

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

Іван ПРОЦЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр
зі спеціальності 171 – Електроніка
освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»
на тему: **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ПАРАМЕТРИ**
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ
Здобувача групи ЕП.м-11н Лизогуба Іллі Олександровича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Керівник, професор кафедри
електроніки, загальної та прикладної
фізики, д.ф.-м.н., професор

Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

Суми – 2023

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-наукова програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ЕЗПФ

І.Ю. Проценко

«03» травня 2023 року

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Лизогуба Іллі Олександровича

Тема роботи: **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА
ПАРАМЕТРИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ**

затверджена наказом по університету від «26» квітня 2023 р., № 0426-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 24 травня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Волоконно – оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) – це оптична система, яка складається з пасивних та активних елементів і призначена для передачі інформації у оптичному діапазоні. Волокно в кожен будинок – термін, використовуваний телекомунікаційними провайдерами, для позначення широкосмугових телекомунікаційних систем, що включають: високошвидкісний доступ в Інтернет; послуги телефонного зв'язку та послуги телевізійного прийому. Оптичне волокно в даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації, а також найперспективнішим середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані.

Мета роботи полягала у вивченні фізичних основ функціонування оптоволоконних ліній та проведення розрахунку конструктивних і технологічних параметрів ВОЛЗ під дією впливу на них зовнішніх факторів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Фізичні принципи та конструктивно-технологічні особливості ВОЛЗ.

2. Переваги і недоліки ВОЛЗ.

3. Розрахунок параметрів ВОЛЗ: вплив зовнішніх електричних полів,

розрахунок заземлення та врахування кліматичних умов місцевості.

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Слайди № 1-2. Актуальність і мета роботи, методи досліджень.

Слайди № 3-4. ВОЛЗ як сучасні лінії зв'язку. Розповсюдження світла по оптичним волокнам. Типи оптоволокна. Структура ВОЛЗ.

Слайди № 6-8. Устаткування мережі. Вибір оптичного модуля лінії.

Слайди № 9-12. Оцінка ймовірності пошкоджень ВОЛЗ ударами блискавки.

Слайд №13. Висновки.

Слайд №14. Список публікацій. Подяка.

6. Дата видачі завдання 03.05.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 07.05.2023 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 21.05.2023 р.	<i>вик.</i>
3.	Оформлення тексту кваліфікаційної роботи.	до 24.05.2023 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	25.05.2023 р., онлайн	<i>вик.</i>
5.	Захист кваліфікаційної роботи	30.05.2023 р., 10-05 – 13-00 онлайн	

Здобувач вищої освіти

Лизогуб І.О.

Науковий керівник

Однодворець Л.В.

АНОТАЦІЯ

Обсяг роботи: 33 сторінки, 7 рисунків, 4 таблиці, 15 використаних джерел.

Актуальність теми роботи.

Оптоелектронна галузь стикається з динамічно зростаючим попитом на частотні ресурси, що пов'язано із зростанням кількості користувачів Internet та міжнародних операторів та обсягів переданої інформації. Постачальники засобів зв'язку при формуванні сучасних інформаційних мереж широко використовують волоконно-оптичні лінії та систем зв'язку (ВОЛЗ) для протяжних телекомунікаційних магістралей і локальних обчислювальних мереж. Оптичне волокно (ОВ) на даний час вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передачі інформації та перспективним середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані.

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

Методи: розрахунки і прогнозування параметрів та характеристик ВОЛЗ з урахуванням впливу зовнішніх факторів на систему передачі інформації.

Отримані результати:

1. Показані переваги оптоволоконних ліній перед іншими джерела світла: ОВ не проводить електрику, ультрафіолетові та інфрачервоні промені; має здатність пропускати потужні світлові потоки при мінімальному діаметрі кабелю; джерело світла може знаходитись на відстані від місця світіння; контроль зміни кольору; термін експлуатації кабелю більше 10 років.
2. Розрахунки параметрів ВОЛЗ та аналіз впливу зовнішніх факторів показали, що ймовірність пошкодження оптичного кабелю блискавкою 3,5-4,0% залежно від кліматичних умов місцевості, по якій прокладений кабель та кількості металевих елементів в системі.
3. Показано, 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 GeO_2 (3%)+ SiO_2 (97%).

4. Розрахунковим методом встановлено, що при зростанні довжини світлової хвилі від 0,5 до 2,0 мкм показник заломлення серцевини зменшується від 1,458 до 1,445, показник заломлення оболонки від 1,453 до 1,438, що характерне для одномодового оптоволокна.

Рекомендації щодо використання: врахування впливу зовнішніх факторів на зміну параметрів та загальне функціонування волоконно-оптичної системи зв'язку.

Ключові слова: оптоволокно, волоконно-оптична система зв'язку, одно- і багатомодове волокно, дисперсія, повне внутрішнє віддзеркалення, показник заломлення.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
РОЗДІЛ 1	7
КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА	7
1.1 Врахування впливу зовнішніх факторів на оптичне волокно.....	7
1.2 Врахування впливу людської активності на оптичне волокно	11
1.3 Особливості та види захисту волоконно-оптичного кабелю	13
1.4 Механічні властивості оптоволоконного кабелю.....	18
РОЗДІЛ 2	20
КОНСТРУКЦІЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЯ.....	20
2.1 Оптоволоконні лінії зв'язку	20
2.2 Принцип роботи та особливості застосування	22
РОЗДІЛ 3	25
РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ПАРАМЕТРИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ	25
3.1 Оцінка ймовірності пошкоджень ВОЛЗ ударами блискавки.....	25
3.2. Розрахунок витрат оптичного кабелю та дисперсійних параметрів системи	29

РОЗДІЛ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА ПАРАМЕТРИ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

1.1 Врахування впливу зовнішніх факторів на оптичне волокно.

Відомо, що волоконно-оптичний кабель складається з волокон, по яких поширюється сигнал, та елементів конструкції, що забезпечують захист волокон від зовнішніх впливів [1-3]. Залежно від умов експлуатації до конструкції кабелю пред'являються різні вимоги. Кабель, який використовується на відкритому повітрі, в першу чергу повинен мати захист від атмосферних впливів, таких як сонячні промені, волога, перепади температур. Для кабелю, який призначений для прокладання в кабельних колодязях, необхідний захист від гризунів. Якщо кабель підвішений між опорами ліній електропередач опорами ліній електропередач, важлива його механічна міцність.

Величина допустимого поздовжнього розтягування (міцність на розрив) характеризує максимальне зусилля, яке можна докласти в поздовжньому напрямку кабелю і при якому не відбудеться зміни характеристик оптичного волокна. При розтягуванні кабелю, в першу чергу, відбувається вплив на оболонку кабелю, а вже потім - на оптичне волокно.

Приклад залежності розтягування волокна і оболонки кабелю від прикладеного зусилля наведено на малюнку праворуч нижче. З нього видно, що при розтягуванні кабелю із зусиллям, меншим за 1,5 кН, розтягнення оптичного волокна не відбувається. Це граничне значення і показує, як міцність на розрив. Чому відразу не виникло розтягнення волокна? Довжина волокна кабелю перевищує довжину оболонки кабелю - оптичні волокна вільно розташовані в заповненій гелем трубці по спіралі. При розтягуванні оболонки кабелю - спіраль волокон випрямляється, при стисненні - навпаки, стискається. Коли до оболонки кабелю прикладається зусилля розтягування, оптичні волокна спочатку випрямляються і лише потім починає подовжуватися. За деякими критеріями

розтягнення волокна на величину до 0,5 % також є допустимим, і тоді межа міцності на розрив кабелю за тією ж схемою можна вважати 2 кН [1, 4].

