

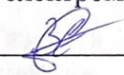
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра електричних станцій і систем

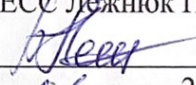
Бакалаврська дипломна робота на тему:

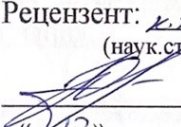
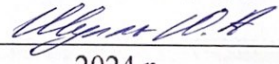
**ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ В РОЗПОДІЛЬНИХ
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ
ЕНЕРГІЇ**

Виконав: студент 4 курсу, групи 2ЕЕ-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Завадський Є.О. 

Керівник: д.т.н., професор.,
проф. каф. ЕСС Лежнюк П.Д.


« 12 » 06 2024 р.

Рецензент:  
(наук. ступінь, вч. звання, назва кафедри)

« 12 » 06 2024 р.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.


« 12 » 06 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«11» 03 2024р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Завадський Євген Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Волоконно-оптичні лінії зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії»

Керівник роботи д.т.н., проф., професор каф. ЕСС Лежнюк П.Д.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 80.

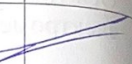
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Використання волоконно-оптичних ліній зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. 2. Методи вимірювання температури та подовження ЛЕП. 3. Концепція методу одночасного вимірювання температури і подовження ЛЕП. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Актуальність. 2. Структурна схема волоконно-оптичної лінії зв'язку. 3. Будова оптичних кабелів різноманітного призначення. 4. Класифікація волоконно-оптичних ліній зв'язку. 5. Система стандартів ІЕС по ВОЛЗ. 6. Типові конструкції волоконно-оптичних ліній зв'язку. 7. Інтеграція ВОЛЗ в розподільні мережі з ВДЕ. 8. Висновок.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Лежнюк П.Д. д.т.н., проф., проф кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24
2	Використання волоконно-оптичних ліній зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії (розділ 1 БДР)	16.02.24	15.03.24
3	Методи вимірювання температури та подовження ЛЕП (розділ 2)	16.03.24	10.04.24
4	Концепція методу одночасного вимірювання температури і подовження ЛЕП (розділ 3 БДР)	11.04.24	11.05.24
5	Охорона праці (розділ 4 БДР)	12.04.24	19.05.24
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	20.05.24	24.05.24
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.24	04.06.24
	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	05.06.24	07.06.24
	Рецензування БДР	08.06.24	10.06.24
	Захист БДР	За графіком	

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

Є. О. Завадський

П.Д. Лежнюк

АНОТАЦІЯ

ANNOTATION

ВСТУП

1 ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

1.1 Використання волоконно-оптичних ліній зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії

1.2 Інтеграція оптичних ліній зв'язку в розподільні електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії

1.3 Загальні вимоги до волоконно-оптичних ліній зв'язку

1.3.1 Класифікація волоконно-оптичних ліній зв'язку

1.3.2 Вимоги до волоконно-оптичних ліній зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії

1.4 Типові конструкції волоконно-оптичних ліній зв'язку

2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ TEMПЕРАТУРИ І ПОДОВЖЕННЯ ЛЕП

2.1 Метод розподілення температури в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії

2.2 Конструкція розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії

3 КОНЦЕПЦІЯ МЕТОДУ ОДНОЧАСНОГО ВИМІРЮВАННЯ TEMПЕРАТУРИ І ПОДОВЖЕННЯ ЛЕП

3.1 Лінії електропередачі в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії

3.2 Волоконно-оптичні лінії зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії

3.2.1 Двопроменеві волоконно-оптичні лінії зв'язку

волоконна

3.2.2 Оптоволоконні лінії зв'язку

3.2.2.1 Рівномірні оптоволоконні лінії зв'язку

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ANNOTATION	4
ВСТУП	5
1 ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ	9
1.1 Використання волоконно-оптичних ліній зв'язку для моніторингу та керування електричними мережами	10
1.2 Інтеграція оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії	12
1.3 Загальні вимоги до волоконно-оптичних ліній зв'язку	17
1.3.1 Класифікація волоконно-оптичних ліній зв'язку	17
1.3.2 Вимоги до волоконно-оптичних ліній зв'язку та фактори впливу на конструкції ВОЛЗ	18
1.4 Типові конструкції волоконно-оптичних ліній зв'язку	22
2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ПОДОВЖЕННЯ ЛЕП	25
2.1 Метод розподіленого волоконного датчика температури на основі комбінаційного розсіювання	26
2.2 Конструкція розподілених волоконно-оптичних датчиків	30
3 КОНЦЕПЦІЯ МЕТОДУ ОДНОЧАСНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ І ПОДОВЖЕННЯ ЛЕП	33
3.1 Лінії електропередавання	33
3.2 Волоконно-оптичні датчики температури та деформації	36
3.2.1 Двопроменеві класичні і фотонні двопроменепереламні волокна	37
3.2.2 Оптиковолоконні бреггівські решітки	41
3.2.2.1 Рівномірні бреггівські решітки	42

3.2.2.2 Решітки Брегга з перемінним періодом	43
3.2.2.3 Похилі бреггівські решітки	44
3.2.2.4 Довгоперіодні решітки	45
3.2.2.5 Деформаційна і температурна чутливість решіток Брегга	48
3.3 Аналіз поведінки електричної мережі з конкретним робочим провідником під механічним впливом та впливом температури	50
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	53
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження	53
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	53
4.1.2 Електробезпека	56
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	57
4.2.1 Мікроклімат	57
4.2.2 Склад повітря робочої зони	58
4.2.3 Виробниче освітлення	59
4.2.4 Виробничий шум	60
4.2.5 Виробничі вібрації	61
4.3 Пожежна безпека	61
ВИСНОВКИ	64
ЛІТЕРАТУРА	65
ДОДАТКИ	68

АНОТАЦІЯ

Завадський Євген Олегович «Волоконно-оптичні лінії зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії». Бакалаврська дипломна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця : ВНТУ. 2024. 68 с.

Українською мовою. Бібліогр.: 31 назва; рис.: 17; табл. 10.

В бакалаврській дипломній роботі проведено дослідження стосовно використання волоконно-оптичних ліній зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Проаналізовано методи вимірювання температури та подовження ЛЕП. Використано концепцію методу одночасного вимірювання температури та подовження ЛЕП. В розділі «Охорона праці» виконано технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження; технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії; розрахунок виробничого освітлення та шуму і пожежної безпеки.

Ключові слова: волоконно-оптичні лінії зв'язку, моніторинг електричних мереж, відновлювальні джерела енергії.

ABSTRACT

Zavadsky Yevhen "Fiber-optic communication lines in electrical distribution networks with renewable energy sources." Bachelor's thesis on specialty 141 - Power engineering, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU. 2024. 68 p.

In ukrainian. Bibliography: 31 titles; Fig.: 17; table 10.

In the bachelor's thesis, research was conducted on the use of fiber-optic communication lines in distribution electric networks with renewable energy sources. The methods of temperature measurement and extension of power lines were analyzed. The concept of the method of simultaneous measurement of temperature and extension of power lines is used. In the "Occupational safety" section, technical decisions regarding the safe execution of the research were made; technical solutions for occupational hygiene and industrial sanitation; calculation of industrial lighting and noise and fire safety.

Keywords: fiber-optic communication lines, monitoring of electrical networks, renewable energy sources.

ВСТУП

Зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичних системах вимагає впровадження сучасних технологій зв'язку для ефективного управління та моніторингу розподільних електричних мереж. Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) стають ключовим елементом у забезпеченні надійного, швидкого і захищеного обміну даними між компонентами розподільних мереж, що використовують ВДЕ. ВОЛЗ дозволяють передавати великі обсяги даних на великі відстані з мінімальними затримками і втратами, що є критично важливим для інтеграції та управління ВДЕ.

Переваги волоконно-оптичних ліній зв'язку

Висока пропускна здатність: ВОЛЗ забезпечують надзвичайно високу пропускну здатність, що дозволяє передавати великі обсяги даних у реальному часі. Це особливо важливо для мереж з ВДЕ, де необхідно швидко обробляти дані про виробництво та споживання енергії, стан обладнання та інші параметри.

Низькі затримки та втрати сигналу: Оптичне волокно має дуже низькі затримки і втрати сигналу порівняно з традиційними мідними кабелями. Це забезпечує високу швидкість та надійність передачі даних, що є критично важливим для систем реального часу, які використовуються в розподільних мережах з ВДЕ.

Стійкість до електромагнітних завад: Волоконно-оптичні кабелі не піддаються впливу електромагнітних завад, що є перевагою в середовищах з високим рівнем електромагнітного випромінювання, таких як електричні підстанції та лінії електропередач.

Безпека даних: Оптичне волокно є дуже складним для перехоплення або втручання, що забезпечує високий рівень безпеки переданих даних. Це особливо важливо для захисту критичної інфраструктури розподільних мереж.

Інтеграція ВОЛЗ в розподільні мережі з ВДЕ

Моніторинг та управління в реальному часі: ВОЛЗ забезпечують надійний зв'язок між генераторами ВДЕ, системами зберігання енергії та

споживачами. Це дозволяє здійснювати моніторинг і управління в реальному часі, що є необхідним для балансування виробництва та споживання енергії, швидкого реагування на зміни в мережі та оптимізації роботи всіх компонентів.

Інтеграція смарт-метрів та сенсорів: Смарт-метри та сенсори, розташовані у вузлових точках мережі, збирають дані про енергоспоживання, якість енергії, стан обладнання та інші параметри. ВОЛЗ забезпечують швидку та надійну передачу цих даних до центрів управління, де вони аналізуються для прийняття оптимальних рішень.

Підвищення надійності та ефективності: Завдяки ВОЛЗ, розподільні мережі з ВДЕ можуть швидше виявляти та реагувати на аварійні ситуації, знижуючи час простою та підвищуючи загальну надійність мережі. Висока швидкість передачі даних також дозволяє оптимізувати роботу мережі, мінімізуючи втрати енергії та покращуючи ефективність використання ресурсів.

Виклики та перспективи

Високі початкові витрати: Впровадження ВОЛЗ вимагає значних початкових інвестицій, що може бути викликом для деяких операторів мереж. Однак довгострокові переваги, такі як зниження експлуатаційних витрат та підвищення ефективності, можуть компенсувати ці витрати.

Необхідність модернізації інфраструктури: Інтеграція ВОЛЗ вимагає модернізації існуючої інфраструктури розподільних мереж. Це може включати прокладання нових оптичних кабелів та встановлення відповідного обладнання, що потребує планування та координації.

Перспективи розвитку: З розвитком технологій, таких як Інтернет речей (IoT) та штучний інтелект (AI), можливості використання ВОЛЗ у розподільних мережах з ВДЕ продовжують розширюватися. Ці технології дозволять ще більш ефективно використовувати дані для оптимізації роботи мережі, підвищення її надійності та зниження витрат.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку є ключовим елементом для забезпечення ефективної роботи розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Вони надають високу пропускну здатність, низькі затримки,

стійкість до електромагнітних завад та високий рівень безпеки даних. Інтеграція ВОЛЗ дозволяє здійснювати моніторинг та управління в реальному часі, підвищуючи надійність та ефективність мереж. Незважаючи на виклики, такі як високі початкові витрати та необхідність модернізації інфраструктури, перспективи розвитку ВОЛЗ в розподільних мережах з ВДЕ є дуже обнадійливими. Це обумовлено рядом важливих факторів:

1. Надійність та швидкість передачі даних: ВОЛЗ забезпечують високу швидкість та надійність передачі даних, що критично важливо для моніторингу та управління електричними мережами. Завдяки високій пропускній здатності та низьким затримкам, оптичні лінії зв'язку дозволяють оперативно передавати великі обсяги даних, що необхідно для ефективного управління розподілом енергії, особливо з відновлюваних джерел.

2. Віддалений моніторинг та управління: ВОЛЗ забезпечують можливість віддаленого моніторингу та управління компонентами електричної мережі, включаючи генератори відновлюваної енергії (сонячні панелі, вітряки тощо). Це дозволяє операторам швидко реагувати на зміни в мережі, оптимізуючи розподіл енергії та зменшуючи втрати.

3. Інтеграція відновлюваних джерел енергії: Відновлювані джерела енергії, такі як сонячні та вітрові електростанції, мають варіабельний характер виробництва електроенергії. ВОЛЗ дозволяють оперативно передавати дані про виробництво та споживання енергії, забезпечуючи балансування мережі та інтеграцію відновлюваних джерел в загальну електромережу.

4. Синхронізація та координація: Для забезпечення стабільної роботи електричної мережі необхідна точна синхронізація та координація роботи різних її компонентів. ВОЛЗ забезпечують точну передачу синхросигналів, що дозволяє узгоджено працювати різним елементам мережі, зокрема, при змінних умовах генерації відновлюваної енергії.

5. Безпека та стійкість до перешкод: ВОЛЗ мають високу стійкість до електромагнітних перешкод, що робить їх ідеальним вибором для використання

в електричних мережах. Вони не піддаються впливу електромагнітних полів, що забезпечує безперебійну передачу даних навіть у складних умовах.

6. Розвиток "розумних" мереж (Smart Grids): ВОЛЗ є важливою частиною "розумних" мереж, які використовують сучасні технології для покращення ефективності та надійності електропостачання. Вони забезпечують двосторонню передачу даних між споживачами та постачальниками, що дозволяє в реальному часі регулювати навантаження, виявляти несправності та оптимізувати роботу мережі.

1 ВИКОРИСТАННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) є ключовим елементом сучасних енергетичних систем. За останні десятиліття швидкість розвитку технологій в галузі оптичних волокон дозволила значно розширити можливості їх використання в енергетиці. У даній роботі досліджується перспективи та переваги використання ВОЛЗ у розподільних електричних мережах, особливості їх інтеграції з ВДЕ, а також ефективність та економічні вигоди такого підходу.

Оптичні волокна є основою ВОЛЗ та використовуються для передачі великої кількості даних на великі відстані. Вони складаються з тонкої сердцевини, оточеної оптичним волоконним оболонкою. Основні типи волокон - одномодові та багатомодові. Одномодові волокна забезпечують кращу передачу сигналу на великі відстані, що робить їх більш відповідними для застосувань у розподільних мережах.

Розподільні електричні мережі є ключовим ланцюгом у постачанні електроенергії кінцевим споживачам. Вони переносять енергію від підстанцій до житлових будинків, комерційних об'єктів та промислових підприємств. Однак існують виклики, пов'язані зі збільшенням обсягу енергії з ВДЕ та потребою в більшій автоматизації та моніторингу.

ВДЕ, такі як сонячна, вітрова та гідроенергія, стають все більш поширеними джерелами електроенергії. Вони надають чисту та сталу енергію, але потребують ефективних систем передачі та управління для інтеграції з існуючими мережами.

Інтеграція ВОЛЗ у розподільні мережі дозволяє покращити моніторинг та керування системами, що відчутно підвищує ефективність та надійність постачання електроенергії. Технічні аспекти, такі як вибір оптимальних

маршрутів прокладання волокон та розташування оптичних вузлів, важливі для успішної імплементації таких систем.

ВОЛЗ дозволяють забезпечити швидку передачу даних про стан мережі та ефективно керувати нею, що важливо для забезпечення стабільності постачання електроенергії. Системи моніторингу можуть виявляти проблеми та несправності навіть до їх виникнення, що дозволяє проводити попередні заходи та уникнути аварій.

Впровадження ВОЛЗ у розподільні електричні мережі з ВДЕ може призвести до значних економічних вигод. Це включає зменшення витрат на обслуговування та ремонт, збільшення ефективності виробництва та передачі енергії, а також покращення надійності системи. Крім того, ВОЛЗ можуть забезпечити додаткові можливості для впровадження інтелектуальних систем керування, які сприяють оптимізації роботи мережі та підвищенню її продуктивності.

Незважаючи на численні переваги, інтеграція ВОЛЗ у розподільні електричні мережі з ВДЕ вимагає вирішення деяких технічних, регуляторних та соціально-економічних проблем. Зокрема, необхідно вирішити питання зв'язані з технічними обмеженнями, стандартами та нормативами, а також забезпечити відповідну підтримку та участь зацікавлених сторін у процесі впровадження.

Швидкий розвиток технологій у галузі оптичних волокон та електроенергетики відкриває широкі перспективи для подальшого вдосконалення систем ВОЛЗ у розподільних електричних мережах з ВДЕ. Дослідження в області нових матеріалів, технічних рішень та інноваційних підходів можуть допомогти зробити такі системи ще більш ефективними та надійними.

