

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

Кафедра електроніки, загальної та
прикладної фізики

Кваліфікаційна робота бакалавра

Вплив фізичних полів на параметри волоконно – оптичних ліній зв'язку

Студент гр.ЕП-71

О.О. Баранов

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 основ функціонування оптоволоконних ліній та проведення розрахунку конструктивних і технологічних параметрів волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) з урахування впливу фізичних полів.

Розглянуті питання стосовно фізичних принципів функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку, параметрів оптичного волокна, основ розрахунку параметрів волоконно-оптичних ліній. Установлено, що як джерела світла оптичні волокна мають ряд переваг: не проводять електрику, ультрафіолетові та інфрачервоні промені; мають здатність проводити великі світлові потоки при мінімальному діаметрі кабелю; легкий контроль зміни кольору і світлоєфектів; рівномірне освітлення; мале споживання енергії; великий термін експлуатації кабелю (понад 10 років). Показано, що в процесі експлуатації і зберігання оптичні кабелі повинні забезпечувати стабільність характеристик, захист від механічних, кліматичних та інших видів зовнішніх впливів, зручність використання, монтажу і ремонту.

Проведений розрахунок йомірності пошкодження волоконно-оптичної лінії ударами блискавки, її значення дорівнює 3,4%. Оскільки величина менша допустимої норми для промислових ліній, додатковий захист не потрібен.

Робота викладена на 32 сторінках, у тому числі включає 7 рисунків, 3 таблиці, використано 15 літературних джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: волоконно-оптична лінія зв'язку, оптоволоконно, мінімальне загасання, вплив фізичних полів на параметри волз

ЗМІСТ

	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ОПТОВОЛОКОННІ ЛІНІЇ ЯК СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ.....	6
1.1 Історія розвитку оптоволоконних технологій	6
1.2 Загальні та фізико-технічні характеристики оптоволокна.....	10
1.3 Оптичне волокно як джерело освітлення.....	14
РОЗДІЛ 2 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВОЛОКОННО – ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ’ЯЗКУ.....	16
2.1 Етапи розвитку ВОЛЗ	13
2.2 Розповсюдження світла в оптичних волокнах.....	18
2.3 Технічні особливості волоконно-оптичних ліній зв’язку	19
2.4 Переваги і недоліки ВОЛЗ	22
2.5 Вплив зовнішніх факторів на параметри волоконно-оптичної лінії зв’язку: оцінка ймовірності пошкоджень ударами блискавки.....	27
ВИСНОВКИ	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	31

ВСТУП

Волоконно – оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) – це волоконно – 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 базуються на проведенні волоконного каналу і його завершення на території кінцевого користувача шляхом установки термінального оптичного обладнання для надання комплексу телекомунікаційних послуг, що включає: високошвидкісний доступ в Інтернет; послуги телефонного зв'язку та послуги телевізійного прийому.

Світ телекомунікацій і передачі даних стикається з динамічно зростаючим попитом на частотні ресурси. Ця тенденція в основному пов'язана із збільшенням числа користувачів Internet і також зі зростаючим взаємодією міжнародних операторів і збільшенням обсягів переданої інформації. Смуга пропускання в розрахунку на одного користувача стрімко збільшується. Тому постачальники засобів зв'язку при побудові сучасних інформаційних мереж використовують волоконно-оптичні кабельні системи найбільш часто. Це стосується як побудови протяжних телекомунікаційних магістралей, так і локальних обчислювальних мереж.

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 кваліфікаційної роботи полягала у вивченні фізичних основ функціонування оптоволоконних ліній та оцінці впливу на параметри ВОЛЗ зовнішніх факторів.

Результати роботи представлені і обговорені на Науково-технічній конференції «Фізика, електроніка, електротехніка, ФЕЕ-2021» (м.Суми).

РОЗДІЛ 1

ОПТОВОЛОКОННІ ЛІНІЇ ЯК СУЧАСНІ ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ

1.1 Загальна інформація

Волоконно-оптичні лінії зв'язку - це система передачі даних через оптичне волокно з сердечником зі скла або пластику. Зовні його покриває оптична оболонка, яка, відображаючи світло від країв внутрішньої частини, направляє її до центру. Сигнал передається за допомогою електронного імпульсу, який через волоконно-оптичні модеми перетворюється в світловий пучок. Пройшовши велику відстань, дані зчитуються і знову перетворюються в електронний сигнал.

Волоконно-оптичні мережі користуються величезною популярністю і поступово витіснили мідні аналоги не випадково. Вони можуть використовуватися де завгодно: всередині будівлі або поза ним, кабелі для організації передачі сигналу об'єднують яке завгодно кількість територій, незалежно від їх площі та протяжності. Мідний кабель досить дорогий, що виглядає привабливо в очах любителів швидкої наживи, які періодично вирізують їх. В цьому плані оптоволоконні мережі абсолютно нецікаві для шахраїв.

Широке використання волоконно-оптичних ліній пояснюється наступними факторами.

1. Широкопasmового пропускання сигналу частотою 10¹⁴ Гц - одне з головних переваг. Це дозволяє передавати по одному волокну інформаційний потік зі швидкістю декількох терабіт в секунду, при цьому навіть на наддовгих магістралях не використовувати повторювачі.

2. Мають малий обсяг і вага в порівнянні з мідними і іншими аналогами, навіть при наявності товстої захисної оболонки.

3. Мінімальна дисперсія і низьке загасання сигналу в волокні дозволяє передавати його на відстань понад 100 км без ретранслятора.

4. Випускаються з матеріалу, непроникного для хвиль і будь-яких перешкод.

5. Мають високі ізоляційні характеристики, що дозволяє пов'язувати в єдину систему пристрою, заземлення на різних поверхах або в різних частинах будівлі. При цьому можна не турбуватися, що при різко виникла різниці потенціалів в мережі обладнання вийде з ладу.

6. Мають стійкість до пожежі і вибухів, що дозволяє прокладати оптоволоконну магістраль на нафтопереробних, хімічних та інших особливо небезпечних підприємствах.

7. Оптичне волокно практично не передає випромінювання в діапазоні радіохвиль, що забезпечує максимальний захист інформації від сторонніх осіб. Це дозволяє організувати мережу де завгодно: в банківських, урядових та інших установах, де захист даних на першому місці.

8. Волоконно-оптичний кабель економічний, в 2,5 рази дешевше мідних аналогів, тому що виготовлений з недорогого кварцу. Це тим більш актуально, якщо врахувати високу передавальну здатність волокна без ретранслятора. Термін служби оптичного волокна - не менш 25 років, крім того, його можна використовувати спільно з провідниками з міді.

