

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ДЛЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
З ДИСЦИПЛІНИ**

**"ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ВОЛОКОННО - ОПТИЧНИХ
ТРАКТІВ"**

Напряму підготовки:
освітньо-кваліфікаційного рівня:

«телекомунікації»
бакалавр

КИЇВ 2015

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СВІТЛА У ВОЛОКОННОМУ СВІТЛОВODІ

1. *Перевірка засвоєння матеріалу самостійного вивчення - Рекомендації MCE-T G.651-G.655.*
2. *Аналіз моделей розповсюдження світла у ВС.*
3. *Розгляд умов поперечного резонансу в діелектричному світловоді (ДС).*
4. *Розгляд розрахунку товщини оболонки волоконного світловода та використання ефекту Гооса-Генхена.*
5. *Засвоєння швидкого переведення відношення величин у децибели та навпаки. Розрахунки з логарифмічними величинами*

1. *Перевірка засвоєння матеріалу самостійного вивчення - Рекомендації MCE-T G.651-G.655.*

Порівняння параметрів волоконних світловодів, наведених у Рекомендаціях MCE-T G.651-G.655 на предмет застосування цих ВС.

2. *Аналіз моделей розповсюдження світла у ВС.*

Розповсюдження світла у ВС розглядається із застосуванням двох моделей – променевої та хвильової (електродинамічної). Кожна з моделей має свої переваги та недоліки і використовується там, де зручніше. Так, променева модель не може пояснити двох явищ:

- не за усіх кутів падіння променя на торець світловода, більших за критичний, існує напрямлене розповсюдження світла у ВС;
- точка падіння променя на границю серцевина-оболонка не співпадає з точкою відбиття.

Ці явища можна пояснити за допомогою хвильової моделі, які мають назву "Поперечний резонанс" та "Ефект Гооса-Генхена".

3. *Розгляд умов поперечного резонансу в діелектричному світловоді (ДС).*

Розповсюдження хвиль у ДС можна розглядати як суперпозицію двох парціальних хвиль, тому достатньо розглянути розповсюдження однієї з них. При розповсюдженні ця хвиля (первинна) послідовно відбивається від границі

серцевина-оболонка, утворюючи вторинні хвилі. Інтерференція первинних та вторинних хвиль, що мають різний набіг та зсув фази призводять в одних випадках до взаємного їх підсилення, або до взаємного їх гасіння.

4. Розгляд розрахунку товщини оболонки волоконного світловода та використання ефекту Гооса-Генхена.

Ефект Гооса-Генхена пояснюється тим, що при падінні променя на границю серцевина-оболонка хвиля заходить в оболонку і розповсюджується вздовж границі як неоднорідна пласка хвиля, а потім виходить у серцевину. Через те, що напруженість електричного поля цієї хвилі в оболонці спадає експоненціально із зростанням поточного радіуса, важливо, щоб товщина оболонки була великою, щоб уникнути втрат світла.

5. Засвоєння швидкого переведення відношення величин у децибели та навпаки. Розрахунки з логарифмічними величинами

На протяжних лініях, які застосовуються в оптичних системах зв'язку, зручно мати справу з логарифмічними величинами, тобто з дБ та дБм.

Як показала практика, студенти мають певні труднощі при оперуванні з цими величинами, при переводі цих величин у рази та потужності відповідно.

Насправді все це легко зробити на протязі кількох секунд без застосування будь-якої обчислювальної техніки

Для прикладу розберемо випадок вимірювання втрат оптичної потужності в оптичному волокні.

Для вимірювання втрат в оптичному волокні (кабелі) застосовують "метод втрат, що вносяться", або "метод обривання" (або "зрізування"). Ці методи засновані на послідовному вимірюванні потужності (або рівня потужності) оптичного випромінювання на виході волокна оптичного кабелю, що досліджується, та на його вході. Тоді втрати світла (загасання) у кабелі, що вимірюється, в дБ, визначається за формулою:

$$A(\lambda) = 10 \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (1.1)$$

де $A(\lambda)$ – загасання в оптичному кабелі, дБ;

– $\lg$ – знак логарифму при основі 10, тобто десятковий логарифм;

– P_1 та P_2 – відповідно потужності на вході та виході оптичного волокна, що вимірюється, Вт;

– λ – довжина хвилі, на якій проводяться вимірювання, мкм.

Загасання в разях буде визначатися за формулою:

$$A' = P_1 / P_2 \quad (1.2)$$

Потужність сигналу часто характеризують по відношенню до 1 мВт. Тоді рівень потужності визначається за формулою:

$$p_1 = 10 \lg \frac{P_1}{1 \text{ мВт}}, \text{ дБм} \quad (1.3)$$

де P_1 – потужність, що вимірюється у Вт.

Загасання у волокні, що вимірюється, можна визначити тепер за більш зручною формулою:

$$A = p_1 - p_2, \text{ дБ}. \quad (1.4)$$

де p_1 та p_2 - відповідні до P_1 та P_2 рівні потужності, у дБм.

