

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Харківський національний університет радіоелектроніки

АЛЛАХВЕРАНОВ Рауф Юсіф огли

УДК 681.7.068.4

ПРОЕКТУВАННЯ РОЗ'ЄМНИХ ОПТИЧНИХ З'ЄДНУВАЧІВ ДЛЯ
РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Невлюдов Ігор Шакірович, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри технології і автоматизації виробництва радіоелектронних і електронно-обчислювальних засобів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бондаренко Олег Володимирович, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, завідувач кафедри волоконно-оптичних ліній зв'язку.

доктор технічних наук, професор
Стрелков Олександр Іванович, Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, завідувач кафедри загальної фізики.

Захист відбудеться «25» квітня 2012р., о 15-й годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки, за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розіслано «15» березня 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради, проф., д.т.н.



Безрук В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Основною перевагою оптичних радіотехнічних систем (РТС) є потенційно необмежена смуга частот і, відповідно, можливість передачі великих обсягів інформації з високою швидкістю. Саме ця обставина визначила застосування оптичних РТС для добування і передачі інформації (навігація, локація, зв'язок, інтернет, медицина).

Продуктивність таких систем залежить від рівня втрат інформаційного сигналу. У свою чергу відомо, що величина втрат в оптичних РТС залежить від кількості роз'ємних оптичних з'єднувачів (РОЗ), що вміщуються в одиниці об'єму апаратури. Тобто, продуктивність радіооптичних систем безпосередньо пов'язана з величиною втрат у РОЗ.

Для розроблення сучасних РОЗ необхідно створювати не тільки конструкції з малим рівнем втрат і відбиття оптичного сигналу, але й з невеликою собівартістю і складністю, а також високою надійністю. Оскільки задовольнити всім вимогам у рамках однієї конструкції досить складно, то на сьогодні розроблено близько сотні типів РОЗ для оптичних кабелів різного призначення. Однак, методи вибору оптимальної конструкції РОЗ, виходячи з тих або інших вимог, поки що не розроблені.

Аналіз публікацій, пов'язаних з питаннями розроблення і конструювання РОЗ, показав, що процес проектування сучасних РОЗ до початку роботи над дисертацією не був формалізований і базувався на застосуванні евристичних методів, вибір яких залежав від досвіду того або іншого розроблювача. Водночас проектування інших пристроїв оптичних РТС добре розвинене і відставання в рівні проектування РОЗ сильно позначається на процесі розвитку радіооптичних систем у цілому.

У зв'язку з цим можна стверджувати, що тема роботи є актуальною, в ній вирішуються питання формалізації процесу проектування РОЗ і вибору їх ефективної конструкції, що задовольняє заданим вимогам під час мінімізації втрат інформаційного сигналу в РТС.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження за темою дисертації пов'язані з планами держбюджетних і госпдоговірних тем НДР, котрі виконувалися в Харківському національному університеті радіоелектроніки:

1. Держбюджетна тема № 189 “Теоретичні основи створення перспективних компонентів та нових технологій їх виробництва для широкого класу волоконно-оптичних систем” (МОНУ № 960 від 22.12.2004 р., № ДР 0105U002739).

2. Держбюджетна тема № 224 “Конструкторсько-технологічні основи створення перспективних компонентів електромеханічних систем та технологій їх виробництва” (МОНУ № 1044 від 27.11.2007 р., № ДР 0108U002216).

3. Держбюджетна тема № 248 “Теоретичні основи мікромеханічних систем, проектування та технології їх виробництва для гнучких інтегрованих систем” (МОНУ № 686 від 22.07.2009 р., № ДР 0110U002594).

4. Господогвірна тема № 11-21 “Дослідження і вибір фізико-технологічних методів проектування оптичних з'єднувачів з малими втратами”(№ 11-21 від 03.10.2011 р.).

В усіх перерахованих вище НДР автор був виконавцем.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка процедур формалізації процесу проектування РОЗ на основі вибору методу прийняття рішень і вдосконалення фізико-технологічних моделей РОЗ, які враховують, стосовно відомих, більшу кількість факторів, що призводять до втрат інформаційного сигналу в з'єднувачах ліній передачі оптичних РТС.

Для досягнення зазначеної мети в роботі вирішено такі задачі:

1. Розробка підходу до формалізації процесу проектування РОЗ. Вибір методу прийняття рішень і декомпозиція загальної задачі проектування на ряд часткових задач, що відбивають різні рівні проектування (електродинамічний, конструкторський і технологічний).

2. Удосконалення часткових аналітичних і фізико-технологічних моделей для електродинамічного, конструкторського та технологічного етапів проектування на основі: обліку більшої, ніж у відомих моделях, кількості факторів, що впливають на втрати в РОЗ; застосування нових способів самоюстування, технологічних прийомів і нових матеріалів.

3. Проведення чисельних і натурних експериментів та порівняння їх результатів з метою доведення достовірності запропонованих процедур формалізації проектування РОЗ.

Об'єкт дослідження. Процес формалізації процедур проектування РОЗ.

Предмет дослідження. Методи формалізації процедур проектування РОЗ.

Методи дослідження. Методи: прийняття рішень; моделювання електродинамічних, конструкторських і технологічних процесів проектування РОЗ. Чисельний і натурний експерименти.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено підхід до формалізації процедур проектування РОЗ, котрий базується на застосуванні методу байєсівських статистичних рішень і вдосконалених моделей, які використовуються під час декомпозиції проектних процедур на етапі електродинамічного, конструкторського і технологічного проектування, що дозволило підійти до створення основ автоматизованого проектування РОЗ.

2. Удосконалено наближену електродинамічну модель РОЗ для одномодового оптичного волокна (ОВ), що базується на розв'язанні хвильових рівнянь для серцевини і оболонки ОВ, що дає можливість розрахувати втрати, що вносяться, зумовлені геометричними факторами, і обґрунтувати величини допусків на розміри РОЗ.

3. Удосконалено математичну модель електродинамічного етапу проектування РОЗ для багатомодових ОВ, засновану на аналізі оптичної системи РОЗ на мікролінзах, що дозволило визначити шляхи корекції помилок зображення.

4. Обґрунтовано новий метод самоюстування оптичних волокон для створення РОЗ із мінімально можливими втратами, що вносяться, на основі якого вдосконалено одну з можливих фізико-технологічних моделей для етапу конструкторського проектування.

5. Удосконалено інформаційну модель технологічного етапу проектування РОЗ, розроблено нові технологічні прийоми одержання молекулярно-гладкого сколу, що має корозійностійку поверхню, строго перпендикулярну щодо оптичної осі хвилеводу, що зменшує втрати в РОЗ.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблена сукупність моделей РОЗ і способів мінімізації в них втрат являє собою науково-обґрунтовану реалізаційну базу для проектування РОЗ.

2. Визначено допуски на поперечну неузгодженість оптичних осей волокон, які забезпечують задані втрати, що вносяться.

3. Отримано нові знання про ефективні конструкції РОЗ, що самоюстуються, і технології виробництва їх елементів з матеріалу фторопласт-40.