1.1 Використання волоконно-оптичних ліній зв'язку для моніторингу та керування електричними мережами

Використання волоконно-оптичних ліній зв'язку для моніторингу та керування електричними мережами відіграє ключову роль у забезпеченні

стабільності, надійності та ефективності електропостачання. Оптичні волокна дозволяють передавати великі обсяги даних на великі відстані з високою швидкістю і надійністю.

1. **Моніторинг стану мережі:** Оптичні волокна можуть бути використані для встановлення систем моніторингу, які стежать за станом електричних мереж. Це може включати в себе вимірювання напруги, струму, частоти, а також виявлення перешкод та несправностей у мережі.

2. **Дистанційне виявлення несправностей:** Оптичні системи зв'язку дозволяють проводити дистанційний моніторинг стану обладнання та ліній електропередачі. Це дозволяє оперативно виявляти потенційні проблеми, такі як перегрівання, короткі замикання, пошкодження ліній і т.д.

3. **Реакція на аварійні ситуації:** Завдяки оптичним системам зв'язку можливе швидке сповіщення операторів про аварійні ситуації та швидка реакція на них. Це дозволяє зменшити час простою обладнання і відновити електропостачання якнайшвидше.

4. **Управління мережею:** Оптичні системи зв'язку можуть бути використані для впровадження інтелектуальних систем керування, які автоматично регулюють навантаження, розподіл електроенергії та виконують інші операції для оптимізації роботи мережі.

5. **Моніторинг відновлюваних джерел енергії:** Використання ВОЛЗ дозволяє ефективно моніторити виробництво електроенергії з відновлюваних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія. Це дозволяє прогнозувати виробництво енергії, розраховувати навантаження на мережу та забезпечувати оптимальний режим роботи.

Інтеграція волоконно-оптичних ліній зв'язку у мережі дозволяє підвищити їх ефективність, зменшити втрати енергії та забезпечити стабільну та надійну роботу електричних мереж, що стає все важливішим у контексті зростання обсягів виробництва електроенергії з відновлюваних джерел.

1.2 Інтеграція оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії

В останні десятиліття спостерігається стрімке зростання використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у виробництві електроенергії. Це викликає необхідність удосконалення електричних мереж для ефективного інтегрування цих джерел. Одним з ключових елементів такої інтеграції є використання оптичних ліній зв'язку, які забезпечують швидку та надійну передачу даних. У цьому дослідженні буде розглянуто переваги та виклики інтеграції оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з ВДЕ.

Оптичні лінії зв'язку мають декілька переваг, що робить їх привабливими для використання у розподільних електричних мережах з ВДЕ:

- **Велика пропускна здатність:** Оптичні волокна дозволяють передавати великі обсяги даних на великі відстані без втрати якості сигналу.

- **Низькі втрати сигналу:** Волоконно-оптичні системи мають низьку або відсутню втрату сигналу, що дозволяє ефективно передавати дані на значні відстані.

- **Висока надійність:** Оптичні волокна мають високу стійкість до електромагнітних перешкод, корозії та інших впливів, що забезпечує надійну роботу систем зв'язку навіть в умовах невизначеності.

Хоча інтеграція оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з ВДЕ має багато переваг, вона також стикається з деякими викликами:

- **Вартість:** Встановлення та підтримка оптичних систем може бути дорогим завданням, що потребує значних інвестицій.

- **Сумісність з існуючою інфраструктурою:** Інтеграція нових технологій зв'язку може вимагати змін в існуючих електричних мережах, що може бути складним процесом.

- **Безпека даних:** Забезпечення безпеки та конфіденційності даних, які передаються через оптичні лінії зв'язку, є важливою проблемою, особливо у важливих секторах, таких як електроенергетика.

Незважаючи на виклики, існують приклади успішної інтеграції оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з ВДЕ. Наприклад, компанія "Siemens" успішно впровадила оптичні системи зв'язку у своїх розподільних мережах у Німеччині, що дозволило покращити моніторинг та керування енергопостачанням.

Інтеграція оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії є важливим кроком у напрямку створення більш стійких, ефективних та екологічно чистих енергетичних систем. Інтеграція оптичних ліній зв'язку дозволяє оптимізувати роботу електричних мереж, забезпечуючи ефективний моніторинг та керування, а також знижуючи витрати на обслуговування та усуваючи перешкоди для впровадження відновлюваних джерел енергії.

Інтеграція оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з ВДЕ відкриває широкі перспективи для подальшого розвитку. Розвиток нових технологій зв'язку, таких як квантова телепортація або використання штучного інтелекту для автоматизації керування мережею, може допомогти зробити системи енергопостачання ще більш ефективними та надійними.

Інтеграція оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії є ключовим кроком у напрямку створення стійких, надійних та ефективних енергетичних систем. Це дозволяє оптимізувати роботу мережі, підвищує надійність постачання електроенергії та сприяє переходу до більш сталого та екологічно чистого енергетичного виробництва.

В загальному вигляді волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ) містить вхідний кодувальний пристрій КП, передавач, оптичний кабель, ретранслятор Р, приймач і декодувальний пристрій ДКП (рис. 1.1). 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 розповсюджується 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.

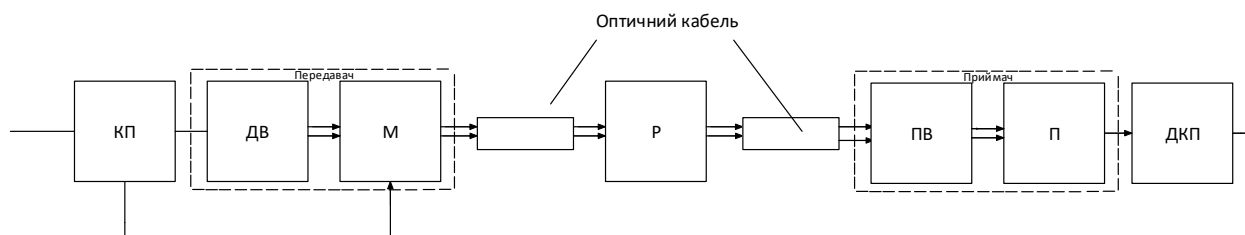


Рисунок 1.1 – Структурна схема волоконно-оптичної лінії зв'язку

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.

Основні переваги ВОЛЗ: широкий діапазон робочих частот (до 1 ГГц), що дозволяє одним оптичним кабелем одночасно передавати до 10^{10} телефонних розмов або 10^6 телепрограм; висока завадостійкість від зовнішніх електромагнітних впливів і міжканальних взаємних наводок, що особливо важливо при високій щільності комунікацій; малі габаритні розміри і маса через відмову від важких екранувальних оболонок, що дає в бортовій апаратурі вигравш у порівнянні з електричними кабелями в 3-5 разів; таємність інформації, що передається, бо ВОЛЗ практично не дає випромінювання в навколишній простір, а виготовлення відводу призводить до порушення цілісності оптичного кабелю; потенційно низька вартість внаслідок заміни дорогих кольорових

металів (мідь, свинець) матеріалами з необмеженими сировинними ресурсами (скло, кварц, полімери).

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.

Незважаючи на значну конструктивну різноманітність оптичних кабелів, вони мають ряд загальних елементів (рис.1.2). Волоконні світловоди передусім покривають тонкою захисною плівкою, що виключає вплив жил одна на одну. Після цього для надання деякої жорсткості жмут світловодів об'єднують загальною оболонкою, для збільшення зусилля на розірвання в конструкцію кабеля вводять зміцнювальні елементи. Зовні кабель покривають ще однією оболонкою, що забезпечує високу міцність і стійкість до зовнішніх впливів. Всі захисні оболонки і зміцнювальні елементи – полімерні. Це зумовлює малу масу кабеля (2-200 г/м), його гарну еластичність (радіус згину 5-50 см при зовнішньому діаметрі 2-20 мм) і високу міцність на розрив (10-100 Н). В 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 10^8 біт/с) і малому затуханню ($B=1\div 5$ дБ/км). Цим вимогам задовольняють тільки кварцові волокна типу селфоків. В якості джерел випромінювання застосовують твердотільні ІАГ:

Nd-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 10^7 біт/с), більшим допустимим згасанням (до 20 дБ/км). В якості оптичних ліній використовуються кварцеві двошарові волокна, джерел випромінювання – напівпровідникові лазери, фотоприймачів – PIN-фотодіоди.

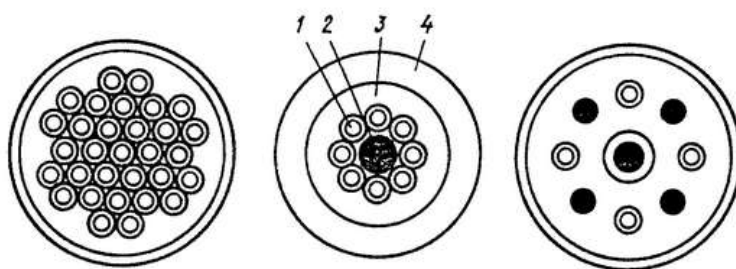


Рисунок 1.2 - Будова оптичних кабелів різноманітного призначення: 1-волокно, 2-зміцнювальний елемент, 3-внутрішня оболонка; 4-зовнішня оболонка

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. Невелика довжина (до сотень метрів) дозволяє використати прості скляні волокна з більшим згасанням. Перевага світловодних ліній зв'язку і останні досягнення в області технології оптичних матеріалів і оптоелектронних пристроїв дозволяють прогнозувати широке застосування ВОЛЗ в системах управління, переробки і передачі інформації.

1.3 Загальні вимоги до волоконно-оптичних ліній зв'язку

1.3.1 Класифікація волоконно-оптичних ліній зв'язку

Згідно з ГБН В.2.2-34620942-002:2015 «Лінійно-кабельні споруди телекомунікацій. Проектування» Оптичний кабель (ОК) або Волоконно-оптичний кабель (ВОК) - кабельний виріб, що містить одне або більше оптичних волокон (ОВ) чи пучків ОВ всередині спільної оболонки, поверх якої в залежності від умов експлуатації, може знаходитись відповідне захисне покриття, в тому числі броня, силові та несучі елементи. За необхідності ОК може мати в своєму складі також електричні провідники [5].

ВОЛЗ можуть класифікуватись за різними ознаками: галузь застосування, наявність чи відсутність металевих елементів, кількість та тип ОВ тощо. ВОЛЗ зв'язку традиційно класифікуються за умовами прокладання та експлуатації:

- для безпосереднього прокладання в ґрунт;
- для прокладання в каналах кабельної каналізації та тунелях;
- для підвішування на опорах (ЛЕП, ПЛЗ, контактної мережі залізниць);
- для прокладання через водні перешкоди;
- морські;
- внутрішні;
- для абонентської проводки та міжблочних з'єднань.

Ця класифікація визначає механічні характеристики та характеристики стійкості до впливу чинників довкілля.

Конструкції ВОК досить різноманітні, але як правило вони містять в собі:

- осердя, що складається з оптичних волокон та інших елементів котрі знаходяться під першою зовнішньою оболонкою кабелю;
- силовий елемент, котрий має приймати на себе повздовжні розтягуючі зусилля прикладені до кабелю. Силовий елемент може бути як в структурі осердя так і самостійно розташований в структурі кабелю;
- захисні оболонки, одна або декілька оболонок котрі мають захищати ВОК від різноманітних зовнішніх впливів, а на зовнішній оболонці також міститься інформація про кабель;

- заповнювачі (гідрофоби, корделі), призначені для захисту від потрапляння вологи (при порушенні цілісності зовнішніх захисних оболонок), та заповнення місця в структурі кабелю для утримання потрібної форми осердя та кабелю.

Основними типами конструкції кабельних осердь є:

Модульна - навколо центрального силового елемента розташовані модулі з оптичними волокнами.

Трубчаста - в полімерній або металевій трубці, що розташована в центрі ВОК, розміщені одиночні оптичні волокна, пучки волокон або блоки стрічок волокон.

Профільована - фігурна полімерна або металева структура з пазами для укладання в них одиночних волокон або модулів з волокнами.

1.3.2 Вимоги до волоконно-оптичних ліній зв'язку та фактори впливу на конструкції ВОЛЗ

Особливості конструкції, а також характеристики - оптичні, механічні та стійкості до впливів довкілля - для ВОЛЗ зв'язку визначаються низкою Рекомендацій ІТУ-Т [5]:

- ВОЛЗ для прокладання в кабельній каналізації та тунелях;
- ВОЛЗ для підвішування на опорах або повітряного застосування;
- ВОЛЗ для прокладання в ґрунт;
- ВОЛЗ для внутрішнього прокладання;
- маловолоконні ВОЛЗ для внутрішнього прокладання;
- ВОЛЗ для прокладання в трубах водостічної каналізації;
- ВОЛЗ для абонентської проводки.

Усі Рекомендації ІТУ-Т гармонізовані з чинними стандартами ІЕС. Система стандартів ІЕС по ВОК показана на рисунку 1.3. Оптичні та передавальні характеристики ВОК визначаються характеристиками ОВ які в них застосовуються. Механічні характеристики ВОЛЗ залежать від їх призначення та умов експлуатації. Зазвичай ВОЛЗ мають бути стійкими до: згинів, розтягувальних зусиль, роздавлювань, ударів та осьових закручувань.

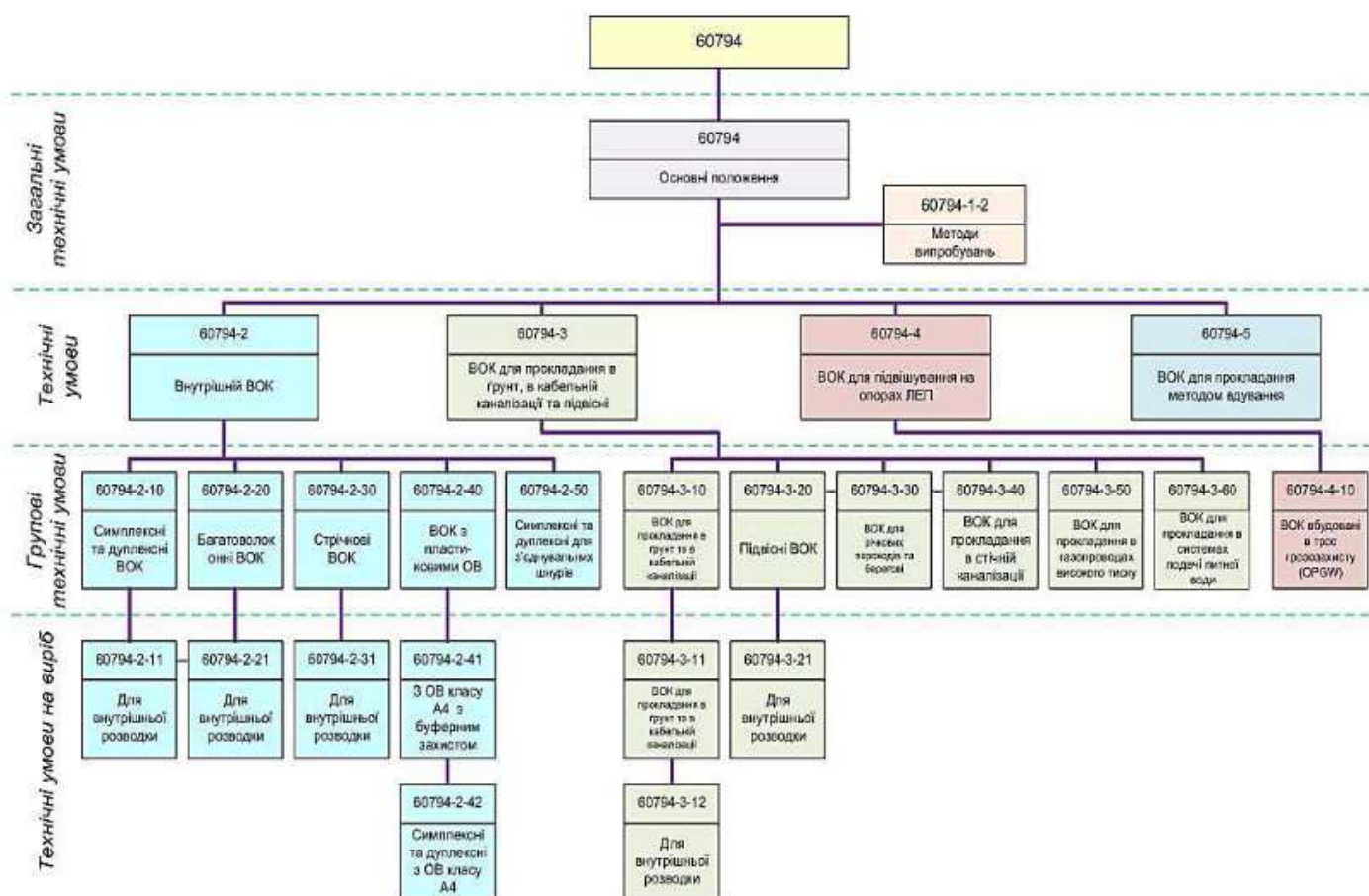


Рисунок 1.3 — Система стандартів ІЕС по ВОЛЗ [5]

Згини - це наслідки динамічних режимів, що виникають в процесі прокладання, в результаті чого ОВ можуть піддаватись деформації через згинання кабелю. Силіві елементи та радіус вигину кабелю під час прокладання мають вибиратись такими, щоб обмежувати ці динамічні деформації. Після прокладання кабелю осі усіх ОВ повинні мати радіуси вигину значно більші за мінімальний, що забезпечує дозволений рівень втрат на макровигинах або гарантований термін служби, обмежений механічною втомою.