Іноді на міцність на розрив вказують два значення: короткочасне і довготривале. Говорячи про цю характеристику оптоволоконного кабелю, важливо відзначити, що мова не йде про фізичний розрив кабелю або навіть волокна.

При виборі кабелю зазвичай орієнтуються на два аспекти: Перший - це пожежна безпека, яка виникає при прокладанні кабелю в приміщеннях. Другий аспект - це цілісність і збереження волокон при зберіганні, прокладанні та експлуатації оптоволоконного кабелю. На кожному з цих етапів кабель піддається механічним, атмосферним та іншим впливам, які можуть бути небезпечними для волокна. Зауважимо що тут мова не йде про фізичне руйнування оптичного волокна [5].

Волоконно-оптичний кабель, як і телекомунікаційний кабель, за стійкістю до зовнішніх факторів, але в меншій мірі, піддається впливу дуже великим переліком зовнішніх факторів. Цей перелік включає два типи факторів: зовнішні умови навколишнього середовища та фактори викликані діяльністю людини. Взаємозв'язок між факторами зовнішнього середовища та механічним впливом цих факторів на оптичне волокно показано на рис. 1.1.

На рис.1.1 показано, що зміни у волоконно-оптичному кабелі, такі як макро-мікрозгинання (волокно з макробендом), фізична або хімічна реакція волоконно-оптичного кабелю на блискавку, воду і вологу, водень і випромінювання, призводить, в першу чергу, до збільшення загасання.

Розглянемо та опишемо більш детально вплив умов навколишнього середовища на оптоволоконний кабель для різних типів кабелів (Рис.1.2):

1. Температура навколишнього середовища - при високих значеннях призводить до усадки оболонки кабелю з розтягуванням жили на повітрі, підводних волоконно-оптичних кабелів, прокладених в землі, в каналізації та тунелях. В результаті різких змін температури відбувається збільшення загасання волоконно-оптичного кабелю при всіх типах укладання. Вплив

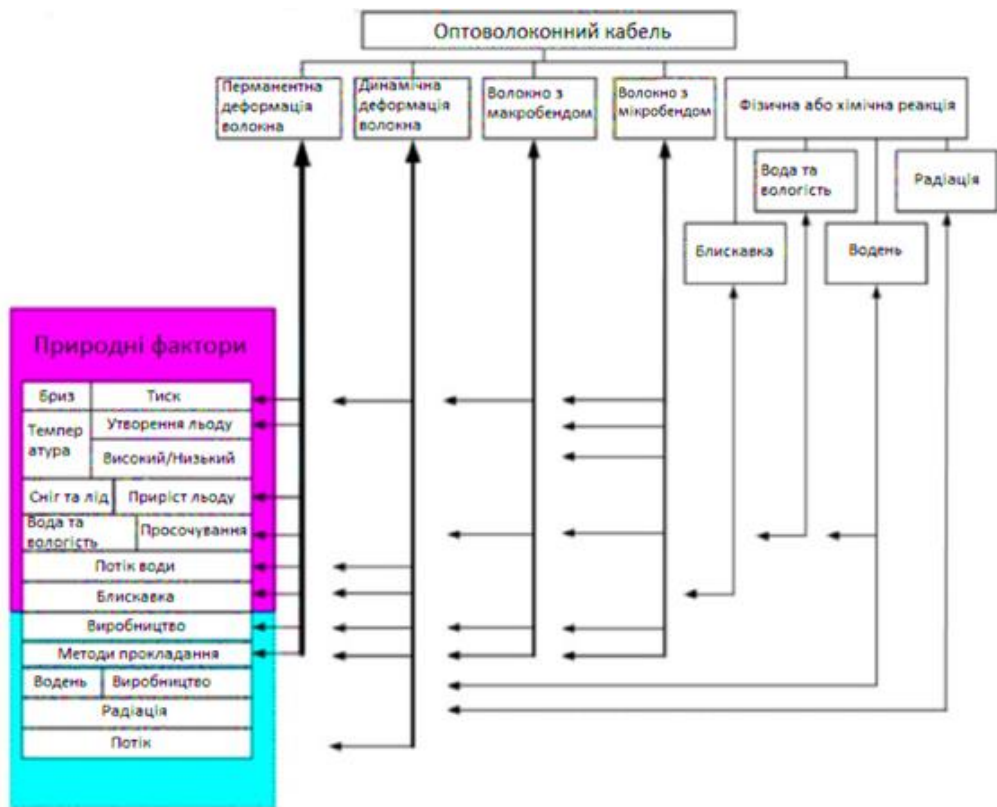


Рисунок 1.1 – Схема дії зовнішніх факторів на оптичне волокно

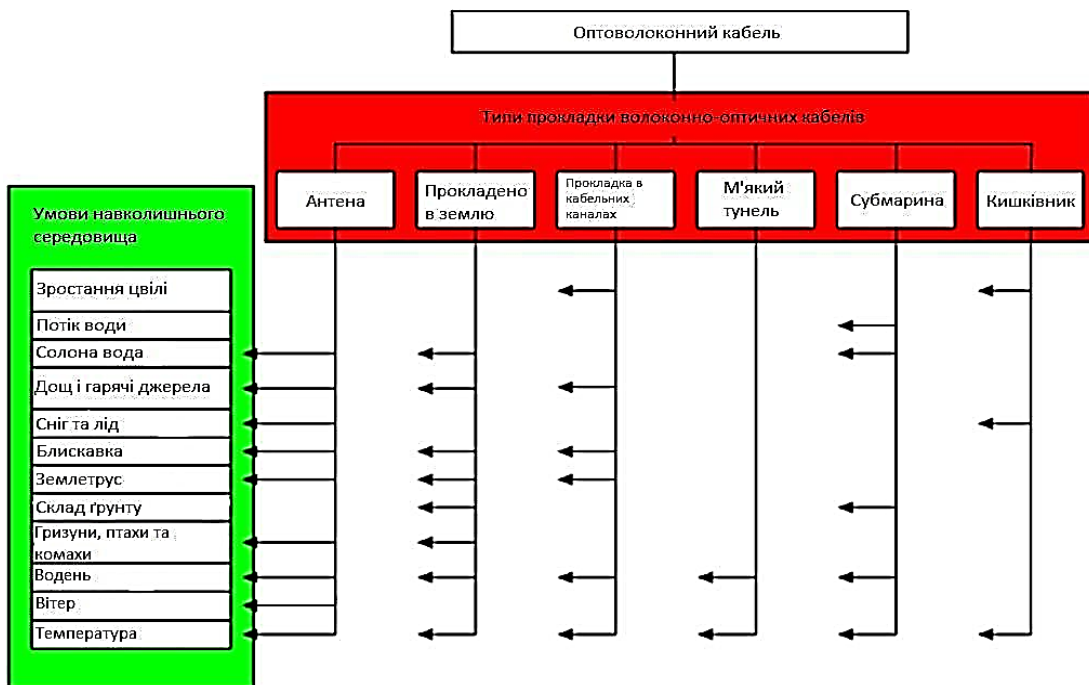


Рисунок 1.2 - Результат впливу на волоконно-оптичний кабель зовнішніх факторів, обумовлених умовами навколишнього середовища. Адатовано із роботи [14]

низьких температур призводить до крихкості оболонки кабелю. Цьому піддаються повітряні кабелі, кабелі в землі і в каналізації, особливо в умовах вічної мерзлоти.

