

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ: РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ
ЗОВНІШНІХ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА РОБОЧІ ПАРАМЕТРИ**

Магістрант гр. ЕП.м-02

Р.М. Скубак

Науковий керівник,
д-р фіз.-мат. наук, професор

Л.В. Однодворець

Завідувач кафедри ЕЗПФ,
д-р фіз.-мат. наук, професор

І.Ю. Проценко

Суми - 2021

РЕФЕРАТ

Мета кваліфікаційної роботи полягала у вивченні фізичних процесів у оптоволоконних системах зв'язку, їх конструктивно-технічних характеристик та впливу зовнішніх фізичних полів на робочі параметри і характеристики ліній.

У роботі розглянуті питання стосовно теоретичних основ передачі світлових сигналів по волоконно-оптичним лініям зв'язку, параметри оптичного волокна, його конструктивно-технологічні особливості та методи захисту від зовнішніх впливів. Установлено, що як джерело світла оптоволоконні лінії мають ряд переваг: світоволокно не проводить електрику, тобто в місці світіння воно відсутнє; не проводить ультрафіолетові та інфрачервоні промені; має здатність проводити великі світлові потоки при мінімальному діаметрі кабелю або ниток; джерело світла знаходиться на відстані від місця світіння; мале споживання енергії; термін експлуатації кабелю більше 10 років. Розрахунок параметрів ВОЛЗ для прокладання на відстані 50-60 км по нерельєфній місцевості показав, що найбільш ефективним для використання в кліматичних і транспортних умовах Сумської області є оптичний кабель типу ОКЛБ-01-0,3/2,0-4, який складається із серцевини SiO_2 і оболонки 3,1% GeO_2 +96,9% SiO_2 . Розрахунковим методом установлено, що при збільшенні довжини світлової хвилі від 0,6 до 1,8 мкм показник заломлення серцевини зменшується від 1,458 до 1,446, показник заломлення оболонки від 1,453 до 1,440, а нормована частота від 3,948 до 1,837. Проведені розрахунки ВОЛЗ і заземлюючих пристроїв та оцінена ймовірність пошкоджень ВОЛЗ ударами блискавки.

Робота викладена на 36 сторінках, у тому числі містить 12 рисунків, 3 таблиці, список цитованої літератури із 18 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВОЛЗ, ДІСПЕРСІЯ, СВІТЛОВИЙ ПОТІК, ОПТОВОЛОКНО, ОДНОМОДОВЕ ОВ, БАГАТОМОДОВЕ ВОЛОКНО, ХВИЛЕВІД.

Зміст

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| | С. |
| ВСТУП | 5 |
| РОЗДІЛ 1. ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ: ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ | 6 |
| 1.1. Фізичні та конструктивно-технологічні основи розповсюдження світла по оптоволокну..... | 6 |
| 1.2. Процеси загасання і дисперсії в оптичних волокнах..... | 9 |
| РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРОННІ БЛОКИ ВОЛЗ: КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ | 19 |
| 2.1. Устаткування мережі | 19 |
| 2.2. Вибір системи передачі: WDM мультиплексні системи..... | 22 |
| РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА ПАРАМЕТРИ ВОЛЗ | 27 |
| 3.1. Оцінка ймовірності пошкоджень ВОЛЗ ударами блискавки..... | 27 |
| 3.2. Розрахунок заземлюючих пристроїв..... | 28 |
| 3.3. Розрахунок витрат оптичного кабеля та дисперсійних параметрів оптоволоконної системи..... | 31 |
| ВИСНОВКИ | 34 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ | 35 |

ВСТУП

Сучасний етап розвитку оптоелектроніки характеризується унікальними досягненнями в швидкості передачі інформації та процесах виробництва нових методів і засобів телекомунікації. Широке використання локальних оптичних систем і мереж пов'язано із розробкою нових функціональних матеріалів і технологій для побудови волоконно-оптичних систем, який включає техніку прокладки підвішуванням ОК опори високовольтних ліній, електрифікованих залізниць. Основні вимоги і, одночасно, переваги таких ліній – простота, швидкість та економічність. При будівництві споруд та прокладанні міжміських локальних мереж використовується нова технологія – пневматичне ущільнення ОК із захистом пластикових труб малого діаметру.

Волоконна оптика – це сучасна галузь оптоелектроніки, яка вивчає фізичні явища, що виникають в оптичних волокнах та прилади і системи, до складу яких входять компоненти на основі оптичних волокон. Галузь оптоелектроніки і волоконної оптики стикається з динамічно зростаючим попитом на частотні ресурси, що пов'язано із збільшенням числа користувачів Internet та зростаючою взаємодією міжнародних операторів у зв'язку із зростанням обсягів переданої інформації. З метою збільшення сумги пропускання на одного користувача постачальники засобів зв'язку при побудові сучасних інформаційних мереж широко застосовують волоконно-оптичні лінії та систем зв'язку (ВОЛЗ) у вигляді телекомунікаційних магістралей і локальних обчислювальних мереж. Оптичне волокно (ОВ) на сьогодні – це найбільш ефективне фізичне середовище для передачі інформації та великих потоків інформації на значні відстані.

Мета кваліфікаційної роботи полягає у вивченні фізичних процесів у оптоволоконних системах зв'язку, їх конструктивно-технічних характеристик та впливу зовнішніх фізичних полів на робочі параметри і характеристики ліній.

Результати роботи опубліковані в Матеріалах Міжнародної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2020».

РОЗДІЛ 1

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ: ФІЗИЧНІ ОСНОВИ РОБОТИ, КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ

1.1 Фізичні та конструктивно-технологічні основи розповсюдження світла по оптичним волокнам

Застосування волоконно-оптичних приладів, поліпшення характеристик кабельних і волоконно-оптичних систем спричинило підвищення якості вже існуючих послуг зв'язку і створення цілого ряду нових:

- можливість користування всесвітньою мережею Інтернет і електронною поштою з доступом до приватних осіб, що мають ПК;
- формування інтелектуальних мереж зв'язку;
- створення безпечних систем освітлення архітектурних об'єктів і важкодоступних зон освітлення (експонати музеїв, медичні барокамери), декоративних систем освітлення (реклама і штучні ялинки);
- використання оптичних волокон в гідрофонах сейсмічних або гідролокаційних приладів (сенсорні системи з гідрофонами для нафтовидобувної промисловості);
- розробка лазерних мікроскопів;
- виробництво оптоволоконних сенсорів температури і тиску, малий розмір і фактична відсутність необхідності в електричній енергії яких, дає оптоволоконним сенсорам перевагу перед традиційними електричними;
- застосування оптоволокон в медичній галузі для формування зображення і дослідження внутрішніх органів людини та проведення хірургічних втручань.

Темпи розвитку волоконної оптики і оптоелектроніки на світовому ринку випереджають всі інші галузі техніки і складають ~40 % у рік. У ряді країн, серед яких США, Англія, Японія, Франція, Італія й інші, вже зараз при будівництві споруджень зв'язку використовуються в основному оптичні кабелі. Вони займають домінуюче місце в мережах міжміського і міського зв'язку. Про масштаби розвитку волоконно-оптичних ліній зв'язку свідчать обсяги

виробництва оптичного волокна в США. За останні 5 років було виготовлено близько 100 млн. км волокна. Така кількість дозволила б зробити 2500 витків довкола всієї земної кулі .

Оптоволокну або оптичне волокно — це скляна або пластикова нитка, яка використовується для перенесення світла завдяки повному внутрішньому віддзеркаленню. Джгут, сплетений із тисяч оптичних волокон називається світловодом. Його діаметр складає до декількох десятків міліметрів.

Конструктивно ОВ складається з трьох частин: центральної частини - серцевини з показником заломлення n_1 ; оболонки з показником заломлення n_2 ($n_2 < n_1$); захисного покриття. В реальних ОВ показники заломлення серцевини і оболонки відповідно $n_1 \sim 1,48$, а $n_2 \sim 1,46$. Показники заломлення для оптоелектричних матеріалів: різні сорти скла 1,6 – 2,04, кварц 1,54.

Якщо ядро та оптична оболонка виготовлені з одного матеріалу (наприклад, чисте кварцеве скло), зміна показника заломлення досягається підбором спеціальних домішок, які вводяться у чистий розплав кварцу. Також ядро оптоволокну також може виготовлятися із скла, а оптична оболонка - з пластику (PCS-оптоволокну).