4. Отримано нові дані чисельних і натурних експериментів про величину втрат у РОЗ, які суттєво доповнюють досвід розроблювачів.

5. Результати роботи впроваджені у виробництво (ННЦ “Інститут метрології”, м. Харків; ТОВ “Стерлінг Груп Україна”, м. Запоріжжя; ДНВП «Об'єднання Коммунар», м. Харків) і в навчальний процес (Харківський національний університет радіоелектроніки; Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського “ХАІ”; Запорізький національний технічний університет), що підтверджується відповідними актами впровадження.

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертаційної роботи зумовлена коректним використанням відомих методів прийняття рішень, електродинаміки, розрахунків елементів РОЗ, а також результатами порівняння даних розрахунків за створеними моделями і натурними експериментами.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві й особисто, здобувачем виконані такі дослідження: запропоновано підхід для розв'язання поставлених задач [1, 3, 5, 6, 10]; запропоновано нову модифікацію наближеної електродинамічної моделі [16]; вирішена задача аналізу оптичної системи РОЗ [4, 12, 17, 18, 19]; запропоновано новий метод самоюстування ОВ для створення РОЗ із мінімально можливими втратами, що вносяться [7, 9, 11, 14]; запропоновано новий метод одержання молекулярно-гладкого сколу [2, 8]; проведено чисельні й натурні експерименти [13, 15, 20].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації були подані і доповідались на Міжнародних конференціях, форумах та наукових семінарах: I-й міжнародній науково-практичній конференції “Безпека та захист інформації в інформаційних і телекомунікаційних системах” (м. Харків, 2008 р.); 3-му Міжнародному радіоелектронному форумі (МРФ-2008) “Телекомунікаційні системи і технології” (м. Харків, 2008 р.); IV-й міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки,

телекомунікацій та інформаційних технологій” (м. Запоріжжя, 2008 р.); XVIII International conference ”New leading technologies in machine building” (Kharkov-Rybachie, 2008p.); 13-му, 15-му міжнародних молодіжних форумах ”Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті” (Харків, 2009, 2011 pp.); IX-й міжнародній науково-практичній конференції “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів”, (Кременчук, 2010 р.); на фаховому науковому семінарі кафедри “Конструювання та технології виробництва радіоапаратури”, радіоприладобудівного факультету Запорізького національного технічного університету (Запоріжжя, ЗНТУ 23.05.2011 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 9 статей у виданнях, які входять до переліку, затвердженого ВАК України, а також 11 тез доповідей на Міжнародних конференціях і форумах.

Структура дисертаційної роботи. Робота складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел зі 170 найменувань і 3 додатків. Робота містить 150 сторінок, 33 рисунки, 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання досліджень. Визначено наукову новизну роботи та її практичне значення. Наведено дані про особистий внесок автора в роботах, виконаних самостійно та у співавторстві, апробацію результатів дисертації та відомості про публікації за темою дисертації.

Перший розділ роботи носить постановчий характер. У ньому, на основі аналізу сучасного стану розробок в області РОЗ, дано характеристику досягнутого дотепер технологічного рівня РОЗ. Показано, що з’єднувач – досить складний технічний пристрій. Конструкція РОЗ складається з таких елементів:

- наконечник або інший елемент для фіксації волокон;
- елемент центрування ОВ, що зрощуються, один відносно одного;
- корпус із елементами захисту від неправильного підключення вилки до розетки і кутового повороту ОВ, що зрощуються, один відносно одного;
- елементи фіксації світловодів і кабелю за зміцнювальні покриття;
- хвостовик, що забезпечує дотримання заданої величини радіусу вигину ОВ на вході у вилку;
- захисний ковпачок.

Залежно від форми реалізації РОЗ ті або інші конструктивні елементи, з наведеного списку, можуть бути у складі вилки чи розетки, або не бути взагалі.

Зазначено, що основними параметрами, котрі характеризують якість РОЗ як елементів радіоелектронних систем, є загасання, що вноситься, і зворотне відбиття. Ці показники якості прямо або побічно залежать від принципу реалізації РОЗ (наприклад, буде використано принцип безпосереднього контакту ОВ, чи використано лінзову систему тощо) та від параметрів кожного з елементів з’єднувача, тобто від використовуваних матеріалів, технології виконання і т.п.

На даний час розроблено значну кількість РОЗ, що відрізняються як конструктивним виконанням того чи іншого елемента, так і використовуваними при цьому матеріалами і технологією виготовлення. При цьому процес проектування не формалізований і істотно залежить від досвіду та інтуїції розроблювачів. Тому в роботі пропонується сформулювати спільне завдання проектування РОЗ як процес пошуку, у ході якого послідовно мають бути вирішені чотири типи частинних завдань:

- вибір найбільш ефективного принципу реалізації з'єднувача для конкретних умов і вимог;
- вибір раціонального технічного рішення для кожного з елементів (щоб вирішити ці завдання, варіюються конструктивні елементи і ознаки для визначення найбільш доцільної їхньої комбінації);
- визначення оптимальних значень параметрів вибраного технічного рішення, виходячи з необхідних показників якості РОЗ;
- вибір технологічного процесу, котрий дозволяє реалізувати необхідні показники якості компонентів РОЗ.

Дані задачі вирішуються на різних етапах проектування і являють собою свого роду рівні деякого ієрархічного процесу (рис. 1).

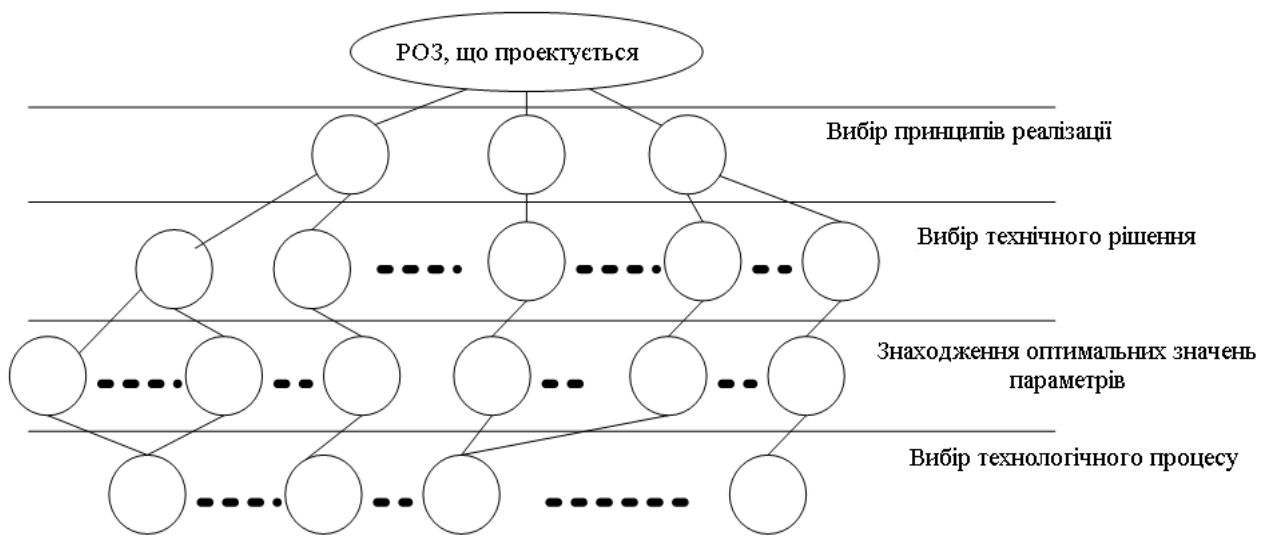


Рис. 1. Ієрархічні рівні проектування РОЗ

Отже, процес цільового проектування зазнає декомпозиції на три етапи: 1 – електродинамічний (вибір принципів реалізації); 2 – конструкторський (вибір технічного рішення і визначення оптимальних значень параметрів); 3 – технологічний (вибір технологічного процесу).