Оптоволоконне з'єднання забезпечує мінімум шумів і високу безпеку. Пластикові волокна використовуються при довжинах не більше 100 метрів і при обмеженій швидкодії (<50 МГц). Останнім часом (2006-2007рік) розроблені пластикові волокна, придатні для передачі зі швидкістю 40 Гбіт/с при довжині кабелю 30 м і зі швидкістю 5,35 Гбіт/с при довжині кабелю 220 м (Lightware N4 2007). Помилка під час передачі по оптичному волокну не суттєво, що в багатьох випадках робить непотрібним контроль цілісності повідомлень. Будуючи мережу застосовують багатожильні кабелі (рис.1.1), але існують й інші різновиди кабелю: У верхній частині рисунка [А] показано окреме оптоволоконно, а в нижній [Б] перетин восьмижильного оптичного кабелю. Світло (довжина хвилі 1350 або 1500 нм) вводиться в оптоволоконно за допомогою світлодіода або напівпровідникового лазера. Центральне волокно

покривається шаром (кледінг, 1А), коефіцієнт заломлення якого менше ніж у центрального ядра (стрілками умовно показаний хід променів світла в волокні). Для забезпечення механічної міцності ззовні волокно покривається полімерним шаром (2А). У кабелі може знаходитися багато волокон, наприклад 8 (1Б). Під час прокладання кабелю застосовують сталевий трос (3Б), який зображено по центру. Зовнішня оболонка захищається сталевий оплітоком (2Б) і забезпечує міцність кабелю, а також його стійкість до зовнішніх впливів.

Проектування волоконно-оптичних ліній зв'язку є складним і трудомістким процесом, який повинен враховувати цілий ряд особливостей, починаючи від технічної можливості проведення траси і закінчуючи кількістю основного і допоміжного обладнання, яке буде поєднано в рамках мережі.

Процес проектування і розробки лінії зв'язку можна розділити на кілька стадій:

- ✓ визначення технічної можливості установки;
- ✓ вибір типу кабелю і його довжини;
- ✓ проведення технічних розрахунків на предмет виявлення величини коефіцієнта загасання сигналу, і інших важливих показників;
- ✓ вибір необхідної апаратури і допоміжних засобів для забезпечення безперебійної роботи мережі та відповідності стандартам передачі інформації;
- ✓ проектування і прокладка траси.

Монтаж волоконно-оптичних ліній зв'язку може здійснюватися двома способами - навісним (кабель прокладається по повітрю на вже існуючих або нових технічних опорах) або підземним (для цього необхідно виконати спеціальні земельні роботи). Вибір способу прокладки траси залежить від кліматичного поясу, атмосферних умов (ступінь промерзання ґрунту, сонячна або вітрова активність), рельєфу місцевості та інших факторів.

Підготовка необхідної технічної документації із зазначенням кількості точок підключення, різні розгалуження і загальна трасування (так звана структурна схема);

Перелік конкретних технічних і апаратних засобів, задіяних у створенні працездатною лінії зв'язку (стаціонарні термінали, підсилювачі, трансивери, муфти відгалуження та інше обладнання); узгодження проекту з замовником та проведення монтажних робіт.

Одна з головних особливостей установки полягає в тому, що волоконно-оптичний канал зв'язку в рамках проекту може досягати декількох десятків кілометрів, тоді як стандартна довжина проводу істотно менше. Це передбачає наявність з'єднань в рамках однієї лінії зв'язку між сегментами кабелю.

З'єднати два сегмента дроти можна декількома способами:

роз'ємне з'єднання (за допомогою оптичних конекторів). У цього способу є одна перевага - роботи відбуваються досить швидко і не вимагають спеціального обладнання. Головний недолік полягає в тому, що це істотно здорожує вартість лінії зв'язку і сприяє збільшенню втрат сигналу при використанні великої кількості сполучних елементів;

нероз'ємний спосіб. Тут існує кілька варіантів, серед яких склеювання і зварювання волоконно-оптичних ліній зв'язку. Ці процеси досить трудомісткі і вимагають спеціального обладнання і практичних навичок, але підсумком є практично повна відсутність втрат швидкості передачі і монолітне з'єднання кабелів.

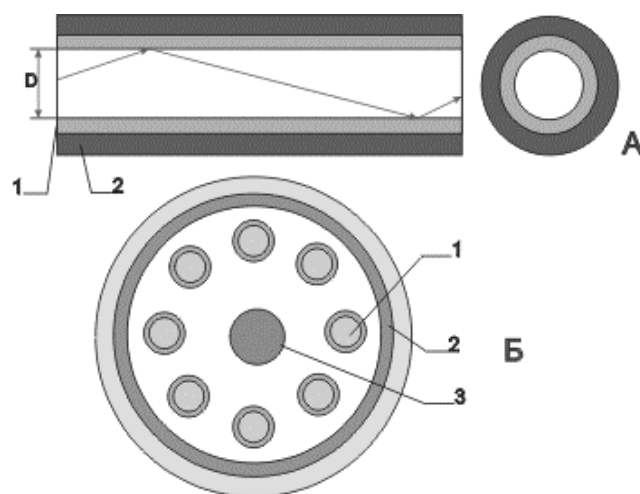


Рис.1.1. Перетин оптоволоконного кабелю. Із роботи [1]

1.2 Загальні та фізико-технічні характеристики оптоволоконна

Передавання світла по волоконно-оптичних світловодах ґрунтується на використанні ефекту повного внутрішнього відбивання, що проявляється коефіцієнт заломлення осердя, який вище коефіцієнта заломлення оболонки [2, 3]. Основна частина оптичного волокна складається з сердечника і оболонки. Матеріалом сердечини служить надчисте кварцове скло, потім покривається одним або двома шарами захисного пластикового покриття, практичним матеріалом для якого є акрилат, адже від покриття залежить міцність волокна.

Оптичне волокно представляє собою циліндр з легованого кварцового скла [4, 5]. Для передачі сигналів найчастіше застосовуються два види волокна: одномодове і багатомодове. У багатомодовому волокні розмір світлопровідної жили порядку 50 – 60 мкм, яке змушує поширюватися одночасно велику кількість мод - променів введених в світловод під різними кутами (рис.1.2).