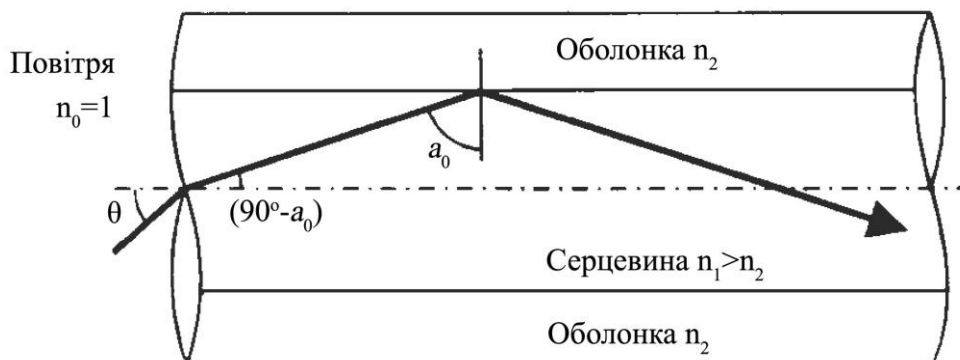


Рис.1.1. Схема для пояснення принципу передачі світла по оптоволокну

Показник заломлення серцевини може бути постійним або змінюватися. Залежно від закону, за яким змінюється показник заломлення серцевини n_1 , ОВ класифікують два види оптоволокон.

✓ОВ із ступінчастими профілями показників заломлення: постійним показником заломлення в серцевині $n_1 = \text{const}$ та різким зменшенням показника заломлення на межі серцевини і оболонки ($n_2 \ll n_1$);

✓ ОВ із градієнтними профілями показників заломлення: оптичне волокно, в якому профіль показника заломлення постійно змінюється в серцевині (як функція відстані від осі) $n_1 = f(d)$.

Основні параметри, якими характеризується ОВ: загасання (втрати на поглинання і розсіювання) та дисперсія.

Загасання обумовлене:

- ◆ наявністю у склі домішок іонів Me перехідної групи: Fe^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , іонів гідроксильної групи OH-;
- ◆ флуктуаціями показника заломлення;
- ◆ розсіюванням на неоднорідностях, розміри яких спів мірні з довжиною хвилі;
- ◆ розсіюванням через різноманітні порушення геометрії ОВ в процесі виробництва:
- ◆ мікровигинами при нанесенні захисного покриття;
- ◆ втрати на з'єднання (стикові втрати);
- ◆ «некруглість» оболонки, неконцентрічність оболонки і серцевини;
- ◆ механічна втома;
- ◆ утворення мікротріщин внаслідок впливу вологи.

Дисперсія визначається різницею швидкостей розповсюдження світлових потоків та властивостями матеріалу ОВ. У реальних волоконно-оптичних лініях мінімуми поглинання припадають на довжину хвилі 1300 і 1500 нм. При довжині хвиль від 1150 нм до 1300 нм дисперсія швидкостей розповсюдження різних довжин хвиль мінімальна.

На відміну від радіосистем, у ВОЛЗ хвиля не поширюється у вільному просторі, а концентрується в самому об'ємі ОВ і передається по ньому в заданому напрямі (Рис.1.2). Передача сигналу по ОВ здійснюється за рахунок віддзеркалень світлової хвилі від границі серцевини і оболонки.

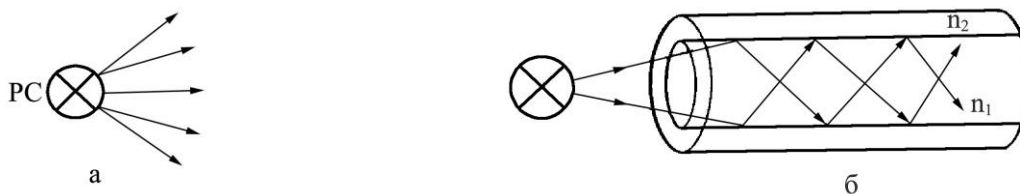


Рис.1.2. Схема процесів передавання сигналів: а – радіозв'язок; б – волоконно-оптичний зв'язок

На даний час при проектуванні та фізичній реалізації ВОЛЗ використовують багатожильні кабелі. Світло ($\lambda \cong 1300 \div 1500$ нм) вводиться в ОВ діаметром $D < 100$ мкм за допомогою світловипромінюючого діода або напівпровідникового лазера.

Кабель може містити багато волокон. У центрі кабелю розміщується сталевий трос, який використовується при прокладенні кабелю. Із зовнішньої сторони кабель захищається від пацюків сталевією опліткою і герметизується еластичним полімерним покриттям.

Розрізняють декілька типів оптичних волокон, які мають різні властивості. Вони відрізняються один від одного залежністю коефіцієнта заломлення від радіусу центрального волокна:

- Оптичні волокна з градієнтним показником заломлення
- Оптичні волокна із ступінчастим профілем розподілу показників заломлення.
- Одномодові оптичні волокна
- Багатомодові оптичні волокна

Мода – це одна з можливих траєкторій, по якій може розповсюджуватися світло у волокні. Чим більше мод, тим більше дисперсійне спотворення форми сигналу.

Якщо розглянути одномодове волокно, то в ньому смуга пропускання знаходиться в діапазоні 50-100 ГГц·км. В цьому методі волокно сприймає меншу частину світла на його вході, але є і позитивна сторона – забезпечення мінімального спотворення сигналу і втрат амплітуди. Якщо розглянути

обладнання для роботи з одномодовим волокном, то воно є значно дорожчим. Діаметр центральної частини одномодового волокна складає 3-10 мкм. Саме число мод, які допускаються волокном, визначає його інформаційну ємність. До розпливання імпульсів і їх накладання один на одного призводить модова дисперсія. Дисперсія залежить від довжини хвилі світла і від діаметру центральної частини волокна.

Для мультимодового волокна число мод N :

$$N = \frac{2\pi^2 d^2 A^2}{\lambda^2},$$

де d – діаметр центральної частини (ядра);

A – чисельна апертура волокна;

λ – довжина хвилі.

Волокно з діаметром центральної частини волокна 50 мкм підтримує 1000 мод. Чим більша довжина хвилі, тим менше число мод і менше спотворення сигналу. Це є причиною роботи в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні. Різні довжини хвиль розповсюджуються по волокну з різною швидкістю навіть для однієї і тієї ж моди. На відміну від багатомодового волокна, в одномодовому випромінювання присутнє не тільки усередині ядра.

До основних переваг ОВ можна віднести: економія кольорових металів; широкосмугова можливість передачі великого потоку інформації (декілька тисяч каналів); малі втрати і відповідно великі довжини ділянок трансляцій (30-100 км); малі габаритні розміри і маса (у 10 разів менше, ніж у електричних кабелів); висока захищеність від впливу зовнішніх фізичних полів; надійна техніка безпеки (відсутність іскріння і короткого замикання).

З'єднувачі для оптичних волокон мають конструкцію, показану на рис.1.3 і виготовляються з кераміки. Втрата світла в з'єднувачі може складати 10-20%, але якщо з'єднувати оптичні волокна методом зварювання, то втрати складуть не більше 1-2%. Окрім з'єднувачів і зварювання існує також техніка механічного зрощення волокон, яка характеризується втратами близько 10%.

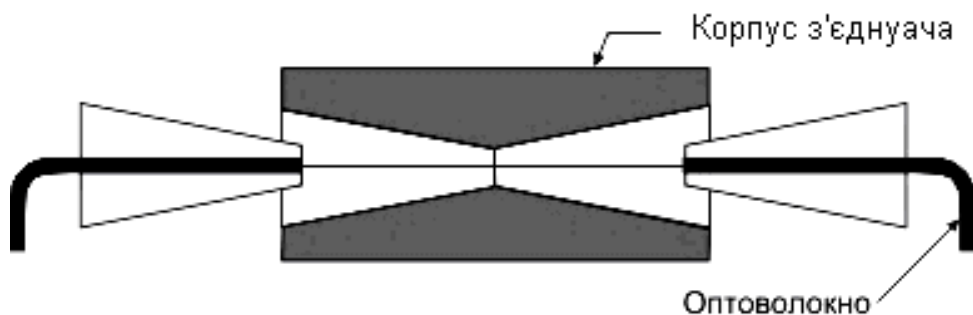


Рис.1.3. Схема оптичного роз'єму. Адаптовано із роботи [14]

Використовуючи оптичні волокна можна створювати не тільки кільцеві структури. Можлива навіть побудувати фрагмент мережі, який по характеру зв'язків буде еквівалентний кабельному сегменту або хабу. Базовим елементом цієї субмережі є прозорий циліндр, на один із торців якого підключаються вихідні волокна всіх передавачів інтерфейсів пристроїв, що становлять субмережу. Сигнал з іншого торця через волокна поступає на вхід фотоприймачів інтерфейсів.