Для вирішення загальної задачі проектування в роботі, на основі аналізу найпоширеніших методів прийняття рішень, пропонується використовувати підхід, що базується на байєсівській теорії статистичних рішень.

Реалізація такого підходу передбачає наявність розвиненого інформаційного забезпечення у вигляді баз даних принципів реалізації і відповідних даним принципам бібліотек математичних моделей різного рівня

строгості, баз даних технічних реалізацій елементів РОЗ, включаючи використовувані при цьому технологічні процеси, і бібліотек моделей елементів, необхідних для визначення оптимальних значень їх параметрів. Слід зазначити, що використовувані бази даних мають бути якомога більш повними та відкритими, тобто мати у своєму складі вже відомі рішення і моделі та допускати включення нових.

Створенню одного з варіантів такого інформаційного забезпечення і присвячено наступні розділи дисертації.

Далі в розділі відзначено, що особливу увагу слід звернути на розробку математичних моделей, що описують принцип реалізації проектного РОЗ. Пов'язано це із прийнятим підходом до проектування – байєсівською теорією статистичних рішень. Будучи за своєю природою імовірнісним підходом, він потребує знання статистичних характеристик тієї або іншої конструкції пристрою. Розрахунки даних характеристик можливі лише на основі статистичних випробувань, тобто багаторазового моделювання пристрою при випадкових відхиленнях його параметрів. Це означає, що розроблювані моделі, з одного боку, мають давати досить адекватні результати моделювання, з іншого боку, повинні бути досить ефективними, щоб забезпечити можливість проведення різноманітного аналізу. Цим суперечливим вимогам зараз задовольняють аналітичні математичні моделі, що описують на електродинамічному рівні процеси в проектованому РОЗ.

Крім електродинамічних моделей на конструкторському і технологічному етапах використовуються фізико-технологічні моделі. Удосконалення часткових аналітичних і фізико-технологічних моделей для електродинамічного, конструкторського і технологічного етапів проектування є одним із завдань дисертаційного дослідження. Таких моделей існує величезна кількість і в рамках одного дослідження всі моделі не можуть бути вдосконалені. Із цієї причини в роботі далі розглядалися лише ті моделі, які нині (на думку автора) можуть суттєво вплинути на розвиток методів проектування РОЗ. Далі розглядаються електродинамічні моделі РОЗ для одномодового ОВ і з'єднання з мікролінзами для багатомодових ОВ; конструкторська модель самоюстуючого РОЗ і технологічна модель одержання гладкого сколу ОВ.

У другому розділі роботи наведено результати розробки електродинамічної моделі РОЗ із безпосереднім стикуванням одномодових ОВ. Вона ґрунтується на теоретичному аналізі збудження мод у приймальному волокні, що стикується, з урахуванням характеристичного рівняння для круглих діелектричних хвилеводів зі східчастим профілем показника заломлення.

Отримано скалярне хвильове рівняння з урахуванням локальної неоднорідності, зумовленої з'єднанням ОВ. Знайдено два незалежних рішення, вибрані з урахуванням характеристичного рівняння; роздільно записано і розв'язано хвильові рівняння для серцевини й оболонки; визначено електромагнітні поля і потоки енергії в серцевині та оболонці ОВ за наявності локальної неоднорідності.

Визначено основні втрати енергії під час з'єднання одномодових волокон для HE_{II} моди. Проаналізовано причини, котрі призводять до втрат енергії електромагнітного поля, що поширюється через сердцевину і по оболонці паралельно осі випромінюючого волокна з урахуванням характеристичного рівняння. Отримано щільність інтегрального потоку електромагнітної енергії ($I_{C \text{ инт.1}}$) в сердцевині приймального волокна:

$$\begin{aligned}
I_{C \text{ инт.1}} = & \frac{2\pi a^2 B^2}{u^4 J_1^2(u)} \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{1/2} (\beta a)(Ka) \frac{u^2}{2} \left(1 - \frac{u^2}{4} + \frac{1}{32} u^4 - \frac{5}{576} \frac{u^6}{4} + \frac{1}{4608} \frac{u^8}{5} \right) - \\
& - \frac{2\pi a^2 B^2}{u^4 J_1^2(u)} \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{1/2} (\beta a)(Ka) \frac{u^2}{8} \left(1 - \frac{u^2}{3} + \frac{3}{64} u^4 - \frac{u^6}{288} + \frac{1}{4608} \frac{u^8}{3} \right) a^2 K^2 n_1^2 a^2 - \\
& - \frac{2\pi a^2 B^2}{u^4 J_1^2(u)} \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{1/2} \frac{u^2}{8} \frac{1}{16} \left(1 - \frac{9}{40} u^2 + \frac{5}{32} \frac{u^4}{7} - \frac{47}{921} \frac{u^6}{63} \right) \times \\
& \times \left[(\beta a) \left(\frac{(\beta a)^2}{n_1} + 6(Ka)(\beta a) + n_1(Ka)^2 \right) + (Ka) \left(5(\beta a)^2 + 2(\beta a)(n_1 Ka) + (n_1 Ka)^2 \right) \right] a + \\
& + \frac{2\pi a^2 B^2}{u^4 J_1^2(u)} (\beta a)(Ka) \left(\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right)^{1/2} \frac{u^2}{16} \left(1 - \frac{u^2}{6} + \frac{5}{192} \frac{u^4}{2} - \frac{7}{2304} \frac{u^6}{5} + \frac{2}{192^2} \frac{u^8}{3} \right) \times \\
& \times \left[\frac{43}{128} (\beta a)^2 + \frac{19}{64} (\beta a)(n_1 Ka) + \frac{12}{128} (n_1 Ka)^2 \right] a^2,
\end{aligned} \tag{1}$$

де μ_0 , ε_0 – магнітна і діелектричні постійні вільного простору; $J_1(\cdot)$ – функція Бесселя першого порядку; β , K – хвильові коефіцієнти в середовищі і вільному просторі; a – радіус сердцевини; α – азимутальний кут; n_1 – показник заломлення сердцевини; $u^2 = (K^2 n_1^2 - \beta^2)$.