Короткострокові розтягувальні зусилля виникають в процесі виробництва та прокладання, і можуть викликати постійні та/або періодичні навантаження на ОВ протягом всього терміну експлуатації (наприклад, через зміни температури). Зміна розтягувального зусилля кабелю через зміну впливу чинників довкілля протягом терміну експлуатації може викликати різноманітні переміщення

кабельних елементів. Надмірне розтягувальне зусилля призводить до зростання оптичних втрат та може спричинити залишкове розтягувальне зусилля ОВ. Запобігати цьому слід ще на етапі проектування, шляхом вибору ВОЛЗ з певним дозволеним розтягувальним зусиллям та контролем розтягувального зусилля в процесі прокладання.

Постійні розтягувальні зусилля можуть існувати протягом усього терміну служби кабелю. Це характерно для ВОЛЗ, що підвішуються на опорах. Розтягувальні зусилля на ОВ можуть бути викликані розтягуванням, осьовим закручуванням, згином та наявним провисанням між затискачами під власною вагою кабелю, способом прокладання та/або методом підвішування та/або умовами довкілля, такими як вітер, ожеледь, температура. Тому при проектуванні повітряних кабельних ліній слід враховувати максимальне дозволене розтягувальне зусилля, номінальну межу міцності та запас навантаження на ВОЛЗ. Якщо кабель піддається тривалому розтягувальному зусиллю протягом усього терміну служби бажано, щоб ОВ не зазнавало додаткових видовжень. Роздавлювання та удари можуть виникати як в процесі прокладання, так і в процесі технічної експлуатації ВОЛЗ. Вони можуть викликати постійне або тимчасове зростання оптичних втрат та/або втрату оптичної цілісності ОВ. ВОЛЗ для підвішування на опорах мають протидіяти роздавлюванню без додаткових оптичних втрат. Закручування виникає внаслідок динамічних навантажень в процесах прокладання і технічної експлуатації ВОЛЗ. В результаті цього можуть виникнути залишкові навантаження на ОВ та/або пошкодження захисних покривів ВОЛЗ. Якщо такі випадки мають місце, конструкція кабелю має витримувати певну кількість осьових закручувань на одиницю довжини без зростання втрат в ОВ та/або пошкодження оболонки. Максимальне залишкове навантаження ОВ через осьове закручування, розтягування та згин кабелю певною мірою визначають термін служби ВОЛЗ. ВОЛЗ для прокладання безпосередньо в ґрунт в процесі транспортування, прокладання та технічної експлуатації може піддаватись механічному впливу. Слід пам'ятати, що кабель, прокладений безпосередньо в

грунт менш захищений ніж кабель, що лежить в захисних трубах. Перш за все слід дотримуватись вимог щодо ударів, згинів, осьових закручувань, роздавлювання та дозволених радіусів вигинів ВОЛЗ. Певні критерії або визначені умови мають бути узгоджені між користувачем та постачальником. Щодо стійкості до впливу чинників довкілля, ВОЛЗ зв'язку мають бути стійкими до: утворення водню, проникнення та розповсюдження вологи, вібрації, зміни температури тощо.

Утворення водню виникає як результат впливу вологи на металеві елементи кабелю. Водень може проникати до ОВ і спричинювати зростання оптичних втрат. Тому слід забезпечувати достатньо низьку концентрацію водню в кабелі, щоб гарантувати відсутність зростання оптичних втрат протягом всього терміну служби кабелю. Низький рівень водню в ВОК досягається шляхом застосування в конструкції кабелю водневопоглинаючих матеріалів та гідрофобних наповнювачів.

Проникнення вологи призводить до зменшення межі міцності та середнього часу статичного старіння матеріалів ОВ. Для захисту від проникнення вологи застосовуються різноманітні матеріали, такі як бар'єри (наприклад, накладення алюмінієвої фольги з перекриттям). Безперервні металеві бар'єри добре захищають від радіального проникнення вологи. Для запобігання поздовжньому розповсюдженню вологи в ВОЛЗ застосовуються різні гідрофобні компаунди або водоблокуючі матеріали (стрічки, обмотки тощо). Вода в кабелі може замерзнути, а в деяких випадках може викликати роздавлювання ОВ і, як наслідок, спричинити погіршення передаточних характеристик та втрату оптичної цілісності. У випадку застосування підвісних кабелів вологість не становить істотних проблем.

Найбільш вразливими до ударів блискавки є ВОЛЗ, що містять у своєму складі металеві елементи, такі як мідні дроти або металеві оболонки.

Біологічні пошкодження виникають внаслідок малих розмірів ВОЛЗ, що робить їх вразливими до нападів гризунів. Види біологічних нападів та заходи захисту від них кабелів зв'язку описані в Рекомендації L.46. Кабелі зв'язку

можуть зазнати пошкодження через біологічні чинники, з яких деякі можуть бути обмеженими специфікою довкілля. Тому винесення кабелю з цих районів вже є захистом від певного біологічного нападу. Пошкодження кабелів зв'язку через біологічний напад можуть бути спричинені:

- ☐ ссавцями (білками, мишами, крисами, кротами, землерийками та іншими гризунами та іншими, особливо тими котрі облаштовують собі нори);
- ☐ птахами, подібними до дятлів та какаду;
- ☐ комахами типу термітів, мурах, жуків, ос та гусениць;
- ☐ мікроорганізмами, подібними до бактерій, грибків та (або) плісняви.

1.4 Типові конструкції волоконно-оптичних ліній зв'язку

Основним елементом ВОЛЗ є ОВ, тому усі конструктивні елементи ВОЛЗ повинні забезпечувати надійну роботу ОВ протягом усього терміну служби кабелю. Оскільки межі механічної міцності ОВ значно нижчі ніж у струмопровідних елементів металевих кабелів зв'язку, ОВ обов'язково потрібно захищати. Для безпосереднього захисту на ОВ накладають захисні покриття. Розрізняють первинне захисне покриття та вторинне покриття [5].

Первинне захисне покриття ОВ наноситься безпосередньо на оболонку ОВ. Первинне захисне покриття ОВ виготовлюється з лаків на акрилатній основі, причому первинне захисне покриття виготовлюється двошаровим.

Первинне захисне покриття (внутрішній) шар виготовляється з м'якого акрилату. Воно забезпечує захист ОВ. Вторинне захисне покриття (зовнішній) шар виготовляється з твердого акрилату і забезпечує м'який акрилат. Часто поверх первинного захисного покриття використовують вторинний захист ОВ:

Найбільш широкого застосування набули такі типи вторинного захисного покриття:

- за допомогою вільного укладання ОВ в спеціальній трубці (оптичному модулі) або в пазу профільованого осердя;
- за допомогою жорстких конструкцій;
- стрічкові структури.

Оптичний модуль (ОМ) являє собою систему у вигляді пластмасової трубки, всередині якої розміщено одне або кілька ОВ (як правило до 12 ОВ). При потребі ОМ може бути заповнений гідрофобним заповнювачем. Трубки можуть виготовлятися з поліетилену (ПЕ), поліаміду (ПА), полібутилентерефталату (ПБТ) або полікарбонату. ОВ в ОМ розташоване вільно по гелікоїді. Таке розміщення ОВ дозволяє значно зменшити вплив на нього зовнішніх навантажень, прикладених до ВОЛЗ.

Іншим способом захисту ОВ є вільне його укладання в паз (пази) профільованого елемента (осердя). Пази формуються по гелікоїді. ОВ вільно укладаються в пази і фіксуються шляхом обмотування профільованого елемента скріплюючою плівкою. В результаті утворюється система ідентична захисту за допомогою ОМ. Профільований елемент виготовляють з ПЕ або поліпропілену (ПП). При потребі вільний простір може бути заповнений гідрофобним заповнювачем.

Жорсткі методи захисту ОВ використовують у випадках коли виникають потреби забезпечення малих радіусів вигину та досить високого рівня стійкості до роздавлюючих зусиль. При такому захисті покриття (жорсткий буфер) накладається безпосередньо на первинне захисне покриття. Матеріалом для жорсткого буфера служить ПА або ПБТ, іноді фторопласт.

Як зазначалось вище тип захисту ОВ визначає типовість конструкції ВОЛЗ. Таким чином розрізняють ВОЛЗ: вільним укладанням ОВ; жорстким буфером; стрічковими елементами. ВОЛЗ з вільним укладанням ОВ в даний час набули найбільшого застосування. Найбільш поширеною конструкцією ВОЛЗ є конструкція, в якій ОВ укладені в захисні трубки – оптичні модулі (ОМ), які в свою чергу скручуються навколо центрального силового елемента (ЦСЕ) (рисунок 1.4). До переваг такої конструкції слід віднести простоту ідентифікації ОВ та монтажу ВОЛЗ.

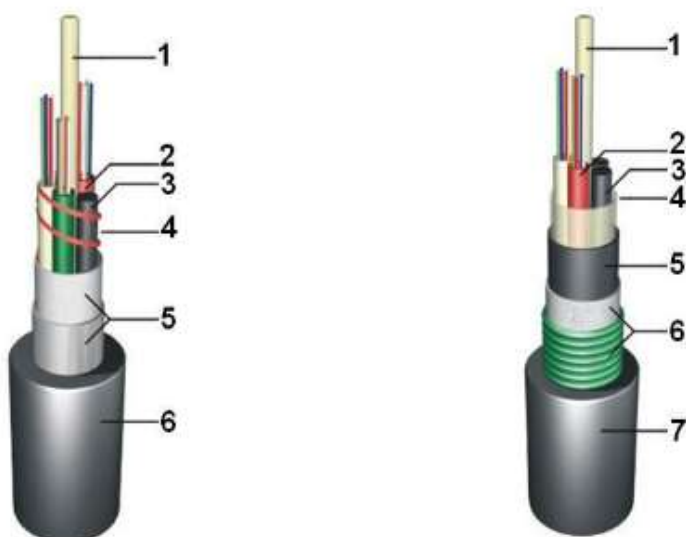


Рисунок 1.4 - Приклад конструкції оптичного кабелю для прокладання в кабельній каналізації та ґрунт [5]

- | | |
|---|---|
| 1 - центральний силовий елемент | 1 - центральний силовий елемент |
| 2 - модуль з оптичними волокнами | 2 - модуль з оптичними волокнами |
| 3 - кордель заповнення (для щільного укладання елементів в осерді ОК, якщо більшої кількості модулів з оптичними волокнами не потрібно) | 3 - кордель заповнення |
| 4 - гідрофобний заповнювач | 4 - гідрофобний заповнювач |
| 5 - водоблокуюча стрічка та алюмінієва скріплююча стрічка | 5 - внутрішня поліетиленова оболонка |
| 6 - зовнішня поліетиленова оболонка | 6 - водоблокуюча стрічка та гофрована сталева стрічка для захисту від пошкоджень кабелю гризунами |
| 7 - зовнішня поліетиленова оболонка | 7 - зовнішня поліетиленова оболонка |

2 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ПОДОВЖЕННЯ ЛЕП

Методи вимірювання температури та подовження повітряних ліній електропередавання є важливими для забезпечення надійної та безпечної експлуатації електромереж. Вони допомагають контролювати стан проводів і опор, виявляти можливі проблеми та запобігати аваріям. Серед основних методів вимірювання температури та подовження ЛЕП:

Вимірювання температури

- Термовізійне обстеження: Використання інфрачервоних камер для виявлення температурних аномалій. Термографія дозволяє швидко і безконтактно оцінити температуру проводів та обладнання, ідентифікувати гарячі точки, які можуть вказувати на проблеми з провідністю або перевантаженням. Переваги: безконтактність, висока точність, можливість обстеження важкодоступних місць. Недоліки: висока вартість обладнання, залежність від погодних умов.
- Контактні термометри: Принцип дії: Вимірювання температури за допомогою датчиків, які безпосередньо контактують з провідниками. Датчики кріпляться до проводів або опор і забезпечують постійний моніторинг температури. Переваги: висока точність вимірювань, можливість безперервного моніторингу. Недоліки: необхідність встановлення датчиків, що може бути складним та дорогим.
- Оптичні волоконні датчики: Використання оптичних волокон для вимірювання температури на основі змін у властивостях світлового сигналу. Оптичні волокна розташовуються вздовж проводів, що дозволяє вимірювати температуру по всій довжині ЛЕП. Переваги: висока точність, можливість вимірювань на великій відстані. Недоліки: висока вартість установки та експлуатації.

Вимірювання подовження

- Відеоспостереження та фотограмметрія: Використання відеокамер та фотограмметричних методів для вимірювання геометричних параметрів проводів. Камери встановлюються вздовж ЛЕП і забезпечують візуальний контроль положення проводів. Переваги: безконтактність, можливість моніторингу в реальному часі. Недоліки: залежність від погодних умов, необхідність спеціального програмного забезпечення.
- Тензодатчики: Вимірювання механічного напруження в проводах за допомогою спеціальних датчиків. Датчики кріпляться до проводів і вимірюють зміни напруження, що дозволяє оцінити подовження. Переваги: висока точність, можливість безперервного моніторингу. Недоліки: складність установки, висока вартість обладнання.
- Лазерна дальнометрія: Вимірювання відстаней за допомогою лазерних променів. Лазерні дальноміри використовуються для визначення відстаней між проводами та землею, що дозволяє оцінити подовження. Переваги: висока точність, можливість швидких вимірювань. Недоліки: залежність від погодних умов, необхідність прямої видимості між датчиками та проводами.

Застосування різних методів вимірювання температури та подовження ЛЕП дозволяє забезпечити надійний моніторинг стану електропередачі, своєчасно виявляти та усувати потенційні проблеми. Вибір конкретного методу залежить від конкретних умов експлуатації, технічних вимог та фінансових можливостей.

2.1 Метод розподіленого волоконного датчика температури на основі комбінаційного розсіювання

Серед множини розподілених волоконних датчиків температури системи на основі комбінаційного розсіювання становлять особливий інтерес.

Комбінаційне розсіювання (КР) світла супроводжується появою додаткових зрушених по частоті спектральних компонентів у розсіяному світлі. Кількість і спектральне становище цих ліній залежить від структурних

характеристик речовини, що розсіюється. У КР відбувається обмін енергією між фотоном, що падає, і молекулою речовини: якщо молекула переходить з основного стану в збуджений, то розсіяний фотон зміщується по частоті в червону область спектру, і таким чином генерується стоксова компонента КР (рис. 2.1). Можливий також зворотний процес, коли структурна молекула втрачає енергію і перерозсіяний фотон з більш високою енергією генерує антистоксову лінію в синій області спектра щодо лінії накачування. Вочевидь, що заселеність збудженого рівня безпосередньо залежить від температури речовини, отже, і інтенсивність антистоксової компоненти виявлятиме температурну залежність. Таким чином, реєструючи тимчасову динаміку інтенсивності антистоксової компоненти КР при зондуванні волокна імпульсним випромінюванням, за допомогою такого датчика можна проводити вимірювання температури вздовж волокна.