Оптичному волокну вже більше 50 років, але до сих пір відкриваються його досі невідомі властивості. Вчені університету штату Огайо з'ясували, що оптоволоконно може бути в півтора рази міцніше, ніж вважалось раніше. Найпопулярнішим типом скла для виробництва волокон є так званий E - glass. Цей матеріал був розроблений в 1950 році спеціально для потреб електроніки. Тепер він використовується для додавання міцності виробам з пластику та виробництва вогнетривких тканин, тросів і утеплювачів житлових приміщень. Групою індійських вчених під керівництвом професора матеріалознавства Прабхата Гупти був запатентований метод підвищення міцності E - glass та інших видів скла як матеріалів для ВОЛЗ. Принцип нової технології зводиться до охолодження скляних волокон і деформування їх аж до зламування. Головне - попередньо пересвідчитися, що в склі немає дефектів. Для вимірювань було використано оптоволоконно товщиною 100 мкм, яке охолоджувалось до температури -195°C . Потім зразки згинали в U - подібну форму і здавлювали між двома металевими пластинами. Заморожені волокна витримували тиск до 60 атмосфер.

Мода представляє собою одне з можливих рішень рівняння Максвелла. У спрощеному вигляді можна вважати, що мода - це одна з можливих траєкторій, за якою може поширюватися світло в оптоволокну.

1.2. Процеси загасання і дисперсії в оптичних волокнах

У загальному випадку поширення електромагнітних хвиль описується системою рівнянь Максвелла в диференціальній формі:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0, \\ \operatorname{rot} \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} &= \vec{j}, \\ \operatorname{div} \vec{D} &= \rho, \end{aligned} \tag{1.1}$$

де ρ - щільність електричного заряду, \vec{E} і \vec{H} - напруженості електричного і магнітного полів відповідно, \vec{j} - щільність струму, \vec{D} і \vec{B} - електрична і магнітна індукції.

Якщо представити напруженість електричного і магнітного поля \vec{E} і \vec{H} за допомогою перетворення Фур'є [1]:

$$\begin{aligned} \vec{E}(r,t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\vec{E}}(r,\omega) e^{-j\omega t} d\omega, \\ \vec{H}(r,t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\vec{H}}(r,\omega) e^{-j\omega t} d\omega, \end{aligned} \tag{1.2}$$

то хвилеві рівняння наберуть вигляду:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \tilde{\vec{E}} + \frac{\omega^2 n^2(\omega)}{c^2} \tilde{\vec{E}} &= 0, \\ \nabla^2 \tilde{\vec{H}} + \frac{\omega^2 n^2(\omega)}{c^2} \tilde{\vec{H}} &= 0, \end{aligned} \tag{1.3}$$

де ∇^2 - оператор Лапласа.

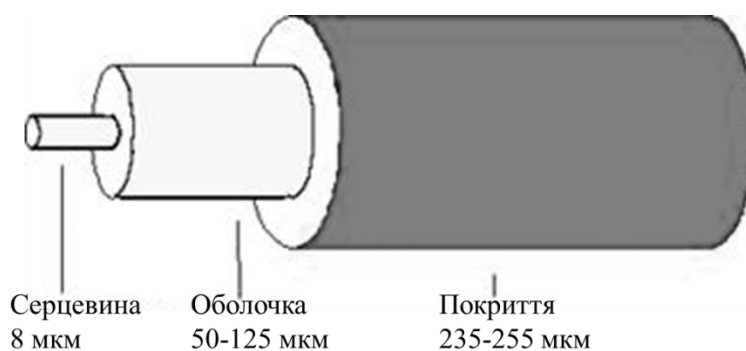


Рис 1.4. Схематичне зображення одномодового оптичного волокна. Адаптовано із роботи [3]

Світлопровід можна представити як ідеальний циліндр з подовжньою віссю z , осі x і y в поперечній (xy) площині утворюють горизонтальну (xz) і вертикальну (yz) площині. У цій системі існують 4 класи хвиль (E і H ортогональні). Поперечні T : $E_z = H_z = 0$; $E = E_y$; $H = H_x$; електричні E : $E_z = 0$, $H_z = 0$; $E = (E_y, E_z)$ - поширюються в площині (yz); $H = H_x$; магнітні H : $H_z = 0$, $E_z = 0$; $H = (H_x, H_z)$ - поширюються в площині (xz), $E = E_z$; змішані EH або HE : $E_z = 0$, $H_z = 0$; $E = (E_y, E_z)$, $H = (H_x, H_z)$ - поширюються в площинах (xz) і (yz).

При розв'язанні системи рівнянь Максвелла зручніше використовувати циліндричні координати (z, r, φ), при цьому рішення буде представлено у вигляді хвиль з компонентами E_z, H_z :

$$\begin{aligned} E_z(r, \omega) &= A(\omega)F(r)e^{jm\varphi}e^{-j\beta \cdot z} \\ H_z(r, \omega) &= B(\omega)F(r)e^{jm\varphi}e^{-j\beta \cdot z} \end{aligned} \quad (1.4)$$

де $A(\omega)$ і $B(\omega)$ - нормуючі постійні; $F(r)$ - функція, яку треба визначити; β - подовжній коефіцієнт поширення хвилі; $k = n\omega$ - хвильове число.

Параметр β визначається як розв'язок характеристичного рівняння, яке отримується з граничних умов, що вимагають безперервності тангенціальних складових компонент E_z і H_z електромагнітного поля на межі розділу серцевини і оболонки. Характеристичне рівняння дає набір з n рішень (цілі індекси) для

кожного цілого m , отримаємо β_{mn} власних значень, кожному з яких відповідає певний тип хвилі, званий модою. Умовою існування моди є експоненціальне зменшення її поля в оболонці уздовж координати r , що визначається значенням поперечного коефіцієнта поширення в оболонці. При $k_{o\delta} = 0$ встановлюється критичний режим, що полягає в неможливості існування моди, що направляється, що відповідає [1]:

$$J_0(k_c r) = 0. \quad (1.5)$$

Останнє рівняння має незліченну безліч рішень [4]:

$$k_c r = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2) \cdot (kr)^2 - (k_{o\delta} r)^2} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2) \cdot (2\pi r / \lambda)^2 - (k_{o\delta} r)^2}. \quad (1.6)$$

Введемо величину, звану нормованою частотою V , яка зв'язує структурні параметри ОВ і довжину світлової хвилі, і визначувану наступним вираженням:

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi r}{\lambda} NA. \quad (1.7)$$

При $k_{o\delta} = 0$ для кожного з рішень рівняння (1.6) має місце критичне значення нормованої частоти V_{nm} ($m = 1, 2, 3, \dots$, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$):

$$V_{01} = 2,405; V_{02} = 5,520. \quad (1.8)$$

Вибираючи параметри ОВ можна добитися режиму поширення тільки цієї моди, що здійснюється за умови [4]:

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2,405. \quad (1.9)$$

Мінімальна довжина хвилі, при якій в оптоволоконі поширюється фундаментальна мода, визначається як:

$$\lambda_{CF} = 2\pi r \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / 2,405. \quad (1.10)$$

Спектр власного електронного поглинання кварцевого скла лежить в ультрафіолетовій області ($\lambda < 0,4$ мкм). Спектр поглинання ґрат лежить в інфрачервоній області ($\lambda > 7$ мкм). Оскільки структура кварцевого скла аморфна, смуги поглинання мають розмиті межі, а їх «хвости» заходять у видиму область спектру. У другому і третьому вікнах прозорості в діапазоні довжин хвиль 1,3-1,6 мкм втрати, викликані поглинанням складають 0,03 дБ/км.