Аналізуючи цей вираз, бачимо, що перший член являє собою потік електромагнітної енергії, який дорівнює потоку з випромінюючого волокна. Інші члени відображають енергетичні втрати в сердцевині приймального волокна, зумовлені порушенням модової структури через злам осі між волокнами, що стикаються. Відносні втрати енергії в сердцевині $L_{\alpha c}$ під час стикування одномодових ОВ при кутовій неузгодженості осей:

$$L_{\alpha c} = 10 \lg \frac{I_{oc}}{I_{C \text{ инт.1}}}, \quad \text{дБ}, \tag{2}$$

де I_{oc} – щільність потоку електромагнітної енергії в сердцевині біля торця випромінюючого волокна.

Розраховано втрати енергії в з'єднувачах одномодових ОВ за наявності кута між осями і поперечного зсуву волокон. Відносні втрати одномодового ОВ представлені на рис. 2.

З рис. 2 випливає, що відхилення на кут $\alpha = 1^\circ$ дає втрати $\sim 1,5$ дБ, а при

кутовій неузгодженості $\alpha = 2^\circ$ втрати становлять вже 6 дБ. Отже, енергетичні втрати через куту неузгодженість суттєво зростають навіть при порівняно невеликих кутах α і потребують досить жорстких допусків.

Першим членом цього виразу є густина потоку електромагнітної енергії в серцевині випромінюючого волокна I_{oc} . Відносні втрати енергії в серцевині $L_{\alpha c}$ при кутівій неузгодженості:

$$L_{\alpha c} = 10 \lg \frac{I_{oc}}{I_c}, \quad \text{дБ}, \quad (3)$$

де I_c – щільність потоку електромагнітної енергії в серцевині біля торця приймального волокна.

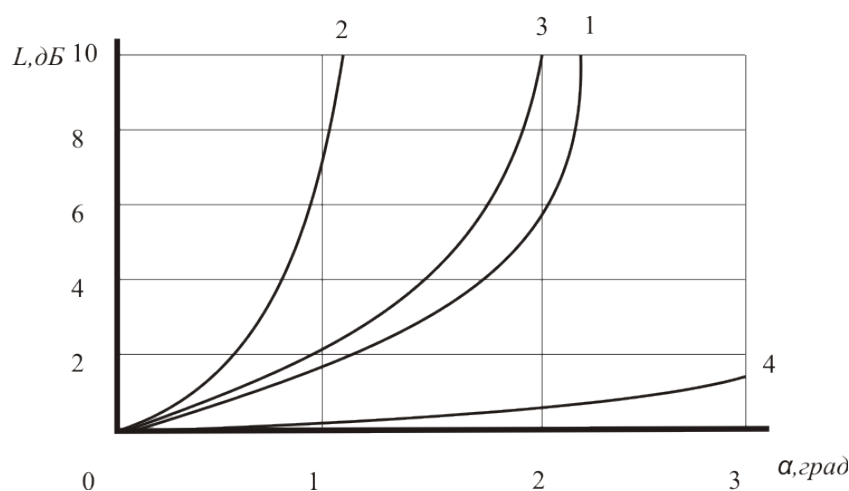


Рис. 2. Залежність втрат у серцевині (1), оболонці (2), сумарних втрат (3) і втрат, розрахованих за методом гауссового пучка (4), від кута між осями однодовових ОВ

Сумарні відносні втрати L_α в однодововому ОВ внаслідок кутівій неузгодженості мають вигляд:

$$L_\alpha = 10 \lg \left[\frac{(I_{oc} + I_{o\text{об}})}{(I_c + I_{o\text{об}})} \right], \quad (4)$$

де $I_{o\text{об}}$ і $I_{об}$ – щільність потоку електромагнітної енергії в оболонці біля торця випромінюючого та приймального волокна відповідно.

Як випливає з розрахунків, навіть при порівняно невеликих кутах внесені втрати настільки великі, що необхідно витримувати досить тверді допуски на куту неузгодженість. Відносні втрати в оболонці однодовового ОВ при цьому виді розузгодженості значно більші, ніж у серцевині. Проте, оскільки їх енергетичний внесок малий, вони не позначаються помітно на сумарних втратах.

Показано, що для досягнення втрат порядку 0,5 дБ, необхідно забезпечити кут між осями і непаралельність торців волокон не більше $0,5^\circ$.

Великі, порівняно з розрахованими втратами (за методом гауссового пучка), втрати пояснюються тим, що цей метод не враховує зміни інтенсивності моди HE_{11} при з'єднанні ОВ.

Отже, у розділі розроблено аналітичну модель, яка на електродинамічному рівні описує процеси в РОЗ із безпосереднім стикуванням ОВ, що дозволяє проводити його багатоваріантний аналіз.

У третьому розділі розглянуто питання побудови математичної моделі РОЗ з використанням мікролінз (рис. 3).

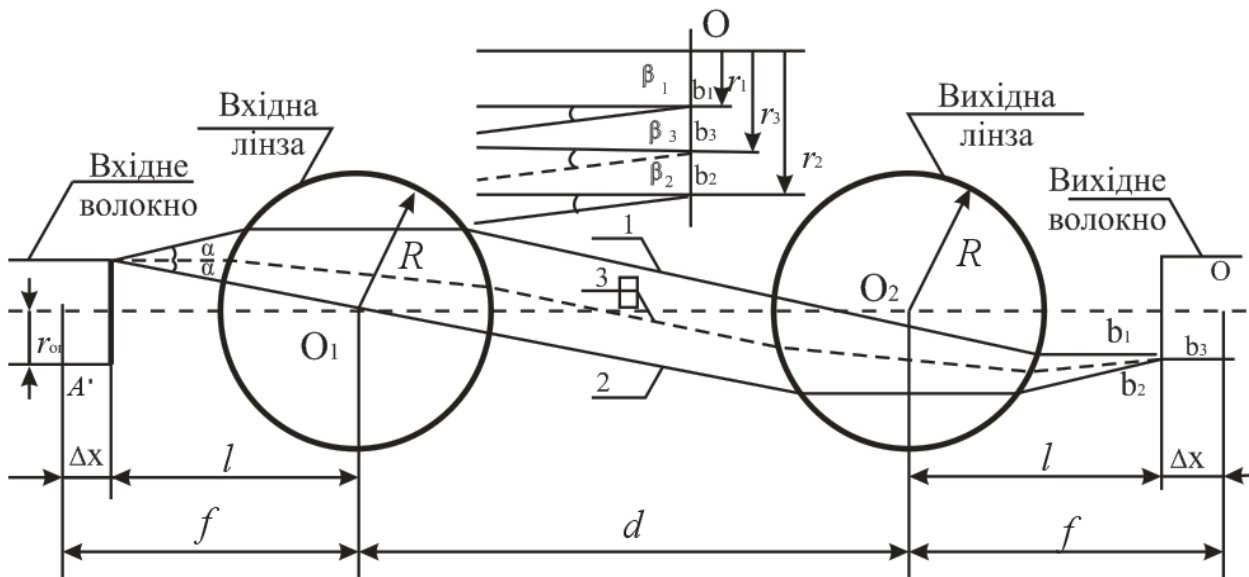


Рис. 3. Оптична система з'єднувача на мікролінзах

Зазначено, що використання мікролінз дає можливість на стикові ОВ розширити пучок до розмірів (400 - 1000) мкм, що вдесятеро знижує вимоги до радіальної неузгодженості. Однак мікролінзи вносять додаткові втрати, зумовлені помилками зображення, внаслідок чого діаметр плями, сфокусованої на торці приймального волокна, перевищує діаметр серцевини. Відповідно, апертура сфокусованого пучка перевищує апертуру ОВ і викликає додаткові втрати по «кату».

