

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

МОДЕЛЬ РОЗРАХУНУ ОПТИЧНОЇ ТРАСИ ДЛЯ
ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ФТОІМ-22-1
Бобровніков В.О.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та
оптоінформатика»
(повна назва освітньої програми)

Керівник зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О.С.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Фізичних основ електронної техніки
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Бобровнікову Вадиму Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Модель розрахунку оптичної траси для передачі інформації

затверджена наказом університету від « 03 » листопада 2023 р. № 1285 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Траса ВОЛП: Харків Вовчанськ; кількість ПЦП – 640;

показник заломлення: $n_1=1,474$; відносна різниця показників заломлення – 0,006;

робоча довжина хвилі $\lambda_p = 1,29$ мкм; питомий опір ґрунту – 80 Ом·м; поверхневий

коефіцієнт $K_p = 2,6$; довжина ділянки зближення $L_1 = 5$ км, $L_2 = 6$ км; ширина

зближення між ЛЕП і ВОЛП: $a_1 = 90$ м, $a_2 = 50$ м, $a_3 = 60$ м; струм КЗ на початку

зближення $I_{кз_{max}} = 6,5$ кА, в кінці зближення $I_{кз_{min}} = 1,5$ кА;

нормальний робочий струм ЛЕП $I_p = 20$ А.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Вибір траси, оптичного кабелю та системи передачі.

2 Розрахунок оптичних параметрів волокон і параметрів передачі кабелів.

3 Розрахунок довжини ділянки регенерації ВОСП.

4 Захист оптичних кабелів від впливу зовнішніх електромагнітних полів.

5. Організація робіт із будівництва та монтажу проектованої лінії.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій _____

Розрахунки волоконно-оптичних ліній передач – 2 арк. _____

Демонстраційний матеріал – 13 слайдів _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про оптичні траси для передачі інформації	01.09.23–02.10.23	Виконано
2	Виконання розрахунків оптичних параметрів волокон та передачі кабелів	06.10.23–27.10.23	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків довжини ділянки регенерації ВОСП	02.11.23–25.11.23	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів ВОСП	19.11.23–25.11.23	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	02.12.23–18.12.23	Виконано
6	Оформлення графічних та демонстраційних матеріалів	22.12.23–03.01.24	Виконано
7	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	04.01.24–15.01.24	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	18.01.24–19.01.24	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.01.24–24.01.24	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ зав. каф. ФОЕТ Гнатенко О.С.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 37 с., 5 рис., 5 табл., 2 додатки, 12 джерел.

ОПТИЧНИЙ КАБЕЛЬ, ОПТИЧНЕ ВОЛОКНО, ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ, ВОЛОКОННО-ОПТИЧНА ЛІНІЯ ПЕРЕДАЧІ, МАГІСТРАЛЬНА ЛІНІЯ ЗВ'ЯЗКУ, ГРОЗОСТІЙКОСТЬ, РЕГЕНЕРАЦІЯ.

Мета роботи – проектування волоконно-оптичної лінії передачі.

Об'єкт дослідження – волоконно-оптична лінія передачі.

Метод дослідження – теоретичний та розрахунковий.

У роботі розглянуто розв'язання конкретних завдань при проектуванні траси волоконно-оптичної лінії передачі. Створено розрахунковий проєкт для вибіру оптичного кабелю, розміщення регенераційних пунктів, захисту оптичного кабелю від впливу ліній електропередач, дана оцінка грозостійкості лінії, розраховані показники надійності волоконно-оптичної лінії передачі та складено план організації будівельно-монтажних робіт.

На основі результатів розрахунків створено проєкт магістральної лінії зв'язку .

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 37 pp., 5 figures, 5 tables, 2 appendices, 12 sources.

OPTICAL CABLE, OPTICAL FIBER, FIBER-OPTIC TRANSMISSION SYSTEMS, FIBER-OPTIC TRANSMISSION LINE, TRUNK COMMUNICATION LINE, LIGHTNING PROTECTION , REGENERATION

The purpose of the work is to design a fiber-optic transmission line.

The object of research is a fiber-optic transmission line.

The research method is theoretical and calculation.

The solution of specific tasks in the design of the route of the fiber-optic transmission line is considered in the work. A calculation project was created for the selection of an optical cable, placement of regeneration points, protection of the optical cable from the influence of power lines, an estimate of the lightning resistance of the line was given, the reliability indicators of the fiber-optic transmission line were calculated, and a plan for the organization of construction and installation work was drawn up.

Based on the results of the calculations, a project of the main communication line was created.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Вибір траси, оптичного кабелю та системи передачі.....	8
1.1 Траса та картографічна ділянка	8
1.2 Типи оптичних волокон та кабелів.....	10
1.3 Вибір апаратури ВОСП.....	11
2 Розрахунок оптичних параметрів волокон і параметрів передачі кабелів.....	13
2.1 Оптичні параметри та характеристики волокон	13
2.2 Розрахунок коефіцієнту втрат в оптичних волокнах.....	15
2.3 Розрахунок погонної дисперсії сигналу	17
3 Розрахунок довжини ділянки регенерації ВОСП, діаграма енергетичних	19
рівнів	19
3.1 Розрахунок довжини ділянки регенерації за загасанням	19
3.2 Розрахунок довжини відрізка регенерації з урахуванням дисперсії	21
3.3 Організація розташування пунктів регенерації на маршруті волоконно- оптичного лінійного проводу	21
3.4 Створення графіка рівнів енергетичного потенціалу волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) на відстані одного відрізка регенерації.....	22
4 Захист оптичних кабелів від зовнішніх впливів.....	25
4.1 Захист оптичних кабелів від природніх енергій	25
4.2 Розрахунок небезпечних магнітних впливів.....	28
5 Розрахунок параметрів надійності лінійних споруд волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП)	32
Висновки.....	35
Перелік джерел посилання	36
Додаток А Розрахунки волоконно-оптичних ліній передачі.....	38
Додаток Б Демонстраційний матеріал	40

ВСТУП

Протягом останнього періоду розвитку в галузі зв'язку волоконно-оптичні кабелі (ВОК) та системи передачі через оптичні волокна (ВОСП) стали визнаними лідерами. За своїми характеристиками вони суттєво випереджають усі традиційні кабельні системи зв'язку. Використання волоконно-оптичних кабелів стало ключовим напрямком науково-технічного прогресу. Оптичні системи та кабелі застосовуються не лише для організації телефонного зв'язку в містах та міжміському, але й для кабельного телебачення, відеотелефонії, радіомовлення, комп'ютерної техніки, технологічного зв'язку та інших сфер.