1. Вітер - це стан навколишнього середовища, під впливом якого знаходяться оптоволоконні кабелі. У підвішеному стані волоконно-оптичні кабелі пошкоджуються тиском вітру або розгойдуванням кабелю.

2. Солоня вода - завдає шкоди підводному кабелю та кабелю, прокладеному в ґрунті, оскільки викликає корозію броні кабелю, а у підвішеному волоконно-оптичному кабелі - корозію несучого кабелю.

3. Дощ і гарячі джерела - подібно до корозії солоня води призводять до корозії підвісного кабелю в повітрі і корозії кабельної броні в кабелях під впливом гарячих джерел, прокладених в землі і в каналізації.

4. Сніг і лід - під впливом сили тяжіння льоду можуть виникати пошкодження в повітрі і внутрішніх кабелях.

5. Блискавка - призводить до руйнування кабелю та небезпеки для персоналу. Повітряні волоконно-оптичні кабелі, кабелі прокладені в ґрунті і в каналізації, схильні до цього впливу. Це питання розглянуто в роботі [4].

6. Землетруси і зсуви ґрунту, каменепади - для кабелів , прокладених в землі і в каналізації при зсувах відбувається обрив , а оптичні кабелі для повітряних небезпек - каменепади.

7. Склад ґрунту - ця умова, якщо вона включає агресивні компоненти, призводить до корозії бронекабелів прокладених у ґрунті та підводних кабелів.

8. Гризуни, птахи та комахи - пошкодження оболонки кабелю гризуни, птахи та комахи з'являються в повітрі і зариваються в кабелі. Як повідомляється, найчастіше пошкоджуються кабелі, прокладені в захисних пластикових трубах. Основними шкідниками є білки, бабаки та хом'яки, а в населених пунктах - сірі та чорні щури і хатні миші.

9. Водень - призводить до збільшення втрат у волоконно-оптичному кабелі зовнішньої прокладки.

10. Потік води - цей зовнішній вплив небезпечний лише для підводних волоконно-оптичних кабелів.

11. Ріст плісняви - призводить до пошкодження оболонки волоконно-оптичного кабелю, прокладеного в тунелі та у внутрішніх кабелях.

1.2 Врахування впливу людської активності на оптичне волокно

Вплив факторів, спричинених діяльністю людини, є не менш небезпечним для волоконно-оптичних кабелів, проте, як правило, має локальний вплив. Ми представили ці фактори на рисунку 1.3. Ця блок-схема показує, що всі волоконно-оптичні кабелі, незалежно від типу прокладки, схильні до помибок при монтажі кабелів.

Розглянемо фактори впливу людської активності.

1. Неправильна прокладка кабелю - найпоширенішою помилкою при монтажі кабелю є перегин барабана в зливі та розтягнення. Цей аспект людської діяльності досить детально вивчений у різних джерелах з ВОЛЗ. Приклад наведено у пункті. При виникненні помилки в прокладанні кабелю також може статися повний або частковий розрив або обрив кабелю.

2. Водень - призводить до збільшення загасання ВОЛЗ зовнішньої установки.

3. Радіація - вплив цього фактора все ще погано вивчений, але його вплив на оптоволоконний кабель вже вивчається багатьма установами.

4. Пожежа - руйнівному впливу цього зовнішнього фактора в основному піддаються повітряні кабелі ВОЛЗ, що знаходяться всередині і прокладені в тунелі.

5. Витік нафтового газу - з кабелів, прокладених в землі або в каналізації, газойль роз'їдає хімічні речовини, що входять до складу оболонки, що входять до складу цього газу.

6. Постійний струм - вплив постійного струму на кабелі в землі та в каналізації, кабелі та повітря.

7. Наведена напруга - вплив цього фактора добре вивчений на прикладах підвішування ВОЛЗ на лініях електропередач.

8. Рух автотранспорту - повітряний оптоволоконний кабель може бути пошкоджений під час роботи кранів, під час розкопок кабелів прокладених в землі кабелів і з'єднань. Він сприйнятливий до перехідного загасання в оптичному кабелі з вібрацією волокна, коли люди працюють у каналізаційному ВОЛЗ.

9. Заводський дим і забруднення повітря - повітряні оптичні кабелі є найбільш вразливими до впливу зовнішніх факторів. В оболонці таких кабелів агресивні компоненти забрудненого повітря викликають корозію металу і роз'їдання оболонки хімічними речовинами.

Для усунення впливу зовнішніх факторів і факторів навколишнього середовища, що є результатом людської діяльності, підприємства та виробники працюють над удосконаленням конструкції волоконно-оптичних кабелів.

Таким чином, оптоволоконна технологія має величезний потенціал для розвитку. Конструкція волоконно-оптичного кабелю повинна забезпечувати захист від різноманітних пошкоджень волокна. Це означає, що конструкція волоконно-оптичного кабелю повинна забезпечувати мінімальний вплив перерахованих вище факторів. Численні проведені дослідження привели до розробки спеціалізованих конструкцій кабелів, які використовуються в залежності від різних застосувань.

1.3 Особливості та види захисту волоконно-оптичного кабелю

Основним елементом захисту волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛС) є зовнішня оболонка кабелю від впливу зовнішніх факторів. Поліетилен - матеріал, який найчастіше використовується для виготовлення зовнішньої оболонки волоконно-оптичних кабелів. Він володіє відмінними фізичними властивостями (висока міцність, великий запас зносостійкості, не піддається УФ-окисленню та іншим хімічним впливом), а також хорошими діелектричними