Уведення мікролінз у РОЗ є перенесенням в мікрооптику принципів проектування оптичних пристроїв. Тому в процесі розроблення моделі РОЗ на мікролінзах використано підхід на основі геометричної оптики. Згідно з даним підходом отримано співвідношення для втрат у РОЗ під час проходження оптичних променів через систему «ОВ – лінза – ОВ». З використанням даної моделі отримано залежності оптичних втрат від радіуса лінзи R при фіксованому показнику заломлення n (рис. 4).

Як видно з рис. 4, при $R = 400$ мкм і $n = 1,5$ оптичні втрати через перевищення діаметра вихідної світлової плями над діаметром серцевини волокна (оптичні втрати по плямі) становлять $\sim 2,15$ дБ, а оптичні втрати через

перевищення кута входу променя в ОВ числової апертури NA ОВ (оптичні втрати по куту) $\sim 0,35$ дБ. Сумарні оптичні втрати, таким чином, дорівнюють 2,5 дБ. Зі збільшенням радіусу лінзи сумарні оптичні втрати зростуть. При $R = 1000$ мкм ($n = 1,5$) оптичні втрати становлять $\sim 4,2$ дБ. Ці значення втрат визначаються аберраціями оптичної системи і зумовлені кінцевими поперечними розмірами серцевини ОВ (об'єкта) і відхиленнями світлового пучка від параксіального.

Далі в розділі розглянуто джерела помилок зображення, вношуваних оптичною системою з'єднувача. Для цього запропоновано модель, що враховує такі помилки зображення, як: дисторсія, кривизна поля і астигматизм, кома, сферична аберрація. Під час побудови моделі розглядалося поздовжнє розташування джерел збудження пристрою уздовж головної осі оптичної системи.

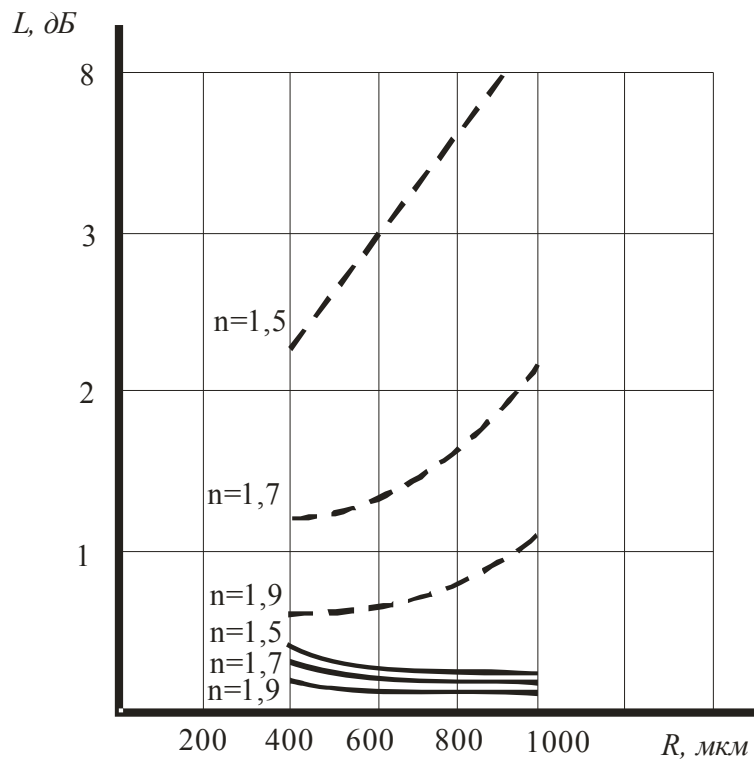


Рис. 4. Залежність оптичних втрат від радіусу лінзи по плямі (---) і по куту (—)

З використанням запропонованої моделі розглянуто параметри оптичної системи з'єднувача і доведено можливість компенсації втрат по плямі і куту. Розроблено і порівняно між собою декілька варіантів кріплення лінзи в оправі. Встановлено, що навіть кращий з них призводить до втрат, які становлять 1,5 дБ, що є неприпустимим у сучасних оптичних системах передачі, особливо спеціального призначення. Отже, застосування лінз у з'єднувачах одномодових ОВ неприйнятне внаслідок значних втрат, що вносяться.

Як вихід із цього положення далі в розділі запропоновано використовувати метод самоюстування, реалізований за допомогою сухого

мікроскладання без імерсійної рідини між ОВ, що стикуються.

Юстування здійснюється за допомогою конічних уловлювачів волокна. Кінець першого волокна всувається у з'єднувальний канал і зближається до упору з кінцем другого волокна. Через те що матеріал пластин має більш низький модуль пружності, ніж волокно, то після переходу ОВ з уловлювача в циліндричну канавку і при наступному стиску пластин (виготовлених зі значно більш еластичного і піддатливого матеріалу, ніж волокно) два циліндричні симетричні тверді тіла самоцентруються в радіально-симетричному і пружно-навантаженому середовищі.

Показано, що для реалізації методу самоюстування доцільно виготовляти пластини з високополімерних органічних матеріалів, але оскільки клиноподібний жолоб не сполучає у вертикальній площині осі волокон, він повинен мати вигляд порожнього напівциліндра з діаметром, який дещо перевищує найбільший діаметр ОВ, і глибиною, меншою найменшого діаметра волокна. Після того, як волокна 1 і 2 (рис. 3) зістиковані в жолобі нижньої пластини 3, на них насувається верхня пластина, під тиском якої волокно більшого діаметра симетрично занурюється в дно жолоба і верхню пластину, оскільки останні виготовлені з однакового матеріалу.

Четвертий розділ присвячено удосконаленню моделі для технологічного етапу проектування РОЗ. Традиційна технологія виготовлення сколів ОВ потребує застосування спочатку шліфування, а потім полірування торця ОВ. Після цього на торці волокна з'являється поверхня складного профілю із тріщинами (замість рівної поверхні), що вносить додаткові втрати. Тобто традиційна технологія характеризується впливами перетворюючого типу. В дисертації запропоновано нову технологію виготовлення торця волокна шляхом застосування впливу керуючого типу.

На підставі аналізу фізичних процесів у склі при симетрично навантаженому стані встановлено, що можна керувати флуктуаційними механізмами розкриття тріщини. Ці механізми дозволяють створити поверхню відколу з повністю гладкими торцями за рахунок уведення в тріщину суміші октилового спирту й ацетону, яка відіграє роль поверхнево-активного середовища під час розкриття тріщин. Ацетон має точку кипіння $56,5^{\circ}\text{C}$ і при температурі 20°C його парціального тиску достатньо для здійснення перекидання потоку молекул ацетону CH_3COCH_3 через парову фазу в повністю змочувану свіжовідкривану тріщину. При здійсненні надрізу алмазним різцем ділянки волокна, змоченого ацетоном, утворюється скол, що має молекулярно-гладку поверхню.