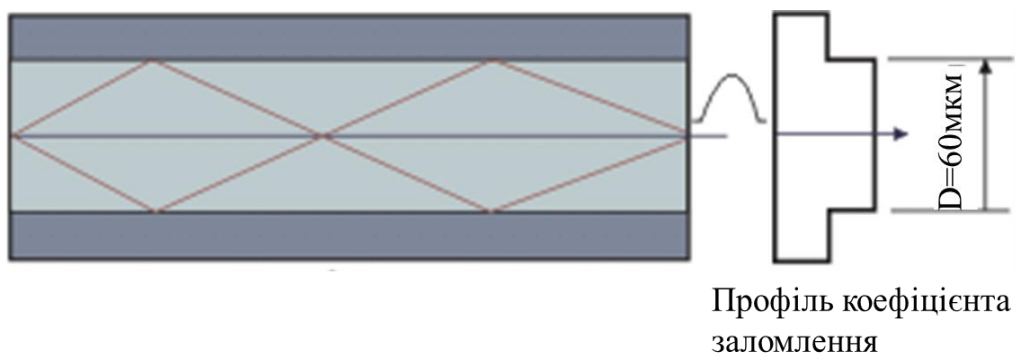


Рис.1.2. Схема багатомодового оптичного волокна. Із роботи [10]

Багатомодове оптоволоконно володіє відносно великим діаметром сердечини (50 і 62,5 мкм), а також великою числовою апертурою, що полегшує монтаж і експлуатацію в цілому. Головний недолік цього волокна є межмодова дисперсія [6, 7] для зменшення впливу якої було розроблено багатомодове волокно з градієнтним профілем показника заломлення. Однак повністю усунути межмодову дисперсію все ж не вдається, що пояснюється як

недосконалістю профілю показника заломлення, так і наявністю так званих спіральних мод, що виникають внаслідок осьової симетрії оптоволоконна, позбутися яких в принципі неможливо.

Градiєнтне волокно характеризується профiлем показника заломлення. Тобто, цей тип оптоволоконна характеризується меншою дисперсією часу поширення, що в свою чергу приводить до менших спотворень форми сигналу.

Застосування цього профiлю показника заломлення призведе до зменшення дисперсії до 1 нс/км і навіть менше. Відомо, що, надаючи світловим імпульсам деяку форму (зворотний гіперболічний косинус), нехтуючи дисперсійним ефектами. Зокрема, маємо, змогу без спотворення форми передавати імпульси на відстань у тисячі кілометрів, що мають назву – солітони.

Повторювачі використовують через кожні 30 км (проти 5 км для мідних проводів). Якщо порівнювати з мідними проводами оптоволоконні кабелі на порядок легші. Наприклад, одна тисяча скручених пар при довжині 1 км важить 8 тон, а два волокна тієї ж довжини, що володіють більшою пропускнуою здатністю, мають вагу 100 кг. Ця обставина відкриває можливість укладання оптичних кабелів уздовж високовольтних ліній зв'язку, підвішуючи або обвиваючи їх навколо провідників. На рис 1.4 зображений одномодовий вид волокна. У ньому відбувається поширення тільки одного світлового променя (одна мода) (рис.1.5). Чим більше мод, тим більше дисперсійне перекручування форми сигналу. Одномодове волокно дозволяє отримати смугу пропускання в діапазоні 50-100 ГГц/км. Типове значення модової дисперсії лежить в межах від 15 до 30 нс/км. Ефективність різних мод різна. У деяких модах світло взагалі не переноситься, а енергія може перетікати з однієї моди в іншу. Це пов'язано з вигинами волокна і варіаціями коефіцієнта заломлення. В залежності від руху світла, воно буде переходити з однієї моди в іншу, поки не досягне рівноважний розподіл мод [8, 9].

Даний різновид волокна приймає меншу частку світла на вході, але підтримує мінімальне спотворення сигналу і мінімальні втрати амплітуди.

Центральна частина одномодового волокна має діаметр 3-10 нм, а діаметр кледінга становить 30-125 нм. Число мод, що допускаються волокном, певною мірою визначає його інформаційну ємність. Модова дисперсія призводить до розпливання імпульсів і їх перекривання один на одного. На поляризаційну модову дисперсію впливають порушення кругової симетрії, механічне напруження, здавлювання, вигин і скручування волокна. Особливо, це важливо при переході на швидкості передачі порядку 10 Гбіт/с або вище. У одномодового кабеля використовуються лазерні приймачі, які застосовують світло, тільки з потрібною довжиною хвилі, але вони дорогі і не довговічні.

Дослідження МО на прикладі тих же плівкових систем, що і випадку дослідження електрофізичних властивостей (рис.3.7), дали наступні результати. У всіх випадках для низько-, середньо- та високоентропійних сплавів амплітуда МО при $T=300\text{K}$ має відносно малу величину (в основному на рівні 0,2-0,4%), що є типовою ситуацією для плівкових систем, які відносяться до класу СЕС або ВЕС. Лише в окремих випадках [33] амплітуда МО досягає величини 0,8-1,0%. Абсолютно малу величину МО має у випадку ВЕС. Характеристика плівкових матеріалів і результати вимірювання МО наведені у таблиці 3.4.

Підкреслимо, що польова залежність магнітоопору в трьох геометріях вимірювання має повністю ідентичний характер (за виключенням величини амплітуди) і усі ознаки ГМО. Таким чином, можна зробити висновок, що у плівкових ВЕС у вигляді одношарового т.р. реалізуються елементи гранульованого стану, що і буде спричиняти ефект гігантського магнітоопору. В той же час у всіх випадках архітектури плівкових матеріалів, властивості яких вивчалися нами, при певних умовах спостерігається анізотропний магнітоопір, що обумовлюється ні СЗРЕ, а спін-орбітальною взаємодією електронів. Його амплітуда відносно мала, оскільки навіть у масивних зразках АМО не більше 4%, що може бути в десятки разів менше величини ГМО. У цьому випадку архітектура зразків не відіграє помітної ролі.

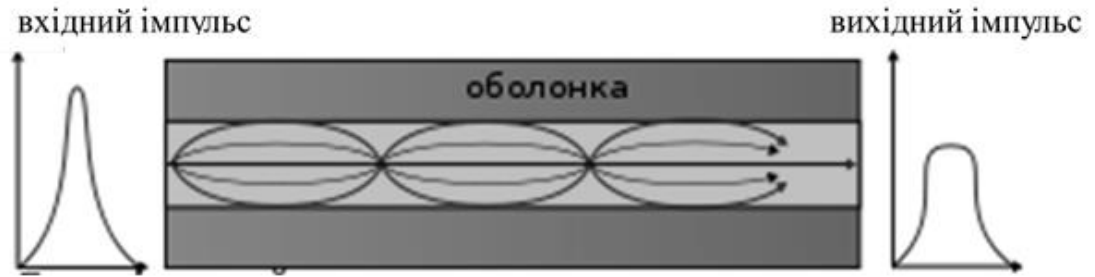


Рис.1.3. Схематична будова і принцип роботи градієнтного оптичного волокна. Із роботи [3]

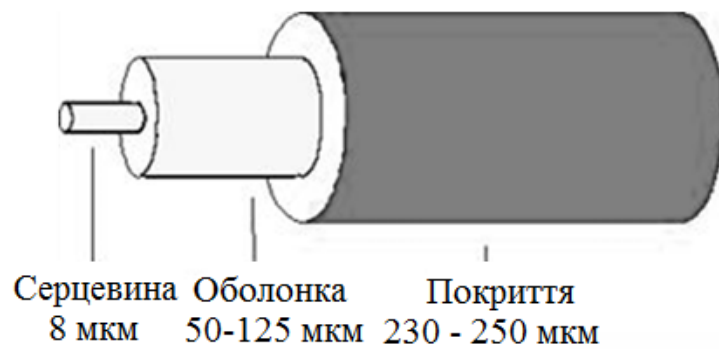


Рис 1.4. Схематичне зображення одномодового оптичного волокна. Із роботи [1]