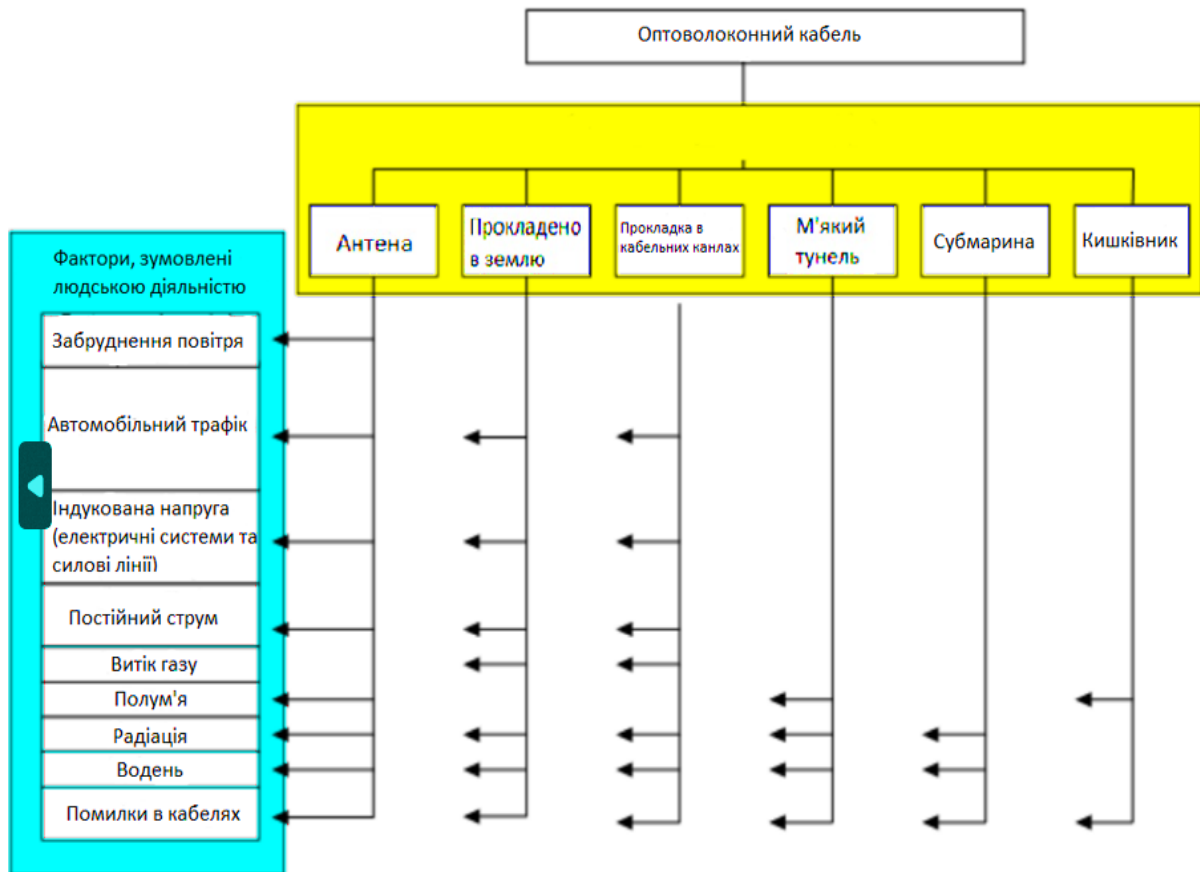


Рисунок 1.3 - Результат впливу зовнішніх факторів, спричинених діяльністю людини, на волоконно-оптичний кабель. Адаптовано із роботи [14]

властивостями. Поліетилен має стійкість до проникнення вологи, низьких і високих температур, а також має здатність не змінювати свої фізичні властивості під впливом температурних змін навколишнього середовища.

Оболонки оптоволоконних кабелів відрізняються за щільністю використання поліетилену. Найміцнішим матеріалом є поліетилен високої щільності - HDPE (High Density Polyethylene). Його використовують при виготовленні кабелів для зовнішнього застосування, які безпосередньо закопуються в землю або для продовження каналізаційних мереж. Вартість цього матеріалу досить висока, тому його часто використовують для кабелів з великою кількістю оптичних волокон. Меншу вартість має поліетилен середньої щільності - MDPE (Medium Density Polyethylene). З нього виготовляють багато

кабелів, які мають хороші механічні характеристики при відносно невисокій вартості.

Менш міцним є поліетилен низької щільності - LDPE (Low Density Polyethylene), який часто використовують у будівництві кабелів в комбінації з поліетиленом високої щільності. Наприклад, оптоволоконний кабель з металевою бронєю. Його зовнішня оболонка може бути виготовлена з MDPE-поліетилену, а додаткова внутрішня оболонка під сталеву броню - з поліетилену LDPE.

Підвищена міцність оптоволоконного кабелю може бути досягнута, якщо в якості верхнього шару використовується PA (поліамід). Це дуже підходящий матеріал для виробництва кабелів для промислового застосування. Поліамід має відмінну стійкість до хімічних сполук, таких як концентрований луг, різні масла, деякі розчини органічних і мінеральних кислот. Товщина поліамідної плівки не перевищує 0,5 мм. Сама оболонка найчастіше має помаранчевий або чорний колір.

Незважаючи на хороші механічні властивості, поліамід дуже вразливий до вологи та ультрафіолету. Тому, як правило, поліамід використовується як додатковий конструктивний елемент разом з поліетиленом. Цей кабель використовується для прокладки в кабельних каналах або пластикових трубах. Затягувати поліамідний кабель легко, оскільки коефіцієнт тертя між гладкою поверхнею поліаміду і пластиковими трубами відносно низький. Крім того, поліамід має відмінну стійкість до стирання.

Особливу увагу слід звернути на оптоволоконні кабелі, корпуси яких відповідають вимогам пожежної безпеки. Основою для виготовлення відповідних оболонок є поліетилен, а необхідні властивості досягаються додаванням спеціальних хімічних добавок. В описі оптоволоконного кабелю про наявність таких властивостей часто свідчить абревіатура LSZH (Low Smoke Zero Halogen).

Загалом, існує багато стандартів, що описують необхідні властивості кабельних оболонки відповідно до міжнародних або національними нормами пожежної безпеки. Ці стандарти описані нижче.

Умова, коли зовнішня оболонка не підтримує горіння (не поширює полум'я), означає, що у випадку вертикального запалювального кабелю знизу його оболонка не сприятиме поширенню полум'я вгору. Однак дотримання цієї норми в жодному разі випадку не гарантує, що при розташуванні кабелю, наприклад, в тунелях або трубах вогонь не пошириться в горизонтальному напрямку [7, 8].

За вогнестійкість відповідає характеристика, яку можна перекласти як "нерозповсюдження полум'я" (Non propagation of fire). Якщо кабель має відповідні характеристики, то це гарантує, що він не стане причиною пожежі або поширення вогню (хоча існує безліч інших джерел займання). Відсутність виділення галогенів та інших токсичних сполук під час горіння забезпечує необхідні умови для евакуації та ліквідації пожежі. Це такі ж важливі властивості оптоволоконного кабелю, як і здатність не виділяти дим при впливі полум'я.

Наявність у волоконно-оптичного кабелю негорючої оболонки, яка не виділяє галогенів, значно підвищує вартість, але прокладка кабелю всередині приміщень, на промислових об'єктах, в підземних тунелях в міжнародних і національних пожежних нормах вимагають використання кабелю саме цього типу. Коли говорять, що кабель захищений від гризунів, найчастіше мають на увазі наявність металевої броні. Причина в тому, що така броня найбільш ефективна при невисокій вартості, тому саме вона знайшла найбільш широке застосування.

Умовно можна виділити кілька типів металевої броні [1, 3, 9]:

- сталева, ламінована стрічка, яку складають вздовж бічних країв, щоб покласти одну на іншу. Цей тип броні часто використовується у волоконно-оптичних кабелях загального використання;

- броньований, сталевий, оцинкований дріт, основне призначення якого - забезпечення більшої допустимої межі міцності на розрив, а також захист від гризунів. Цей кабель призначений для заглиблення в землю.

Для нашої широти допускається використання тросової та ребристої сталевोї броні, що значно дешевше. Броня у вигляді діагональної свити зі сталевого дроту, але кабелі з такою бронєю, як і кабелі з бронєю з алюмінію, міді або іншого металу, є обладнанням спеціального призначення, наприклад, кабелем, який прокладається під водою.