У цьому розділі також проведено аналіз фізико-механічних параметрів високополімерних матеріалів, придатних для виготовлення пластин затискного пристрою. Для виготовлення цих деталей, що затискають симетрично стосовно осі ОВ, необхідний матеріал, у якого модуль пружності значно менший, ніж у матеріалу самих волокон. Тоді стиковані волокна є фактично жорсткими деталями, стисненими пружно-піддатливими затискачами. При симетричній щодо осі конфігурації цих затискачів і зусиль стиснення відбувається самоюстування (точніше самоцентрування щодо осі).

Другою важливою вимогою є відсутність холоднотекучості матеріалу в діапазоні використовуваних зусиль стиснення, стабільність поведінки матеріалу під навантаженням у часі, стійкість до зовнішніх впливів і радіаційна стійкість. Визначено, що необхідні сполучення цих властивостей має фторопласт-40.

Внаслідок експериментального дослідження визначено технологічний режим формування пластин затискного пристрою. Доведено, що фторопласт-40, маючи малий коефіцієнт тертя, забезпечує плавний захід ОВ у затискний пристрій без задирів і особливих зусиль, уникаючи тим самим можливого ушкодження волокна.

У п'ятому розділі викладено результати числових і натурних експериментів з дослідження параметрів РОЗ. У першій частині розділу здійснено моделювання процесу вибору конструктивно-технологічних параметрів РОЗ для мінімізації втрат на основі методу байєсівських статистичних рішень. Вибір проводився шляхом аналізу дерева рішень (рис. 5).

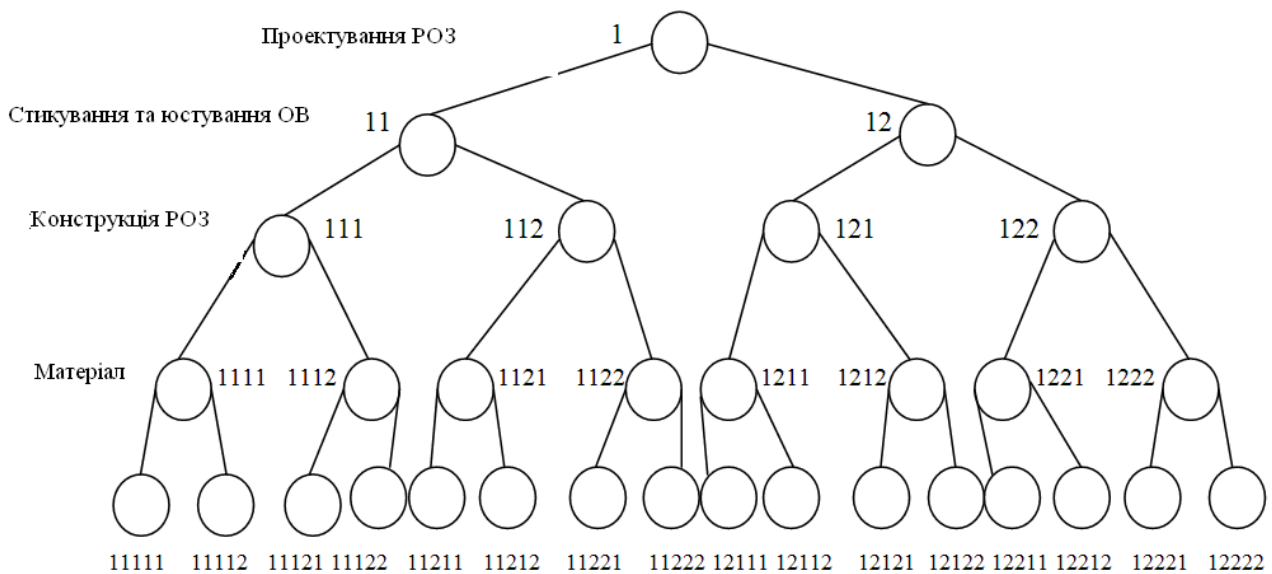


Рис. 5 Дерево рішень

У дереві рішень подано такі рівні ієрархії: 1 – безпосереднє проектування РОЗ з мінімальними втратами, що вносяться; 2 – стикування і юстування ОВ, у даному, розглянутому випадку подано вибір між конструктивно-технологічними рішеннями з керуючими конструктивними та технологічними впливами (11) і конструктивно-технологічними рішеннями перетворюючого типу (12); 3 – тип конструктивного виконання з'єднувача (РОЗ з циліндричною напрямною (111), РОЗ з V-подібною напрямною (112) – для самоюстуючих з'єднувальних вузлів; штекерна конструкція РОЗ (121), РОЗ на мікролінзах (122) – для розв'язків перетворюючого типу); 4 – матеріал

стикувального вузла з'єднувача (розглянуті полімер (фторопласт) і кераміка (діоксид цирконію) для кожного з варіантів).

За оцінковий фактор для розрахунків за теоремою Байєса було вибрано мінімальну потужність оптичних втрат, що вносяться. Виходячи з викладених вихідних даних було отримано такий результат. Найкращу конструкцію має №1111, це – РОЗ з циліндричною направляючою і матеріалом стикувального вузла фторопласт-40.

Розрахунковий рівень втрат, що вносяться, у цій конструкції – 0,2116 дБ.

Викладено також результати натурних експериментів. Вимірювання проводилися за методикою TR NWT – 000326, рекомендованою компанією Bellcore і міжнародним комітетом IEEE для оцінки величини внесених РОЗ втрат (рис. 6).

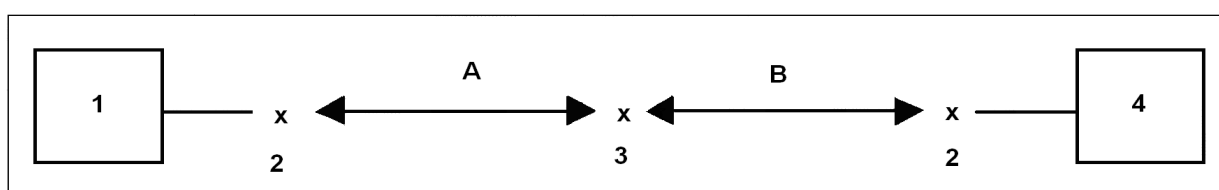


Рис. 6. Схема вимірювання загасання, що вноситься, по TR NWT-000326

На рис. 6 прийнято такі позначення: 1 – джерело оптичного випромінювання; 2 – допоміжний роз'єм; 3 – вимірювані РОЗ, зістиковані в розетки; 4 – вимірювач оптичної потужності.

Досліджувалась конструкція РОЗ, яку вибирали під час моделювання. Було виконано 500 вимірювань. Статистична обробка результатів дала середнє значення вибірки 0,2084 дБ при стандартному відхиленні 0,0257 дБ.