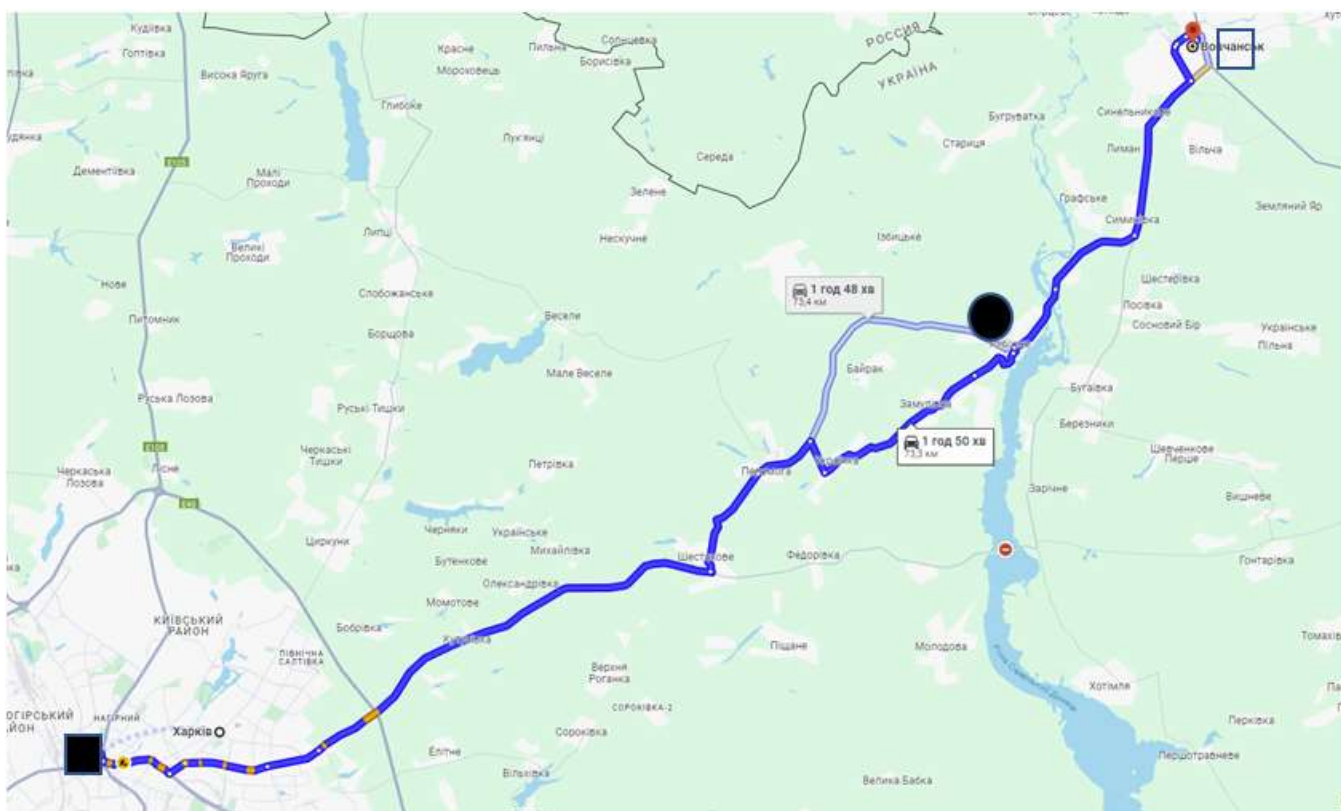
Використовуючи волоконно-оптичний зв'язок, обсяг передаваної інформації різко збільшується у порівнянні із такими поширеними засобами, як супутниковий зв'язок і радіорелейні лінії. Це пояснюється тим, що волоконно-оптичні системи передачі мають широкий діапазон пропускання.

Метою цієї роботи є вирішення завдання щодо проектування лінії зв'язку між двома містами з урахуванням особливостей місцевості на трасі лінії. Також важливо визначити її надійність, стійкість до грози, довжину ділянки регенерації та вплив ліній електропередачі на оптичний кабель з точки зору небезпечного магнітного впливу.

1 ВИБІР ТРАСИ, ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ ТА СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ

1.1 Траса та картографічна ділянка

Волоконно-оптичної траси (ВОТ) (рис. 1.1), вибрана для розрахунку, проходить по Харківській області через населенні пункти: Харківволоконно-оптична лінія передачі (ВОЛП) проходить через чотири області та такі населені пункти, як: Харків, Рубіжне, Вовчанськ. Параметри траси наведені в таблиці 1.1 [1].



- – пункт початку прокладання (ППП); ● – пункт регенерації (ПР);
- – обслуговуваний регенераційний пункт;

Рисунок 1.1 – Зображення карти ВОТ

Таблиця 1.1 – Параметри трас лінії передачі

	ППП	ПР-1	КПП
Траса (довжина), км	0	54,4	73,3
Ґрунти (категорії)	II-III	II-III	II-III
Опір ґрунту ρ , Ом·м	80	80	80
Грозодіяльність T , год/рік	30	30	30
Довжина кабелю	0	60	20

Характеристика ВОТ наведена в табл. 1.2

Таблиця 1.2 – Загальна характеристика варіантів траси ВОЛП [1]

№ зп	Найменування	Одиниці	Кількість	Примітка
1	ВОТ, довжина	км	73,3	
2	Картографія: – з населенням; – без перешкод; – лісосмуга.	км км км	23,3 30 20	
3	Ґрунти, категорії: – II-III; – IV; – V-VI	км км км	73,3 0 0	
4	Автомобільні дороги: – з асфальтовим покриттям; – з щебневим покриттям; – ґрунтові дороги; – бездоріжжя.	км км км	73,0 0,3 0 0	Паралельне проходження
6	Пересічення з: – автодорогами; – залізничними дорогами.	пер. пер.	10 7	
7	Водні перешкоди: – річки несудоходні;	пер/м пер/м	2	
8	Прокладання ОК	км	73,3	
9	Число ПР	шт.	1	

1.2 Типи оптичних волокон та кабелів

Обираємо одномодове оптичне волокно зі східчастим профілем стандарту G.652D, яке має максимальний коефіцієнт згасання на довжині хвилі $1,31 \text{ мкм} \leq 0,36 \text{ дБ/км}$, довжину хвилі нульової дисперсії $\lambda_0 = 1310 \text{ нм}$, коефіцієнт хроматичної дисперсії $D(\lambda) = \leq 3,5 \text{ пс/(нм} \cdot \text{км)}$, коефіцієнт кутової дисперсії $\leq 0,092 \text{ пс/(нм}^2 \cdot \text{км)}$. Вибір типу оптичного волокна та кабелю.

При виборі типу оптичного волокна (ОВ) враховують кількість призначених до передачі каналів, швидкість передачі інформації, відстань між кінцевими пунктами і населеними пунктами по трасі ВОЛП, а також принципи побудови мережі зв'язку, яке призначене вирішувати дана лінія передачі.

Вибираємо одномодове оптичне волокно зі східчастим профілем стандарту G.652D. Це волокно має максимальний коефіцієнт згасання на довжині хвилі $1,3 \text{ мкм} \leq 0,36 \text{ дБ/км}$, довжину хвилі нульової дисперсії $\lambda_0 = 1310 \text{ нм}$, коефіцієнт хроматичної дисперсії $D(\lambda) \leq 3,5 \text{ пс/(нм} \cdot \text{км)}$, коефіцієнт кутової дисперсії $\leq 0,092 \text{ пс/(нм}^2 \cdot \text{км)}$.

Вибір конструкції оптичного кабелю визначається вибраним числом оптичних волокон, умовами та планованим способом прокладання та експлуатації [1–3].

Кількісні характеристики оптичних волокон розраховується за виразом [1–2]:

$$N_{\text{ОВ}} = 2 \cdot \left[\frac{N_{\text{ПЦП}}}{N_{\text{ПЦП ВОСП}}} \right] \cdot [1 + 0,5],$$

де $N_{\text{ПЦП}}$ – задане за варіантом число каналів;

$N_{\text{ПЦП ВОСП}}$ – число каналів апаратури ВОСП, для STM-4 = 252;

0,5 – запас загального числа оптичних волокон (відповідає 50 % загальної кількості оптичних волокон). З урахуванням цього кількісні характеристики оптичних волокон можуть бути виражені:

$$N_{\text{ОВ}} = 2 \cdot \left[\frac{640}{252} \right] \cdot 1,5 = 7,6.$$

Округлюємо результат до найближчого стандарту числа волокон – 8 штук. Вибираємо броньований волоконно-оптичний кабель модульної конструкції ОКЛБг-4-ДА(2,7) 2П-2х4Е1-0,36Ф3, 5/0, 22Н18-8/0 . Ескіз якого подано на рис. 1.2. Область застосування цього кабелю включає прокладання як ручним, так і механізованим способами в ґрунтах всіх категорій з низькою, середньою і високою корозійною агресивністю, зокрема заражених гризунами, за винятком схильних до мерзлотних деформацій. Крім того, можлива прокладка в кабельній каналізації, трубах, блоках, колекторах і т. д. при наявності ризику пошкодження гризунами [1].