Ступінь втрат визначається коефіцієнтом загасання:

$$\alpha = \alpha_n + \alpha_p + \alpha_{np} + \alpha_k + \alpha_{ик},, \quad (1.11)$$

де α_n - коефіцієнт загасання, обумовлений втратами на поглинання світлової енергії;

α_p - коефіцієнт загасання, обумовлений релеевским розсіюванням на неоднородностях матеріалу ОВ, розміри яких значно менше довжини світлової хвилі, і тепловими флуктуаціями показника заломлення. Релеевське розсіяння викликається розсіянням на неоднорідностях показника заломлення, які виникли в розплавленому кварці у зв'язку з локальними термодинамічними флуктуаціями концентрації молекул кварцу завдяки їх хаотичному руху в розплавленому стані. При твердінні волокна неоднорідності застигають в структурі кварцевого скла. Коливання щільності призводять до випадкових флуктуацій показника заломлення в масштабі, меншому, ніж довжина світлової хвилі λ .

α_{np} - коефіцієнт загасання, викликаний присутніми в ОВ домішками, що призводять до додаткового поглинання оптичної потужності (іони металів Fe, Cu, Ni, Mn, Cr), що викликають поглинання в діапазоні довжин хвиль 0,6-1,6 мкм, і гідроксильні групи (ОН), завдяки яким виникають т.зв. резонансні всплескі загасання $\alpha(\lambda)$ на довжинах хвиль 0,75; 0,97 і 1,39 мкм.

α_k - додаткові втрати, які викликані деформацією ОВ в процесі виготовлення кабелю, скручуванням, вигином, відхиленням від прямолінійного розташування і термомеханічними діями.

$\alpha_{ик}$ - коефіцієнт загасання, залежний від довжини хвилі оптичного злучення і за рахунок поглинання в інфрачервоній області що зростає в показовій мірі із зростанням довжини хвилі.

У техніці зв'язку в основному застосовуються кварцеві ОВ, область ефективного використання яких знаходиться в діапазоні довжин хвиль до 2 мкм. На довгих хвилях як матеріал для волокна використовуються галоїдні, халькогенідні та фторидні типи скла. У порівнянні з кварцевими волокнами вони мають більшу прозорість і забезпечують зниження втрат на декілька порядків. З появою ОВ з нових матеріалів стає реальним створення ВОЛЗ без ретрансляторів. Загасання оптичного хвилеводу враховується при розрахунку енергетичного бюджету.

Загасання оптоволоконної лінії з урахуванням втрат на роз'ємних з'єднаннях і зростках (нероз'ємних з'єднаннях) визначається по формулі:

$$A = A_{нс} \cdot n_{нс} + \alpha \cdot L + A_{рс} \cdot n_{рс}, \quad (1.12)$$

де $A_{нс}$ і $A_{рс}$ - значення втрат на зростку і роз'ємі відповідно, $n_{нс}$ і $n_{рс}$ - кількість зростків і роз'ємних з'єднань упродовж оптоволоконної лінії завдовжки L , α - кілометричний коефіцієнт загасання оптичного волокна в дБ/км.

Світловий сигнал в цифрових системах передачі поступає у світлопровід імпульсами, які внаслідок некогерентності реальних джерел випромінювання містять складові з різною частотою. Розширення світлового імпульсу, що викликається відмінністю часу поширення його спектральних і поляризаційних компонент, і називається дисперсією [5].

Світлова хвиля, що поширюється уздовж напрямку x , описується рівнянням:

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega \cdot t - kx), \quad (1.14)$$

де A - амплітуда світлової хвилі; ω - її кутова частота, k - хвилеве число.

Якщо зафіксувати значення фази хвилі :

$$\omega \cdot t - kx = \text{const}, \quad (1.15)$$

то швидкість переміщення фази в просторі або фазова швидкість буде:

$$v = \frac{\omega}{k}, \quad (1.16)$$

Світловий імпульс, що поширюється в ОВ є суперпозицією електромагнітних хвиль з частотами, що знаходяться в інтервалі Δ , яка називається групою хвиль виду (2.4). У момент часу t в різних точках для різних x хвилі посилюватимуть один одного, що призводить до появи максимуму інтенсивності групи хвиль. Центр групи хвиль переміщається з швидкістю:

$$u = \frac{d\omega}{dk}, \quad (1.17)$$

званою груповою. Замінивши $k=2\pi/\lambda$ і $\omega = vk$ виразив, отримаємо співвідношення, що виражає залежність групової швидкості від довжини хвилі :

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (1.18)$$

Це і є причиною, що призводить до відмінності швидкостей поширення частотних складових випромінюваного спектру по оптичному волокну. В результаті у міру поширення по оптичному волокну частотні складові досягають приймача в різний час. Це явище називається хвилеводною дисперсією [6]:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \cdot L \cdot \frac{2n_1^2 \Delta}{c\lambda} = \Delta\lambda \cdot L \cdot N(\lambda), \quad (1.19)$$

де Δ - відносна різниця показників заломлення серцевини і оболонки, L - довжина ОВ; $N(\lambda)$ - коефіцієнт хвилеводною дисперсії, званий питомою хвилеводною дисперсією.

Залежність питомої хвилеводною дисперсії від довжини хвилі наведена на рис. 2.1.

Швидкість поширення хвилі залежить від частоти та середовища поширення. Для пояснення цього явища електрони усередині атомів і молекул

розглядаються в теорії дисперсії квазіпружними пов'язаними. Електрони, що коливаються, збуджують вторинні хвилі, що поширюються з швидкістю z , які, складаючись з первинною, утворюють результуючу хвилю. Ця результуюча хвиля поширюється в речовині з фазовою швидкістю v , причому, чим ближче частота первинної хвилі до власної частоти електронів, тим сильніше будуть вимушені коливання електронів і відмінність між v і c буде більше, що пояснює залежність $v = v(\omega)$. Залежність показника заломлення від довжини хвилі, яка характеризує дисперсійні властивості оптичних матеріалів, дорівнює:

$$n^2 = 1 + \frac{Ne^2}{\pi mc^2} \sum_i \frac{(e_i^2/m_i) \lambda_{0i}^2 \lambda^2}{\lambda_{0i}^2 - \lambda^2}, \quad (1.20)$$

де N - щільність частинок; m і e - маса і заряд електрона; λ_{0i} - резонансні довжини хвиль; $f_i = e_i^2/m_i$ - електричні осциляції.

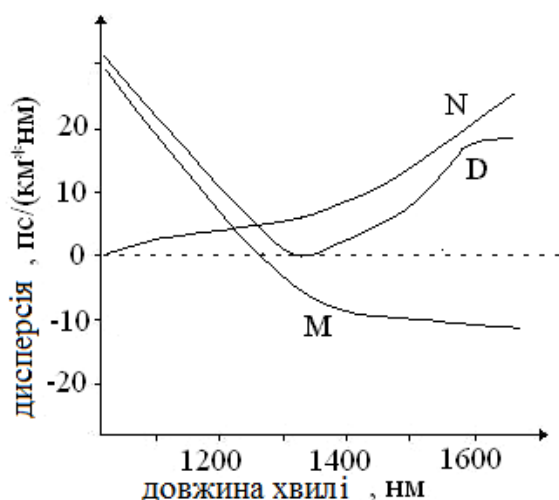


Рис. 1.6. Залежності коефіцієнтів хвилеводної, матеріальної і результуючої хроматичної дисперсії від довжини хвилі. Адаптовано із роботи [9]

Хроматична дисперсія пов'язана з питомою хроматичною дисперсією:

$$\tau_{chr}(\lambda) = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot L.$$

До зменшення хроматичної дисперсії веде використання когерентних джерел випромінювання, наприклад лазерних передавачів і робочої довжини хвилі ближчої до довжини хвилі нульової дисперсії.

Розділ 2.

ЕЛЕКТРОННІ БЛОКИ ВОЛЗ: КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ

2.1 Устаткування мережі

Структура оптоволоконного кабелю дуже проста і схожа на структуру коаксіального електричного кабелю, але замість центрального мідного дроту тут використовується тонке (діаметром близько 1 - 10 мкм) скловолокно, а замість внутрішньої ізоляції – скляна або пластикова оболонка, що не дозволяє світлу виходити за межі скловолокна. Мова йде про режим так званого повного внутрішнього відбиття світла від межі двох речовин з різними коефіцієнтами заломлення (у скляній оболонки коефіцієнт заломлення значно нижче, ніж у центрального волокна). Для механічного захисту від навколишнього середовища застосовують броньований кабель, який може об'єднувати під одним оболонкою кілька оптоволоконних кабелів) [2].