Отже, можна стверджувати, що, застосовуючи запропонований підхід, вдалося встановити конструкцію РОЗ, яка має втрати, що вносяться 0,2116 дБ (найменші серед інших конструктивних виконань РОЗ) і величини цих втрат мало відрізняються від експериментального значення 0,2084 дБ.

Цей факт дозволяє зробити висновок про можливість застосування запропонованого підходу в практиці проектування РОЗ.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі, яка полягає в необхідності розробки адекватних методів формалізації процедур проектування РОЗ, як основи його автоматизації. Це рішення базується на ідеї декомпозиції процесу проектування на окремі етапи і застосуванні на кожному етапі (електродинамічному, конструкторському та технологічному) методів прийняття рішень у сполученні з тією або іншою фізико-технологічною моделлю, адекватною поточному етапу проектування.

Головний результат дисертації полягає в тому, що запропоновано новий

підхід до формалізації процедур проектування РОЗ, котрий закладає основи автоматизованого проектування оптичних з'єднувачів і базується на застосуванні байєсівських статистичних рішень й вдосконалених моделей, використовуваних під час декомпозиції проектних процедур на етапах електродинамічного, конструкторського і технологічного проектування.

У рамках головного результату вирішено такі нові теоретичні й практичні завдання.

В області теорії:

1. Для одномодових ОВ запропоновано нову модифікацію наближеної електродинамічної моделі, в якій уперше роздільно отримані рішення хвильових рівнянь для серцевини й оболонки ОВ. За рахунок цього реалізовано можливості не лише вибору типу конструкції РОЗ для одномодових ОВ на ранніх стадіях електродинамічного проектування, але й обґрунтованого розрахунку допусків на геометричні розміри РОЗ.

2. На етапі електродинамічного проектування РОЗ для багатомодових ОВ вперше вирішено задачу аналізу оптичної системи РОЗ на мікролінзах і визначено шляхи корекції помилок зображення.

3. Для етапу конструкторського проектування РОЗ запропоновано новий метод самоюстування ОВ для створення РОЗ із мінімально можливими втратами, що вносяться.

4. Для етапу технологічного проектування запропоновано новий спосіб одержання молекулярно-гладкого сколу, що має корозійностійку поверхню, строго перпендикулярну оптичній осі хвилеводу.

В області практичних розробок.

Доповнені бази знань:

- про величини допусків на геометричні розміри РОЗ;
- про ефективні конструкції РОЗ;
- про нові технології виробництва елементів РОЗ і властивості застосовуваних у них матеріалів.

В області експерименту – досліджено втрати, що вносяться РОЗ і отримано результати, які доводять (порівнянням їх з розрахунковими) доцільність застосування розроблених моделей на практиці.

Отже, усі поставлені завдання вирішені і мету роботи досягнуто.

Подальші дослідження з питань проектування РОЗ можуть розвиватися в напрямку поповнення баз знань про нові конструкції з'єднувачів, створених на основі перспективних матеріалів, і про нові технології їхнього виробництва.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Невлюдов И.Ш. Исследование способов минимизации оптических потерь при стыковке одномодовых и многомодовых волокон / И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров, Р.Ю. Аллахверанов // Технологія приладобудування: Науково-технічний журнал. – Харків, 2004. – Вип. № 1.– С. 17-21.

2. Невлюдов И.Ш. Исследование формирования скола волокна для минимизации оптических потерь / И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров,

Р.Ю. Аллахверанов, А.В. Ганшина // Технологія приладобудування: Науково-технічний журнал. – Харків, 2004. – Вип. № 2. – С. 15-21.

3. Невлюдов И.Ш. Исследование конструктивно-технологических характеристик материалов, пригодных для самоустировки узлов ВОЛС / И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров, Р.Ю. Аллахверанов // Технологія приладобудування: Науково-технічний журнал. – Харків, 2006. – Вип. № 2. – С.48-53.

4. Аллахверанов Р.Ю. Минимизация потерь в соединителях многомодовых волокон с вклеенными наконечниками // Технологія приладобудування: Науково-технічний журнал. – Харків, 2007. – Вип. № 1. – С. 47-48.

5. Невлюдов И.Ш. Анализ оптических потерь при стыковке одномодовых и многомодовых волокон / И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров, Р.Ю. Аллахверанов // Технологія приладобудування: Науково-технічний журнал. – Харків, 2007. – Вип. № 2. – С. 15-20.

6. Аллахверанов Р.Ю. Исследование способов минимизации оптических потерь при стыковке одномодовых и многомодовых волокон / Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції “Безпека та захист інформації в інформаційних і телекомунікаційних системах”: Зб. наукових статей “Управління розвитком” № 7. – Харків: ХНЕУ, 2008. – С. 78 – 79.

7. Аллахверанов Р.Ю. Исследование конструктивно – технологических характеристик материалов, пригодных для самоустировки узлов ВОЛС / Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції “Безпека та захист інформації в інформаційних і телекомунікаційних системах”. Зб. наукових статей “Управління розвитком” №7. – Харків: ХНЕУ, 2008. – С.82 – 83.

8. Омаров М.А. Технология получения зеркально-гладкого скола оптического волокна / М.А. Омаров, Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // Радіотехніка: Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник. – Харків, 2008. – Вип. № 152. – С. 165-171.

9. Омаров М.А. Створення конструкцій оптичних з'єднувальних пристроїв та розробка технології їх збирання / М.А. Омаров, Р.Ю. Аллахверанов, І.С. Хатнюк, В.А. Андрусевич // Матеріали 3-го Міжнародного радіоелектронного форуму. Міжнародна конференція “Телекомунікаційні системи і технології /ТСТ-2008/”. – Харків, 2008. – С. 202-205.

10. Невлюдов И.Ш. Анализ физических явлений, возникающих при стыковке одномодовых оптических волокон в оптических соединительных устройствах / И.Ш. Невлюдов, М.А. Омаров, Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // Materials of XVIII International conference ”New leading technologies in machine building”. Collection of the scientific papers – Kharkov-Rybachie – 2008.- P. 21.

11. Аллахверанов Р.Ю. Выбор оптимального материала для построения самоустировочных зажимов в оптических соединительных устройствах / Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // Матеріали ІV міжнародної науково-практичної конференції ”Сучасні проблеми й досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій”. Зб. матеріалів конференції. – Запоріжжя: ЗДТУ, 2008. – С. 20-22.