Рисунок 1.2 – Ескіз поперечного перерізу кабелю ОКТБг-М(1,5)П-2х12Е1

1.3 Вибір апаратури ВОСП

Тип і характеристики ВОСП вибираються в залежності від необхідного об'єму передачі інформації, який задається числом основних (первинних) цифрових потоків, робочою довжиною хвилі апаратури, відстанню між кінцевими пунктами і населеними пунктами по трасі ВОТ, а також принципами побудови мережі зв'язку, завдання якого вирішує дана лінія передачі.

Обираємо ВОТ синхронної цифрової ієрархії STM-4, технічні характеристики, якого наведено у таблиці 1.2 [2].

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики STM-4 [1]

ЕКД	Вкорочена		Стандартна	
	Довжина хвилі, мкм	1,31	1,55	1,31
STM-4				
Кількість цифрових потоків E1	252			
Швидкість оптичного стику, Мбіт/с	622			
Середня вихідна потужність, дБм	-11	-0,5	-0,5	4,5
Мінімальна чутливість приймача, дБм	-34	-36	-39	-45
Ширина спектральної лінії випромінювання $\Delta\lambda$, нм	< 2,5	< 1,7	< 0,5	< 0,5
Максимальна хроматична дисперсія σ_K , пс/нм, на ЕКД	15000			

2 РОЗРАХУНОК ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОН І ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАЧІ КАБЕЛІВ

2.1 Оптичні параметри та характеристики волокон

Оптичне волокно виступає як напрямна система для поширення електромагнітних хвиль. Для їх поширення вздовж волокна використовується явище повного внутрішнього відбиття на межах двох діелектричних середовищ: осердя з показником заломлення n_1 і оболонки з показником заломлення n_2 , де $n_1 > n_2$.

Згідно з [4–5], значення відносної різниці показників заломлення оптичного волокна із східчастим профілем показника заломлення (ППЗ) знаходиться за допомогою виразу [2]:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2.1)$$

З формули (2.1) знайдемо значення показника заломлення для оболонки [2]:

$$n_2 = n_1 - n_1 \cdot \Delta = 1,474 - 1,474 \cdot 0,006 = 1,465. \quad (2.2)$$

Для обраного ОВ числова апертура визначається співвідношенням:

$$N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} = \sqrt{1,474^2 - 1,465^2} = 0,161. \quad (2.3)$$

Режим роботи оптичного волокна, через нормовану частота визначається:

$$V = \frac{\pi d}{\lambda_p} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (2.4)$$

де λ_p – довжина хвилі, мкм;

d – діаметр серцевини ОВ, мкм (для стандартного ОВ d = від 8,6 мкм до 9,5 мкм).

Тоді, маємо:

$$V = \frac{3,14 \cdot 8,8}{1,29} \sqrt{1,474^2 - 1,465^2} = 3,455.$$

Якщо $V < 2,405$, тоді оптичне волокно працює в одномодовому режимі; у протилежному випадку – в багатомодовому. Оскільки отримане значення $V > 2,405$, то режим роботи оптичного волокна є багатомодовим. Однак, оскільки вибраний кабель є одномодовим, подальші розрахунки будуть виконуватися для одномодового волокна. Здійснюємо розрахунки критичної частоти оптичного волокна, при якій поширюється тільки один тип хвилі – HE_{11} [1-2]:

$$f_0 = \frac{P_{nm} \cdot c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, \quad (2.5)$$

де P_{nm} – значення моди випромінювання HE_{11} – 2,405;

c – швидкість світла в вакуумі ($c = 2,998 \cdot 10^8$ м/с).

Тоді:

$$f_0 = \frac{2,405 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot 8,8 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,474^2 - 1,465^2}} = 1,618 \cdot 10^{14} \text{ Гц.}$$

Визначимо критичну довжину хвилі в ОВ за виразом:

$$\lambda_0 = \frac{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{P_{nm} \cdot n_1}, \quad (2.6)$$

$$\lambda_0 = \frac{3,14 \cdot 9 \cdot \sqrt{1,472^2 - 1,465^2}}{2,405 \cdot 1,472} = 1257 \times 10^{-9} \text{ м} = 1,257 \text{ мкм.}$$

2.2 Розрахунок коефіцієнту втрат в оптичних волокнах

Коефіцієнт згасання сигналу в оптичному волокні визначається власними та додатковими втратами [3, 6], які виникають під час виробництва волокна, збирання та прокладання оптичного кабелю.

(2.6)

$$\alpha = \alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{д}},$$

де $\alpha_{\text{в}}$ – сумарні власні втрати в оптичному волокні, дБ/км;

$\alpha_{\text{д}}$ – інші втрати в оптичному волокні, дБ/км.

Загальні втрати в оптичному волокні визначаються:

(2.7)

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{pp}} + \alpha_{\text{вм}} + \alpha_{\text{іч}} + \alpha_{\text{он}},$$

де α_{pp} – втрати за рахунок релеевського розсіювання в ОВ, дБ/км;

$\alpha_{\text{вм}}$ – матеріальні втрати, втрати за рахунок поляризацію, дБ/км;

$\alpha_{\text{іч}}$ – втрати на поглинання в інфрачервоній області спектра, дБ/км;

$\alpha_{\text{он}}$ – втрати в оптичному волокні за рахунок залишку вологи води, дБ/км.

Втрати за рахунок релеевського розсіювання [1, 4]:

(2.8)

$$\alpha_{\text{pp}} = \left(\frac{6,3 \cdot 10^{11}}{\lambda^4} \right) (1 + 215\Delta),$$

де λ – довжина хвилі, нм.

При проведенні розрахунків релеевських втрат в одномодовому оптичному волокні, компоненту у виразі (2.8) слід приблизно вважати рівною 0 при значенні 215 Δ . Втрати в матеріалі, пов'язані із втратами на поляризацію, лінійно збільшуються зі зростанням частоти, як вказано в виразі [1–2]:

$$\alpha_{\text{вм}} = \frac{8,69\pi \cdot n_1 \cdot \text{tg}\delta}{\lambda},$$

де $tg\delta$ – кут діелектричних втрат в серцевині оптичного волокна, $tg\delta = 10^{-11}$.