На рисунку 2.1 показана схема оптичного переговорного пристрою. Коли на початку 1960-х рр. з'явилися перші промислові лазери, світло постало в новій якості - когерентне електромагнітне випромінювання значно розширило частотний діапазон функціонування систем.

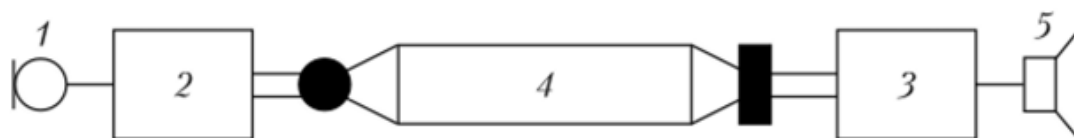


Рис.2.1. Схема оптичного переговорного пристрою: 1 - мікрофон; 2,3 - підсилювачі сигналу; 4 - ВОЛЗ; 5 – телефон. Адаптовано з роботи [5]

Якщо прийняти лише 1% цього діапазону в якості смуги сигналів, якими можна модулювати дане коливання, то отримаємо значення 3000 ГГц. Це відповідає приблизно мільярду телефонних розмов (смуга телефонного сигналу

близько 3000 Гц) або мільйону телевізійних програм (смуга частот телевізійного сигналу становить 8 МГц), які можна передати одним світловим променем [5].

ВОЛЗ класифікуються таким чином:

✓ аналогові ВОЛЗ, якщо каналоутворювальне обладнання створюється на основі аналогових методів модуляції параметрів гармонійної несучої частоти (амплітудна, частотна, фазова модуляції і їх комбінації) або параметрів періодичної послідовності імпульсів (амплітудно-імпульсна, широтно-імпульсна, фазоімпульсна модуляції і їх комбінації);

✓ цифрові ВОЛЗ, якщо каналоутворювальне обладнання будується на основі імпульсно-кодової модуляції, дельта-модуляції і їх різновидів.

Залежно від способу модуляції сигналів:

- ВОЛЗ з модуляцією інтенсивності оптичного випромінювання і відповідної його демодуляції;

- ВОЛЗ з аналоговими методами модуляції оптичного випромінювання (оптичної несучої): амплітудної, фазової, частотної модуляціями і їх комбінаціями.

Залежно від способу прийому або демодуляції оптичного сигналу підрозділяються на:

✓ волоконно-оптичні системи передачі з прямою демодуляцією або безпосереднім прийомом, при якому відбувається безпосереднє перетворення інтенсивності оптичного випромінювання в електричний сигнал, напруга або струм якого однозначно відображають зміну інтенсивності оптичного сигналу;

✓ когерентні волоконно-оптичні системи передачі, в яких застосовується гетеродинна або гомодинного перетворення частота незалежно від виду модуляції (синхронна або несинхронна) оптичного випромінювання, що здійснюється на проміжній частоті. При гетеродинному прийомі одночасно з оптичним сигналом частоти на фотодетектор подається досить потужне оптичне випромінювання місцевого гетеродина з частотою, на виході фотодетектора виділяється проміжна частота, на якій і здійснюються подальші перетворення

оптичного сигналу в електричний. При гомодинному методі прийому частоти коливань прийнятого оптичного випромінювання і місцевого гетеродина повинні бути однаковими, а фази синхронізовані.

Залежно від способу організації двостороннього зв'язку:

✓ двоволоконну односмугову однокабельну, при якій передача і прийом оптичних сигналів ведуться за двома оптичними волокнами (ОВ) і здійснюються на одній довжині хвилі;

✓ одноволоконну односмугову однокабельну, особливістю якої є використання одного оптичного волокна для передачі сигналів в двох напрямках на одній і тій же довжині хвилі;

✓ одноволоконну двосмугову однокабельну.

За призначенням і дальністю передачі ВОЛЗ поділяються на:

- магістральні, призначені для передачі повідомлень на тисячі кілометрів і з'єднують між собою центри республік, країв, областей, великі промислові і наукові центри;

- зонові, призначені для організації зв'язку в адміністративних межах республік, країв, областей і протяжністю до 600 км;

- ВОЛЗ для місцевих мереж, призначені для організації міжстанційних з'єднувальних ліній на міських і сільських телефонних мережах;

- ВОЛЗ для розподілу інформації, що забезпечують зв'язок між обчислювальними машинами, організацію локальних комп'ютерних мереж і мереж кабельного телебачення.

За методами ущільнення оптичного волокна, в основі яких лежить процес мультиплексування:

✓ ВОЛЗ зі спектральним ущільненням або мультиплексуванням з розділенням довжин хвиль;

✓ ВОЛЗ з частотним або гетеродинним ущільненням;

✓ цифрові ВОЛЗ з часовим ущільненням.

2.2 Вибір системи передачі: WDM мультиплексні системи

Одночасна передача по оптоволокну незалежних інформаційних каналів на різних оптичних несучим дозволяє використовувати всю оптичну смугу пропускання световода. Ця технологія одержала назву «wavelength division multiplexing» (WDM). Кожний компонент у системі WDM з певною довжиною хвилі являє собою окремий оптичний канал передачі інформації зі своїм передавачем і приймачем. Додавання нового каналу в лінію зв'язку зводиться до введення нового компонента світлового пучка на не зайнятий довжині хвилі й ніяк не впливає на роботу вже існуючих оптичних каналів передачі сигналів. Для передачі інформації з різних каналів можуть використовуватися аналогові й цифрові сигнали, різні протоколи й швидкості передачі. Така можливість об'єднання, передачі по волокну і наступному поділу каналів з різними довжинами хвиль несучої заснована на принципі суперпозиції (незалежності) хвиль у лінійній оптиці. Нелінійна взаємодія хвиль може привести до появи небажаних перехресних перешкод, і тому потрібно вживати заходів по ослабленню нелінійних ефектів в WDM-Системах зв'язку.

Принцип роботи WDM-систем пояснює рис.2.2. Світлові сигнали з різними довжинами хвиль, як генеруються декількома оптичними передавачами, поєднуються мультиплексором і вводяться в оптичне волокно лінії зв'язку. При більших відстанях передачі на лінії зв'язку встановлюється один або кілька оптичних підсилювачів. На прийомному кінці лінії зв'язку демультимплексор приймає складений сигнал, виділяє з нього вихідні компоненти з різними довжинами хвиль і направляє їх на відповідні фотоприймачі.

Така система передачі «крапка-крапка» забезпечує збільшення пропускної здатності лінії зв'язку між двома вузлами. Однак можливості й переваги технології WDM у ще більшому ступені розкриваються в складних мережах зв'язку, що містять багато різних вузлів. На проміжних вузлах спектральні канали можуть бути додані або виділені зі складеного сигналу за

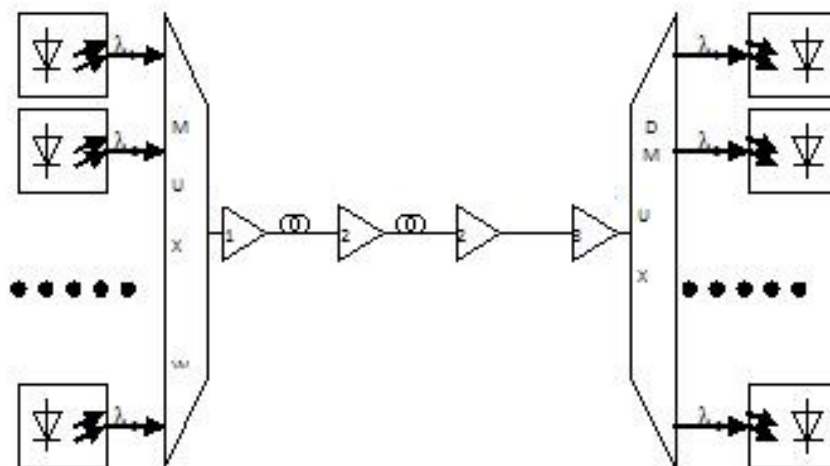


Рис.2.2. Структура волоконно-оптичної лінії зв'язку із хвильовим мультиплексуванням. Адаптовано із робіт [5, 7]