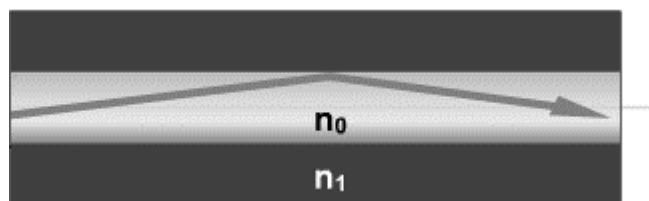


Рис.1.5. Хід променя в одномодовому оптичному волокні: n_0 і n_1 – коефіцієнт заломлення серцевини і оболонки

Наприклад, волокно з діаметром центральної частині волокна 50 нм підтримує 1000 мод., а для градієнтного оптоволокна (рис.1.3) значення N в два рази менше.

Чисельна апертура A дорівнює:

$$A = \sqrt{n_0^2 - n_1^2}, \quad (1.2)$$

де n_0 і n_1 – показники заломлення серцевини і кледінгу відповідно.

1.3 Оптичне волокно як джерело освітлення

Основним елементом оптоволоконної системи освітлення, що забезпечує її неповторні властивості, є гнучкий оптоволоконний кабель – світловод. Залежно від типу він дозволяє передавати його в потрібну точку (кабель торцевого свічення) або рівномірно розподіляти його по всій довжині кабелю (кабель бокового світіння). Додаткові можливості надають розсіювачі для світильників (від ландшафтних і підводних світильників до кришталевих розсіювачів на основі кристалів всесвітньо відомої фірми Swarovski). Джерело світла при цьому може бути винесений за межі освітлюваного приміщення, чим забезпечується повна звукоізоляція, електро- та пожежна безпека [1, 8].

Як джерело світла оптичні волокна мають ряд переваг: світоволокно не проводить електрику, тобто в місці світіння воно відсутнє; світоволокно має здатність проводити великі світлові потоки при мінімальному діаметрі кабелю або ниток це дозволяє підсвічувати місця, які до цього підсвічувати було вельми складно і з великими витратами; джерело світла знаходиться на відстані від місця світіння, тобто зміна лампи, обслуговування в місці свічення не виробляються; система оптоволоконного дозволяє легко контролювати зміну кольору або світлоєфектів, в т.ч. механічно за допомогою світлофільтрів, що відкриває величезні можливості для дизайну, реклами, візуальної інформації; можливість домогтися виключно рівномірного освітлення; можливість розмістити розсіювач у важкодоступному місці; невеликий розмір і

непомітність розсіювача, при великій потужності світла дає необмежені можливості для світлового дизайну; мале споживання енергії (одне джерело 150 Вт підсвічує до 200 м кабелю); можливість використання 2-х типів світіння кабелю торцевого і бічного від одного джерела світла; зміна кольору кабелю із застосуванням RGB систем; термін експлуатації кабелю - більше 10 років; термін служби стандартної металогалоїдною 6000-10000 годин [2, 4]; розсіювачі для світильників можуть виготовлятися з небитких недорогих матеріалів (акрил) і служити невизначено довгий час, роблячи незамінним використанням волоконно-оптичних при підсвічуванні вокзалів, переходів, стадіонів і т.д.

РОЗДІЛ 2

ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВОЛОКОННО – ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Етапи розвитку ВОЛЗ

З розвитком техніки з початку ХХ століття постійно просліджується тенденція використання електромагнітних хвиль усе більш високої частоти. Характерною особливістю інформаційної ери був стрімкий розвиток комунікацій – однієї зі головних інфраструктур інформаційних технологій. В умовах зростаючої потреби в забезпеченні надійного каналу зв'язку як в сфері побудови глобальних інформаційних мереж, так і в області промислової автоматизації з'явилася необхідність пошуку альтернативних технологій передачі даних замість традиційних, заснованої на мідному кабелі.

Ця альтернатива – волоконооптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ), яка дозволяє передавати інформацію з істотно більши швидкостями в порівнянні з мідним кабелем, несприйнятлива до електромагнітного випромінювання. Припущення, що електроніка і радіотехніка досягнуть оптичного діапазону хвиль, стає усе більш достовірним. З'явилася оптоелектроніка – область науки і техніки на стику оптики й електроніки. У другій половині ХХ століття рішення було знайдено – виявилось, що передача сигналу за допомогою світла набагато ефективніше як електричного, так і НВЧ-сигналу [5, 6, 9]. Роком виникнення оптоелектроніки можна вважати 1955-й рік, коли Е. Лоебнер описав потенційні параметри різних оптоелектронних пристроїв зв'язку, названих оптронами, тобто коли були обґрунтовані основні характеристики з'єднання оптичного й електронного пристрою.

Поява на початку 1960-х років лазерів сприяла прискоренню розвитку оптоелектроніки. Напівпровідникові лазери стали випускатися серійно в 1970 р. Видатний вклад в розробку гетеролазерних структур вніс російський академік Ж.І. Алфьоров.



Рис. 2.1. Жмут оптичних волокон. Із роботи [4]

У 1970 році американська фірма «Corning» розробила технологію виготовлення кварцового волокна із загасанням 20 дб/км. Ця подія стала епохальною і послужила стимулом для подальших наукових досліджень і практичних розробок [4, 5, 10]. На сьогоднішній день загасання кварцових оптичних волокон складає менш 0,2 дб/км. Головною метою розробки оптичних волокон було забезпечення оптичних засобів зв'язку. Для далекого зв'язку найбільш важливі такі властивості волокна, як широкосмужність (теоретично широкосмужність оптичного волокна може складати до декількох десятків терагерц) і малі втрати. Для внутрішньо-міських мереж особливе значення мають малий діаметр, відсутність взаємного впливу і безіндукційність. Після інтенсивних досліджень в період з 1975 до 1980 року з'явилася перша комерційна волоконно-оптична система, що оперувала світлом з довжиною хвилі 0,8 мкм і використала напівпровідниковий лазер на основі арсеніду галію (GaAs). Бітрейт систем першого покоління становив 45 Мбіт/с, відстань між повторювачами – 10 км. 22 квітня 1977 в Лонг-Біч, штат Каліфорнія, компанія «General Telephone and Electronics» вперше використала оптичний канал для передачі телефонного трафіку на швидкості 6 Мбіт/с [6, 11]. Друге покоління волоконно-оптичних систем було розроблено для комерційного використання на початку 1980-х. Вони оперували світлом з довжиною хвилі 1,3 мкм від InGaAsP-лазерів. Проте такі системи все ще були обмежені через розсіювання, що виникає в каналі. Проте вже в 1987 році ці

системи працювали на швидкості до 1,7 Гбіт/с при відстані між повторювачами 50 км.