Ці втрати можна визначити за допомогою виразу [1, 4]:

$$\alpha_{\text{вм}} = 2,55 \times 10^{-3} \cdot e^{4,63 \cdot 10^3 / \lambda}. \quad (2.10)$$

Втрати сигналів, пов'язані з поглинанням в інфрачервоній області спектра, обумовлені хвостами резонансних поглинань іонів(атомів). Вони визначаються за виразом [4–5]:

$$\alpha_{\text{іч}} = 7,81 \times 10^{11} \cdot e^{-4,85 \cdot 10^4 / \lambda}. \quad (2.11)$$

Втрати в оптичному волокні на залишку вологи [1, 4]:

$$\alpha_{\text{он}} = \begin{cases} 0,10 \text{ дБ/км} & \text{при } \lambda = 850 \text{ нм} \\ 0,05 \text{ дБ/км} & \text{при } \lambda = 1300 \text{ нм.} \\ 0,03 \text{ дБ/км} & \text{при } \lambda = 1550 \text{ нм} \end{cases} \quad (2.12)$$

Виконаємо розрахунок власних втрат в оптичному волокні за формулами (2.8 – 2.12):

$$\alpha_{\text{рр}} = \left(\frac{6,3 \times 10^{11}}{1290^4} \right) = 0,228 \text{ дБ/км},$$

$$\alpha_{\text{пм}} = 2,55 \times 10^{-3} \cdot e^{4,63 \cdot \frac{10^3}{1290}} = 0,092 \frac{\text{дБ}}{\text{км}},$$

$$\alpha_{\text{іч}} = 7,81 \times 10^{11} \cdot e^{-4,85 \cdot \frac{10^4}{1290}} = 3,7 \times 10^{-5} \frac{\text{дБ}}{\text{км}},$$

$$\alpha_{\text{он}} = 0,05 \text{ дБ/км.}$$

Знайдемо сумарні власні втрати за формулою (2.7):

$$\alpha_{\text{с}} = 0,228 + 0,092 + 3,7 \times 10^{-5} + 0,05 = 0,37 \text{ дБ/км.}$$

Експериментально встановлено, що додаткові втрати в оптичному кабелі становлять приблизно від 20 % до 40 % від власних втрат і можуть бути розраховані за допомогою формули [2–5]:

$$\alpha_d = \alpha_v \cdot \frac{1}{3} = 0,37 \cdot \frac{1}{3} = 0,123 \text{ дБ/км.} \quad (2.13)$$

Знайдемо коефіцієнт загасання сигналу в оптичному окні за формулою (2.6):

$$\alpha = 0,37 + 0,123 = 0,493 \text{ дБ/км.}$$

Виконані вище розрахунки показали, що для вибраного волокна коефіцієнт загасання без додаткових втрат на довжині хвилі 1,29 мкм становить 0,37 дБ/км, що задовольняє рекомендації G.652, отже можна брати волокно за даною рекомендацією.

2.3 Розрахунок погонної дисперсії сигналу

Середньоквадратичне значення погонної дисперсії одномодового волокна дорівнює:

$$\sigma = D(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (2.14)$$

де λ – довжина хвилі, нм;

$\Delta\lambda$ – ширина лінії випромінювання лазера, який береться із табл. 1.2;

$D(\lambda)$ – коефіцієнт хроматичної дисперсії ОВ, пс/(км·нм).

Коефіцієнт хроматичної дисперсії $D(\lambda)$ для ступінчастих волокон і волокон зі зміщеною дисперсією розраховується за допомогою формули [2, 4–6]:

$$D(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \quad (2.15)$$

де S_0 – нахил кривої дисперсії, $S_0 = 0,092 \text{ пс}/(\text{нм}^2 \cdot \text{км})$;

λ_0 – довжина хвилі нульової дисперсії, $\lambda_0 = 1310$ мкм.

Тоді:

$$D(\lambda) = \frac{0,092}{4} \left[1290 - \frac{1310^4}{1290^3} \right] = -1,74 \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}},$$

$$\sigma = 1,74 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 = 0,87 \cdot 10^{-12} \text{ с/км} = 0,87 \text{ пс/км}.$$

3 РОЗРАХУНОК ДОВЖИНИ ДІЛЯНКИ РЕГЕНЕРАЦІЇ ВОСП. ДІАГРАМА ЕНЕРГЕТИЧНИХ РІВНІВ

Довжина ділянки регенерації ВОТ обмежується двома факторами: згасанням сигналу та розширенням імпульсу в лінійному тракті. При проектуванні необхідно виконати два розрахунки і обрати найменше значення для довжини ділянки регенерації, позначене як L_p .

3.1 Розрахунок довжини ділянки регенерації за загасанням

Енергетичний потенціал (ЕП) апаратури ВОСП визначається як різниця між рівнем потужності оптичного сигналу на передачі $P_{\text{пер}}$ (в децибелах міліват) та мінімальною чутливістю за потужністю сигналу на прийомі $P_{\text{пр}}$ (в децибелах міліват), при якій забезпечується визначена якість передачі інформації [1–4]:

$$\text{ЕП} = P_{\text{пер}} - P_{\text{пр}} = 4,5 - (-45) = 49,5 \text{ дБ.} \quad (3.1)$$

Максимальна довжина ділянки регенерації за втратами визначається за допомогою формули [2–4, 7]:

$$L_{P1 \text{ max}} = \frac{\text{ЕП} - p_3 - 2 \cdot \alpha_{\text{дв}} + \alpha_{\text{н}} - 2 \cdot \alpha_{\text{вп}}}{\alpha + \frac{\alpha_{\text{н}}}{l_{\text{б\gammaд}}}}, \quad (3.2)$$

де ЕП – енергія апаратури ВОСП, дБ;

p_3 – енергетична потужність системи, дБ;

$\alpha_{\text{дв}}$ – втрати на роз'ємному з'єднанні, дБ;

$\alpha_{\text{вп}}$ – втрати в роз'ємному з'єднанні «волокно-приймач», дБ;

$\alpha_{\text{н}}$ – втрати в не роз'ємному з'єднанні волокон між собою, дБ;

$l_{б\gamma d}$ – будівельна довжина кабелю, км;

α – коефіцієнт загасання ОК, дБ/км.

Енергетичний запас за потужністю (6 дБ) представляє собою резерв системи на втрати сигналу внаслідок експлуатаційних негараздів, таких як старіння оптичного кабелю і обладнання ВОСП, кабельні вставки та інші чинники. Мінімальна довжина ділянки регенерації за втратами визначається за формулою [1–6]:

$$L_{P1\ min} = \frac{E_{\text{ПУ}} - \alpha_{\text{АРП}} - p_3 - 2 \cdot \alpha_{\text{дв}} + \alpha_{\text{н}} - 2 \cdot \alpha_{\text{вп}}}{\alpha + \frac{\alpha_{\text{н}}}{l_{\text{б\gamma d}}}},$$

де $\alpha_{\text{АРП}}$ – діапазон АРП приймальної частини апаратури (ПРОМ).

Втрати в роз'ємних з'єднаннях типу PC/PC, SC/PC, які використовуються в сучасних мережах зв'язку, не перевищують значення $\alpha_{\text{р}} \leq 0,2$ дБ.

В розрахунках приймаємо втрати $\alpha_{\text{дв}} = \alpha_{\text{вп}} = \alpha_{\text{р}}$.

Втрати в нероз'ємному з'єднанні повинні відповідати допустимим значенням, що встановлені в нормативно-технічній документації. Згідно зі стандартами для параметрів електромагнітної кабельної ділянки (ЕКД) в оптичних волокнах для одномодових систем, втрати на стику волокон не повинні перевищувати 0,1 дБ для 100 % всіх з'єднань та 0,05 дБ для 50 % всіх з'єднань [1–4, 8].

Межі регулювання амплітудно-режимного потужнісного запасу (АРП) визначаються конкретним типом обладнання і знаходяться в діапазоні від 10 дБ до 20 дБ. Для даного випадку приймаємо значення $\alpha_{\text{АРП}}$ рівним 15 дБ.