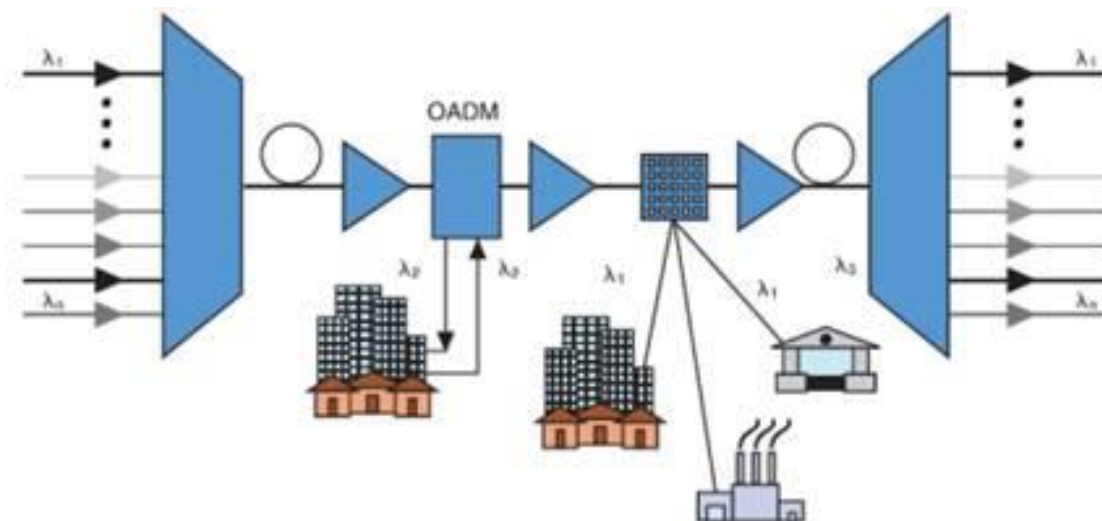


Рис.2.3. Принцип роботи WDM-Систем передачі інформації в складних мережах. OADM. Адаптовано із роботи [9]

допомогою мультиплексорів уведення/виводу, а інші канали проходять через вузол без перетворення в електричний сигнал. У деяких вузлах пристрою оптичної кросскоммутації дозволяють перенаправляти канали по нових напрямках (Рис.2.3).

Мультиплексор уведення/виводу оптичних несучих, ОС- оптичний кросс-комутатор. Перші дослідження WDM-Технології, проведені в 1980-х роках, продемонстрували можливість об'єднання оптичним несучим, розділеним спектральним інтервалом 10-25 нм, для передачі сигналів по многомодовому волокну в локальних мережах, при цьому робочі довжини хвиль розташовувалися в першому (850 нм) і другому (1310 нм) вікнах прозорості. Першими WDM-Системами, що знайшли практичне застосування, стали двухволновые WDM-Системи, що об'єднали дві несучі довжини хвиль 1310 і 1550 нм. Практичний успіх двухволновых WDM-Систем обумовлений тим, що вони дозволяють або подвоїти сумарну швидкість передачі сигналів по одному волокну, або створити дуплексні системи на одному волокні, не змінюючи існуючого активного встаткування й використовуючи прості й надійні двухволновые мультиплексори/демультиплексори.

Застосування оптичних підсилювачів EDFA (Erbium doped fiber amplifier) значно розширює можливості систем з WDM, починає бурхливо розвиватися технологія спектрального мультиплексування із щільним розташуванням спектральних каналів - DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Економічна ефективність систем DWDM у системах далекого зв'язку різко збільшилася із застосуванням оптичних підсилювачів, тому що один пристрій - підсилювач - замінило десятки регенераторів, що використовувалися до появи оптичних підсилювачів для відновлення оптичних сигналів кожного спектрального каналу окремо. Системи електричної регенерації сигналів, застосовувані, наприклад, у мережах SDH, є досить дорогими й, крім того, протокольно залежними, тому що вони можуть регенерувати тільки певний вид кодування сигналу.

У силу того, що основний робочий діапазон підсилювачів EDFA лежить у межах довжин хвиль 1525–1565 нм, з'явилася необхідність розмістити в цьому проміжку якнайбільше каналів. Найбільш широке поширення одержали системи, у яких передбачене розташування каналів із частотним інтервалом до 100 ГГц, що в області 1550 нм відповідає спектральному інтервалу 0,8 нм. Ведуться роботи зі створення систем із частотним інтервалом 50 ГГц (0,4 нм) і навіть 25 і 12,5 ГГц.

Технологія DWDM виявилася незамінною в лініях далекого зв'язку, у яких необхідно передавати великі потоки інформації на більші відстані, що вимагають застосування оптичних підсилювачів. Крім того, останнім часом активно розвиваються міські мережі й мережі доступу, у яких також доцільне застосування технологій спектрального мультиплексування декількох видів: грубе, щільне і надщільне, які відрізняються кількістю оптичних каналів та оптичним діапазоном.

Грубе спектральне мультиплексування (Coarse Wavelength Division Multiplexing, CWDM) характеризується тим, що відстань між сусідніми каналами дорівнює 20-25 нм, а кількість оптичних каналів не перевищує 18. При щільному оптичному мультиплексуванні DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) мультиплексується до 40 спектральних каналів із зсувом довжин хвиль між каналами 0,8 нм. Зверхщільне оптичне мультиплексування HDWDM (Hyper Dense Wavelength Division Multiplexing), в якому мультиплексується до 80 спектральних каналів з розносом довжин хвиль 0,4 нм.

У DWDM та HDWDM використовується тільки одне вікна прозорості 1550 нм у межах області посилення EDFA (1530-1560 нм). Системи з HDWDM вимагають випромінювачів із шириною спектра не більше 0,1 нм, а також вузькосмугових демультіплексорів. У цих системах сильніше проявляються дисперсійні спотворення. Класифікація систем з спектральним ущільненням наведена в таблиці 2.1. Технологія DWDM виявилася незамінною в лініях далекого зв'язку, у яких необхідно передавати величезні потоки інформації на значні відстані, що вимагає застосування оптичних підсилювачів.

Таблиця 2.1

Класифікація систем зі спектральним ущільненням

| | CWDM | DWDM | HDWDM |
|-------------------------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Розкид довжин хвиль(частот) каналів | 20 нм або 25 нм | <1,6 нм 200ГГц,100ГГц, 50ГГц | <0,4 нм 25ГГц, 12,5ГГц |
| Використовувані діапазони | O, E, S, C, L | S, C, L | C, L |
| Типове число каналів | 18 максимум | до 40 каналів | до 80 каналів |
| Вартість каналу | низька | висока | висока |

Крім того, останнім часом активно розвиваються міські мережі й мережі доступу, у яких також доцільне застосування технологій спектрального мультиплексування. У деяких з них не потрібні настільки високі сумарні потоки інформації, які забезпечує технологія DWDM, в цьому разі доцільно застосовувати технологію CWM.

В устаткуванні ВОЛЗ передбачені стаціонарні типові цифрові стійки, що дозволяє при необхідності; здійснити виділення цифрових чи потоків окремих каналів у транзитних пунктах. У комплексі апаратури системи передач використовується типове цифрове каналоутворююче устаткування.

Розділ 3.

ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФІЗИЧНИХ ПОЛІВ НА ПАРАМЕТРИ ВОЛЗ

3.1. Оцінка ймовірності пошкоджень ВОЛЗ ударами блискавки

Оцінка ймовірності частоти пошкодження волоконно-оптичних ліній зв'язку базується на значеннях допустимого струму блискавки в металевих покриттях оптичного кабелю. Довідникове значення питомого опору ґрунту приблизно $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [5, 6].

Очікувана кількість пошкоджень за рік залежить від кількості ударів блискавки, що приходиться на ділянку земної поверхні [6]:

$$N_n = N_o \cdot K_p \cdot K_n \quad (3.1)$$

де K_n - поверхневий коефіцієнт. Існуючу залежність кількості ударів блискавки в землю від рельєфу і наявності на поверхні землі високих (дерев, мачт, опор) об'єктів рекомендується врахувати за допомогою поверхневого коефіцієнта – K_n . В даному проекті візьмемо його рівним 1, так як вздовж траси ВОЛП немає дерев і місцевість рівна;

K_p - коефіцієнт грозозахисності оптичного кабелю з металевими елементами;

N_o - загальне ймовірне середньорічне число всіх ударів блискавки в оптичний кабель лінії зв'язку.