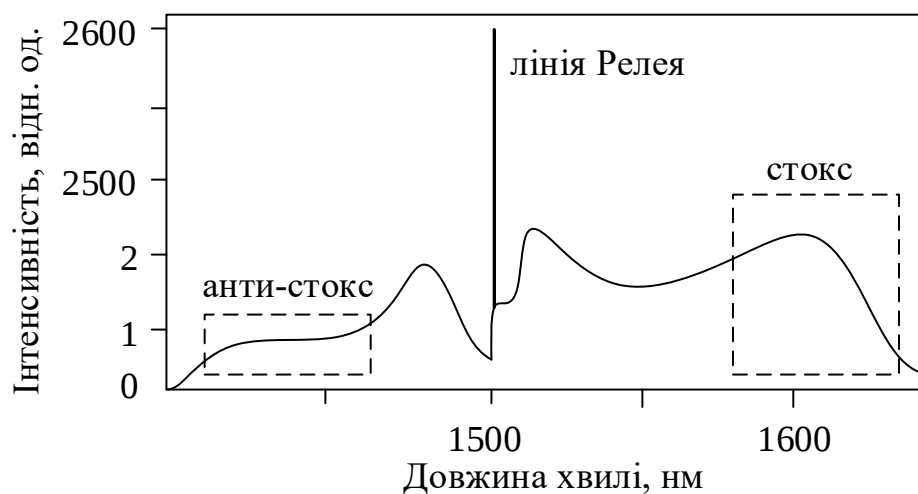


Рисунок 2.1 – Спектр комбінаційного розсіювання в оптоволокну SMF-28

На рис. 2.1 наведено спектр комбінаційного розсіювання в одномодовому оптоволокну SMF-28, виміряний у зворотному напрямку до напрямку поширення лазерного імпульсу.

Показано, що інтенсивність антистоксової лінії дуже мала (на 30 дБ слабкіша за амплітуду пружного релєївського розсіювання), і тому реєстрація відношення інтенсивностей стоксової та антистоксової компонент є складним

завданням. Крім цього, потужність зондувального випромінювання не повинна перевищувати кількох Вт, щоб уникнути проявів таких нелінійних ефектів, як вимушене комбінаційне розсіювання та вимушене розсіювання Мандельштама-Брілюена. Все це потребує особливо ретельного підходу до вибору методу спектрального фільтрування корисного сигналу.

Тому розглянемо метод фільтрації на основі волоконних бреггівських ґрат та спрямованих спектрально-селективних відгалужувачів, який дозволив проводити вимірювання інтенсивності компонентів КР у широкому спектральному діапазоні з мінімальними втратами, при цьому чутливості звичайного p-i-n InGaAs фотоприймача виявилось достатньо. Даний фільтр пригнічував центральну область спектра на довжині хвилі 1529 нм і пропускав антистоксову і стоксову компоненти КР, центровані на 1430 і 1630 нм відповідно, у смугі шириною 30-50 нм (рис. 2.2), кожна з яких надалі прямувала на відповідний реєструючий фотодіод. Повна схема розподіленого датчика температури наведено на рис. 2.3.

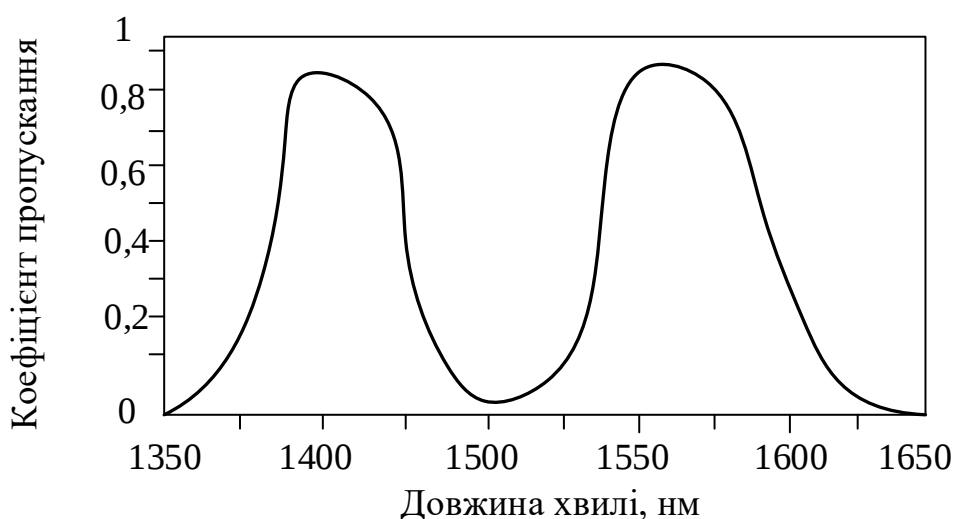


Рисунок 2.2 – Спектр пропускання фільтра

Для того, щоб мінімізувати шуми фотодетектора, потрібно усереднення даних, що реєструються (~100-кратне). Як було показано, чутливість

розробленого датчика за температурою становить кілька градусів для одномодової лінії волокна протяжністю до ~10 км (рис. 2.4, 2.5).

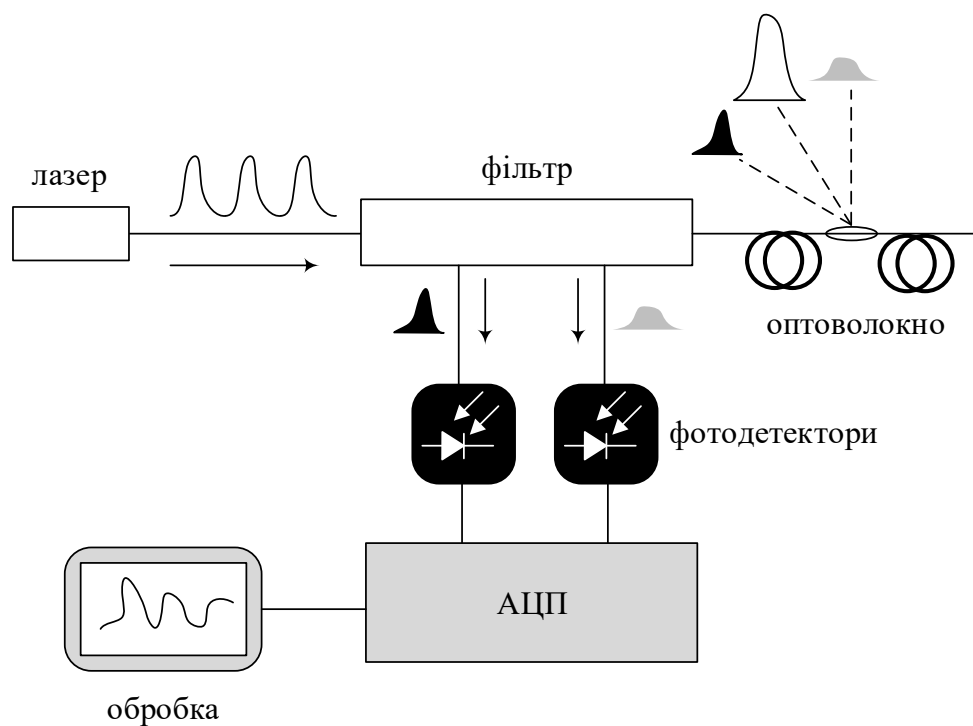


Рисунок 2.3 – Схема розподілення датчика температури

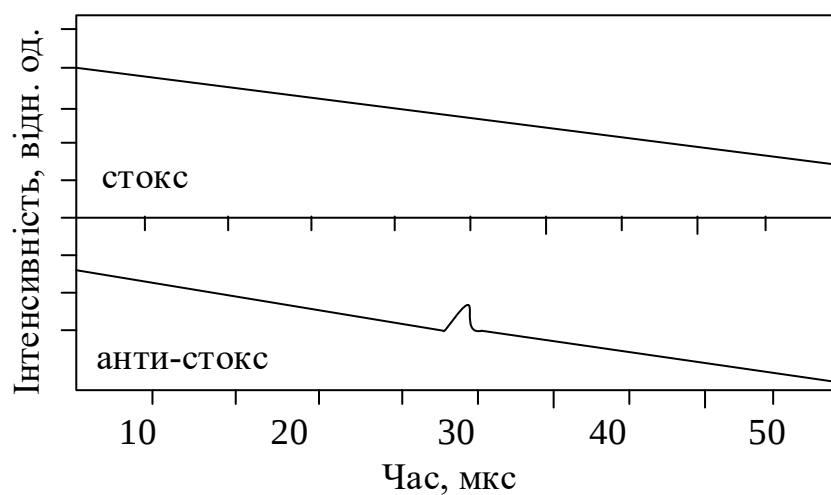


Рисунок 2.4 – Залежність часу від інтенсивності від компоненту стокс, анти-стокс

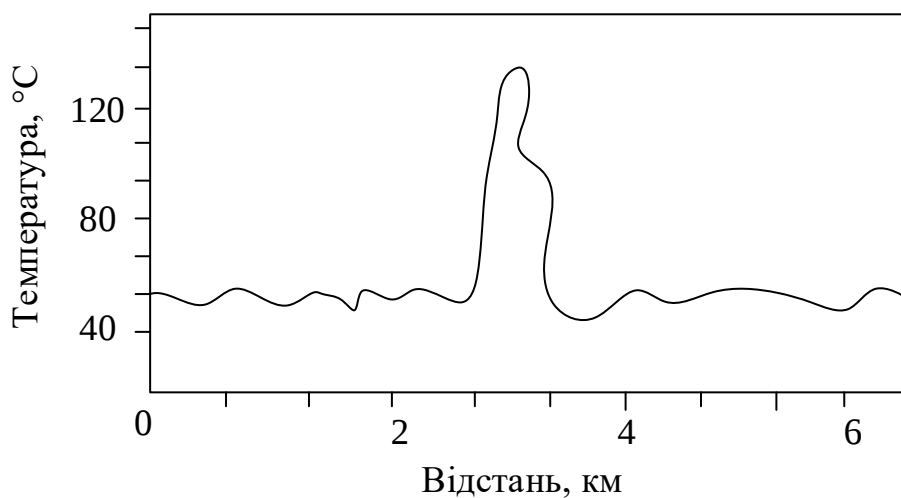


Рисунок 2.5 – Розподіл температури, що розрахована по даним, приведеним на рис. 2.4

Використання лавинних фотодіодів замість р-і-п дозволить суттєво покращити точність вимірювання температури. Просторова роздільна здатність становить ~ 10 м. Воно обмежено смугою пропускання фотодетектора (10 МГц) і може бути покращено до значень одиниць метрів, що визначаються тривалістю імпульсу зондувального випромінювання імпульсного волоконного лазера.

2.2 Конструкція розподілених волоконно-оптичних датчиків

На основі проведених досліджень було розроблено приладові варіанти розподілених датчиків для використання на практиці. Функціональна схема внутрішнього пристрою розподіленого датчика температури представлена на рисунку 2.6.

До складу лазерного модуля входить струмовий драйвер, який забезпечує живлення, термостабілізацію та керування імпульсним лазером, який створює первинний зондуючий імпульс довжиною 10–40 нс. Токовий драйвер має цифро-аналоговий перетворювач для перетворення цифрового сигналу синхронізації в аналоговий сигнал, керуючий генерацією лазерного імпульсу, а також величиною сили струму, що подається на лазер, та аналого-цифровий перетворювач для зворотного зв'язку управління. Малоінтенсивний лазерний

імпульс (типова пікова потужність 2-5 мВт) посилюється ($K_{\text{посил}} = 30-40$ дБ) за допомогою двопрхідного ербієвого підсилювача з напівпровідниковим накачуванням (980 нм).

Система управління двома лазерами (імпульсним та лазером накачування підсилювача) дозволяє варіювати характеристики вихідного імпульсу в широкому діапазоні таких параметрів як довжина імпульсу, інтенсивність, форма, шпаруватість та ін.

Частина чутливого елемента з відомою температурою (баласт) призначена для порівняння співвідношення інтенсивності стоксової та антистоксової компонент у чутливій лінії та всередині блоку обробки, значення температури в цій частині чутливого елемента береться за опорне значення, щодо якого проводиться перерахунок температури у чутливому елементі. При необхідності послідовного вимірювання кількох оптичних ліній у схему додається оптичний перемикач (світч) та індивідуальні баласти кожного каналу для обліку та компенсації різниці у згасанні компонентів розсіювання для різних каналів перемикача.

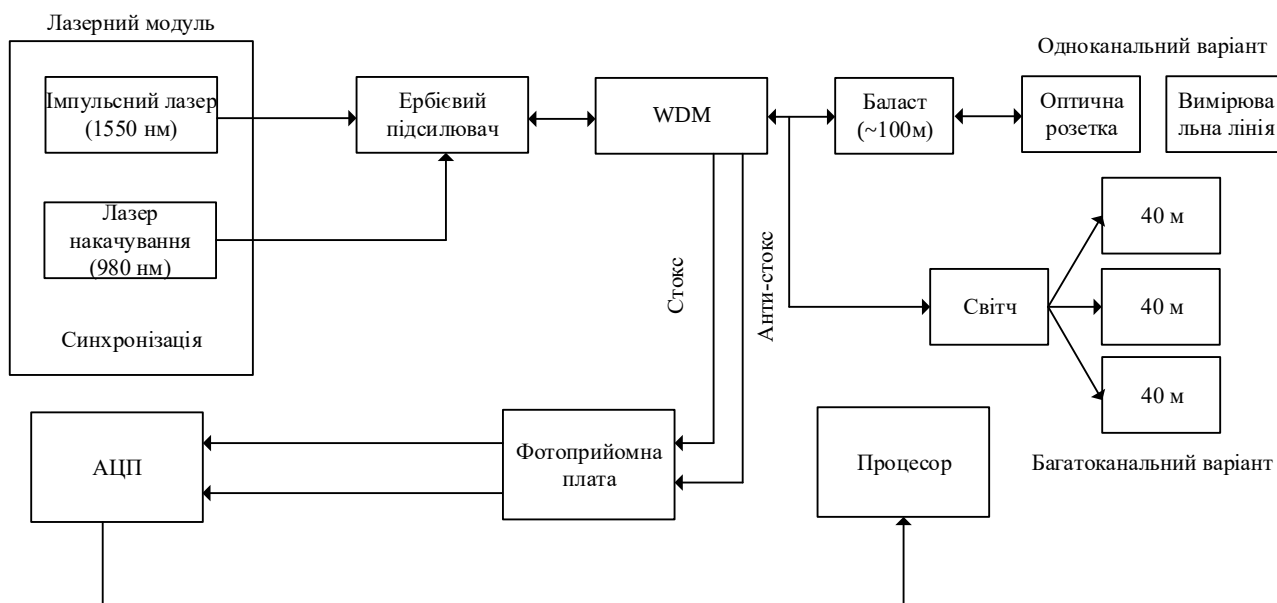


Рисунок 2.6 – Функціональна схема блоку обробки датчика розподілення температури

Відбите розсіяне випромінювання фільтрується за допомогою WDM, ціллю якого є поділ стоксової та антистоксової компонент у різні канали. При цьому важливим завданням є придушення інтенсивної (на три порядки сильніше антистоксу) релєївської компоненти, наявність якої в корисному сигналі може призвести до істотного зниження співвідношення сигнал/шум.

Стоксова та антистоксова компоненти перетворюються на електричний сигнал, посилюються, а потім оцифровуються за допомогою високошвидкісного АЦП (аналого-цифрового перетворювача). Накопичення та усереднення рефлектограм проводиться за допомогою спеціального приладу, а за обчислення температури за калібрувальними коефіцієнтами відповідає процесор.

3 КОНЦЕПЦІЯ МЕТОДУ ОДНОЧАСНОГО ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ І ПОДОВЖЕННЯ ЛЕП

3.1 Лінії електропередавання

Найчастіше використовувані високовольтні лінії 110, 220 і 330 кВ. Пропускна спроможність цих ліній залежить від погодних умов, які є суттєвим обмеженням. Параметрами, що визначають стан прольоту лінії, є температура провідника та його натяг, які виражаються у провисанні дротів. Моніторинг параметрів роботи мережі є методом, який дозволяє безпечно керувати роботою енергосистеми. Мінливість їх температури, що виникає внаслідок зміни погодних умов та величини струму навантаження, надає вирішальний вплив на поведінку кабелів ЛЕП. Зміна температури кабелю викликає зміну провисання та натягу, що може призвести до обриву кабелю або надто близького зближення кабелю із землею або перешкодою, наприклад, деревом. Лінійні дроти, вільно натягнуті між двома точками кріплення, називаються так званими контактна крива наступного виду:

$$y(x) = \frac{H}{w} \cosh\left(\frac{w}{H}x - 1\right), \quad (3.1)$$

де: w – вага одиниці довжини тросу,

H – горизонтальна складова сили натягу.