Розраховуємо максимальну та мінімальну ділянку регенерації за згасанням за формулами (3.2) і (3.3):

$$L_{P1\ max} = \frac{49,5 - 6 - 2 \cdot 0,2 + 0,1 - 2 \cdot 0,2}{0,37 + \frac{0,1}{4}} = 108,4 \text{ км,}$$

$$L_{p1 \min} = \frac{49,5 - 15 - 2 \cdot 0,2 + 0,1 - 2 \cdot 0,2}{0,37 + \frac{0,1}{4}} = 85,6 \text{ км.}$$

3.2 Розрахунок довжини відрізка регенерації з урахуванням дисперсії

За умовами, наведеними вище, довжина електромагнітної кабельної ділянки (ЕКД) повинна відповідати вимогам щодо дисперсії, встановленим у [1–4, 8]:

$$L_{p2} \leq \frac{0,25}{\sigma \cdot B}, \quad (3.4)$$

де B – швидкість передачі на оптичному стику, визначається за даними табл. 1.2, біт/с;

σ – середньоквадратичне значення погонної дисперсії ОВ, с/км.

Розраховуємо довжину ділянки регенерації за дисперсією:

$$L_{p2} = \frac{0,25}{0,87 \cdot 10^{-12} \cdot 622 \cdot 10^6} = 462 \text{ км.}$$

Значення $L_{ЕКД} = L_p$ вибирається як найменше з розрахованих за формулами (3.2) і (3.4).

Оскільки довжина регенераційної ділянки за згасанням менше, ніж за дисперсією, то обрана довжина ділянки регенерації дорівнюватиме 108,4 км.

3.3 Організація розташування пунктів регенерації на маршруті волоконно-оптичного лінійного проводу

З великою протяжністю електромагнітної кабельної ділянки (ЕКД) волоконно-оптичного лінійного проводу можна розміщувати регенератори в населених пунктах, де є принаймні два незалежних джерела електроживлення.

Розташування регенераторів визначається з урахуванням бюджету потужності та припустимої дисперсії на електромагнітній кабельній ділянці.

З урахуванням бюджету потужності між регенераторами волоконно-оптичного лінійного проводу (ВОЛП), довжина електромагнітної кабельної ділянки (ЕКД) $L_{ЕКД}$ повинна знаходитися в межах, що визначаються: $L_{min} \leq L_{ЕКД} \leq L_{max}$.

Розраховуємо запас потужності і дисперсію для найдовшої ЕКД за формулою:

$$\alpha_3 = \text{ЕП} - \alpha_n n_n - \alpha_p n_p - \alpha L_{ЕКД}, \quad (3.5)$$

де n_p – кількість з'єднань з апаратурою;

n_n – кількість з'єднань кабелів.

Тоді маємо:

$$n_n = \left(\frac{L_{ЕКД}}{l_{б\text{уд}}} \right)_6 - 1 = \left(\frac{108}{4} \right)_6 - 1 = 26, \quad (3.6)$$

$$\alpha_3 = 49,5 - 0,1 \cdot 26 - 0,2 \cdot 2 - 0,37 \cdot 108 = 6,56 \text{ дБ.}$$

3.4 Створення графіка рівнів енергетичного потенціалу волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) на відстані одного відрізка регенерації

Енергетичний потенціал (ЕП) ВОСП визначає енергетичні можливості використовуваної апаратури для компенсації втрат у лінійному тракті. Чим вище значення ЕП, тим далі можна передавати інформацію або, при тій же відстані, використовувати оптичні кабелі з більшими втратами, але меншою вартістю. Енергетичний потенціал визначається передавальною потужністю оптичного модуля (ПОМ) та чутливістю приймального оптичного модуля (ПРОМ). [8, 9].

Щоб збільшити значення ЕП, можна використовувати такі методи:

- використовувати лазерні діоди (ЛД) замість суперлюмінісцентних діодів (СД) у передавальному оптичному модулі (ПОМ);
- застосовувати приймальний оптичний модуль (ПРОМ) з покращеною чутливістю, наприклад, замінюючи *p-i-n* фотодіод (ФД) лавинним фотодіодом (ЛФД).

Зменшити втрати енергії при введенні в оптичне волокно, використовуючи мікролінзи та інші техніки.

Діаграма рівнів енергетичного потенціалу ВОСП надає візуальне уявлення про енергетичні можливості системи та розподіл втрат потужності в лінійному тракті. Ця діаграма будується для ділянки регенерації (рис. 3.1) у координатах: рівень оптичної потужності P , дБм; відстань L_p , км. По вертикальних осях А і Б відображаються рівні потужності ПОМ (в точці А) та чутливість ПРОМ (в точці Б), відповідно.

На вісі А відображають відрізки $(P_{\text{пер}} + \eta)$, а на вісі Б – $(P_{\text{пр}} + p_z + 2\alpha_{\text{вп}})$. Вздовж осі абсцис відображається загасання оптичного кабелю (ОК) у формі лінії з нахилом $l_{\text{буд}}$, дБ для кожної будівельної довжини $l_{\text{буд}}$, а в місцях стику будівельних довжин позначаються відрізки, які відповідають загасанню в нерознімних з'єднаннях ОК – α_n .

Можна вважати, що ВОСП спроектована правильно, якщо побудована така діаграма енергетичних рівнів перетинає вісь Б приблизно в точці, рівній (або трошки вище), ніж значення $p_z + P_{\text{пр}}$.

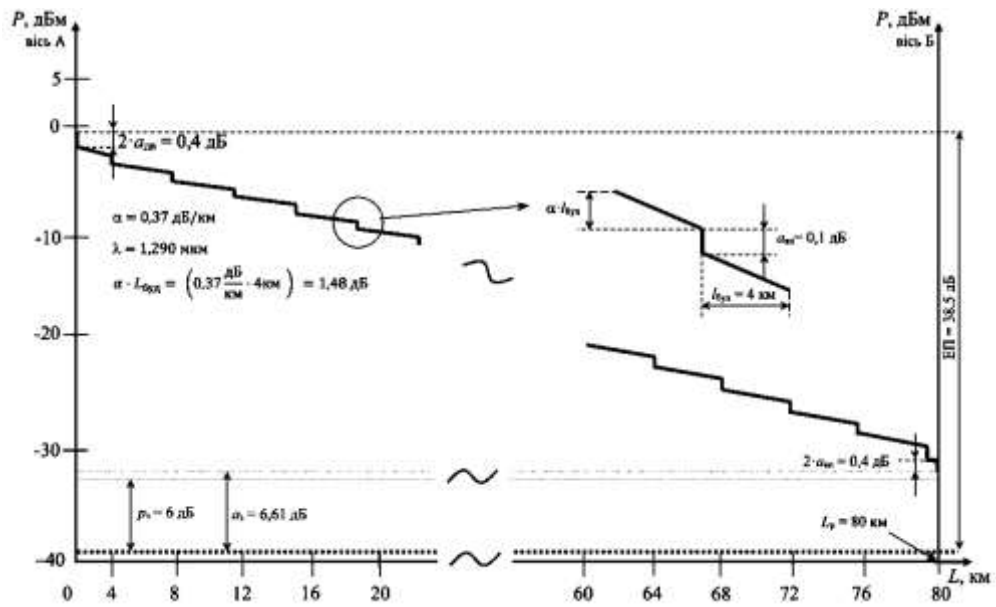


Рисунок 3.1 – Графік рівнів енергетичного потенціалу на відрізку регенерації для волоконно-оптичної системи передачі STM-4

4 ЗАХИСТ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ ВІД ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ

4.1 Захист оптичних кабелів від природніх енергій

Методика розрахунку ймовірності щорічної частоти пошкодження волоконно-оптичного кабелю (ВОЛП) ґрунтується на використанні припустимого струму блискавки в металевих оболонках оптичних кабелів, при якому не відбувається переривання зв'язку, і розрив зовнішнього шару не вважається пошкодженням оптичного кабелю. Розмір цього струму, як правило, визначається експериментальним методом [7].