Дана величина розраховується по формулі [7]:

$$N_o = \frac{g \cdot 2 \cdot r_{no} \cdot L}{1000} \quad (3.2)$$

де g - питома щільність ударів блискавки в рік на км^2 земної поверхні;
 r_{no} – умовний радіус іскрової зони, м; L – довжина лінії, км: $L = 20 \text{ км}$.

Інтенсивність грозової діяльності знаходиться по питомій щільності ударів блискавки у землю (очікувана кількість ударів блискавки в 1 км^2 поверхні землі за рік) виходячи із середньорічної тривалості блискавок в годинах.

Кількість ударів блискавки в землю залежить від типу грози і може змінюватись в межах від 0,05 до 0,25 ударів на 1 км² в грозовий день.

Розрахуємо g на основі співвідношення [7]:

$$g = C \cdot T, \quad (3.3)$$

де T – середньорічна тривалість гроз в годинах для даної місцевості.

Для ділянки довжиною 20 км між Сумами і Білопільям середньорічна тривалість гроз в годинах найбільша $T = 73,5$ год [7];

C – середня кількість ударів блискавки на 1 км² землі під час грози [7].

$$C = 0,067 \text{ 1/год} \cdot \text{км}^2, \quad g = 0,067 \cdot 73,5 = 4,92 \text{ 1/год} \cdot \text{км}^2 \quad (3.4)$$

де r_{no} - умовний радіус іскрової зони, розраховується за співвідношенням із роботи [7]:

$$r_{no} = \sqrt{\frac{20,66 \cdot \rho}{2\pi \cdot E_{np}}}, \quad (3.5)$$

де ρ - питомий опір ґрунту на трасі ВОЛЗ.

E_{np} – пробивна напруга електричного поля в ґрунті, при ρ рівному до 100 Ом·м, $E_{np}=108$ кВ/м.

$$r_{no} = \sqrt{\frac{20,66 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 108}} = 1,75 \text{ м}.$$

Вибираємо коефіцієнт ризику K_p для заданого типу кабелю, $K_p=0,01$.

Отримані результати підставляємо у співвідношення (3.2):

$$N_o = \frac{4,92 \cdot 2 \cdot 1,75 \cdot 20}{1000} = 0,689.$$

Імовірність пошкодження оптичного кабелю по формулі (3.5):

$$N_n = 0,689 \cdot 0,05 \cdot 1 = 0,034.$$

Порівняємо одержаний результат з допустимою нормою на очікувану імовірність пошкодження ОК з металевими елементами яка розраховується за формулою [7, 13]:

$$N_1^H = N^H \cdot \frac{L}{100}, \quad (3.6)$$

де N^H - норма на імовірне число пошкодження кабелю на 100 км довжини траси складає $N^H = 0,2$ – для магістральних ВОЛЗ.

$$N_1^H = 0,038 = 3,8\% . .$$

Оскільки $N_n \leq N_1^H$ то захист кабелю не потрібен.

Окрім даного випадку трапляються випадки коли імовірність пошкодження оптичного кабелю перевищує допустиму норму. В таких випадках необхідно застосовувати перехоплення струмів блискавки, що попали у дерево або опору високовольтної лінії передач, за допомогою захисного тросу або проводу. Імовірність пошкодження підземного кабелю може бути зменшена за рахунок використання екрануючих проводів або тросів.

3.2. Розрахунок заземлюючих пристроїв

Для заземлення оболонки кабелю в муфтах необхідно визначити конструкцію заземлюючих пристроїв [14].

Структура ґрунту по трасі кабельної магістралі двохшарова. Глибина першого складає $h_1 = 0,2$ м, а другого шару $h_2 = \infty$. Питомий опір першого шару $\rho_1 = 10$ Ом·м, а другого - $\rho_2 = 100$ Ом·м. При виборі заземлювача циліндричною форми вибираємо довжину заземлювача $\ell = 3$ м, діаметр $d = 0,051$ м.

Значення опору одного заземлювача визначається співвідношенням [15]:

$$R = \left(\left(\ln \left(\frac{2 \cdot l}{d} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot l + 7 \cdot h}{l + 7 \cdot h} \right) \right) \cdot \frac{\rho_e}{2\pi \cdot l} \right) \cdot K_2; \quad (3.7)$$

де l - довжина вертикального заземлювача;

d – діаметр дроту, що з'єднує заземлювач з оболонкою кабелю, м;

h – глибина закопування заземлювача;

ρ_e – еквівалентний питомий опір землі.

$$\rho_e = \frac{[1 + 4 \cdot \tau \cdot \cos(\alpha) + \tau^2(4 - 2 \cdot \cos(2 \cdot \alpha)) + 4 \cdot \tau^3 \cdot \cos(\alpha) + \tau^4] \cdot \rho_1}{1 - 2 \cdot \tau^2 \cdot \cos(2 \cdot \alpha) + \tau^4} \quad (3.8)$$

$$\text{де } N = \frac{1 - \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}}{1 + \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}}} = 0,52; \quad \alpha = \frac{180 \cdot \sqrt{2} \cdot m \cdot hl}{\pi} = 0,176; \quad \tau = N \cdot e^{-\sqrt{2} \cdot m \cdot hl} = 0,519;$$

$$m = \sqrt{314 \cdot 4 \cdot \pi \cdot \frac{10^{-7}}{\rho_1}} = 0,011.$$

$$\rho_e = \frac{1 + 4 \cdot 0,5192 \cdot \cos 0,18 + 0,5192^2 \cdot (4 - 2 \cdot \cos(2 \cdot 0,18)) + 4 \cdot 0,5192^3 \cdot \cos 0,18 + 0,5192^4}{1 - 2 \cdot 0,5192^2 \cdot \cos(2 \cdot 0,1763) + 0,5192^4} =$$

$$= 109,8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Визначимо опір трубчатого вертикального заземлювача [8,14]:

$$R_1 = \left(\left(\ln \left(\frac{2 \cdot 3}{0,0504} \right) + 0,5 \cdot \ln \left(\frac{4 \cdot 3 + 7 \cdot 0,2}{3 + 7 \cdot 0,2} \right) \right) \cdot \frac{109,8}{2 \cdot 3 \cdot 14 \cdot 3} \right) \cdot 3 = 104 \text{ Ом}.$$

Оскільки опір заземлення необхідно прийняти рівним 2 Ом, то виберемо багатоелементний заземлювач, який складається із паралельно з'єднаних заземлювачів сталеву смугу шириною 0,01 м з відстанями між одиночними заземлювачами по 6 м.

Розрахуємо опір горизонтального заземлювача у вигляді смуги [8,14]:

$$R_2 = \frac{K_1 \cdot \rho_e \cdot \ln \left(\frac{1,5 \cdot l}{\sqrt{b \cdot h}} \right)}{\pi \cdot l}, \quad (3.9)$$

де K_1 – сезонний коефіцієнт промерзання ґрунту ($K = 1,23$):

$$R_2 = \frac{1,23 \cdot 101,96 \cdot \ln\left(\frac{1,5 \cdot 3}{\sqrt{0,0038 \cdot 0,2}}\right)}{3,14 \cdot 3} = 55 \text{ Ом.}$$

Визначимо попереднє число одиночних заземлювачів в контурі [9]:

$$n = \frac{R_f}{R_2 \eta^2}, \quad (3.10)$$

де η - коефіцієнт використання заземлювача $\eta_2 = 0,73$, $R_{\text{заг}}$ – норма опору заземлення контуру 2 Ом.

$$n = \frac{101,96}{55 \cdot 0,73^2} = 4 \text{ шт.}, \text{ тоді коефіцієнт використання смуги } \eta_1 = 0,56.$$

Таким чином, нами були проведені розрахунки параметрів волоконно-оптичної лінії, ймовірність пошкодження блискавкою та параметри заземлюючих пристроїв.