Розкладаючи гіперболічний косинус у ряд Маклорена, можна використовувати наступне наближення:

$$y(x) = \frac{w(x^2)}{2H}. \quad (3.2)$$

У разі плоского прольоту максимальний прогин Z у середині прольоту можна визначити, підставивши $x = \frac{S}{2H}$. Наближене співвідношення, визначальне величину провису Z , має вигляд:

$$Z = \frac{wS^2}{8H}, \quad (3.3)$$

де: S – прольот.

Це наближення досить точно, коли провисання не перевищує 5% довжини S -подібного прольоту. Горизонтальна складова сили натягу H дорівнює повній силі натягу в центрі прольоту. У точках підвісу провідника та ізоляторів зусилля натягу провідників визначається рівнянням:

$$F = H + wD. \quad (3.4)$$

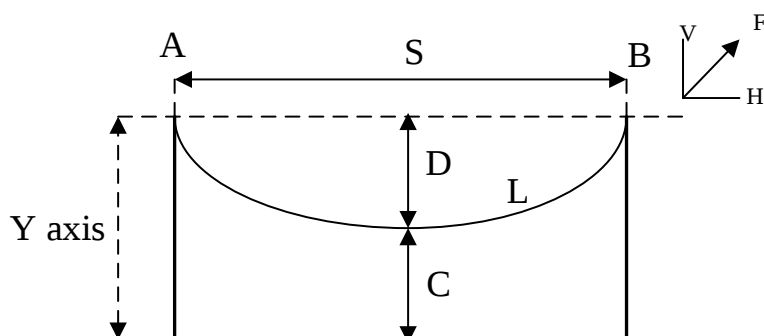


Рисунок 3.1 – Схема лінії електропередавання з відміченими довжинами ліній, провисом, направленням і поверненням натягу, і довжиною прольоту

Тільки горизонтальна складова H використовується для розрахунків провисання та натягу робочого дроту в прольоті, а F використовується тільки в інформаційних цілях. Довжину троса, підвішеного в прольоті, можна визначити методом контактної кривої за рівнянням:

$$L = \frac{2H}{w} \sinh\left(\frac{Sw}{2H}\right); \quad (3.5)$$

або з його наближення:

$$L = S + \frac{8D^2}{3S}; \quad (3.6)$$

що дозволяє визначити провисання у вигляді рівняння:

$$D = \sqrt{\frac{3S(L-S)}{8}}; \quad (3.7)$$

Різниця загальної довжини провідника L у прольоті S прольотів називається провисанням провідника. Оскільки прогин D залежить тільки від довжини провідника L , яка змінюється з температурою, відповідно до рівняння:

$$L_z = cL_0(T_1 - T_0) + bL_0(\delta_1 - \delta_0), \quad (3.8)$$

де індекси 0 і 1 відносяться до початкового і кінцевого стану відповідно, L_0, L_1 - довжина провідника в початковому і кінцевому стані відповідно, c - коефіцієнт теплового розширення труби, δ_0, δ_1 - початкова і кінцева напруги в проволці, b - коефіцієнт деформації провідника.

Зв'язок між температурою та напругою в тросі, підвішеному в прольоті, визначається рівнянням стану лінії у вигляді:

$$\delta_1 - \frac{S^2 G_1^2}{24bG_1^2} = \delta_0 - \frac{S^2 G_0^2}{24b\delta_0^2} - \frac{a}{b}(T_1 - T_0), \quad (3.9)$$

де S - прольот, δ_0, δ_1 - натяг проволки, $G = \frac{W}{A}$ об'ємна вага кабелю, A - площа поперечного перерізу провідника, b - коефіцієнт деформації провідника.

Визначення температури в кінцевому стані вимагає використання складної теплової моделі провідника, заданої стандартом IEEE чи CIGRE.

Припускаючи, що система є лінійною, це означає, що лінія подовжується однаково незалежно від розташування короткої ділянки вимірювання, що можна записати:

$$L - L_0 = cL_0(T - T_0) + bL_0(\delta - \delta_0), \quad (3.10)$$

де L – довжина вимірювальної ділянки при зміні величини роботи, L_0 – початкова довжина вимірювальної ділянки, c – коефіцієнт температурного розширення провідника, b – коефіцієнт деформації тросу, δ_0 – початкова напруга в вимірювальному перерізі, δ – напруга в вимірювальній частині, T – температура трубопроводу при зміні умов експлуатації, T_0 – початкова температура лінії.

Перетворивши вищенаведене рівняння, можна отримати залежність, що визначає напругу в провіднику лінії під дією температури та її фактичне подовження, тобто:

$$\delta = \frac{\left(\frac{L - L_0}{L_0} - c\right)(T - T_0) + b\delta_0}{b}. \quad (3.11)$$

Для вимірювань на працюючій ЛЕП, тобто її температури і напруги, доцільно використовувати оптичні волокна, нечутливі до електромагнітного поля. З цією метою будуть розглянуті волоконно-оптичні датчики, які можна використовувати для одночасного вимірювання температури та напруги при нормальній роботі повітряної лінії електропередач.

3.2 Волоконно-оптичні датчики температури та деформації

Щоб розробити волоконно-оптичну вимірювальну систему, яка дозволить вимірювати температуру та напругу електромагнітної лінії, необхідно вибрати компоненти цієї системи. Найважливішим елементом тут буде вимірювальний датчик, на який впливатимуть температура та механічні дії. Роль датчика можуть виконувати двопротинезаломлюючі оптичні волокна, як класичні, так і

фонічні, а також оптичні решітки Брегга або довгоперіодні решітки. Для аналізу можливості їх використання як вимірювальних датчиків будуть представлені їхні основні властивості та розглянуто вплив зовнішніх факторів на їх параметри.

Вплив температури і напруги на параметри волоконно-оптичних елементів може бути використаний для створення волоконно-оптичних датчиків, стійкість яких до електромагнітних перешкод дає вирішальну перевагу перед електронними датчиками в багатьох додатках.

Для побудови таких волоконних датчиків можна використовувати як одномодові, так і фотонні волокна, також відомі як мікроструктуровані волокна. У разі одномодових волокон можуть використовуватися двопробіжувальні волокна, волоконні решітки Брегга, поляризаційні решітки та решітки з великим періодом.

3.2.1 Двопробіжувальні класичні і фотонні двопробіженепереламні волокна

У класичних одномодових оптичних волокнах з високою симетрією та ізотропними матеріалами чутливість до зовнішніх факторів незначна. Для отримання оптичних волокон, чутливих до зовнішніх факторів, наприклад, тиску, температури, розтягуванню, скручування і т. д., застосовують так звані двопробіжувальні оптичні волокна, в яких постійні поширення B і показники заломлення n залежать від напрямку поширення.

Оптичне волокно має модальне подвійне пробіженезаломлення, яке визначається наступним чином:

$$B = \frac{(|\beta_x - \beta_y|)}{k} (|n_x - n_y|), \quad (3.12)$$

де β_x і β_y - постійні розповсюдження в напрямках x та y відповідно, n_x і n_y - показники переломлення, k – модуль хвильового вектору.

У нормальних умовах величина B не постійна вздовж волокна, а змінюється через нерівномірність форми серцевини та механічної напруги. Асиметрія форми досягається за рахунок використання еліптичного осердя або

еліптичної оболонки. Оптичні волокна з двопротенезаломлюючою формою також можна отримати, використовуючи тунелі з обох боків циліндричної серцевини, які зменшують латеральний показник заломлення. Переріз таких оптичних волокон показано в таблиці 7.1.

У таких оптичних волокнах $B \sim 10^{-6}$ виходять двопротенеломлення B порядку 10^{-4} . Виробництво таких світловодів полягає у введенні двох стрижнів з кварцового скла, легованого матеріалом з більш високим коефіцієнтом теплового розширення, наприклад B_2O_3 або Al_2O_3 , на протилежних сторонах серцевини на стадії заготівлі.

У преформі одномодове волокно діаметром кілька десятків мм свердлять два отвори діаметром, наприклад, 10 мм і поміщають стрижні, а потім витягують одномодове волокно. У таблиці 3.1 показані поперечні перерізи обраних типів оптичних волокон з подвійним протенезаломленням під напругою.

Одномодовими оптичними волокнами. поляризацію підтримувати).

До них належать такі типи оптичних волокон: еліптична оболонка, тип Bow-tie, тип Panda. Вони дуже чутливі до зовнішніх факторів. У таблиці 3.1. також показує чутливість вибраних волокон до температури та тиску.

До групи оптичних волокон з високим подвійним протенезаломленням входить безліч волокон з незвичайною структурою та властивостями.

Постійні поширення мод з ортогональними напрямками поширення x та y у них різні.

Таблиця 3.1 – Чутливість вибраних двопротенепереломних волокон до температури і тиску

Типи оптичних волокон	Чутливість до температури	Чутливість до тиску
Bow-tie	-5	+11
Класичний з боковим отвором	-0,5	-34
Боковий отвір з еліптичною серцевиною, тип К	-3,3	+38
Боковий отвір з еліптичною серцевиною, тип Р	+2,9	-68

Модове двопротенезаломлення або фазове двопротенезаломлення B , визначене, як показано раніше в залежності (3.13), як різницю показників заломлення поляризаційних мод x і y , можна записати наступним чином:

$$B = \eta_{ef}^x - \eta_{ef}^y, \quad (3.13)$$

який є основним параметром, що характеризує двопротенезаломлюючі волокна. Еквівалентним параметром є так званий шлях биття L_B , що є довжиною волокна, на якій зміна фази між модами поляризації дорівнює 2π . Шлях биття виражається формулою:

$$L_B = \frac{\lambda}{B}. \quad (3.14)$$

Групове подвійне протенезаломлення G -волокна визначається наступним співвідношенням:

$$G = B - \lambda \frac{dB}{d\lambda}. \quad (3.15)$$

Поляриметрична чутливість волокна до параметра x (наприклад, температури) визначається як різниця фаз між модами поляризації, що виникає при зміні цього параметра на одиниці довжини волокна:

$$K_x = \frac{1}{L_x} \frac{d(\varphi_x - \varphi_y)}{dx} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{dB}{dx} + \frac{B}{L} \frac{dL}{dx} \right), \quad (3.16)$$

де $d(\varphi_x - \varphi_y)$ - різниця фаз між модами поляризації, що викликана зміною цього параметру на dx , L_x - довжина волокна з урахуванням дії фактору x .

Для вимірювання чутливості волокна до заданого зовнішнього чинника найчастіше застосовують інтерференційний метод. Тоді формула поляриметричної чутливості набуває вигляду:

$$K_x = \frac{2\pi}{L_x} \frac{\Delta M}{\Delta x}, \quad (3.17)$$

де L_x – довжина волокна, на яку впливає параметр x , ΔM - зміна фази між модами поляризації, що виражена кількістю інтерференційних смуг, що виникають в результаті зміни фізичного параметру по Δx .

Поляриметрична чутливість до температури порівняно висока (табл. 3.1), а у волокнах з натяжними елементами вона обумовлена різними коефіцієнтами теплового розширення цих елементів та чистого скла. Тому підвищення температури викликає стрес, у результаті виникає висока чутливість таких волокон до температури.

Поляриметрична чутливість до тиску залежить від конструкції оптичних волокон (таблиця 3.1). Чутливість до розтягування для волокна з еліптичною оболонкою становить -5, а для Bow-tie, -18 рад mstrain⁻¹ м⁻¹.

Важливим кроком у розвитку двопроменевих оптичних волокон стала поява фотонних (мікроструктурних) оптичних волокон. Світло в такому волокні спрямовується так само, як і в волокнах зі ступінчастим профілем показника заломлення, з тією різницею, що збільшення показника заломлення в серцевині досягається не легуванням, а заміною капіляра суцільним стрижнем. Залежність від нормованої частоти V для класичних оптичних волокон можна використовувати і фотонних волокон, тобто:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_c^2 - n_{nl}^2}, \quad (3.18)$$

де a – радіус серцевини, n_c – показник переломлення серцевини, n_{nl} – показник переломлення оболонки.

Для фотонних волокон необхідно враховувати ефективний показник заломлення оболонки, що чисельно визначається, який сильно змінюється з довжиною хвилі. Збільшення довжини хвилі врівноважується дисперсією ефективного показника заломлення оболонки, внаслідок чого співвідношення (3.18) прагне постійного значення для коротких довжин хвиль.

Структура оболонки і серцевини двопробових волокон може бути змінена для збільшення їх метрологічних можливостей. Дослідження фотонних волокон показали, що чутливість до температури найбільше залежить від матеріалу волокна та його геометрії, а чутливість до тиску пов'язана з напругою, що виникає поблизу серцевини внаслідок тиску. Температурна чутливість може бути додатково знижена за рахунок виготовлення волокна без германію в серцевині, що, у свою чергу, не суттєво впливає на чутливість до тиску. Наведений матеріал показує, що як датчики можуть виступати як класичні, так і фотонні двопробові світловоди.

З появою фотонних волокон почалися роботи з виробництва фотонних двопробовезаломлюючих волокон, отримавши двопробовезаломлення 10^{-3} для $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$. Також було виготовлено оптичне волокно з еліптичними отворами оболонки, двопробовезаломлення було $\sim 10^{-4}$, але на основі чисельного аналізу після оптимізації геометрії за рахунок орієнтації отворів дозволяє легко записувати решітки Брегга, а його подвійне пробовезаломлення для $\lambda = 1,55 \text{ мкм}$ досягає значення $1,8 \cdot 10^{-3}$.

3.2.2 Оптичне волоконні брегівські решітки

Решітки, що працюють у відбивній конфігурації (традиційні брегівські решітки), можуть використовуватися в оптичних циркуляторах, інтерферометрах, лазерах із зворотним зв'язком, як смугових фільтрів і датчиків пропускання конфігурації. Періодична модуляція показника заломлення серцевини або періодична деформація всього оптичного волокна призводить до формування брегівської решітки або решіток з великим періодом. Брегівські решітки мають дуже короткі періоди (порядку сотень нм), і зазвичай їх виготовляють у світловодах з ветоутливою серцевиною (легованої германієм або підданий водневій обробці), що має сильне поглинання ультрафіолету в діапазоні 193-266 нм. Через малі періоди зміну показника заломлення одержують наступними методами: інтерференційним, фазовою маскою, а також крапковим записом за допомогою лазера CO_2 або фемтосекундного лазера.

Як згадувалося раніше, в даний час виготовляються багато типів волоконних решіток Брегга. Найчастіше використовуються аподизовані однорідні решітки, решітки зі змінним періодом та косі решітки. Слід зазначити, що виробляються і волоконно-оптичні довгоперіодні решітки.

3.2.2.1 Рівномірні брегівські решітки

Волоконні брегівські решітки з постійним періодом та постійним значенням показника заломлення називаються рівномірними ґратами. Світло, введене в сердцевину, розсіюється на кожній площині ґрат (рис. 3.2).

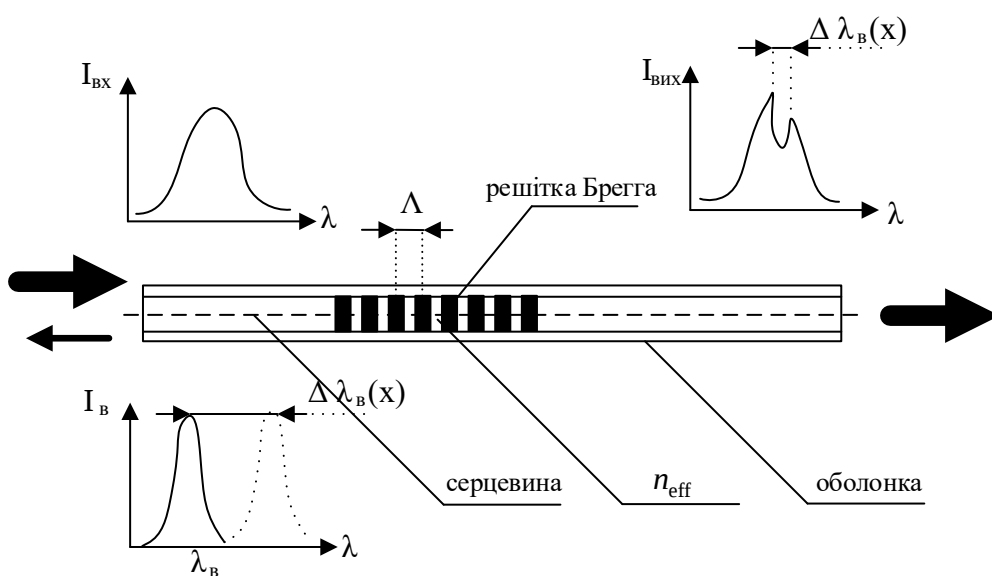


Рисунок 3.2 – Принцип роботи рівномірної сітки Брегга

Якщо виконується умова узгодження Брегга, відбите світло конструктивно інтерферує, створюючи відбитий промінь, що розповсюджується в напрямку, протилежному променю, що падає. Довжина хвилі Брегга або умова резонансу визначається формулою (3.19), яку можна записати як:

$$\lambda = 2n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (3.19)$$

де n_{eff} - ефективний коефіцієнт переломлення сердцевини, Λ - період решітки.