Очікувана ймовірність виникнення пошкоджень протягом року залежить від кількості ударів блискавки, які припадають на поверхню прямого впливу блискавки або дуги, що виникає між місцем удару та кабелем. Ймовірність виникнення струму в підземному кабелі, що може призвести до його ушкодження, у загальному випадку обчислюється за формулою [1, 6]:

$$N_n = N_0 \cdot K_p \cdot K_n,$$

де N_0 – загальне ймовірнісне середньорічне число всіх ударів блискавки величиною від 1 до 250 кА в кабель ВОЛП, що проектується;

K_p – коефіцієнт ризику пошкоджень оптичного кабелю з металевими елементами, який визначається з рис. 4.1;

K_n – поверхневий коефіцієнт, який враховується при ширині зближення ОК з наземним об'єктами менше за $2r_{0max}$;

$2r_{0max}$ – максимальний радіус іскрової зони, м.

Так як кабель ОКЛБг належить до першої категорії грозостійкості, то $K_p = 0,05$.

Значення N_0 розраховується за формулою:

$$N_0 = \frac{q \cdot 2 \cdot r_{по} \cdot L}{1000}, \quad (4.2)$$

де q – питома щільність ударів блискавки в рік на 1 км^2 поверхні землі за одну грозоводину;

$r_{\text{по}}$ – умовний радіус іскрової зони, м;

L – довжина лінії, км, у розрахунках припустимо $L=100$ км.

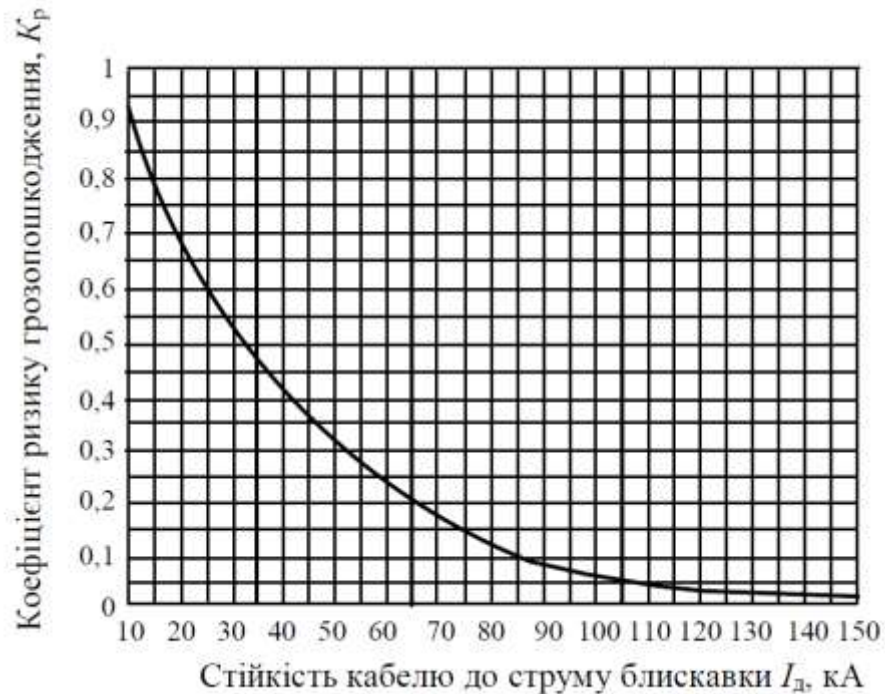


Рисунок 4.1 – Залежність коефіцієнта ризику грозового пошкодження оптичного кабелю від його стійкості до струму блискавки

Величина q розраховується за виразом:

$$q = C \cdot T, \quad (4.3)$$

де $C = 0,067$ – середня кількість ударів блискавки на 1 км^2 поверхні землі за одну грозоводину;

T – середньорічна тривалість гроз у годинах.

Умовний радіус іскрової зони $r_{\text{по}}$ визначається за формулою:

$$r_{\text{по}} = \sqrt{\frac{20,66 \cdot \rho}{2\pi \cdot E_{\text{пр}}}}, \quad (4.4)$$

де ρ – питомий опір ґрунту на довжині L траси ВОЛП, Ом·м;

$E_{\text{пр}}$ – пробивна напруга електричного поля в ґрунті, кВ/м.

Значення $E_{\text{пр}}$ змінюється від 250 кВ/м при $\rho = 1000$ Ом·м і до 500 кВ/м при $\rho \geq 1000$ Ом·м. Приймаємо значення $E_{\text{пр}} = 100$ кВ/м.

Розраховуємо необхідні значення за формулами (4.1 – 4.4):

$$q = 0,067 \cdot 40 = 2,68,$$

$$r_{\text{по}} = \sqrt{\frac{20,66 \cdot 80}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^3}} = 0,051,$$

$$N_0 = \frac{2,68 \cdot 2 \cdot 0,051 \cdot 100}{1000} = 0,021,$$

$$N_n = 0,021 \cdot 0,05 \cdot 2,6 = 2,68 \cdot 10^{-3}.$$

Для порівняння отриманого результату з допустимою нормою щодо очікуваної ймовірності пошкодження оптичного кабелю з металевими елементами, необхідно розрахувати значення N_l^H для $L \neq 100$ км за допомогою наступної формули:

$$N_l^H = N^H \cdot \frac{L}{100}, \quad (4.5)$$

де N^H – норма на вірогідне число пошкоджень кабелю на 100 км траси, для транспортної ВОЛС $N^H = 0,1$.

Тоді:

$$N_l^H = 0,1 \cdot \frac{80}{100} = 0,08.$$

Так як $N_n < N_l^H$, то додатковий захист кабелю не потрібний.

4.2 Розрахунок небезпечних магнітних впливів

Один із ключових факторів, що визначає ступінь впливу ліній електропередачі (ЛЕП) на волоконно-оптичний кабель (ВОЛП), це характер їх зближення. Під зближенням розуміється взаємне розташування ВОЛП і ліній високої напруги (ЛВН) (ЛЕП або контактних мереж електрифікованої залізниці (ЕЗД)), при якому в оптичному кабелі можуть виникати небезпечна напруга та струми. Зближення може бути паралельним, скісним і складним [1].

Ділянка зближення вважається паралельною, якщо найкоротша відстань між лініями (ширина зближення) а змінюється за довжиною зближення не більше ніж на 10 % від середнього значення. Якщо ця умова не виконується, то ділянка зближення буде скісною. Таке зближення замінюється ступінчастим паралельним, при цьому вибирають довжину паралельних еквівалентних ділянок так, щоб відношення максимального значення ширини зближення до мінімального на кінцях ділянки було не більше трьох. Тоді еквівалентна ширина зближення $a_{\text{екв}}$ визначається співвідношенням $a_{\text{екв}} = (a_i * a_{i+1}) / (a_i + a_{i+1})$ [1].

Небезпечний магнітний вплив може виникнути при нормальному режимі роботи ЛВН або при аварійному режимі при обриві і заземленні фазового дроту ЛЕП або контактного дроту ЕЗД. Велика величина струму короткого замикання створює інтенсивне магнітне поле, що індукуює електророзчинні сили (ЕРС) в жилах кабелю. Ця ЕРС може перевищити допустимі значення. Ця ЕРС називається поздовжньою, оскільки індуковане електричне поле направлене уздовж дроту зв'язку [4–9].

Поздовжня ЕРС – це різниця потенціалів на початку і в кінці металевій оболонки ОК на довжині ділянки зближення.