Перший трансатлантичний телефонний оптичний кабель – ТАТ-8 – був введений в експлуатацію в 1988 році. В його основі лежала оптимізована технологія «Desurvire» посилення лазера. ТАТ-8 розроблявся як перший підводний волоконно-оптичний кабель між США та Європою. Розробка систем хвильового мультиплексування дозволила у декілька разів збільшити швидкість передачі даних по одному волокну і до 2003 року при застосуванні технології спектрального ущільнення була досягнута швидкість передачі 10,92 Тбіт/с (273 оптичних канали по 40 Гбіт/с) [3, 11]. У 2009 році лабораторії Белла за допомогою мультиплексування 155 каналів по 100 Гбіт/с вдалося передати дані зі швидкістю 15,5 Тбіт/с на відстань 7000 кілометрів.

2.2 Переваги і недоліки ВОЛЗ

Низькі втрати при передачі. Волоконно-оптичні кабелі з малими втратами дозволяють передавати сигнали зображення на великі відстані без використання маршрутних підсилювачів або репітерів. Це особливо зручно для схем передачі на далекі відстані - наприклад, системи спостереження за автострадами або залізницею, де нерідкі безрепітерні ділянки по 20 км.

Широкосмугова передача сигналу. Широка смуга передачі оптичного волокна дозволяє одночасно передавати по одному волоконно-оптичному кабелю високоякісне відео, звук і цифрові дані.

Несприйнятливість до перешкод і наведень. Повна нечутливість оптоволоконного кабелю до зовнішніх електричних перешкод і наведень забезпечує стійку роботу систем навіть у тих випадках, коли монтажники не приділили достатню увагу розташуванню довколишніх мереж живлення.

Електрична ізоляція. Відсутність електропровідності для оптоволоконного кабелю означає, що йдуть проблеми, пов'язані із змінами потенціалу землі, характерні, наприклад, для електростанцій або залізниць. Це

ж їх властивість усуває небезпеку пошкодження обладнання, викликаного стрибками струму від блискавок та ін.

Нестаріюча лінія зв'язку. Простою заміною кінцевого обладнання, а не самих кабелів, волоконно-оптичні мережі можна модернізувати для передачі більшого обсягу інформації. З іншого боку, частина або навіть всю мережу можна використовувати для зовсім іншої задачі, наприклад, об'єднання в одному кабелі локальної обчислювальної мережі і замкнутою ТВ системи.

Вибухо- та пожежобезпечність. Через відсутність іскроутворення оптичне волокно підвищує безпеку мережі на хімічних, нафтопереробних підприємствах, при обслуговуванні технологічних процесів підвищеного ризику.

Економічність і тривалий термін експлуатації. Волокно виготовлено з кварцу, основу якого складає двоокис кремнію, широко поширеної, а тому недорогого матеріалу, на відміну від міді. З часом волокно зазнає деградації. Це означає, що затухання в прокладеному кабелі поступово зростає, але завдяки досконалості сучасних технологій виробництва ОВ, термін служби становить приблизно 25 років.

До недоліків ВОЛЗ можна віднести високу складність монтажу і спеціальні інструменти для цього. Оптичне волокно менш міцний і гнучкий, ніж електричний. Типова величина допустимого радіуса вигину становить близько 10-20 см, при менших радіусах вигину центральне волокно може зламатися. Оптичне волокно чутливе до іонізуючого випромінювання, через яке знижується прозорість скловолокна та збільшується загасання сигналу.

2.3 Структура і конструктивні елементи ВОЛЗ

У загальному вигляді ВОЛЗ містить вхідний кодувальний пристрій (КП), передавач, оптичний кабель, ретранслятор (Р), приймач і декодувальний пристрій (ДКП). Закодована в КП інформація надходить на передавач, що складається з джерела випромінювання (ДВ) і модулятора (М). В якості ДВ в системах оптичного зв'язку використовуються твердотілі і напівпровідникові

лазери, а також світлодіоди. Модулятор управляє інтенсивністю випромінювання, що надходить від ДВ. Таким чином, оптичним кабелем розповсюджує змінний оптичний сигнал, що несе закодовану інформацію. При великій довжині ВОЛЗ спостерігається сильне ослаблення світлового променя, тому для відновлення його інтенсивності використовується ретранслятор. В приймачі оптичне випромінювання знову перетворюється в електричний сигнал і посилюється за потужністю з допомогою підсилювача П. Декодувальний пристрій дозволяє розшифрувати передану інформацію [12].

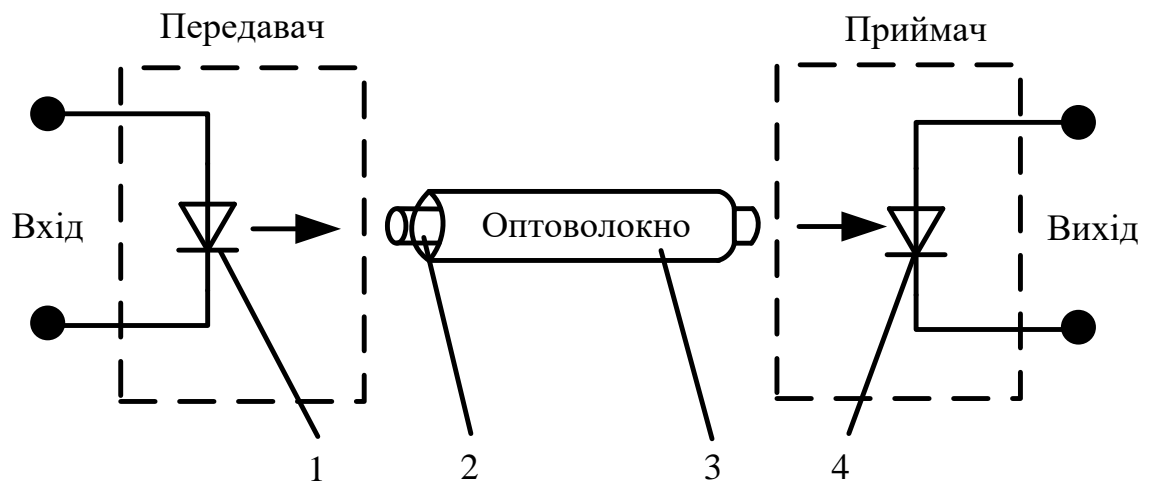


Рис. 2.2. Структурна схема волоконно-оптичної лінії зв'язку: 1 – світлодіод; 2 – сердцевина; 3 – оболонка; 4 – фотодіод. Із роботи [3]

Реальна схема ВОЛЗ інколи містить не всі названі елементи. При невеликій довжині ліній відпадає необхідність в застосуванні ретранслятора. При використанні в якості ДВ напівпровідникових лазерів і світлодіодів управління інтенсивністю випромінювання здійснюється в самих приладах, тому додатковий зовнішній модулятор не потрібний [3, 13].