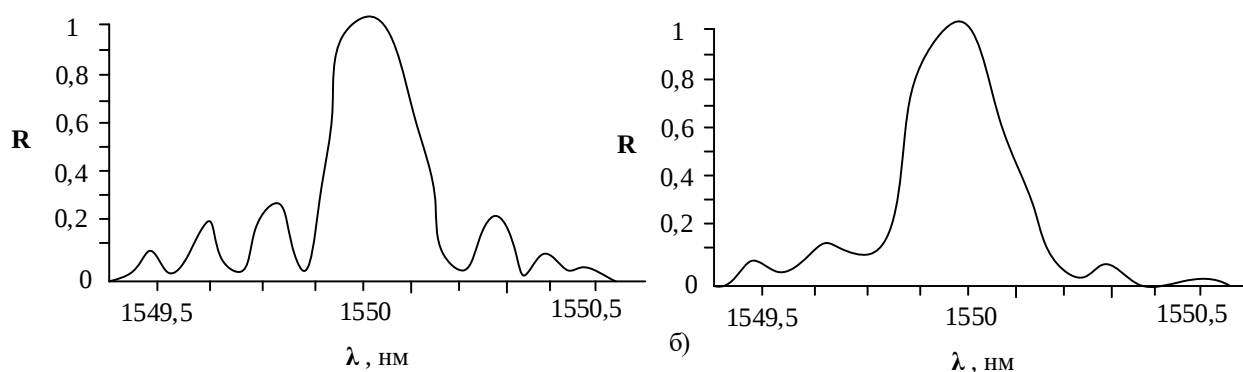


Рисунок 3.3 – Спектр сигналу, відбитого від однорідної решітки довжиною $L = 6$ мм, а) без аподизації, б) з аподизацією

3.2.2.2 Решітки Брегга з перемінним періодом

Решітки зі змінним періодом мають період, що монотонно змінюється (рис. 3.4).

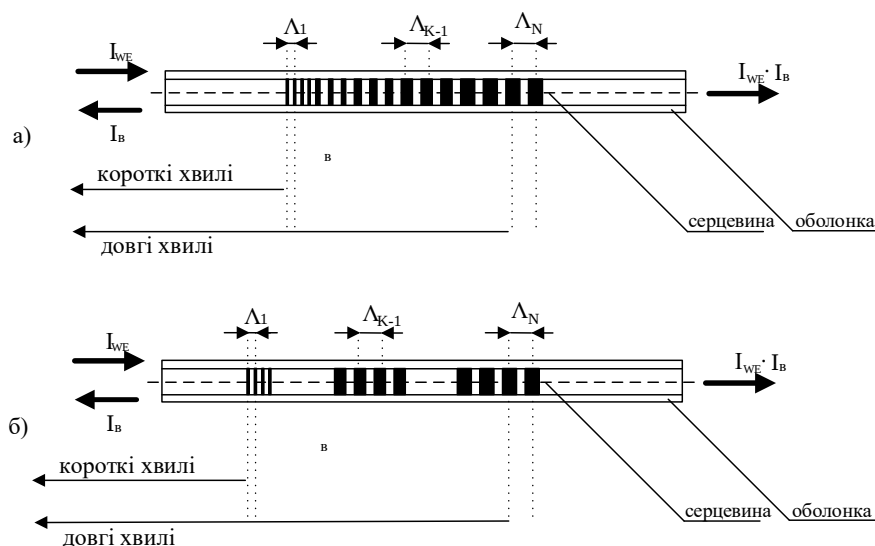


Рисунок 3.4 – Волоконно – оптична решітка Брегга зі змінним періодом, а) структурна схема, б) структурна модель

Співвідношення (7.19) для брегтівської решітки зі змінним періодом можна записати в наступному вигляді:

$$\lambda_B(Z) = 2n_{eff}(Z) \cdot \Lambda(Z). \quad (3.20)$$

Решітка, у яких період змінюється лінійно, тобто.

$$\Lambda(Z) = \Lambda_0 + \Lambda_L \cdot Z, \quad (3.21)$$

де Λ_0 - початковий період, Λ_L - коефіцієнт зміни періоду в решітці, що може бути змодельований серією однорідних решіток невеликої довжини. Приклади спектральних характеристик такої сітки показано на рис. 3.5.

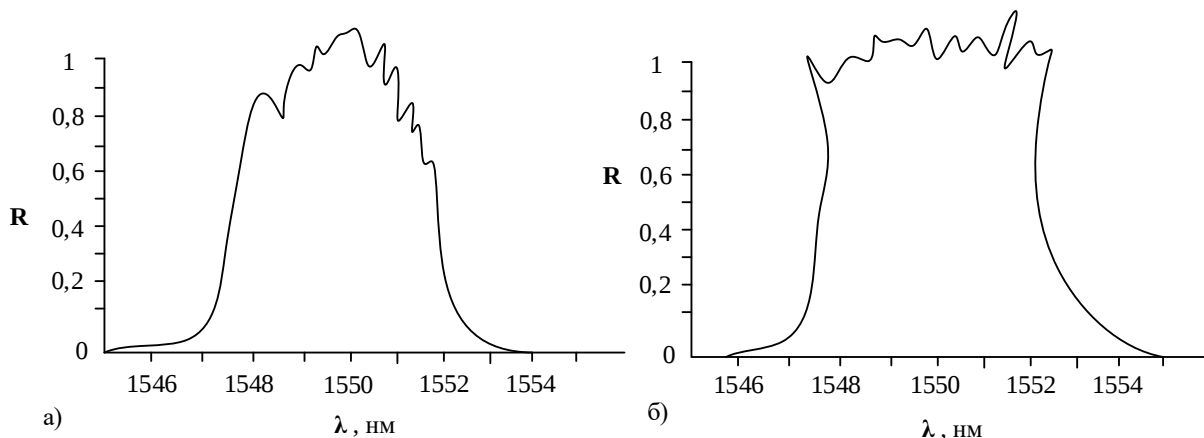


Рисунок 3.5 – Характеристики відображення решітки з лінійно – змінним періодом, визначені численно методом матриці переходу, а) з аподизацією, б) без аподизації

3.2.2.3 Похилі бреггівські решітки

Похилі бреггівські решітки є конструкції, в яких площини решітки утворюють з поздовжньою віссю волокна кут менше 90° (рис. 3.6).

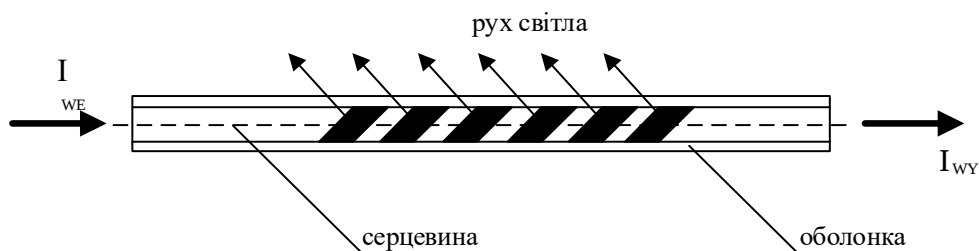


Рисунок 3.6 – Схема нахиленої волоконної решітки Брегга

3.2.2.4 Довгоперіодні решітки

Періодична деформація всього оптичного волокна призводить до формування довгоперіодної решітки, має довжину періоду порядку міліметрів, тоді як брегговські решітки мають порядок сотень нанометрів. Такі решітки в основному виготовляються поточковим методом з використанням лазера CO_2 з довжиною хвилі $\lambda = 10,64$ м або за допомогою електричної дуги. Опромінення інфрачервоним випромінюванням та використання електричної дуги викликає локальне затоплення волокна, завдяки чому можлива поява напруги, що виникають у процесі протягування оптичного волокна або при використанні звуження або скручування. Це спричиняє деформації по всьому його перерізу у зоні опромінення.

Введення періодичної зміни показника заломлення викликає зв'язок мод, що розповсюджуються в оптичному волокні. Умова фазового синхронізму для двох постійних мод з постійними β_1 та β_2 поширення може бути записана як

$$\beta_1 \pm \beta_2 = \frac{2\pi k}{\Lambda}, \quad (3.22)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots$ - ціле число, що представляє рядок решітки, Λ - період решітки.

Коли має місце зв'язок мод із протилежним напрямом поширення. У зв'язку з тим, що абсолютні значення модальних постійних розповсюдження мод для протилежного напрямку однакові, співвідношення (3.19) можна подати у вигляді:

$$2\beta_{1,2} = \frac{2\pi k}{\Lambda}. \quad (3.23)$$

Вираз постійного поширення через ефективний показник заломлення моди:

$$2\beta_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}, \quad (3.24)$$

для бреггівської решітки, отримаємо:

$$k\lambda_B = 2n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (3.25)$$

де λ_B - довжина хвилі моди, що розповсюджується в решітці Брегга, або просто довжина хвилі Брегга, n_{eff} - ефективний показник переломлення серцевини волокна.

Коли постійні поширення у співвідношенні (3.19) мають однакові знаки, існує зв'язок між модами з тим самим напрямом поширення. Ця умова виконується великих періодів, тобто. для довгоперіодних ґрат. У довгоперіодних ґратах може бути зв'язок між основною модою та модами вищого порядку в модах серцевини чи оболонки. Умова відповідності може бути записана як:

$$k\lambda_{LPG} = (n_{eff}^{rdz} - n_{eff}^{wr,pl}) \cdot \Lambda, \quad (3.26)$$

n_{eff}^{rdz} - ефективний показний переломлення серцевини, n_{eff}^{wr} - ефективний показник переломлення серцевини для мод серцевини більш високого порядку, n_{eff}^{pl} - ефективний показник переломлення серцевини для мод оболонки, k – ціле число, Λ - період решітки, λ_{LPG} - довжина хвилі, що розповсюджується в довгоперіодній решітці.

Умова фазового синхронізму для ґрат, виготовлених з двопротенезаломлюючих волокон, має вигляд:

$$k\lambda_{pol} = (n_{eff}^x - n_{eff}^y) \cdot \Lambda, \quad (3.27)$$

де k – ціле число, λ_{pol} - довжина хвилі поляризаційної моди, $n_{eff}^{x,y}$ - показник переломлення поляризаційної моди x та y відповідно, Λ - період решітки, що може бути представлений як:

$$\lambda_{pol}k = B \cdot \Lambda, \quad (3.28)$$

де B – двопротеневопереломлюючі моди, визначені за (3.12).

У фотонних оптичних волокнах хід фазового двулучепреломлення B залежить від довжини хвилі, тому створювані у яких решітки мають резонанси вищого порядку при $k = 1, 2, 3, \dots$, тоді виходить вираз:

$$L_B = \frac{\Lambda}{K}, \quad (3.29)$$

звідки слідує, що у положення резонансу можна проводити, вибираючи період решітки, кратний ходу биття для потрібної довжини хвилі.

Зміна положення резонансів на решітці пов'язана зі зміною фазового двопреломлення B і довжини періоду решітки Λ_{nod} під впливом параметра X . Тоді співвідношення (3.28) виконується для іншої довжини хвилі, і зсув резонансної довжини хвилі представлений співвідношенням:

$$\frac{\partial\left(\frac{BL}{\lambda}\right)}{\partial\lambda}\partial\lambda + \frac{\partial\left(\frac{BL}{\lambda}\right)}{\partial x}\partial x = 0. \quad (3.30)$$

Компоненти рівняння (3.29) можуть бути виражені таким чином:

$$\frac{\partial\left(\frac{BL}{\lambda}\right)}{\partial x} = \frac{1}{\lambda}\left(\frac{\partial L}{\partial x}B + \frac{\partial B}{\partial x}L\right) = \frac{BL}{\lambda}\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial x}\right)\Lambda \quad (3.31)$$

і

$$\frac{\partial\left(\frac{BL}{\lambda}\right)}{\partial\lambda} = -\frac{1}{\lambda^2}\left(B - \lambda\frac{\partial B}{\partial\lambda}\right) = -\frac{L}{\lambda^2}G. \quad (3.32)$$

Таким чином, відношення (3.28) набуває вигляду:

$$\frac{1}{\lambda}\frac{\partial\lambda}{\partial x} = \frac{B}{G}\left(\frac{1}{L}\frac{\partial L}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial B}{\partial x}\right), \quad (3.33)$$

що може бути представлено за допомогою поляриметричної чутливості волокна K_x (3.17) як:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial x} = \frac{\lambda^2 K_x}{2\pi G}. \quad (7.34)$$

Встановлена залежність означає, що чутливість решітки до зовнішнього фактора X визначається параметрами волокна, на якому були записані решітки. Таким чином, можна впливати на метрологічні властивості ґрат шляхом відповідного вибору параметрів K_x і G .

3.2.2.5 Деформаційна і температурна чутливість решіток Брегга

Центральна довжина хвилі Брегга визначається таким чином: $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ де: Λ – період решітки, n_{eff} – ефективний показник заломлення серцевини волокна.

Для визначення можливих зрушень спектральних характеристик бреггівської решітки, що використовується як датчик, необхідно визначити її температурну та деформаційну чутливість. Зміну довжини хвилі Брегга, викликане подовженням та зміною температури решітки, можна описати виразом:

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_e}{\partial L} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial L}\right)\Delta L + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_e}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T. \quad (3.35)$$

Перша частина виразу показує вплив подовження, друга частина показує вплив зміни температури на волокно. Зміни температури та деформації решітки впливають зміну показника заломлення серцевини і довжини періоду решітки. Вплив деформації та зміни температури на зміну довжини хвилі Брегга можна записати у вигляді залежності:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left[(1 - p_c) \varepsilon + (\alpha_1 + \alpha_n) \Delta T \right], \quad (3.36)$$

де ε - відносна деформація, $\alpha_1 = \left(\frac{1}{\Lambda}\right)\left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)$ - коефіцієнт температурного розширення волокна, $\alpha_n = \left(\frac{1}{n_e}\right)\left(\frac{\partial n_e}{\partial T}\right)$ - температурно – оптичний коефіцієнт, p_c – коефіцієнт оптичного викривлення, що визначається за формулою:

$$p_c = \frac{n_e^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (3.37)$$

де p_{11} і p_{12} - пружнооптичні коефіцієнти, ν – постійна Пуассона.

Згадана раніше чутливість до деформації K_ε для фіксованої температури, тобто. $\Delta T = 0$, дорівнює:

$$K_\varepsilon = \frac{\Delta \lambda_B}{\varepsilon} = k_\varepsilon \lambda_\varepsilon, \quad (3.38)$$

де k_ε - відносна деформаційна чутливість, яка для $\Delta T = 0$

$$k_\varepsilon = \frac{\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B}}{\varepsilon} = 1 - p_c. \quad (3.39)$$

Для легованого германієм кварцового скла:

$$p_{11} = 0,113, \quad p_{12} = 0,252, \quad \nu_p = 0,16, \quad n_{eff} = 1,482, \quad a \quad p_c \approx 0,22.$$

Температурна чутливість брегівської решітки при постійній напрузі дорівнює:

$$K_T = \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = k_T \lambda_B, \quad (3.40)$$

де k_T - коефіцієнт відносної температурної чутливості, що визначається як:

$$k_T = \frac{\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B}}{\Delta T}. \quad (3.41)$$

Для кварцового скла: $\alpha_\lambda = 0,55 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_\Pi = 8,6 \cdot 10^{-6}$. Для брегівської решітки з брегівською хвилею 1550 нм:

$$K_\varepsilon = 1,2 \text{ нм} / \mu\varepsilon, \text{ зазвичай } 0,0011 \text{ нм} / \mu\varepsilon,$$

$$K_T = 14,2 \text{ нм} / K, \text{ зазвичай } 0,002 \text{ нм} / K.$$

Визначення натягу лінії буде ґрунтуватися на вимірі подовження робочого провідника на заданій довжині вимірювальної ділянки. Використовуючи рівняння стану лінії (3.9), прийнявши зміну температури за 0 К, можна визначити зміну довжини цього відрізка при заданій довжині вимірювальної ділянки та прийнятій максимальній робочій напрузі для очікуваного (передбачуваного) діапазону виміру. Як датчик тут використовуватиметься оптоволокну з бреггівськими решітками.