Абсолютне значення поздовжньої електророзчинної сили (ЕРС), яка виникає в металевій оболонці оптичного кабелю (ОК) через магнітний вплив ліній високої напруги (ЛВН) на складній ділянці зближення (рис. 4.2), розраховується на частоті 50 Гц за наступною формулою:

(4.6)

$$E = \omega \sum_{i=1}^n M_{1ai} I_i l_i,$$

де E – поздовжня ЕРС, В;

n – кількість ділянок зближення;

I_i – впливаючий струм, А;

M_{1ai} – коефіцієнт взаємної індукції між однопроводовими колами ЛВН і «оболонка ОК-земля» на i -й ділянці зближення, Гн/км;

L_i – довжина i -ї ділянки зближення, км.

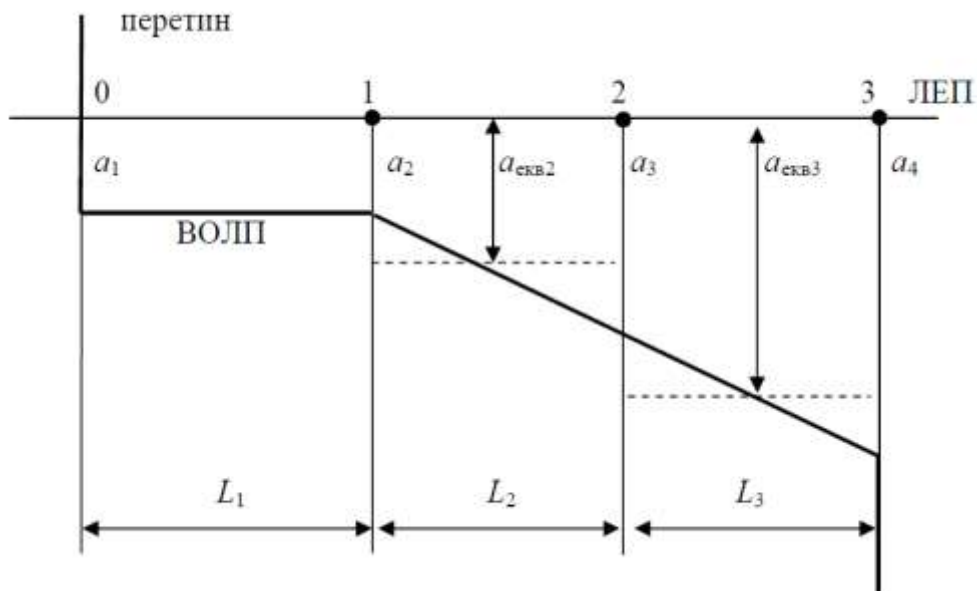


Рисунок 4.2 – Схема зближення ВОЛП з ЛЕП

Визначаємо коефіцієнт взаємної індукції за наближеною формулою, яка справедлива в діапазоні тональних частот [1]:

$$M_{1a} = \ln \left| 1 + \frac{6 \cdot 10^5}{a_3^2 \sigma_3 f} \right| \times 10^{-4}, \quad (4.7)$$

де $a_{екв}$ – еквівалентна ширина зближення, м;

f – частота впливаючого струму, Гц;

σ_3 – провідність землі, См/м.

Розрахунок поздовжньої ЕРС наведеної на металевій оболонці ОК виконується в двох [режимах роботи ЛВН (аварійному і нормальному). Для цього у виразі (4.7) замість I_i підставляють значення $I_{кзі}$ (струму короткого замикання в кінці i -ї ділянки зближення), а в другому – значення I_p (робочого струму ЛВН) [1].

Визначивши коефіцієнт взаємної індукції M_{a1} для кожної ділянки проводиться розрахунок поздовжньої ЕРС, наприклад, в аварійному режимі роботи ЛВН:

$$E_a = \omega(M_{1a1}L_1I_{кз3} + M_{1a2}L_2I_{кз3} + M_{1a3}L_3I_{кз3}). \quad (4.8)$$

У нормальному режимі роботи ЛВН розрахунок поздовжньої ЕРС виконується за виразом [1]:

$$E_H = \omega I_p(M_{1a1}L_1 + M_{1a2}L_2 + M_{1a3}L_3). \quad (4.9)$$

Проведемо розрахунок магнітного впливу та складемо таблицю отриманих результатів.

$$\sigma_3 = \frac{1}{80} = 1,25 \times 10^{-2} \text{ СМ/М};$$

$$\alpha_{экв1} = \sqrt{90 \cdot 50} = 67,08 \text{ м};$$

$$M_{1a1} = \ln \left| 1 + \frac{6 \cdot 10^5}{71,414^2 \cdot 1,25 \cdot 10^{-2} \cdot 50} \right| \times 10^{-4} = 536,75 \cdot 10^{-6} \text{ ГН/КМ.}$$

Результати розрахунків ЕРС зведені в табл. (4.1, 4.2) [1].

Таблиця 4.1– Результати розрахунку поздовжньої ЕРС в аварійному режимі роботи ЛЕП

№ зп	a_1 , м	a_2 , м	$a_{екв}$, м	M_{1a} , мкГн/км	L_i , км	$I_{кз}$, кА	E_i , В	E , В
0	0	90	0	0	0	6,5	0	3764,1
1	90	50	67,08	536,75	5	2,1	1770,6	
2	50	60	54,77	577,14	6	1,6	1740,6	
3	60	75	67,08	536,75	1	1,5	252,9	

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку поздовжньої ЕРС в нормальному режимі роботи ЛЕП

№ зп	a_1 , м	a_2 , м	$a_{\text{екв}}$, м	M_{1a} , мкГн/км	L_i , км	I_p , А	E_i , В	E , В
0	0	90	0	0	0	210	0	440,93
1	90	50	67,08	536,75	5		177,06	
2	50	60	54,77	577,14	6		228,46	
3	60	75	67,08	536,75	1		35,41	

Величини небезпечної напруги та струмів у металевих елементах волоконно-оптичного кабелю (ВОЛП), які виникають під впливом ліній високої напруги (ЛВН), встановлюються з урахуванням безпеки обслуговуючого персоналу, що працює на станційних і лінійних спорудах, а також за умови захисту цих споруд від пошкоджень (пробою ізоляції жил, захисного шлангу кабелю, пошкодження апаратури та іншого обладнання). Допустимі величини небезпечної напруги та струмів обираються так, щоб не було необхідності в спеціальних заходах захисту.

При цьому враховується час і умови їх дії на людей і споруди зв'язку. Короткочасна небезпечна напруга та струми можуть виникати в ВОЛП на ділянках зближення з ЛВН і електрифікованою залізницею при їх короткому замиканні на землю. Час дії цієї напруги і струмів складає від 0,15 с до 1,2 с (час спрацювання відключених пристроїв), тому для такого аварійного режиму роботи допускається відносно висока напруга. При нормальному та вимушеному режимах роботи ліній високої напруги, де небезпечна напруга та струми діють тривало, норми для цих режимів роботи істотно нижчі (42 В) [9–11].

5. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ НАДІЙНОСТІ ЛІНІЙНИХ СПОРУД ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ (ВОСП)

Для волоконно-оптичного лінійного з'єднання з довжиною L , параметр потоку відмов визначається за виразом [1, 10]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i L_i, \quad (5.1)$$

де λ_i – інтенсивність відмов i -ї ділянки лінії, 1/час;

L_i – довжина i -ї ділянки ВОЛП з відповідною інтенсивністю відмов.

Інтенсивність відмов залежить від місцевості прокладання ОК. Для рівнинного району згідно [10], інтенсивність відмов на один кілометр траси ($\lambda \times 10^{-7}$, 1/год) для броньованого кабелю в ґрунті та неброньованого кабелю відповідно $\lambda_{\text{ср}} = 18,9$ та $\lambda_{\text{ср}} = 15,3$, середній час відновлення відповідно $t_{\text{св}} = 3,85$ та $t_{\text{св}} = 4,93$ год.