Основу ВОЛЗ складають волоконні світловоди, передача оптичної енергії якими здійснюється за рахунок ефекту повного внутрішнього відбивання. Це явище спостерігається при падінні променя світла на межу розділу двох середовищ з показниками заломлення n_1 і n_2 , коли випромінювання розповсюджується в оптично більш щільному матеріалі.

При розповсюдженні оптичного сигналу ВОЛЗ відбувається «розмивання» його в часі. Це пов'язане з тим, що, по-перше, промені світла проходять різний шлях, по-друге, всі джерела мають кінцеву ширину спектра випромінювання і, по-третє, спостерігається дисперсія світла в матеріалі волокна. Очевидно, що повне розширення імпульсу при передачі оптичним кабелем визначається трьома перерахованими чинниками і пропорційно довжині ВОЛЗ. У залежності від призначення і відстані між передавачем і приймачем ВОЛЗ поділяють на лінії великої довжини, або магістральні; середні, або внутрішньоміські, і короткі, або внутрішньооб'єктні.

Магістральні лінії призначені для далекого зв'язку (відстань більш 50 км). До них високі вимоги по пропускній спроможності (не менше 108 біт/с) і малому затуханню ($B = 1,5$ дБ/км). Цим вимогам задовольняють тільки кварцові волокна типу селфоків. В якості джерел випромінювання застосовують твердотільні лазери, а приймачів – лавинні фотодіоди. Для відновлення потужності сигналу через 10-20 км розміщують ретранслятори.

Внутрішньоміські лінії забезпечують зв'язок високопродуктивних центральних ЕОМ з віддаленими приладами збору і первинної обробки даних і терміналами, передачу інформації між різноманітними обчислювальними центрами, телефонний зв'язок між абонентами і кабельні системи телебачення і радіомовлення. Ці ВОЛЗ характеризуються середньою довжиною (1-10 км), меншою швидкістю передачі інформації (до 107 біт/с), більшим допустимим згасанням (до 20 дБ/км). В якості оптичних ліній використовуються кварцеві двошарові волокна, джерел випромінювання – напівпровідникові лазери, фотоприймачів – р-і-n-фотодіоди [9, 14].

Внутрішньооб'єктні ВОЛЗ служать для організації зв'язку між окремими процесорами обчислювальних комплексів, зовнішніми приладами і ЕОМ, окремими блоками електронної апаратури і т. д. Подібні лінії потрібні для монтажу контрольно-вимірювальних приладів, систем промислового телебачення, місцевого телефонного і радіозв'язку, приладів автоматичного управління різноманітними об'єктами і технологічними процесами.

2.4 Загальні принципи проектування ВОЛЗ

Оптичним кабелем називається кабельний виріб, який містить кілька оптичних волокон, оптичних модулів або оптичних джгутів, які мають спільну оболонку, поверх якої в залежності від умов експлуатації може бути використаний захисний шар. Оптичні кабелі повинні забезпечувати стабільність характеристик оптичного волокна при експлуатації та зберіганні, захист волокна від механічних, кліматичних та інших видів зовнішніх дій, зручність використання, монтажу та ремонту. Існуючі волоконно – оптичні системи передачі та кабелі за своїм призначенням можуть бути розділені на чотири групи: міжміські, міські, об'єктові, та підводні. В окрему групу виділяють монтажні та оптичні кабелі [12, 14].

Міжміські системи призначені для передачі інформації на великі відстані і розраховані на велике число каналів. Вони повинні мати мале затухання і дисперсію, велику інформаційно – пропускну здатність. Оптичні системи міського зв'язку використовуються в якості з'єднувальних між міськими АТС і вузлами зв'язку. Вони розраховані на короткі відстані від 5 до 10 км та велике число каналів. Такі лінії, як правило, працюють без проміжних лінійних регенераторів.

Об'єктові системи служать для передачі інформації всередині об'єкта. До них відносяться: внутрішній установчий зв'язок, відеотелефонний зв'язок, внутрішня мережа кабельного телебачення, а також бортові інформаційні системи рухомих об'єктів (літака, корабля і т. д.) .

Підводні системи передачі призначені для здійснення зв'язку через великі водні завади. Оптичні кабелі, які застосовуються для цієї мети повинні мати високу механічну стійкість на розрив і мати надійні вологостійкі покриття. Для підводного зв'язку також важливо мати мале послаблення і великі довжини регенераційних ділянок.

Монтажні оптичні кабелі призначені для внутрішнього та міжблокового монтажу апаратури.

Будівництво ВОЛЗ здійснюється наступними етапами [13]: розробка технічного завдання; розробка проектної документації; прокладка та монтаж кабелю, встановлення обладнання для ВОЛЗ; прийом лінії в експлуатацію [3, 14]. Розробка технічного завдання здійснюється після отримання замовлення на будівництво ВОЛЗ. Під час створення технічного завдання визначаються із базовими принципами побудови ВОЛЗ, здійснюється вибір системи передачі, вибір траси, вибір типу кабелю, визначення загальної вартості будівництва. Після затвердження технічного завдання розробляється проектна документація. Проектна документація містить в собі робочі креслення траси прокладання кабелю та лінійних споруд, креслення на розміщення і встановлення прикінцевого обладнання, кошторис на будівництво ВОЛЗ.

Ділянки прокладання волоконно-оптичного кабелю:

- прокладання кабелю в ґрунт. (за допомогою кабелеукладачів, екскаваторів, траншеєкопачів або вручну);
- прокладання кабелю по дну водоймищ та через водні перешкоди (за допомогою морських або річкових кабелеукладачів);
- прокладання кабелю з підвішуванням його на опорах ліній електропередачі (ЛЕП), на опорах електрифікованих залізниць, на опорах повітряних ліній зв'язку. При прокладанні кабелю на опорах ЛЕП виділяють наступні методи прокладання волоконно-оптичний кабель вмонтовується в грозозахисний або фазовий провід, волоконно-оптичний кабель навивається навколо фазового проводу за допомогою спеціальних навивальник машин, волоконно-оптичний кабель містить в своїй конструкції елемент, котрий кріпиться до опор ЛЕП (самонесівний кабель);
- прокладання кабелю в кабельну каналізацію, тунелі метрополітену, колектори; прокладання кабелю в будинках, де міститься прикінцеве обладнання.

Прокладання оптичного кабелю в ґрунт здійснюється безтраншейним способом за допомогою кабелеукладача або у заздалегідь приготовану траншею, викопану вручну чи механізованим способом (траншеєкопачем,

екскаватором). Глибина прокладки підземних оптичних кабелів (броньованих та неброньованих) в ґрунтах 1–4 групи повинна бути 1,2 м – для оптичних кабелів магістральної первинної мережі, внутрішньозонових оптичних кабелів, для оптичних кабелів, що прокладаються поза населеними пунктами, та оптичних кабелів, що прокладаються на з'єднувальних кабельних лініях. При перетині автомобільних та залізничних доріг, проїзних частин вулиць і трамвайних шляхів кабелі слід прокладати в азбоцементних або поліетиленових трубах діаметром 100 мм з виводом по обидва боки від підшви насипу чи польової бровки на довжину не менше 1 м.