Іноді необхідно використовувати кабель, в якому повністю відсутні металеві компоненти. Як в такому випадку забезпечити надійний захист від гризунів? Існують оптоволоконні кабелі з так званою "неметалевою бронєю". Це або зовнішній шар високоміцного ізоляційного матеріалу, наприклад, поліаміду товщиною в півміліметра, або тонкий шар поліпропілену.

Ефективний захист від гризунів може забезпечити щільний шар скляних волокон, які також виконують роль несучих елементів. Однак при згинанні кабельної трубки з оптичними волокнами може вийти шар поздовжньо розтягнутих скловолокон, що ставить під загрозу захист волокна. Цього можна уникнути, якщо скрутити скловолокно в спіраль або скрутити між собою - таким чином підвищується ступінь захисту.

Всі ці методи захисту від гризунів засновані на конструктивних особливостях оптоволоконного кабелю, які сприяють підвищенню його механічну міцність. Існує ще один спосіб, який базується на додаванні спеціальних хімічних компонентів до зовнішньої оболонки (у нас рідко можна зустріти такий тип кабелю через його високу вартість). Будівництво оптоволоконних каналів зв'язку вимагає значних фінансових вкладень, проте ще на етапі проектування необхідно мінімізувати фактори, які можуть знизити надійність лінії передачі. При цьому захист від гризунів є частиною завдання забезпечення стабільної роботи оптоволоконної лінії зв'язку. Це актуально як при заглибленні кабелю в землю, так і при прокладанні в каналізаційних колекторах і тунелях під землею.

Звичайно, можна виготовити оптоволоконний кабель, який забезпечить всі перераховані види захисту від гризунів. Однак кабель повинен мати інші якості, такі як пожежна безпека, легка вага або відсутність металевих компонентів. Вартість також відіграє важливу роль.

Для збільшення допустимого розтягування оптоволоконного кабелю в його конструкцію обов'язково вводять силові елементи. Допустиме розтягування 1000-2000 Н (Ньютон) можна досягти, використовуючи скловолокно або кевлар. Зазвичай цього показника цілком достатньо для кабелю загального призначення. Нитки можуть утворювати щільний шар, а можуть переплітатися. Вважається, що кевлар забезпечує більшу допустиму міцність на розрив. Однак скловолокно також захищає від гризунів і є бар'єром для розповсюдження горіння.

Висока допустима межа міцності на розрив в окремих типах кабелів, для яких цей показник повинен бути встановлений на рівні десятків кН, досягається за рахунок використання стрижнів. У таких оптоволоконних кабелях використовуються заповнені гелем сталеві трубки.

Є ще одна функція, яку можуть виконувати кевларові та скляні волокна в кабелях. Це так званий "ефект пам'яті". Основним компонентом зовнішньої оболонки оптоволоконного кабелю є поліетилен, який поставляється в гранульованому вигляді. Після термічної обробки виходить однорідна маса, з якої і витягується у вигляді трубки оболонка кабелю.

З часом поліетилен стискається, намагаючись прийняти свою початкову форму завдяки своїй молекулярній структурі. В результаті поздовжнього зміщення зовнішньої оболонки кабелю, відносно вільно, розміщуються гладкі трубки, в яких розташовані волокна. При цьому зовнішня оболонка стискається, звільняючи кінці ділянок кабелю з термопластичних трубок, які можуть пошкодити оптичні волокна всередині муфти або коробки при розрізанні. Цій усадці можна запобігти, якщо скручену зовнішню оболонку з кевлару встановлюється на спеціальну монтажну муфту. Це явище слід враховувати, при прокладанні кабелю вільно на кілометровій ділянці, наприклад, в землі.

1.4 Механічні властивості оптоволоконного кабелю

Механічні характеристики вказують на те, що як волоконно-оптичний кабель чутливий до механічних впливів: розтягування чи стиснення, згинання і

скручування. В результаті зміни температури навколишнього середовища відбувається природне збільшення або зменшення довжини. Тому в цю групу характеристик також входить температурний діапазон, в якому можна зберігати, обслуговувати і монтувати кабель.

У випадку, коли до оболонки прикладається розтягуюче зусилля, оптичне волокно спочатку випрямляється і тільки потім починає подовжуватися. За деякими критеріями розтягнення волокна на величину до 0,5% також є допустимим, і тоді міцність на розрив кабелю в цьому ж показнику можна вважати 2 кН [1, 10]. Іноді на міцність на розрив вказують два значення: короткочасне і довготривале. Говорячи про цю характеристику волоконно-оптичного кабелю, важливо зазначити, що мова не йде про фізичний розрив кабелю або навіть волокна.

Межа міцності на стискання характеризує допустиме стискаюче напруження, яке може стиснути кабель в поперечному напрямку за умови, що величина загасання у волокні залишається в межах норми. Оскільки розмір тестового середовища становить 100 мм, то за одиницю стискаючої сили часто приймають значення тиску, що вимірюється в кН на 100 мм.

Ударне навантаження характеризує захист троса безпеки від ударів. Наприклад, ударне навантаження, що дорівнює 2 Нм, означає, що при вільному падінні на кабель вантажу вагою 2 кг з висоти 100 мм параметри оптичного волокна не зміняться. Таке випробування проводиться не менше трьох разів.

Максимальний вигин кабелю - ще один важливий параметр, який характеризує максимально допустимий радіус вигину прокладки кабелю [3, 9, 10]. Його необхідно враховувати, коли мова йде про прокладку оптоволоконного кабелю, наприклад, в трубах або кабелепроводах. Мінімальний радіус вигину часто знаходиться в межах 15-20 на зовнішньому діаметрі кабелю. Якщо проігнорувати цей параметр може призвести до пошкодження волокон в кабелі.

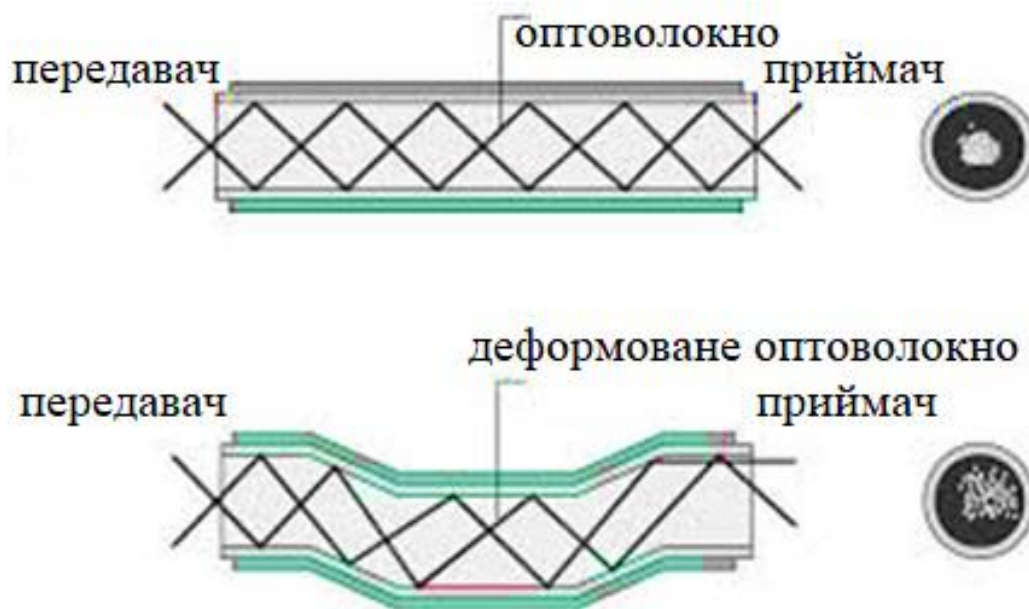


Рисунок 1.4 – Схема механічної деформації оптоволоконна при експлуатації

Кручення визначає здатність кабелю захищати оболонку волокна від скручування навколо своєї осі. Для кабелю з металеву бронею допустимий кут скручування менший, ніж для кабелю без броні.