Використання бреггівської решітки як датчик подовження змушує враховувати вплив зміни робочої температури лінії на спектральні характеристики решітки. Відомо, що напруги викликають зміну центральної бреггівської довжини хвилі на $\Delta\lambda_B(\varepsilon)$. Цю зміну можна визначити із співвідношення:

$$\frac{\Delta\lambda_B(\varepsilon)}{\lambda_B} = (1 - p_c) \varepsilon, \quad (3.42)$$

де $\Delta\lambda_B(\varepsilon)$ - зміна довжини хвилі Брегга під дією напруги ε , p_c - фотопружна постійна матеріалу серцевини оптичного волокна, що визначається відношенням (3.15), ε - відносна деформація решітки, що являється іншою формою залежності (3.37).

3.3 Аналіз поведінки електричної мережі з конкретним робочим провідником під механічним впливом та впливом температури

Аналіз показує, що важливим параметром безпечне використання ПЛЕП є збільшення провисання при температурі кабелю в діапазоні 40–80 °С. У прольотах довжиною 300 м, а для кабелів АЛФ-6 провисання збільшення в цьому діапазоні температур становить приблизно 3 см/К. Діапазон температур, прийнятий для аналізу становить від -50 °С до 180 °С. У реальних умовах одночасне підвищення напруги і робочої температури лінії може відбуватися тільки за рахунок механічно навантажуючи його зовнішнім фактором,

наприклад, морозиво. Механізм збільшення або зменшення лінійної напруги показаний на рис. 3.7.

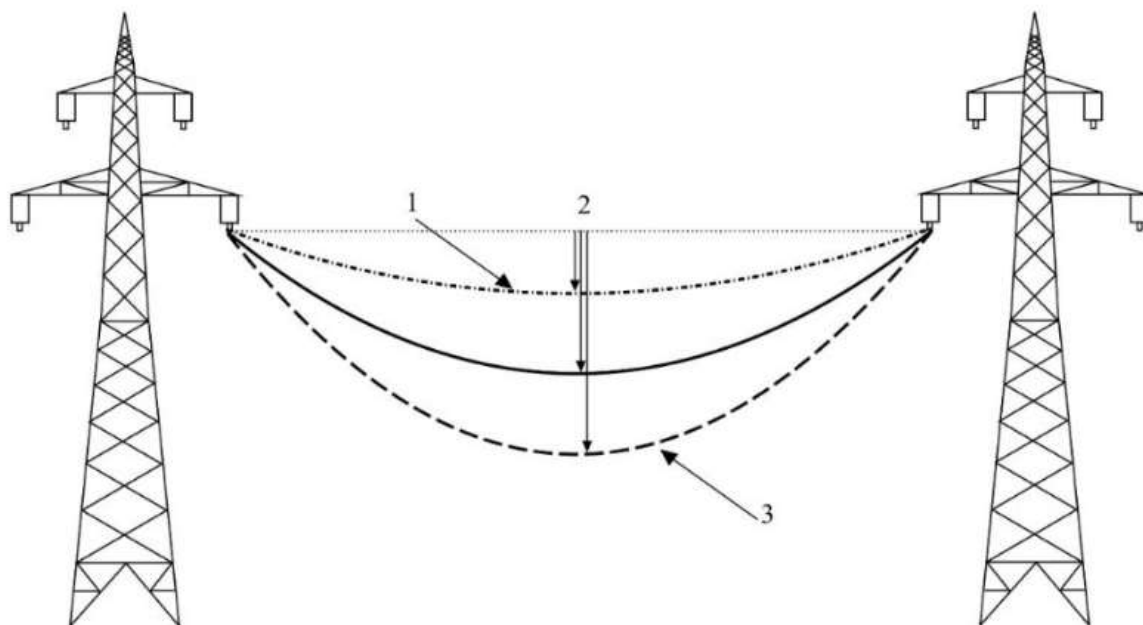


Рисунок 3.7 – Схема зміни величини провису в залежності від температури робочого провідника лінії. 1 – зменшення температури, збільшення напруги, 2 – провис, 3 – збільшення температури, зменшення напруги [76]

Іній утворюється за рахунок осідання кристалів льоду на робочій лінії, тому вона не може виникнути за температури лінії вище 10°C .

Це означає, що механічне підвищення напруги робочої лінії може відбуватися тільки при низьких температурах. Звідси випливає, що зсув бреггівської довжини хвилі у бік великих довжин хвиль може відбуватися лише за низьких температур. Тому можна припустити, що в діапазоні температур від 20°C до 100°C відсутні напруги, що перевищують 50 МПа, а максимально можливою напругою 160 МПа є діапазон температур $-50^{\circ}\text{C} \dots +20^{\circ}\text{C}$.

За цих припущень певні зрушення центральних довжин хвиль, викликані екстремальними умовами фактичної роботи лінії, значення якої представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення зсувів довжин хвиль Брегга для крайніх робочих зон кабелю ПЛЕП

Температура, °C	Зміщення $\Delta\lambda_B$ відносно температури, нм	Напруга, МПа	Зміщення $\Delta\lambda_B$ відносно напруги, нм	Накопичений стрес $\Delta\lambda_B$
-50 ~ 20	1,74	160	6,106	7,846
20 ~ 180	4,06	50	1,908	5,968

Проаналізовані випробування повинні дозволити визначити можливість адаптації вимірювальної головки до різних матеріалів, що використовуються на практиці, повітряних ліній електропередач і до змінних кліматичних умов, що впливають на лінію.

Для розробки методу одночасного вимірювання температури та подовження ЛЕП необхідно визначити її математичну модель та можливу мінливість умов, у яких вона зможе працювати. Це дозволить за допомогою оптоволоконних технологій розробити необхідні датчики для одночасного вимірювання робочої температури лінії, так і її подовження.

Фотонні оптичні волокна та бреггівські решітки, записані як на звичайних волоконних, так і на фотонних оптичних волокнах, можуть використовуватися для одночасного вимірювання температури та подовження.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розділ з охорони праці бакалаврської роботи направлений на розробку системи заходів з безпечної експлуатації ліній зв'язку. Отже, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює їхнє обслуговування, впливають такі фізичні, хімічні та трудового процесу небезпечні та шкідливі виробничі фактори [16, 17]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної організації виконання робіт

4.1.1 Технічні рішення щодо безпечної організації робочих місць з обслуговування ліній зв'язку

Цих правил потрібно дотримуватись під час виконання таких робіт [18]:

- на кабельних та повітряних лініях зв'язку;
- на обладнанні і пристроях засобів диспетчерського та технологічного керування (ЗДТК), розміщених в апаратних залах, кросах, радіовузлах зв'язку і приміщеннях на енергетичних підприємствах;
- в пристроях зв'язку, установках високочастотного зв'язку, релейного захисту і телемеханіки по повітряних лініях електропередавання;

- в установках промислового телебачення і обчислювальних приладах.

Керівником робіт, що виконуються на лініях зв'язку, а також нижчеперелічених, слід призначати працівника з групою V зі складу керівників або спеціалістів, зокрема, для таких робіт:

- з демонтажу, встановлення опор всіх типів і замінювання проводів (тросів) в охоронній зоні ПЛ, що перебувають під напругою, а також у місцях перетинання з іншими ПЛ, фідерними радіотрансляційними лініями I класу, із залізницями та шосейними дорогами, судноплавними річками;

- із замінювання і монтажу проводів ПЛЗ у зоні наведеної напруги, комунікацій та інтенсивного руху транспорту;

- з улаштування щоглових переходів, замінювання кінцевих і кутових опор;

- з випробування КЛЗ;

- з апаратурою НПП;

- на фільтрах приєднання, без вмикання заземлювального ножа, за винятком оглядів фільтрів без їх розкривання.

Працівнику, який видає наряд, дозволяється призначати керівника робіт і під час проведення інших робіт, крім зазначених в цьому пункті.

Допускається суміщення керівником робіт зі складу виробничих працівників обов'язків допускателя у пристроях ЗДТК, якщо для підготовки робочого місця не вимагається оперувати комутаційними апаратами (крім ножа фільтра приєднання). У цьому разі допускатч може знімати запобіжники і разом з одним із членів бригади встановлювати переносні заземлення.

У пристроях ЗДТК за розпорядженням можна виконувати такі роботи:

- на вимкнених ПЛЗ і КЛЗ, які не підлягають впливу ліній електропередавання і фідерних радіотрансляційних ліній I класу;

- ремонт, монтаж і налагодження пристроїв ЗДТК, крім апаратури в НПП і апаратури ВЧ-зв'язку, розміщеної в РУ, включаючи елементи обробки і приєднання високочастотних каналів зв'язку.

Виконувати роботи на ділянках перетинання і зближення кабельних або повітряних ліній зв'язку з повітряними лініями електропередавання, що перебувають під напругою, слід з врахуванням вимог цих Правил.

Влаштування перетинів і ремонт проводів ПЛЗ, що перетинають проводи контактної мережі електрифікованих залізниць, трамваїв та тролейбусів, необхідно виконувати після вимкнення і заземлення на місці робіт контактної мережі відповідно до розробленого ППР та у присутності представника дистанції (району) контактної мережі.

У разі перетягування проводів зв'язку над проводами ліній електропередавання на вулицях населених пунктів слід виставляти сигнальників з прапорцями для попередження перехожих і водіїв транспорту.

У разі натягування та регулювання проводів зв'язку, що проходять під лінією електропередавання, слід виконувати такі вимоги. Перед початком виконання робіт необхідно перевірити відсутність напруги на проводах ПЛЗ (між проводами і землею). Забороняється у разі виявлення на проводах ПЛЗ напруги понад 42 В починати роботу до з'ясування причини появи напруги і до зниження її нижче 42 В.

У разі виконання робіт на ПЛЗ, які перебувають під наведеною напругою, слід дотримуватись вимог щодо робіт на ПЛ під наведеною напругою. Заземлення проводів ПЛЗ, що знаходяться під наведеною напругою, виконується через дренажні котушки за допомогою штанг для накладання переносних заземлень.

У разі виконання робіт на ПЛЗ під наведеною напругою проводи, які розкочують і монтують, слід заземлити на початку прольоту і безпосередньо біля місця роботи. Провід, який лежить на землі, не повинен доторкатись до лінійних проводів і проводів, розкочених на наступних ділянках. Регулювати стрілу провисання і кріпити провід на ділянці слід до з'єднання його з проводом попередньої ділянки. Перед з'єднанням окремих відрізків проводи на місці робіт слід заземлювати з обох боків від місця з'єднання.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огороджувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;
- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;
- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишились під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в

електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [18], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні встановлюють оптимальну та допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 4.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	до 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони та зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше їм.

3. Для забезпечення нормованих значень руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил при свердлінні отворів і різанні металевих виробів їх ГДК наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони в кабіні проектувальника установки

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
Пил нетоксичний	Максимально разова	Середньо добова	4
	0,5	0,15	

Для забезпечення параметрів мікроклімату та складу повітря робочої зони відповідно до проектом передбачено-періодичне провітрювання приміщень та використання засобів індивідуального захисту.

4.2.3 Виробниче освітлення

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормуємо освітлення у виробничих приміщеннях. Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «г».

Нормовані значення освітленості наведені в таблиці 4. 3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 4,5 метра.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харакка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всьог о	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	г	середній великий великий	світлий світлий середній	-	200	4	2,4

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

4.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Основним джерелом шуму є механічний інструмент: дрелі, перфоратори, зварювальний апарат. Допустимі рівні звукового тиску в октавних смугах частот, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях в виробничих приміщеннях і на території підприємств представлені в таблиці 4.4.

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму потрібно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.

- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало

шумові вентилятори.

- організувати перерви в роботі (15 хвилин), після кожної години роботи з пристроями що є джерелом шуму.

4.2.5 Виробничі вібрації

Джерелами вібрацій в умовах, що розглядаються в проекті, являються насосні агрегати, вентилятори, дрілі, болгарки, перфоратори, які відносяться до типу загальної вібрації.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$	ДБ	$\text{м}\cdot\text{с}^{-2}\cdot 10^{-2}$	ДБ
За	Z_o, Y_o, X_o	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

4.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для

промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Приміщення п/ст за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В з зонами П-III (місця, де зберігаються тверді горючі речовини).

Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Будівля, в якій розташовані приміщення п/ст, характеризується II ступенем вогнестійкості. До II ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 наведено в таблиці 4.6.

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 4.7.

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В виробничому приміщенні, відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м² наступна: до 1 – 100 м².

Таблиця 4.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхів (у т.ч. горючі та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Таблиця 4.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвилинах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуршлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекрытия	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.8 (знаменник).

Таблиця 4.8 - Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
I, II	6/9	8/9	10/12

На території п/ст встановлено 16 вогнегасників ВП-5.

ВИСНОВОК

Впровадження волоконно-оптичних ліній зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії є важливим кроком у напрямку створення більш стійких, ефективних та екологічно чистих енергетичних систем. Ці технології відкривають нові можливості для оптимізації енергетичного сектору та забезпечення сталого розвитку.

Волоконно-оптичні лінії зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії відіграють важливу роль у створенні ефективних, надійних та стійких енергетичних систем майбутнього. За допомогою оптичних технологій передачі даних можливе швидке та ефективне моніторинг та керування розподільними мережами, що дозволяє оптимізувати їхню роботу та забезпечувати стабільне електропостачання.

Переваги використання ВОЛЗ у розподільних мережах з ВДЕ включають велику пропускну здатність, низькі втрати сигналу, високу надійність та стійкість до електромагнітних перешкод. Інтеграція оптичних систем зв'язку дозволяє ефективно моніторити та управляти відновлюваними джерелами енергії, оптимізувати розподіл електроенергії та підвищувати загальну надійність мережі.

Незважаючи на виклики, такі як високі витрати на встановлення та підтримку систем, необхідність сумісності з існуючою інфраструктурою та проблеми з безпекою даних, інтеграція ВОЛЗ у розподільні електричні мережі з ВДЕ вважається стратегічно важливим кроком у напрямку створення ефективних та стало-орієнтованих енергетичних систем, які сприяють зниженню викидів CO₂ та забезпеченню сталого розвитку.

Отже, подальші дослідження та розвиток технологій ВОЛЗ у контексті розподільних електричних мереж з ВДЕ є важливими для забезпечення сталого, надійного та ефективного електропостачання в майбутньому.

ЛІТЕРАТУРА

1. Smith, J. (2020). "Optical Fiber Communication Systems." McGraw-Hill Education.
2. Wang, L., & Liu, X. (2018). "Integration of Renewable Energy Sources and Smart Grid: Challenges, Trends and Solutions." Springer.
3. Li, Z., Zhang, J., & Xu, Z. (2019). "Fiber Optic Sensors for Power Industry Applications." CRC Press.
4. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2022). "Renewable Power Generation Costs in 2022." IRENA Publication.
5. В.Б. Каток, І.Е. Руденко, П.М. Однорог (2016). Волоконно-оптичні лінії зв'язку. - Київ.
6. Siemens. (2022). Optical Communication Solutions for Distribution Networks. Retrieved from [link].
7. Miller, A., & Smith, B. (2019). Optic Fiber Integration in Renewable Energy Distribution Grids. *Journal of Renewable Energy*, 25(3), 145-162.
8. П. Д. Лежнюк, Н. М. Черемісін, В. В. Черкашина Волоконно-оптичні технології в моніторинзі повітряних ліній електропередавання // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2015. - №2. - С 106-110.
9. Іванов, О. (2020). Інтеграція оптичних ліній зв'язку у розподільні електричні мережі з відновлюваними джерелами енергії: переваги та виклики. *Електроенергетика України*, 2(15), 45-58.
10. Петрова, Н. М. (2021). Використання волоконно-оптичних технологій у сучасних електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*, 4(28), 112-125.
11. Гриценко, В. (2019). Роль оптичних ліній зв'язку у підвищенні надійності електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. *Енергетика та ресурсозбереження*, 5(20), 78-91.
12. Ковальов, О. В. (2022). Інтеграція волоконно-оптичних технологій у розподільних електричних мережах: виклики та перспективи. *Наукові записки*

Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Електроенергетика та електромеханіка, 2(45), 34-47.