Приклад конструкцій оптичного кабелю зв'язку для прокладання в ґрунт, в тому числі з використанням прокладання всередині пластикових трубок показано на рис. 2.3. Для прокладання кабелів по дну морів використовують спеціальні кабелі з високоміцною конструкцією. Прокладання здійснюється з допомогою морських кабелеукладачів (спеціалізоване судно).

Улаштування кабельних переходів через русло водної перешкоди може бути виконане одним із способів: кабелеукладачем, кабелеукладачем на довгому тросі, засобами гідромеханізації, з використанням установок горизонтально-напрявленого буріння. Вибір способу виконання переходу залежить від гідрогеологічних умов на водній перешкоді. Кабельні переходи через водні перешкоди, залежно від призначення кабельних ліній і місцевих умов, можуть виконуватися: під водою (із заглибленням у дно і без заглиблення); по мостах; на штучних спорудах (опори і т. ін.).

При прокладанні оптичного кабелю в кабельну каналізацію потрібно контролювати тягове зусилля, котре не повинне перевищувати нормованого значення на кабель. При прокладанні оптичного кабелю в кабельну каналізацію використовують направляючі пристрої (ролики, коліна та інші), що забезпечує оптичний кабель від пошкоджень при вводі в кабельну каналізацію.

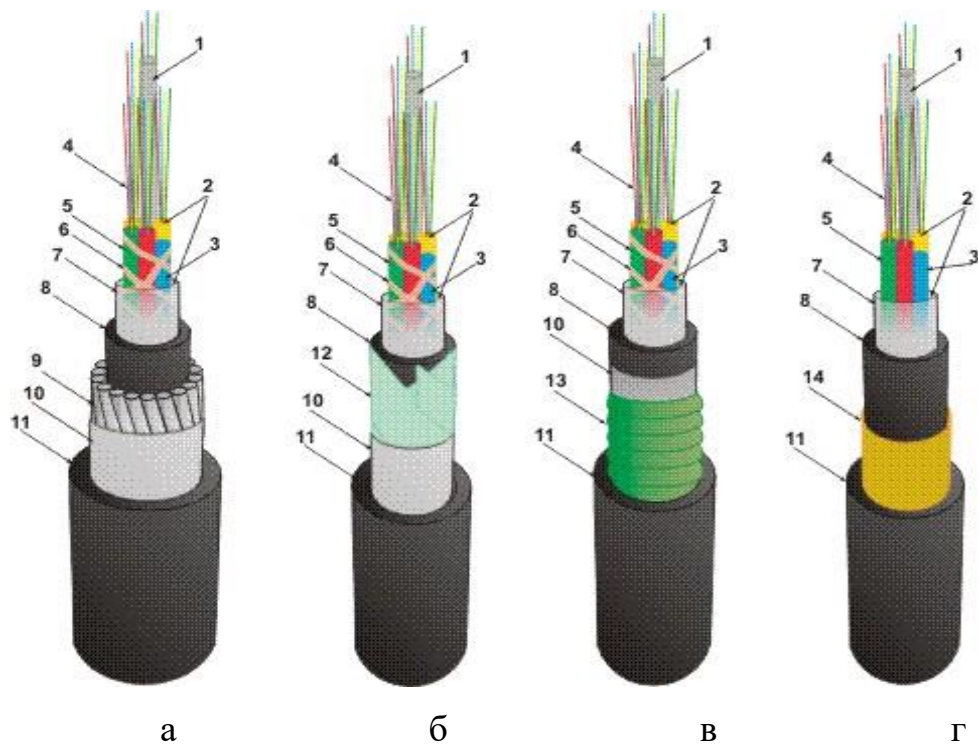


Рис. 2.3. Конструкції оптичного кабелю зв'язку для прокладання в ґрунт [8]:
 а – кабель з бронею з круглих (пласких) сталевих дротів; б – кабель з бронею з двох сталевих стрічок; в – кабель з використанням гофрованої оболонки; г – повністю діелектричний кабель:

1 – центральний силовий елемент ;

2 – гідрофобний наповнювач;

3 – кордель заповнення (для щільного укладання елементів в осерді ОК);

4 – оптичне волокно (основний елемент конструкції оптичного кабелю);

5 – оптичний модуль ; 6 - зкріплюючі нитки;

7 – гідроізоляція осердя - водо-блокуюча стрічка (папір);

8 – внутрішня (проміжна) поліетиленова оболонка;

9 – броня з круглих сталевих дротів;

10 – гідроізоляція бронепокрову - водоблокуюча стрічка (папір);

11 – зовнішня захисна поліетиленова або полімерна оболонка, що не розповсюджує горіння;

12 – броня з двох сталевих стрічок накладених перехресно одна на іншу;

13 – гофрована оболонка;

14 – нитки СВМ (мають високу стійкість на розрив)

На опорах контактної мережі ЕЗД оптичні кабелі рекомендується розташовувати з польового боку опор. При цьому слід витримувати нормовані відстані оптичного кабелю і елементів його кріплення від секційних роз'єднувачів контактної мережі, ножів, елементів гасіння дуги не менше чим 3 м, до рівня фундаменту опор при максимальній стрілі провисання не менше чим 5 м. Самонесівні оптичні кабелі повинні підвішуватись в області мінімального потенціалу електричного поля. Підвішувати ОК доцільно в тих випадках, коли з якоїсь причини неможливе прокладання кабелів в ґрунті або в кабельній каналізації: в умовах вічної мерзлоти, скельного ґрунту, при прокладанні через ріки, глибокі болота та ін.

Підводний оптичний кабель стоїть осторонь від усіх інших, так як прокладається в принципово інших умовах. Майже всі типи підводних кабелів, так чи інакше, броньовані, а ступінь бронювання вже залежить від рельєфу дна і глибини залягання. Розрізняють наступні основні типи підводних кабелів (за типом бронювання): не броньований; одинарне (одноповивное) бронювання; посилене (одноповивное) бронювання; посилене скельне (двухповивное) бронювання.

Прямої кореляції бронювання кабелю з глибиною залягання немає, так як армування захищає оптику не від високих тисків на глибині, а від діяльності морських мешканців, мереж, тралів і якорів риболовецьких суден. Така перевага ВОЛЗ, як неприйнятність до індукційних завад, часто розглядається при побудові інформаційних систем в енергетичних комплексах як більш важлива, ніж вартість. Висока надійність ВОЛЗ у безпосередній близькості до потужних електропристроїв та високовольтних проводів викликає великий попит на них не тільки електротехнічних компаній, а й інших відомств [2, 20]. Вибір варіанту прокладання оптичного кабелю залежить від природних умов проходження траси волоконно – оптичної лінії зв'язку.