Параметри термічного циклу визначають стабільність коефіцієнта загасання оптоволоконного кабелю при роботі в різних температурних умовах. Зміна температури навколишнього середовища призводить, в першу чергу, до розтягування або стиснення оболонки кабелю на кручення, що, як уже зазначалося, впливає на характеристики волокна. У документації, яка супроводжує оптичний кабель, вказана мінімальна і максимальна робоча температура. Згідно з методикою визначення цього параметра, відносна зміна загасання у волокні в даному температурному діапазоні не перевищує декількох десятих часток дБ/км. Іноді в характеристиках кабелю, крім цього показника, вказують ще й температурні діапазони для зберігання, монтажу та експлуатації.

Вологозахист є важливим параметром для оптоволоконного кабелю, особливо якщо він призначений для зовнішнього використання. Лабораторний зразок кабелю поміщають у воду на глибину близько одного метра. Оптичні волокна не повинні контактувати з водою протягом одного або декількох днів.

РОЗДІЛ 2

КОНСТРУКЦІЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО КАБЕЛЯ

2.1 Оптиволоконні лінії зв'язку

Оптиволоконні лінії - це тонкі, гнучкі, прозорі нитки з оптично чистого кварцового скла або пластику, які використовуються для транспортування цифрових даних через джерело світла. Ці нитки, як правило, менші в діаметрі, ніж людська волосина. Оптиволоконна нитка складається з декількох шарів. Власне провідник - це серцевина з кварцового скла або пластику. Ця серцевина оточена заломлюючим покриттям, яке називається оболонкою, що забезпечує відбивну поверхню і змушує світло поширюватися по всій довжині серцевини. Третій шар - це буферне покриття для захисту від вологи та інших пошкоджень. Він також запобігає виходу світла з оптиволокна і може мати кольорове покриття для ідентифікації.

Оптиволоконні нитки, як правило, об'єднані в кабель. Ці нитки можуть бути згруповані як щільні або вільні буферні кабелі. Обидва типи кабелів містять певні зміцнювальні елементи, такі як арамідна нитка, дротяні пасма з нержавіючої сталі або наповнені гелем гільзи. Однак вони призначені для різних середовищ.

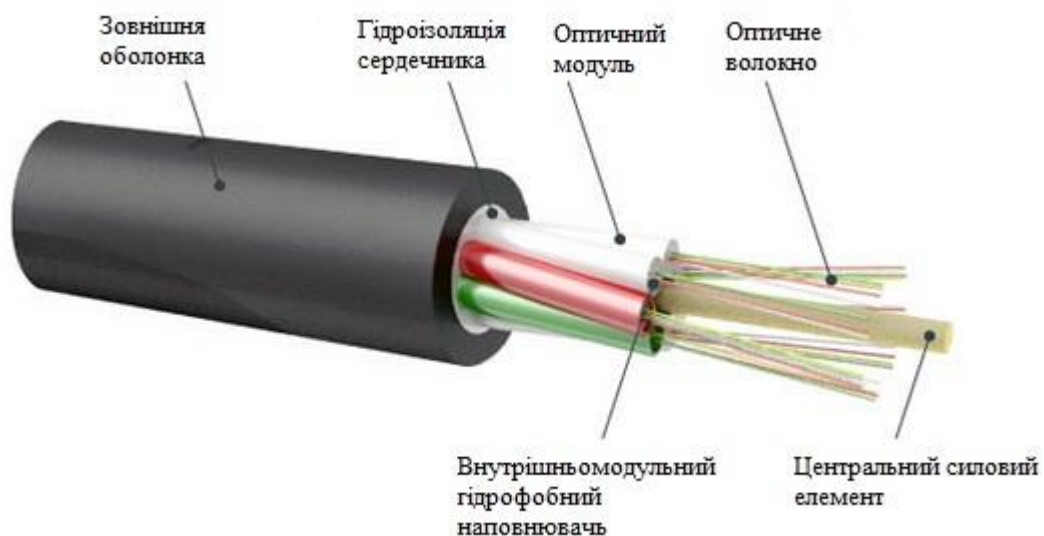


Рис. 2.1 - Конструкція волоконно-оптичного кабелю

Щільний буферний кабель складається із зв'язаних волоконних ниток, покритих зовнішньою оболонкою. Часто зовнішня оболонка містить кілька шарів, щоб додати кабелю структуру і забезпечити водонепроникність. У вільних буферних кабелях волокна містяться в буферних трубках, що дозволяє волокнам вільно рухатися, а також забезпечує додатковий захист волокон. Додавання буферних трубок та інших захисних шарів призводить до того, що діаметр кабелю стає більшим, а сам кабель - менш гнучким. Це також означає, що щільні буферні кабелі легше пошкодити, ніж вільні буферні кабелі. Ці фактори роблять щільні буферні кабелі більш придатними для використання всередині приміщень, а вільні буферні кабелі - переважно для зовнішнього використання. Оптиковолоконний кабель, який використовується зовні, зазвичай заповнений водонепроникним гелем. Буферні трубки можуть містити також водонепроникне покриття між внутрішньою і зовнішньою оболонками. Як внутрішня, так і зовнішня оболонки виготовлені з матеріалів, призначених для захисту від корозії. Деякі кабелі також мають металеве броньоване покриття для підвищення міцності та захисту від гризунів. У технічних характеристиках оптичного волокна вказано співвідношення діаметрів серцевини та оболонки.

Багатомодове волокно зазвичай має розмір 62,5 x 125 мікрон або 50 x 125 мікрон. Одномодове волокно зазвичай має розмір 9 x 125 мікрон. Оптиковолоконні кабелі мають багато переваг перед мідними кабелями, в тому числі стійкість до електромагнітних і радіохвильових перешкод. Вони менші і легші за мідні. Вони здатні передавати дані на більшу відстань і більшу пропускну здатність, а також мають меншу деградацію сигналу. Найбільшою перевагою є їхня здатність передавати цифрову інформацію на відстані зі значно вищою швидкістю, ніж мідь. Наприклад, оптиковолоконний кабель може надійно передавати дані на відстань до 10 000 метрів, порівняно з кількома сотнями метрів для мідного. Це означає, що потрібно менше кабелів, менше ретрансляторів сигналу, менше електроенергії та менше обслуговування. Оптиковолоконні кабелі також значно менші в діаметрі, ніж мідні, що полегшує роботу з ними. менші в діаметрі, ніж мідні, що полегшує роботу з ними.

