні технічні характеристики ООЗ відповідають сучасним вимогам, що пред'являються до ООЗ при передачі великих масивів ширококутової цифрової інформації з обертових об'єктів на нерухомі:

- кількість оптичних каналів в ООЗ з волоконно-оптичним компенсатором діаметром 25 мм становить 8 каналів і може бути збільшена до 12 за рахунок більш щільного розташування оптичних ввідів;
- величина оптичної ізоляції між каналами становить не менше 80 дБ;
- інформаційна пропускна здатність кожного каналу становить не менше 500 Мбіт/с;
- величина оптичних втрат безпосередньо в тракті передачі ООЗ не перевищує 3 дБ;
- величина додаткових оптичних втрат вводу-виводу оптичних променів із компенсатора ООЗ у волоконно-оптичний кабель залежить від характеристик кабелю. При використанні волоконно-оптичного кабелю з діаметром сердцевини 50 мкм і числовою апертурою $NA=0,19$ оптичні втрати вводу виводу сигналів із ООЗ становлять в середньому 7,5 дБ;

- величина амплітудної модуляції сигналу не перевищує 3 дБ.

2. Покращити технічні характеристики ООЗ можна таким чином:

- кількість оптичних каналів передачі можна збільшити до 25 шляхом збільшення розміру діаметру компенсатора до 45 мм ;

- величину складової оптичних втрат вводу-виводу оптичних сигналів із ООЗ можна знизити до рівня 5 дБ за рахунок використання кабелю з діаметром сердцевини 100 мкм і з високою числовою апертурою $NA=0,34$;

- величину амплітудної модуляції сигналу можна знизити до рівня 2 дБ за рахунок зменшення розміру сторін торців джгутів в компенсаторі до 1 мм, та за рахунок збільшення діаметру компенсатора до 45 мм;

3. Експериментальний зразок оптичного обертового з'єднувача повністю відповідає вимогам сучасних радіолокаційних комплексів і може бути використаним в якості базового для створення виробництва конкурентно здатних високоякісних багатоканальних ООЗ, що можуть знайти широке використання в радіолокаційних комплексах нового покоління та оптичних системах кругового спостереження.

4. Результати експериментальних досліджень основних технічних характеристик експериментального зразка ООЗ з високою точністю співпадають з розрахованими, що дозволяє в подальшому використовувати розроблену математичну модель ООЗ для проектування ряду пристроїв виключно шляхом комп'ютерного моделювання не вдаючись до високо затратного етапу експериментального макетування ООЗ.

Література

1. H. U. Nickel, A. Doleschel and M. Schmid. Multichannel rotary joints for surveillance radars - State-of-the-art and future trends, // *14th International Radar Symposium (IRS)*, Dresden, 2013, p. 282-287.
2. Glenn Dorsey. High-Speed Data Transmission and Rotary Platforms: Slip Rings, Fiber Optic Rotary Joints, and Multiplexers [Електронний ресурс]/MOOG Components Group. Application Note #204. 2005 - Режимдоступу: <https://www.researchgate.net/publication/242700826>.
3. Пат. № 4,109,998 США, МПК G02B 23/02. Optical slirings / Myren L. Iverson ; The USA as represented by the Secretary of the Navy- № 772396; заявл. 28.02.77; опубл.29.08.78; НПК 350/23, 250/578.
4. JIA Da-gong, ZHANG Pei-song, JING Wen-cai, TAN Jun, ZHANG Hong-xia, and ZHANG Yi-mo. Design of a multi-channel free space optical interconnection component // *Optoelectronics Letters* Vol.4, No.6, p. 0407-0409, 1 November 2008
5. H.Machida, H.Kobayashi, J.Akedo, K.Sawada, T.Yasukawa, R. Iino. Optical rotary connector // *Applide Optics / Vol. 27, No.15, p. 3078-3080, (1988)*.
6. Шапарь В. Н. Многоканальный оптический вращающийся соединитель для РЛС космического базирования / В.Н.Шапарь, С.В.Свечников, П.Ф. Олексенко // *Космічна наука і технологія. ДОДАТОК. -2003. -Т 9. -№ 2. С.30-35*
7. Шапарь В.Н. Принцип компенсации вращения световых пучков с поэтапным преобразованием их угловой скорости вращения / В.Н.Шапарь // *Зв'язок, -2004. -№5 (49). С.64-68.*
8. А.с. СРСР № 267390. С.В.Свечников, В.Н.Шапарь, Р.П.Джангобегов, А.Ф.Ильин и др. (СРСР). № заявки 3156922/3156923; Заявлено 08.12.86; дата выдачи 04.01.1988, не опубликовано.