12. Невлюдов И.Ш. Минимизация потерь в оптических соединительных устройствах, построенных на микролинзах / И.Ш. Невлюдов, Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // *Технологія приладобудування: Науково-технічний журнал*. – Харків, 2008. – Вип. № 1. – С. 18-23.
13. Аллахверанов Р.Ю. Оптимизация оптических потерь в разъёмных соединителях / Р.Ю. Аллахверанов, И.В. Стовбун // *Матеріали 13-го міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті"*. Збірник матеріалів форуму Ч.1. – Харків : ХНУРЕ, 2009. – С. 118.
14. Аллахверанов Р.Ю. Минимизация потерь при стыковке волокон в оптических соединительных устройствах / Р.Ю. Аллахверанов, М.Н. Яковлева // *Матеріали 13-го міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті"*. Збірник матеріалів форуму Ч.1. – Харків : ХНУРЕ, 2009. – С. 139.
15. Аллахверанов Р.Ю. Сетевой анализ при проектировании оптических транспортных информационных сетей / Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // *Матеріали 13-го міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті"*. Збірник матеріалів форуму Ч.1. – Харків : ХНУРЕ, 2009. – С. 193.
16. Невлюдов И.Ш. Теоретический анализ физических явлений при стыковке одномодовых оптических волокон / И.Ш. Невлюдов, Ю.В. Наталуха, Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління: Науково-технічний збірник*. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – Вип. №1 (20). – С. 15-20.
17. Невлюдов И.Ш. Основные принципы конструктивно-технологической реализации оптических соединительных устройств на микролинзах / И.Ш. Невлюдов, А.А. Андрусевич, Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // *Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів"*. Зб. матеріалів конференції. – Кременчук: КНУ імені М. Остроградського, 2010. – С. 66-67.
18. Аллахверанов Р.Ю. Исследование технологических характеристик высокополимерных материалов, пригодных для изготовления оптических стыковочных узлов / Р.Ю. Аллахверанов, Зриби Иед // *Матеріали 15-го ювілейного міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті"*. Міжнародна конференція "Радіоелектронне приладобудування як основа високотехнологічного відновлення всіх галузей виробництва". Збірник матеріалів форуму. Т.2. – Харків : ХНУРЕ, 2011. – С. 28.
19. Аллахверанов Р.Ю. Исследования оптических затворов для фотонных инфокоммуникационных сетей / Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк, В.С. Жабин // *Матеріали 15-го ювілейного міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті"*. Міжнародна конференція "Радіоелектронне приладобудування як основа високотехнологічного відновлення всіх галузей виробництва". Збірник матеріалів форуму. Т.2. – Харків : ХНУРЕ, 2011. – С. 54.
20. Невлюдов И.Ш. Метод поиска наилучшей конструкции оптического соединительного устройства с использованием байесовской теории

статистических решений / И.Ш. Невлюдов, Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк // Технологія приладобудування: Науково-технічний журнал. – Харків, 2011. – Вип. № 1.– С. 27-33.

АНОТАЦІЯ

Аллахверанов Р.Ю. Проектування роз'ємних оптичних з'єднувачів для радіотехнічних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.12.17 – радіотехнічні та телевізійні системи. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2012.

Дисертація є дослідженням, у якому отримано нове вирішення актуальної науково-практичної задачі, котра полягає в необхідності розробки адекватних методів формалізації процедур проектування РОЗ, як основи його автоматизації.

Принципово важливий внесок результатів дисертації в теоретичні дослідження РОЗ полягає в запропонованому підході до формалізації процедур проектування на основі ідеї його декомпозиції на три етапи (електродинамічний, конструкторський і технологічний) та використання на кожному з цих етапів байєсівських статистичних рішень разом з відповідною фізико-технологічною моделлю РОЗ.

Практична цінність роботи визначається тим, що внаслідок досліджень доповнені такі бази знань: про величини допусків на розміри РОЗ, про нові конструкції й технології виробництва елементів РОЗ, а також властивості матеріалів, які в них використовуються.

Проведені експерименти підтвердили достовірність викладених у дисертації наукових положень і принципів. Її результати впроваджено в ряді організацій і в навчальний процес деяких ВНЗ.

Ключові слова: роз'ємні оптичні з'єднувачі, формалізація процесу проектування, методи прийняття рішень, удосконалені моделі для електродинамічного, конструкторського та технологічного етапів проектування, чисельний і натурний експеримент.

АННОТАЦИЯ

Аллахверанов Р.Ю. Проектирование разъемных оптических соединителей для радиотехнических систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.17 – радиотехнические и телевизионные системы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2012.

Диссертация является исследованием, в котором получено новое решение актуальной научно-практической задачи, состоящей в необходимости

разработки адекватных методов формализации процедур проектирования РОС, как основу его автоматизации.

Принципиально важный вклад результатов диссертации в теоретические исследования РОС состоит в развитии подхода к формализации процедур проектирования оптических соединительных устройств. Этот подход базируется на идее декомпозиции процесса проектирования на отдельные этапы – электродинамический, конструкторский и технологический, а также применение на каждом из этих этапов байесовских статистических решений в сочетании с соответствующей физико-технологической моделью РОС.

В рамках развитого подхода усовершенствованы аналитические физико-технологические модели РОС для электродинамического, конструкторского и технологического этапов проектирования. Усовершенствования заключались в том, что впервые: при рассмотрении электродинамической модели (для одномодовых ОВ) получено раздельное решение волновых уравнений для оболочки и сердцевины волокна, что позволило обосновать допуски на геометрические размеры оптических соединителей; на этапе электродинамического проектирования РОС для многомодовых ОВ решена задача анализа оптической системы РОС на микролинзах, определены пути коррекции ошибок изображения и предложен новый способ самоустойчивости РОС, минимизирующий в нем потери; для модели технологического этапа проектирования РОС предложен новый способ получения молекулярно-гладкого скола, имеющего коррозионно-стойкую поверхность, строго перпендикулярную оптической оси волновода.

Практическая ценность работы определяется тем, что в результате исследований дополнены такие базы знаний: о величинах допусков на размеры оптических соединителей, о новых их конструкциях и технологиях производства элементов РОС, а также свойствах материалов, в них применяемых.

Проведенные эксперименты подтвердили достоверность разработанных в диссертации научных положений и принципов. Ее результаты внедрены в ряде организаций и в учебный процесс некоторых вузов.

Ключевые слова: разъемные оптические соединители, формализация процесса проектирования, методы принятия решений, усовершенствованные модели для электродинамического конструкторского и технологического этапов проектирования, численный и натурный эксперимент.

ABSTRACT

Allakhveranov R.Yu. Optical demountable connector design for the radio systems. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.12.17 – radio and television systems. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2012.

The thesis represents the investigation, which has resulted in a new solution of the urgent theoretical and practical problem involving the need for developing

adequate formalization methods for the procedure of the optical demountable connectors (ODC) design.

The fundamental importance of the thesis' results contribution into theoretical investigations of the ODC consists in the approach put forward and the design procedures formalization based on the idea of the ODC decomposition into three stages (electrodynamic, design and technological ones) and application of bayes statistical solutions at each of these stages together with the appropriate physical-technological model of the ODC.

The thesis practical value is distinctive in that due to the performed investigations the following knowledge bases are complemented: the values of tolerances for the ODC dimensions, new constructions and technologies of the ODC elements production as well as properties of the materials used in them.

The performed experiments have supported reliability of the scientific statements and principles presented in the thesis. Its results have been introduced in a number of organizations and educational process in some institutes of higher education.

Keywords: optical demountable connectors, design process formalization, decision making methods, perfection of the model for electrodynamic, design and technological stages, digital and natural experiments.

Підп. до друку 13.03.12.
Умов. друк. арк. 1,2.
Зам. № 2-242.

Формат 60x841/16.
Тираж 100 прим.
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія.

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
Харків, просп. Леніна, 14