2.2 Принцип роботи та особливості застосування

Оптоволоконний кабель широко використовується на вітрових електростанціях для передачі інформації за допомогою світла. Це високоефективний спосіб зв'язку між вітровими турбінами та всередині них. Загалом, система складається з передавача для виробництва і кодування світлових сигналів, оптичного волокна для проведення світлових сигналів і оптичного приймача в місці призначення для декодування світлових імпульсів і повернення їх в цифрову форму. Електричні сигнали можуть бути як цифровими, так і аналоговими. Аналогові сигнали також потребують використання модулятора імпульсного коду для перетворення їх у цифрову форму.

Передавач складається з інтерфейсної схеми, схеми приводу джерела та оптичного джерела. Інтерфейсна схема обробляє електричний сигнал, роблячи його сумісним зі схемою приводу джерела. У свою чергу, схема приводу джерела змінює струм для модуляції оптичного сигналу. Нарешті, оптичне джерело перетворює електричну енергію на світло. Фотоприймач перетворює світлові імпульси в електричні сигнали. Він є світлочутливим і повинен бути здатним виявляти навіть слабкі світлові імпульси. Підсилювач підсилює сигнали, отримані від фотоприймача.

Це основне джерело електричного шуму в приймачі, і чутливість приймача залежить від мінімізації цього шуму. Нарешті, відновлювач сигналу перетворює посилений електричний сигнал у форму, яка підходить для схеми інтерфейсу. Якісні передавачі та приймачі працюють разом, щоб забезпечити меншу деградацію сигналу в мережі. Однак для передачі даних на великі відстані також потрібно використовувати повторювачі або оптичні регенератори для посилення світлового сигналу. Повторювач перетворює світловий сигнал назад в електричний, а потім регенерує новий оптичний сигнал. Волоконно-оптичний ретранслятор не може розрізняти імпульси світла з різною довжиною хвилі і є менш ефективним для багатомодових волокон. Оптичний регенератор використовує лазер для оптичного посилення сигналу. Вони здатні посилювати

окремі довжини хвиль світла і підходять для одномодових і багатомодових волокон.

Ще один пристрій, який може бути доданий до системи, - це оптичний з'єднувач або розгалужувач променя. Він використовується, коли необхідно спрямувати сигнали в декілька місць. Розгалужувачі розрізняють за номерами, які представляють відсоток поділу сигналу, наприклад, 60-40 або 80-20. Кабель, що використовується у волоконно-оптичній системі зв'язку, вимагає різних типів жил залежно від використання. Волокна розрізняються залежно від конструкції серцевини по відношенню до оточуючої оболонки. Залежно від типу використовуваного джерела світла, світлові хвилі, що поширюються через серцевину, можуть йти різними шляхами. Режим описує шлях світлової хвилі, коли вона проходить через серцевину. Режим або шлях визначається кутом входу світлової хвилі в жилу і показником заломлення оболонки. Якщо кут входу світлової хвилі занадто гострий, хвиля не буде поширюватися по кабелю.

Існують одномодові та багатомодові оптоволоконні нитки. Як одномодові, так і багатомодові волокна зазвичай мають зовнішній діаметр 125 мікрон, але в одномодовому волокні серцевина значно менша. Одномодові волокна мають діаметр приблизно від 5 до 10 мікрон [13-15]. Нитка одномодового волокна настільки тонка, що дозволяє сфокусованому лазерному світлу, що входить в серцевину, залишатися під кутом 0 градусів без втрат в оболонці. Тому пропускна здатність майже нескінченна. Воно зазвичай використовується для передачі даних на великі відстані і з високою швидкістю. Багатомодове волокно має більший діаметр серцевини від 50 до 100 мікрон. Найчастіше використовуються розміри 50 або 62,5 мікрон в діаметрі. Багатомодове волокно може використовувати лазерні або світлодіодні джерела світла.

Більша числова апертура дозволяє світловим хвилям входити в серцевину під різними кутами. Якщо світлова хвиля входить в серцевину під кутом, близьким до нуля градусів, це називається режимом нижчого порядку. Коли світлова хвиля відхиляється від нуля градусів, порядок моди зростає.

Чим вищий порядок моди, тим більше світлова хвиля вражає оболонку, коли рухається вниз по активній зоні. Отже, моді вищого порядку потрібно більше часу, щоб досягти місця призначення. Ця різниця в часі між вищими і нижчими модами створює модальну дисперсію і погіршує продуктивність системи. Як результат, багатомодові оптоволоконні нитки в основному використовуються для передачі даних на короткі відстані. Для вирішення проблеми модальної дисперсії були розроблені багатомодові індексні волокна з градуйованим індексом.

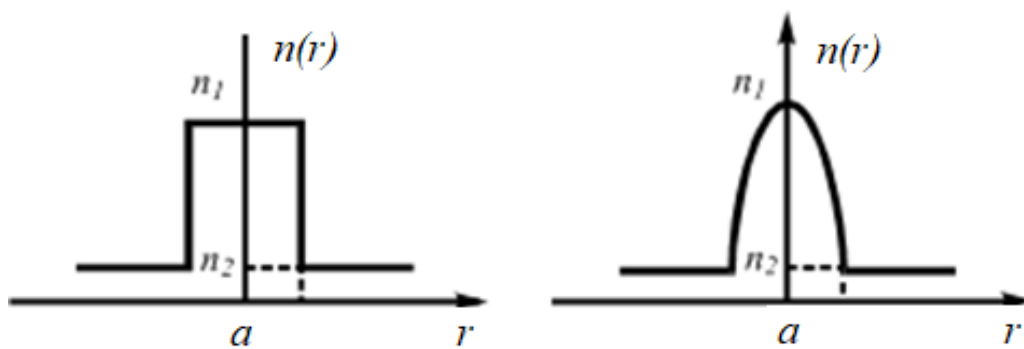


Рисунок 2.2 – Форма сигналу в сходишковому (а) та градієнтному (б) оптоволоконні

Волокна з градієнтним показником заломлення мають найвищий показник заломлення в центрі сердцевини (див., наприклад, [13, 14]. Показник заломлення сердцевини поступово знижується, так що значення на зовнішньому краю сердцевини дорівнює показнику заломлення оболонки. Чим вищий показник заломлення середовища, тим повільніше буде поширюватися світлова хвиля. Тому така конструкція зменшує модальну дисперсію, дозволяючи світловим хвилям у зовнішніх областях сердечника рухатися швидше, ніж у центрі сердечника, завдяки чому вони досягають місця призначення одночасно. Це зменшує втрати сигналу.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ПАРАМЕТРИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Оцінка ймовірності пошкоджень ВОЛЗ ударами блискавки

Оцінювання ймовірності річної частоти пошкодження ВОЛЗ засноване на використанні допустимого струму блискавки, який може проходити через металеві покриття ОК. Зазначений струм прийнято вважати безпечним, оскільки не призводить до пошкодження кабелю з перервою зв'язку, а також не враховується як пошкодження ОК, якщо відбувається пробій зовнішнього шлангу. Величина цього струму залежить від конструкції ОК і, як правило, встановлюється експериментальним шляхом. На всій ділянці траси значення питомого опору ґрунту наближено дорівнює 100 Ом·м.