Розраховуємо параметр потоку відмов за формулою (5.1):

$$\Lambda = 18,9 \times 10^{-7} \cdot 666 = 1,259 \times 10^{-3} \text{ 1/час.}$$

Середній час напрацювання на відмову (год) на волоконно-оптичному лінійному з'єднанні розраховується за виразом [10–12]:

$$T_0 \approx \frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{1,259 \times 10^{-3}} = 794,45 \text{ год.} \quad (5.2)$$

Коефіцієнт готовності ВОЛП визначається за виразом:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_0}{T_0 + t_{\text{св}}} = \frac{794,45}{794,45 + 3,85} = 0,995. \quad (5.3)$$

У даному випадку, коли немає можливості знайти завчасно невідомий закон розподілу випадкових величин T_0 та $t_{\text{св}}$ з обмеженого об'єму статистичних матеріалів, використовують поняття довірчої вірогідності γ .

Якщо припустити, що дані статистичних досліджень за питомою вагою відмов волоконно-оптичних ліній відповідають на практиці експоненціальному закону розподілу напрацювання на відмову T_0 , то довірчі межі середніх значень T_0 та $t_{\text{св}}$ необхідно визначити за виразами:

$$\left. \begin{aligned} \chi_{\text{в}} &= a_1 \chi_{\text{ср}} \\ \chi_{\text{н}} &= a_2 \chi_{\text{ср}} \end{aligned} \right\}$$

де $\chi_{\text{в}}$, $\chi_{\text{н}}$ – верхня і нижня межі середніх значень статистичних характеристик;

a_1 , a_2 – коефіцієнти відповідно верхньої і нижньої меж при заданій довірчій вірогідності;

$\chi_{\text{ср}}$ – середнє значення кількісної характеристики надійності.

У даному розділі $\chi_{\text{ср}}$ дорівнює:

$$\chi_{\text{ср}} = T_0 = 794,45. \quad (5.4)$$

Тоді:

$$\left. \begin{aligned} \chi_{\text{в}} &= 5,32 \cdot 794,45 = 4226,4 \\ \chi_{\text{н}} &= 0,39 \cdot 794,45 = 309,8 \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

Для порівняння отриманих значень коефіцієнта готовності кабельної магістралі зі значенням, яке потребується ($K_{\text{Гпотр}}$), згідно з [1], необхідно розрахувати середній час напрацювання на відмову ($T_{\text{опотр}}$) на довжині кабельної магістралі. Це робиться виходячи з норм середнього часу між відмовами ($T_{\text{онорм}} = 340,5$) год) на довжині еталонного гіпотетичного кола довжиною $L = 2500$ км і норми середнього часу відновлення зв'язку $t_{\text{звнорм}} = 5,2$ год за виразом:

$$T_{0\text{потр}}(L_{\text{км}}) = T_{0\text{норм}} \frac{L}{L_{\text{км}}},$$
$$K_{\text{Гпотр}} = \frac{T_{0\text{потр}}}{T_{0\text{потр}} + t_{\text{звнорм}}}. \quad (5.6)$$

Тоді:

$$T_{0\text{потр}}(L_{\text{км}}) = 340,5 \cdot \frac{2500}{666} = 1278 \text{ год},$$
$$K_{\text{Гпотр}} = \frac{1278}{1278 + 5,2} = 0,996.$$

З розрахунку видно, що $K_{\text{Гпотр}} \approx K_{\text{Г}}$. Це означає, що показники надійності відповідають нормі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі була розроблена магістральна лінія зв'язку між Харковом та Вовчанськом для обслуговування 73,3 км з використанням апаратури STM-4. Використовувана апаратура працює на довжині хвилі 1,29 мк по одномодовому оптичному кабелю із швидкістю 622 Мбіт/с, що відповідає вимогам європейських та українських стандартів.

За допомогою комп'ютерного математичного пакета Mathcad Prime [9] був проведений розрахунок оптичних параметрів оптичного кабелю (ОК) та параметрів ділянок волоконно-оптичної лінії зв'язку (ВОЛЗ). Був вибраний кабель ОКЛБГ-4-ДА(2,7)2П-2х4Е1 для прокладки в ґрунт, що відповідає стандарту G.652 D. Також було обрано варіант траси, визначено довжину ділянки регенерації, яка складає 10,8 км та обмежена згасанням сигналу в оптичному волокні.

У роботі також були розглянуті основні будівельні рішення та запропоновані заходи з захисту оптичної лінії зв'язку від впливу ліній електропередачі (ЛЕП) та можливої ймовірності пошкодження блискавками.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко О.В., Петрович В.С., Степанов Д.М. Методичні вказівки з курсового проектування за темою: «Проект однохвильової волоконно-оптичної лінії передачі» з дисципліни «Напрямні системи електричного та оптичного зв'язку» для студентів заочної форми навчання за напрямом 6.050903 – Телекомунікації, Одеса, 2012. 48 с.
2. КНД-141-99. Керівництво щодо будівництва споруд волоконнооптичного зв'язку. К.: Держкомзв'язок, 2004. 120 с.
3. Gnatenko, A. S., & Machechin, Y. P. (2015). Vasko K.O Providing control of the polarization inside the resonator fiber ring laser. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. Київ*, 20-23.
4. Hnatenko O. S. The creation of an optical laboratory using modern optical applications / O. S. Hnatenko, V. P. Obozna // Інформатика, математика, автоматика: матеріали науково-технічної конференції ІМА:2018, 5-9 лютого 2018 р. Суми, 2018. 200 с.
5. Characteristics of a single-mode optical fibre and cables (Характеристики кабеля с одномодовими оптичними волокнами). G.652.
- 6 Characteristics of a nonzero dispersion shifted single-mode optical fibre cable (Характеристики кабеля с одномодовими оптичними волокнами со смещенной ненулевой дисперсией). G.655.
7. КНД 45-136-99 Інструкція по захисту волоконно-оптичних ліній зв'язку від ударів блискавки та електромагнітних впливів. [Вид. офіц.]. Київ, 1999.
- 8 Kurskoy Y., Machekhin Y., & Gnatenko A. S. (2018). Топологічні методи в вимірюваннях і дослідженнях нелінійних динамічних систем. *Вісник Харківського національного університету імені ВН Каразіна. Серія «Фізика»*, (29). 22-28.

9. Кабелі зв'язку оптичні для магістральних, зонових та міських мереж зв'язку. Технічні умови. ТУ-У 05758730.007-97: 1997. [Чинні від 1997-12-10]. Одеса: УРУ Держстандарта Одеський центр стандартизації і метрології, 1997. 69 с. (Технічні умови ВАТ «Одескабель»).

10. Бондаренко О.В. Статистичні дані для розрахунку показників надійності підземних волоконно-оптичних ліній зв'язку // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2009. № 1. С. 64 – 69.

11. Бітюков А. Ю., & Гнатенко О. С. (2019). Розрахунок та моделювання оптики приймальних вузлів лазерних систем.

12. Hnatenko, Oleksandr S., Yuriy P. Machekhin, Victor Bilichenko, Valeriy Zarytskyi, Yaroslav Yaroslavskyy, Jacek Klimek, Kanat Mussabekov, Bakhyt Yeraliyeva, and Ainur Ormanbekova. "Fiber-optic system for control of the orientation of objects in space." In *Optical Fibers and Their Applications 2023*, vol. 12985, pp. 47-54. SPIE, 2023.