3.3. Розрахунок витрат оптичного кабеля та дисперсійних параметрів системи

Розраховуємо необхідну кількість ОК для прокладки по трасі ВОЛЗ з урахуванням запасів. Запаси на прокладку в ґрунт - 2%, на прокладку в кабельній каналізації 5,7%, на прокладку через водяні перешкоди 14%. [16, 17] Якщо введення кабелю виконують на відстані 50 – 60 км (маршрут Суми – Білопілля), то необхідна кількість оптичного кабелю типу ОКЛБ-01-0,3/2,0-4 визначається:

$$N = (45 \cdot 1,02) + (9,4 \cdot 1,057) + (0,3 \cdot 1,14) = 56,2 \text{ км.}$$

Виберемо склад скла, що буде використовуватися як матеріал серцевини і оболонки. Для оболонки візьмемо 100% SiO₂. Окис германію, фосфору підвищує показник переломлення, а окису бора, фтору знижують його. Враховуючи цю властивість, як матеріал серцевини виберемо скло з добавками 3,1% GeO₂, а як матеріал оболонки - чистий кварц 100% SiO₂.

Як матеріал серцевини будемо використовувати чистий кварц SiO₂. Для

обраних складів скла визначимо показники заломлення в діапазоні довжини хвилі $\lambda = 0,6 - 1,8$ мкм за формулою Селмейера. Рівняння Селмейера – це емпірична формула, яка описує залежність між показником заломлення і довжиною хвилі для конкретного прозорого середовища. Рівняння використовується для визначення дисперсії світла у цьому середовищі. Коефіцієнти Селмейера представимо у вигляді таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Коефіцієнти ряду Селмейера для матеріалів оболонки і осердя

| Склад скла | Тип коефіцієнта | Значення коефіцієнта | | |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | 1 – при $\lambda = 0,6$ мкм | 2 – при $\lambda = 1,2$ мкм | 3 – при $\lambda = 1,8$ мкм |
| 3,1% GeO ₂ ; 96,9% SiO ₂ | A _i | 0,7028554 | 0,4146307 | 0,897454 |
| | l _i | 0,0727723 | 0,1143085 | 9,896161 |
| 100% P ₂ O ₅ | A _i | 0,6961663 | 0,4079426 | 0,8974794 |
| | l _i | 0,0684043 | 0,1162414 | 9,896161 |
| 13,3 % B ₂ O ₃ ; 86,7% SiO ₂ | A _i | 0,690618 | 0,401996 | 0,898817 |
| | l _i | 0,061900 | 0,123662 | 9,098960 |

Спектральна залежність показника заломлення скла описується рівнянням Селмейера:

$$n = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}},$$

де коефіцієнти A_i та l_i визначаються експериментально [1, 18].

Для різних довжин хвиль за допомогою програми MATCAD розраховано показники осердя і оболонки та нормованої частоти. Результати наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Результати розрахунків показників заломлення серцевини і оболонки та нормованої частоти для передачі сигналів різної частоти

| λ , мкм | n_1 | n_2 | v |
|-----------------|--------|--------|-------|
| 0,8 | 1,4581 | 1,4533 | 3,948 |
| 0,9 | 1,4565 | 1,4517 | 3,495 |
| 1,0 | 1,4552 | 1,4504 | 3,137 |
| 1,1 | 1,4540 | 1,4491 | 2,847 |
| 1,2 | 1,4528 | 1,4480 | 2,606 |
| 1,3 | 1,4516 | 1,4469 | 2,403 |
| 1,4 | 1,4504 | 1,4458 | 2,230 |
| 1,5 | 1,4493 | 1,4448 | 2,082 |
| 1,6 | 1,4480 | 1,4434 | 2,015 |
| 1,7 | 1,4468 | 1,4421 | 1,952 |
| 1,8 | 1,4455 | 1,4408 | 1,837 |

Таким чином, отримано, що для з'єднання пунктів, які розташовані на відстані 50 – 60 км більш ефективним є прокладання оптичного кабелю типу ОКЛБ-01-0,3/2,0-4, який складається із серцевини SiO_2 і оболонки 3,1% GeO_2 +96,9% SiO_2 .

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи розглянуті питання стосовно теоретичних основ передачі світлових сигналів по волоконно-оптичним лініям зв'язку, параметри оптичного волокна, його конструктивно-технологічні особливості та методи захисту від зовнішніх впливів; процеси, що відбуваються при поширенні світла в оптичному волокні.

2. Установлено, що як джерело світла оптоволоконні лінії мають ряд переваг: світоволокно не проводить електрику, ультрафіолетові та інфрачервоні промені; має здатність проводити великі світлові потоки при мінімальному діаметрі кабелю; джерело світла знаходиться на відстані від місця світіння; система оптоволоконного дозволяє легко контролювати зміну кольору або світло ефектів; термін експлуатації кабелю більше 10 років.

3. Проведені розрахунки параметрів ВОЛЗ, ймовірність її пошкодження блискавкою та визначені параметри заземлюючих пристроїв для волоконно-оптичної системи. Отримано, що ймовірність пошкодження оптичного кабелю блискавкою 3,4 – 3,8% залежно від наявності і кількості металевих елементів.

4. Розрахунок параметрів ВОЛЗ для прокладання на відстані 50-60 км по нерельєфній місцевості показав, що найбільш ефективним для використання в кліматичних і транспортних умовах Сумської області є оптичний кабель типу ОКЛБ-01-0,3/2,0-4, який складається із серцевини SiO_2 і оболонки 3,1% GeO_2 +96,9% SiO_2 .

5. Розрахунковим методом установлено, що при збільшенні довжини світлової хвилі від 0,6 до 1,8 мкм показник заломлення серцевини зменшується від 1,458 до 1,446, показник заломлення оболонки від 1,453 до 1,440, а нормована частота від 3,948 до 1,837. Ці величини менше граничної 2,405, тому використане оптоволокно одномодове, в якому світло розповсюджується по одній вузьконаправленій траєкторії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кучеренко О.К., Колобродов В. Г., Тягур В. М., Русняк І.М. Волоконна та інтегральна оптика. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 216 с.
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно - оптичні системи передачі / навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 227 с.
3. Розорінов Г.М., Соловійов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку. – Київ: Кафедра, 2016. – 289 с.
4. Кучеренко О.К. Волоконна і інтегральна оптика. – Київ: Політехніка, 2017.– 282 с.
5. Ryszard Ryszard S. Romaniuk, Dorosz Jan, Optical Fibers and Their Applications 2020 / Proc SPIE 11456, 2020. Publisher: SPIE - International Society for Optics and Photonics, Bellingham, WA USA. Project: Tailored Optical Fibres. – 2020. – V.11456. DOI:10.1117/12.2574574
6. Контроль стану оптичної лінії із застосуванням технології FDR / О. Є. Землянський, К. Л. Горященко, В. С. Коваль, А. В. Клепіковський // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 121-125.
7. Кучеренко О.К. Волоконна та інтегральна оптика : навчальний посібник для студентів. – Київ: КПІ, 2017.– 216 с.
8. Joe, H.-E.; Yun, H.; Jo, S.-H.; Jun, M.B.G.; Min, B.-K. A review on optical fiber sensors for environmental monitoring. Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol. – 2018. – №5. – P. 173–191.
9. Moloney Jerome V., Newell Alan C. Nonlinear optics. – USA: Taylor & Francis Group, 2018. – 448 p.
10. Schlesinger J.C. Optical fibers research advances. – New York: Nova science publishers Inc., 2008. – 381с.
11. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-тренз, 2012. – 262 с.
12. Paschotta R. Field Guide to Optical Fiber Technology. – Washington: SPIE, 2010. – 128 с.

13. Оптические транспортные сети / Соломенчук В.Д., Мищенко В.А., Гура К.Н. – Київ: ЦПО ОАО «Укртелеком», 2014. – 294 с.
14. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 200 с.
15. Бондаренко О.В., Іоргачов Д.В. Дослідження опорів заземлювальних пристроїв у неоднорідній землі: Методичне керівництво.– Одеса, 2003. – 17 с.
16. J. Fulconis. Nonclassical interference and entanglement generation using a photonic crystal fiber pair photon source // *Phys. Rev. Lett.* – V. 99, № 12. – 2007. – P. 120501 – 120510.
17. Yamamoto N., Noda S., Fabrication and optical properties of one period of a threedimensional photonic crystal // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 1999. – V. 38. – P. 1282-1285.
18. Cennamo N., Pesavento M., Zeni L. A review on simple and highly sensitive plastic optical fiber probes for bio-chemical sensing // *Sens. Actuators B Chem.* – 2021. – V. 331. – P. 129393.