Очікувана кількість пошкоджень на рік залежить від кількості ударів блискавки, які припадають на площу земної поверхні, безпосередньо підлеглої впливу удару блискавки або дуги, що виникає між місцем удару і кабелем. Ймовірність виникнення струму в підземному кабелі, який може призвести до його пошкодження, загалом визначається за формулою [6]:

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

Залежність кількості ударів блискавки в землю від рельєфу та наявності на поверхні землі високих об'єктів (дерев, мачт, опор) рекомендується враховувати за допомогою поверхневого коефіцієнта K_n . В даному проекті вважається, що $K_n = 1$, оскільки вздовж траси ВОЛЗ відсутні дерева, а місцевість є рівною. Коефіцієнт грозозахисності оптичного кабелю з металевими елементами позначається як K_p .

Загальна ймовірна середньорічна кількість ударів блискавки в оптичний кабель лінії зв'язку позначається як N_o . Це значення обчислюється за формулою

[7]:

$$N_0 = \frac{g \cdot 2 \cdot r_{no} \cdot L}{1000} \quad (3.2)$$

де - питома щільність ударів блискавки в рік на квадратний кілометр земної поверхні.

r_{no} - умовний радіус іскрової зони, в метрах.

L - довжина лінії, в кілометрах, де $L = 40$ км.

Інтенсивність грозової діяльності визначається на основі питомої щільності ударів блискавки в землю, яка виражає очікувану кількість ударів блискавки на 1 квадратний кілометр земної поверхні протягом року, враховуючи середньорічну тривалість блискавок в годинах. Кількість ударів блискавки в землю залежить від типу грози і може варіювати в діапазоні від 0,05 до 0,25 ударів на 1 квадратний кілометр у грозовий день.

Для розрахунку використовується наступне співвідношення [7]:

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

У даному контексті T представляє середньорічну тривалість гроз у годинах для певної місцевості. Для конкретної ділянки між Сумами і Білопільям, яка має довжину 40 кілометрів, найбільша середньорічна тривалість гроз становить $T = 73,5$ години [7].

Значення C вказує на середню 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]:

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

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 і за результатами розрахунків дорівнює 1,8 м.

Вибираємо коефіцієнт ризику K_p для заданого типу кабелю, $K_p=0,01$ та отримані результати підставимо у співвідношення (3.2):

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

Розраховуємо ймовірність пошкодження оптичного кабелю:

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

Допустима норма для ВОЛЗ складає величину 3,8%, в нашому випадку 3,4%, тобто конструкція кабелю достатньою мірою захищає елементи магістральної лінії ВОЛЗ від пошкодження блискавкою. Додатковий захист кабелю в даному випадку не потрібен.

Коли ймовірність пошкодження оптичного кабелю перевищує припустиму норму, то використовують захоплення струму блискавки, який вдарив у дерево або опору високовольтної лінії передачі, за допомогою захисного тросу або проводу. Крім того, щоб зменшити ймовірність пошкодження підземного кабелю, затосовують екрануючі проводи або троси.

3.2. Розрахунок дисперсійних параметрів системи

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 Селмейєра. Параметри ВОЛЗ для одномодового волокна наведені в таблиці 3.1.

Рівняння Селмейєра – це емпірична формула, яка описує залежність між показником заломлення і довжиною хвилі для конкретного прозорого середовища [13-15]. Рівняння використовується для визначення дисперсії світла у цьому середовищі. Коефіцієнти Селмейєра представимо у вигляді таблиці 3.2.

Параметри апаратури для одномодового волокна.

Параметри ВОЛЗ	
Кількість каналів	480
Швидкість передачі, Мбіт/с: - в електронному тракті - в оптичному тракті	34,368 68,736
Довжина оптичної хвилі, мкм	1,30/1,55

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	0,7028	0,4146	0,8974
	I _i	0,0727	0,1143	9,8961
100% P ₂ O ₅	A _i	0,6961	0,4079	0,8974
	I _i	0,0684	0,1162	9,8961
13,3 % B ₂ O ₃ ; 86,7% SiO ₂	A _i	0,6906	0,4019	0,8988
	I _i	0,0619	0,1236	9,0989

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, 10, 13].

Для різних довжин хвиль за допомогою програми MATHCAD розраховано показники осердя і оболонки та нормованої частоти. Результати наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Результати розрахунків показників заломлення серцевини і оболонки та нормованої частоти від довжини оптичної несучої хвилі

λ , мкм	n_1	n_2	F
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 40 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 кваліфікаційній роботі магістра розглянуті питання стосовно принципу передачі світлових сигналів та параметрів оптоволокна, його конструктивно-технологічні особливості та методи захисту від зовнішніх впливів; фактори, від яких залежить швидкість і дальність передачі інформаційних сигналів.

2. Показані переваги одномодового волокна у порівнянні з багатомодовим: широка смуга пропускання (більша приблизно в 50 разів), менша величину затухання сигналу (приблизно в 10 разів).

3. Показані переваги оптоволоконних ліній перед іншими джерела світла: ОВ не проводить електрику, ультрафіолетові та інфрачервоні промені; має здатність пропускати потужні світлові потоки при мінімальному діаметрі кабелю; джерело світла може знаходитись на відстані від місця світіння; контроль зміни кольору; термін експлуатації кабелю більше 10 років.

4. Розрахунки параметрів ВОЛЗ та аналіз впливу зовнішніх факторів показали, що ймовірність пошкодження оптичного кабелю блискавкою 3,5-4,0% залежно від кліматичних умов місцевості, по якій прокладений кабель та кількості металевих елементів в системі.

5. Установлено, 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 GeO_2 (3%)+ SiO_2 (97%).

6. Розрахунковим методом доведено, що при зростанні довжини світлової хвилі від 0,5 до 2,0 мкм показник заломлення серцевини зменшується від 1,458 до 1,445, показник заломлення оболонки від 1,453 до 1,438, що характерне для одномодового оптоволокна.

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, 2-ге видання. – Київ: Кафедра, 2018. – 289 с.
4. Кучеренко О.К. Волоконна і інтегральна оптика. – Київ: Політехніка, 2017.– 282 с.
5. 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.
6. Кучеренко О.К. Волоконна та інтегральна оптика : навчальний посібник для студентів. – Київ: КПІ, 2017.– 216 с.
7. Зачек О.І., Сенік В.В., Магеровська Т.В. Інформаційні технології: навчальний посібник / О. І. Зачек, В. В. Сенік, Т. В. Магеровська. – Львів: ЛДУВС, 2022. – 432 с.
8. Paschotta R. Field Guide to Optical Fiber Technology. – Washington: SPIE, 2010. – 128 с.
9. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л. В. Однодворець, І. М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 200 с.
10. Бондаренко О.В., Іоргачов Д.В. Дослідження опорів заземлювальних пристроїв у неоднорідній землі: Методичне керівництво.– Одеса, 2003.– 17 с.
11. Fulconis J. Nonclassical interference and entanglement generation using a photonic crystal fiber pair photon source // Phys. Rev. Lett. – V. 99, № 12. – 2007. – P. 120501 – 120510.
12. 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.

13. 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
14. 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.
15. Moloney Jerome V., Newell Alan C. *Nonlinear optics*. – USA: Taylor & Francis Group, 2018. – 448 p.