Оптичні кабелі рекомендується підвішувати на опорах на місцевості з великою кількістю перешкод та на ділянках зі складним рельєфом (наявність

ярів, байраків тощо), а також у міській місцевості, де будівництво підземних ВОЛЗ неможливе або економічно недоцільне.

При виборі траси для підвішування ОК на опорах слід, за можливості, уникати ділянок із ґрунтами, агресивними щодо матеріалу цих опор. У місцях, де телефонна кабельна каналізація перенавантажена, або взагалі відсутня, а також при заводі волокна на які-небудь віддалені об'єкти використовують міні - і мікро траншейне прокладання кабелю, або поліетиленової трубки, в котру пізніше методом пневмопрокладання задувається кабель.

2.5 Вплив зовнішніх факторів на параметри волоконно-оптичної лінії зв'язку: оцінка ймовірності пошкоджень ударами блискавки

Методика оцінки базується на допустимому струмі блискавки в металевих покриттях ОК, при якому не виникає пошкодження кабелю з перервою зв'язку, а пробій зовнішнього шлангу не рахується пошкодженням ОК. Величина цього струму залежить від конструкції ОК.

Приймемо значення питомого опору ґрунту приблизно $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Очікувана кількість пошкоджень за рік залежить від кількості ударів блискавки, що приходить на ділянку земної поверхні, безпосередньо підлеглої впливу удару блискавки або дуги яка, виникає між місцем удару і кабелем.

Ймовірність виникнення в підземному кабелі струму, що може викликати його пошкодження в загальному вигляді знаходиться за виразом [12]:

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

де K_n - поверхневий коефіцієнт. Залежність кількості ударів блискавки в землю від рельєфу 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 грозозахищеності оптичного кабелю з металевими елементами;

N_0 - загальне ймовірне середньорічне число всіх ударів блискавки в оптичний кабель лінії зв'язку.

Дана величина розраховується по формулі [12]:

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

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

Розрахуємо g по формулі [7]:

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

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

Для нашої місцевості середньорічна тривалість гроз в годинах $T \cong 73,5$ годин [7];

C – середня кількість ударів блискавки на 1 км^2 землі під час грози [7].

$$C = 0,067 \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}^2} \quad (3.4)$$

Тоді:

$$g = 0,067 \cdot 73,5 = 4,92 \frac{1}{\text{км}^2 \cdot \text{год}},$$

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

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

(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 формулу 3.2:

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

Розрахуємо очікувану імовірність пошкодження оптичного кабелю по формулі (3.5): $N_n = 0,6888 \cdot 0,05 \cdot 1 = 0,0344$.

Порівняємо одержаний результат з допустимою нормою, яка складає для промислових ліній 0,04. Оскільки розрахована нами величина менша, ніж 0,04, то додатковий захист кабелю не потрібен. Якщо ж ймовірність пошкодження оптичного кабелю перевищує допустиму норму, необхідно застосовувати перехоплення струмів блискавки, що попали у дерево або опору високовольтної лінії передач, за допомогою захисного тросу або проводу.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи бакалавра розглянуті питання стосовно фізичних принципів функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку, параметрів оптичного волокна, основ розрахунку параметрів волоконно-оптичних ліній.

2. Установлено, що як джерела світла оптичні волокна мають ряд переваг: не проводять електрику, ультрафіолетові та інфрачервоні промені; мають здатність проводити великі світлові потоки при мінімальному діаметрі кабелю; легкий контроль зміни кольору і світлоєфектів; рівномірне освітлення; мале споживання енергії; великий термін експлуатації кабелю (понад 10 років).

3. Показано, що в процесі експлуатації і зберігання оптичні кабелі повинні забезпечувати стабільність характеристик, захист від механічних, кліматичних та інших видів зовнішніх впливів, зручність використання, монтажу і ремонту.

4. До переваг волоконно-оптичних ліній зв'язку відносять наступні: низькі втрати при передачі; широкосмугова передача сигналу; несприйнятливості до перешкод і наведень; електрична ізоляція; нестаріюча лінія зв'язку; вибухо- та пожежобезпечність; економічність і тривалий термін експлуатації.

5. Проведений розрахунок ймовірності пошкодження волоконно-оптичної лінії ударами блискавки, її значення дорівнює 3,4%. Оскільки величина менша допустимої норми для промислових ліній, додатковий захист не потрібен.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Розорінов Г. М. Високошвидкісні волоконно – оптичні лінії зв’язку: навч. посіб./ Г. М. Розорінов , Д. О. Соловійов. – Київ: Ліра – К, 2007. – 198 с.
2. Осадчук В.С., Осадчук В.В. Волоконно-оптичні системи передачі. - Вінниця: ВНТУ, 2005. – 225 с.
3. Однорець Л.В. Основи оптоелектроніки: конспект лекцій. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010.– 44 с.
4. Бобицький Я.В., Матвіїшин Г.Л. Лазерні технології: навчальний посібник. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. – 320 с.
5. Колесник Ю.І., Кіпенський Ю.І. Елементи та пристрої квантової електроніки: навч. посібник. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – 318 с.
6. Hjelme D.R., Mickelson A.R. On the theory of external cavity operated single-mode semiconductor lasers // IEEE J. –2017. –V. QE-23, № 6. – P.1000-1009.
7. Quinn T.J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards // Metrologia. 2003.– V.40, №1.– P.103-133.
8. Навчальний посібник «Квантова електроніка». Частина 1 / Л. М. Шмирнова, О. М. Бевза, Н. В. Слободян. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 98 с.
9. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л.В. Однорець, І.М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 196 с.
- 10.. Матвієнко М.П. Основи електроніки: підручник. – Київ: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.
11. Матвійків М.Д., Когут В.М., Матвійків О.В. Елементна база електронних апаратів – Львів: Вид-во НТУ «Львівська політехніка», 2018. – 428 с.

12. Tooley M. *Electronic Circuits: Fundamentals and Applications*. – Elsevier: Taylor and Francis, 2013. – 320 p.
13. Стахів П.Г., Панасенко М.В., Сенько Є.В. *Електроніка і мікросхемотехніка елементна база електронних пристроїв*. – Київ: Обереги, 2000. – 300 с.
14. Шликов В.В. *Мікропроцесорна техніка: Практикум* [Електронний ресурс / В.В. Шликов; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,1 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 144 с.
15. Гончаренко О.М., Баранов О.О., Костян М.О., Лободюк О.С., Однодворець Л.В. *Оптоелектронні компоненти сучасних волоконно-оптичних ліній зв'язку / Програма і матеріали Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених «Фізика, електроніки, електротехніка. ФЕЕ-2021»*. – 2021. – С. 65-66.