13. Сидоренко, О. М. (2020). Використання оптичних систем зв'язку у сучасних енергетичних мережах. Електротехніка та електроенергетика, 3(17), 56-67.

14. Петренко, В. П. (2021). Переваги використання волоконно-оптичних систем зв'язку у розподільних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Технічні науки та інженерія, 4(29), 89-102.

15. Кузьмін, І. В. (2019). Інноваційні технології використання оптичних ліній зв'язку для моніторингу та керування електромережами з ВДЕ. Енергетичні системи та екологія, 1(12), 34-47.

16. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

17. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

18. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

19. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

20. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

21. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

22. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
23. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
24. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
25. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
26. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
27. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
28. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
29. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
30. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
31. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА
НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Волоконно-оптичні лінії зв'язку в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії»

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота

(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки

(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unichesk

Оригінальність 75,5 %

Схожість 24,5 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Вишневецький С.Я.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichesk щодо роботи.

Автор роботи

(підпис)

Завадський Є.О.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Лежнюк П.Д.

(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
ФЕЕМ
Кафедра ЕСС

«ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ»

Виконав
Керівник

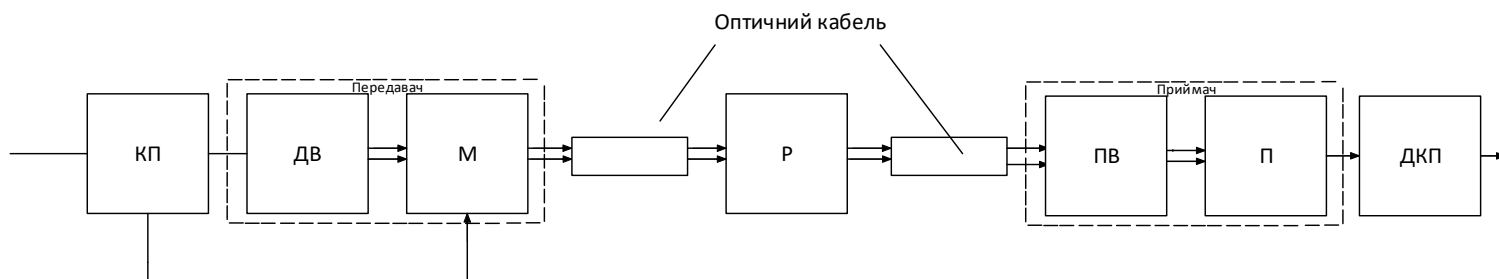
ст. гр. 2ЕЕ-206 Завадський Є.О.
д.т.н., професор Лежнюк П.Д.

Вінниця 2024

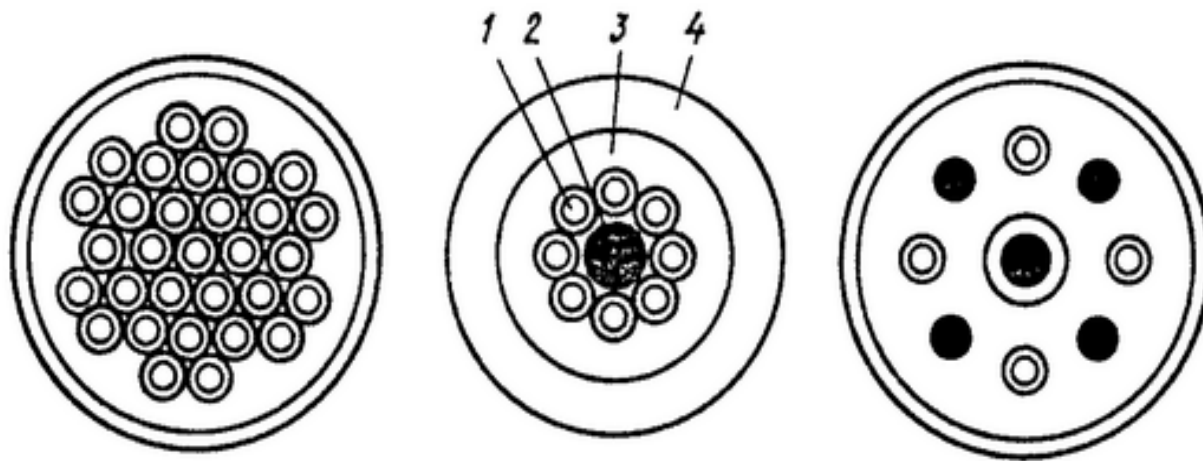
Актуальність

Зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергетичних системах вимагає впровадження сучасних технологій зв'язку для ефективного управління та моніторингу розподільних електричних мереж. Волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) стають ключовим елементом у забезпеченні надійного, швидкого і захищеного обміну даними між компонентами розподільних мереж, що використовують ВДЕ. ВОЛЗ дозволяють передавати великі обсяги даних на великі відстані з мінімальними затримками і втратами, що є критично важливим для інтеграції та управління ВДЕ.

Структурна схема волоконно-оптичної лінії зв'язку



Будова оптичних кабелів різноманітного призначення



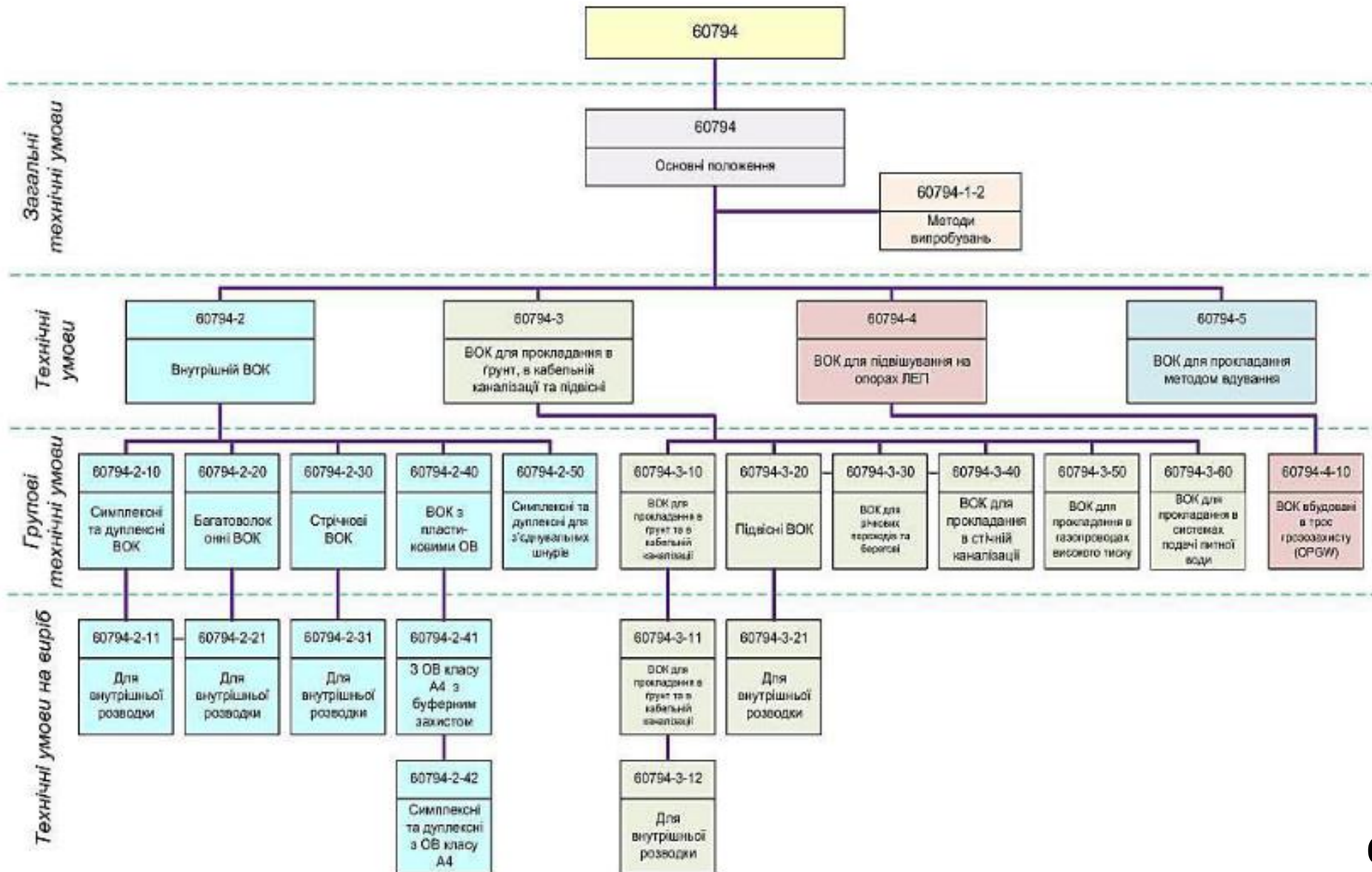
1 - волокно, 2 - зміцнювальний елемент, 3 - внутрішня оболонка; 4 - зовнішня оболонка

Класифікація волоконно-оптичних ліній зв'язку

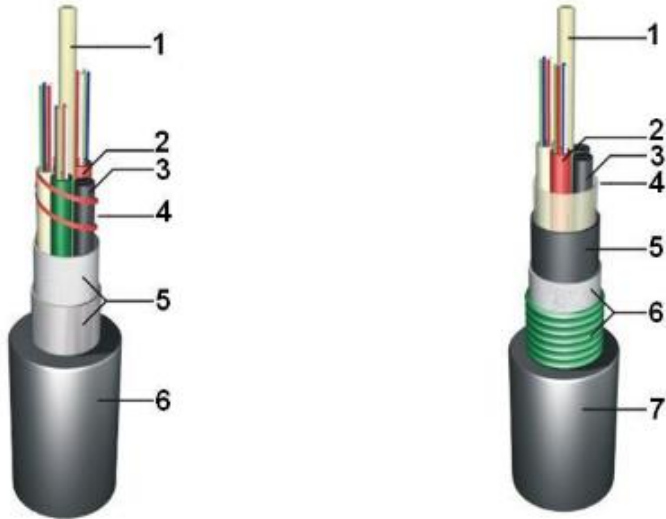
ВОЛЗ можуть класифікуватись за різними ознаками: галузь застосування, наявність чи відсутність металевих елементів, кількість та тип оптичних волокон тощо. ВОЛЗ зв'язку традиційно класифікуються за умовами прокладання та експлуатації:

- ▶ для безпосереднього прокладання в ґрунт;
- ▶ для прокладання в каналах кабельної каналізації та тунелях;
- ▶ для підвішування на опорах (ЛЕП, контактної мережі залізниць);
- ▶ для прокладання через водні перешкоди;
- ▶ морські;
- ▶ внутрішні;
- ▶ для абонентської проводки та міжблочних з'єднань.

Система стандартів ІЕС по ВОЛЗ



Типові конструкції волоконно-оптичних ліній зв'язку



1 - центральний силовий елемент
 2 - модуль з оптичними волокнами
 3 - кордель заповнення (для щільного укладання елементів в осерді ОК, якщо більшої кількості модулів з оптичними волокнами не потрібно)
 4 - гідрофобний заповнювач
 5 - водоблокуюча стрічка та алюмінієва скріплююча стрічка
 6 - зовнішня поліетиленова оболонка
 7 - зовнішня поліетиленова оболонка

1 - центральний силовий елемент
 2 - модуль з оптичними волокнами
 3 - кордель заповнення
 4 - гідрофобний заповнювач
 5 - внутрішня поліетиленова оболонка
 6 - водоблокуюча стрічка та гофрована сталева стрічка для захисту від пошкоджень кабелю гризунами
 7 - зовнішня поліетиленова оболонка

Приклад конструкції оптичного кабелю

Найбільш широкого застосування набули такі типи вторинного захисного покриття:

- за допомогою вільного укладання ОВ в спеціальній трубці (оптичному модулі) або в пазу профільованого осердя;
- за допомогою жорстких конструкцій;
- стрічкові структури.

Інтеграція ВОЛЗ в розподільні мережі з ВДЕ

Моніторинг та управління в реальному часі: ВОЛЗ забезпечують надійний зв'язок між генераторами ВДЕ, системами зберігання енергії та споживачами. Це дозволяє здійснювати моніторинг і управління в реальному часі, що є необхідним для балансування виробництва та споживання енергії, швидкого реагування на зміни в мережі та оптимізації роботи всіх компонентів.

Інтеграція смарт-метрів та сенсорів: Смарт-метри та сенсори, розташовані у вузлових точках мережі, збирають дані про енергоспоживання, якість енергії, стан обладнання та інші параметри. ВОЛЗ забезпечують швидку та надійну передачу цих даних до центрів управління, де вони аналізуються для прийняття оптимальних рішень.

Підвищення надійності та ефективності: Завдяки ВОЛЗ, розподільні мережі з ВДЕ можуть швидше виявляти та реагувати на аварійні ситуації, знижуючи час простою та підвищуючи загальну надійність мережі. Висока швидкість передачі даних також дозволяє оптимізувати роботу мережі, мінімізуючи втрати енергії та покращуючи ефективність використання ресурсів.

Висновок

Волоконно-оптичні лінії зв'язку є ключовим елементом для забезпечення ефективної роботи розподільних електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії. Вони надають високу пропускну здатність, низькі затримки, стійкість до електромагнітних завад та високий рівень безпеки даних. Інтеграція ВОЛЗ дозволяє здійснювати моніторинг та управління в реальному часі, підвищуючи надійність та ефективність мереж. Незважаючи на виклики, такі як високі початкові витрати та необхідність модернізації інфраструктури, перспективи розвитку ВОЛЗ в розподільних мережах з ВДЕ є дуже обнадійливими. Це обумовлено рядом важливих факторів:

1. Надійність та швидкість передачі даних: ВОЛЗ забезпечують високу швидкість та надійність передачі даних, що критично важливо для моніторингу та управління електричними мережами. Завдяки високій пропускній здатності та низьким затримкам, оптичні лінії зв'язку дозволяють оперативно передавати великі обсяги даних, що необхідно для ефективного управління розподілом енергії, особливо з відновлюваних джерел.
2. Віддалений моніторинг та управління: ВОЛЗ забезпечують можливість віддаленого моніторингу та управління компонентами електричної мережі, включаючи генератори відновлюваної енергії (сонячні панелі, вітряки тощо). Це дозволяє операторам швидко реагувати на зміни в мережі, оптимізуючи розподіл енергії та зменшуючи втрати.
3. Інтеграція відновлюваних джерел енергії: Відновлювані джерела енергії, такі як сонячні та вітрові електростанції, мають варіабельний характер виробництва електроенергії. ВОЛЗ дозволяють оперативно передавати дані про виробництво та споживання енергії, забезпечуючи балансування мережі та інтеграцію відновлюваних джерел в загальну електромережу.
4. Синхронізація та координація: Для забезпечення стабільної роботи електричної мережі необхідна точна синхронізація та координація роботи різних її компонентів. ВОЛЗ забезпечують точну передачу синхросигналів, що дозволяє узгоджено працювати різним елементам мережі, зокрема, при змінних умовах генерації відновлюваної енергії.
5. Безпека та стійкість до перешкод: ВОЛЗ мають високу стійкість до електромагнітних перешкод, що робить їх ідеальним вибором для використання в електричних мережах. Вони не піддаються впливу електромагнітних полів, що забезпечує безперебійну передачу даних навіть у складних умовах.
6. Розвиток "розумних" мереж (Smart Grids): ВОЛЗ є важливою частиною "розумних" мереж, які використовують сучасні технології для покращення ефективності та надійності електропостачання. Вони забезпечують двосторонню передачу даних між споживачами та постачальниками, що дозволяє в реальному часі регулювати навантаження, виявляти несправності та оптимізувати роботу мережі.