References

1. H. U. Nickel, A. Doleschel and M. Schmid. Multichannel rotary joints for surveillance radars - State-of-the-art and future trends, // *14th International Radar Symposium (IRS)*, Dresden, 2013, p. 282-287.
2. Glenn Dorsey. High-Speed Data Transmission and Rotary Platforms: Slip Rings, Fiber Optic Rotary Joints, and Multiplexers [Електронний ресурс]/MOOG Components Group. Application Note #204. 2005 - Режимдоступу: <https://www.researchgate.net/publication/242700826>.
3. US Patent № 4,109,997, G02B 23/02. Optical slirings. Myren L. Iverson. 29.08.78.
4. JIA Da-gong, ZHANG Pei-song, JING Wen-cai, TAN Jun, ZHANG Hong-xia, and ZHANG Yi-mo. Design of a multi-channel free space optical interconnection component // *Optoelectronics Letters* Vol.4, No.6, p. 0407-0409, 1 November 2008
5. H.Machida, H.Kobayashi, J.Akedo, K.Sawada, T.Yasukawa, R. Iino. Optical rotary connector // *Applide Optics / Vol. 27, No.15, p. 3078-3080, (1988)*.
6. Shapar V., Svechnikov S., Oleksenko P. A multichannel optical rotary connector for space-based radar. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya. SUPPLEMENT. Vol. 9, #2, p.30-35, 2003 (in Ukrainian)*.
7. Shapar V.N. The principle of compensating the rotation of light beams with a step-by-step transformation of their angular velocity of rotation . *Zv'jazok, #5 (49), p.64-68, 2004 (in Ukrainian)*.
8. USSR Inventing Certificate № 267390. S.V.Svechnikov, V.N. Shapar, R.P. Djangobegov, A.F. Ilyin et al. (USSR). Appl. No 3156922/3156923; filed. 08.12.1986; date of issue 04.01.1988, not published.

Рецензент: д.ф.-м.н., О.В. Стронський



Лицар світла

Ректорат, професорсько-викладацький склад Вінницького національного технічного університету із скорботою повідомляють, що 7 червня 2017 року пішов з життя видатний вчений, Заслужений діяч науки та техніки України, академік АНУ, завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, професор Кожем'яко Володимир Прокопович.

Все своє життя професор Володимир Кожем'яко присвятив розвитку оптико-електронних та лазерних технологій, які сьогодні відіграють важливу роль у вирішенні таких завдань, як сталий розвиток, енергозбереження та охорона здоров'я.

Створення наукової школи професора Володимира Кожем'яка відбулося на основі революційних ідей наукової школи Майорова Сергія Олександровича, які були опубліковані в історичній статті "Исследование некоторых электрических характеристик квантрона как базисного элемента узлов вычислительной техники" і стали фундаментом подальшого розвитку концепції оптико-електронних вузлів обчислювальної техніки – квантронів та принципу квантування часу світловим променем.

Професором Володимиром Кожем'якою в 1987 році було створено СКТБ «Квантрон» для реалізації ідеї створення оптико-електронного квантового комп'ютера та плоского інтелектуального дисплея для вводу та відображення цифро-буквеної та графічної інформації. Було створено низку принципово нових пристроїв «Квант-1», «Квант-2», «Квант-3», «Квант-4», «Квант-5», «Квант-6», «Квант-7», «Квант-8», а наукову групу на чолі з професором Кожем'якою нагороджено багатьма золотими, срібними та бронзовими медалями на міжнародних виставках. І в основі всіх пристроїв був використаний новий функціональний елемент – квантрон.

І саме ці розробки стали піонерськими в напрямку створення сучасних плоских інтелектуальних дисплеїв, які сьогодні широко використовуються в електронних приладах в різних напрямках життєдіяльності людини.

Володимир Прокопович зробив величезний вклад в підготовку наукових та науково-педагогічних кадрів, за його книгами навчалося не одно покоління фахівців в області лазерних та оптико-електронних технологій. Має більш як 1000 патентів на винаходи і нагороджений медаллю Генрі Коунда за винахідницьку діяльність.

Володимир Прокопович відноситься до сузір'я вітчизняних вчених світового рівня, яких по праву можна назвати «піонерами оптоелектроніки», був чудовим вченим та педагогом, шляхетною людиною.

Пам'ять про Володимира Прокоповича Кожем'яку залишиться надовго а наших серцях. Це велика втрата для нас та світової науки!

Редакційна колегія МНТЖ ВОТТІ висловлює співчуття рідним та друзям Володимира Прокоповича, світла пам'ять про нього, як одного із перших членів редколегії журналу, буде збережено в наших серцях.