Коефіцієнт загасання у волокні, що вимірюється, визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{A}{L}, \text{ (дБ/км)} \quad (1.5)$$

Як вже згадувалось, дБ та дБм є логарифмічними величинами. Тому згадаймо, що таке логарифм та основні властивості логарифмів.

Логарифмом числа $N > 0$ за основою $a > 0$ називається показник степеня x , до якого потрібно піднести основу a , щоб отримати число N , тобто:

$$x = \log_a N, \text{ тоді } a^x = N \quad (1.6)$$

Приклад: $\log_2 0,25 = -2$, оскільки $2^{-2} = 1/2^2 = 1/4 = 0,25$.

Основні властивості логарифмів (якщо $a > 0; a \neq 1; b > 0; c > 0$):

$$\begin{aligned} 1) \log_a(bc) &= \log_a b + \log_a c; & 4) \log_a b &= \frac{\log_c b}{\log_c a}; c \neq 1; \\ 2) \log_a \frac{b}{c} &= \log_a b - \log_a c; & 5) \log_a b &= \frac{1}{\log_b a}; b \neq 1. \\ 3) \log_{a^p} b^q &= \frac{q}{p} \log_a b. \end{aligned}$$

Зі співвідношення 3) випливає, що для $p = 1$

$$\log_a b^q = q \cdot \log_a b \quad (1.7)$$

На практиці використовують логарифми з основою 10, які називають десятковими логарифмами.

$$\log_{10} M = \lg N.$$

У зв'язку також використовуються (рідше) натуральні логарифми. Основою натуральних логарифмів є число $e = 2,71828\dots$. Такі логарифми позначаються знаком $\ln$.

Перехід від натуральних логарифмів до десятикових і навпаки виконують за формулами:

$$\lg N = 0,43 \ln N; \ln N = 2,3 \lg N.$$

Надалі будемо розглядати десяткові логарифми.

Можна сказати, що величини, виражені в разях, отримуються за допомогою множення та ділення, а величини, що виражені у дБ та дБм, отримуються за допомогою додавання та віднімання. Тому останніми легше оперувати.

Використовуючи (1.1) та (1.6), знайдемо відповідність у разях деяким значенням, вираженим у децибелах.

Так, для $0 \text{ дБ} = 10 \cdot \lg P_1/P_2$ логарифм $\lg P_1/P_2 = 0$ і $P_1/P_2 = 1$ через те, що $10^0 = 1$. Тобто чисельник дорівнює знаменнику. Відповідно $10 \text{ дБ} = 10 \cdot \lg P_1/P_2$ логарифм $\lg P_1/P_2 = 1$ і $P_1/P_2 = 10$ через те, що $10^1 = 10$. Аналогічно отримаємо для 20 дБ $P_1/P_2 = 100$, 30 дБ $P_1/P_2 = 1000$ і так далі. Бачимо, що для додатних значень децибелів чисельник більше знаменника в певну кількість разів.

Відповідно для від'ємних значень децибелів з урахуванням (1.6) та (1.7) отримуємо:

$$-10 \text{ дБ} \Rightarrow P_1/P_2 = 0,1; -20 \text{ дБ} \Rightarrow P_1/P_2 = 0,01; -30 \text{ дБ} \Rightarrow P_1/P_2 = 0,001.$$

Бачимо, що для від'ємних значень децибелів чисельник менше знаменника в певну кількість разів.

Для приклада оцінимо (дуже грубо), у скільки разів зменшується світлова потужність у кабелі із загасанням у 36 дБ . Використовуючи (1.6), знаходимо, що $\lg P_1/P_2 = 3,6$. Тоді $P_1/P_2 = 10^{3,6}$ разів. Тобто значення $10^{3,6}$ лежить в межах від $10^3 = 1000$ до $10^4 = 10000$. Така груба оцінка навряд чи когось задовольнить, тому перейдемо до більш точної оцінки.

Згадуючи, що логарифм $\lg 2 = 0,3010 \approx 0,3$, отримаємо, що відношенню $P_1/P_2 = 2$ відповідає 3 дБ .

І, нарешті, 1 дБ відповідає $1,26$ рази (менш точно – $1,25$, що зручно використовувати для наближених розрахунків).

Наведемо таблицю перерахунку основних логарифмічних величин.

Таблиця – Перерахунок основних логарифмічних величин

дБ (дБм)	рази (мВт)
0	1
10	10
20	100
30	1000
-10	0,1
-20	0,01
-30	0,001
3	2
1	1,26 (1,25)

Подивившись уважно на таблицю, можна зробити висновок, що додавання 10, 20 та 30 дБ до якогось значення збільшує значення у разях в 10, 10 та 1000 разів відповідно. І, навпаки, віднімання від якогось значення 10, 20 та 30 дБ до зменшує значення у разях в 10, 10 та 1000 разів відповідно

За допомогою цієї таблиці розберемо кілька прикладів перерахунків логарифмічних величин, пам'ятаючи, що додаванню та відніманню величин, виражених у дБ, відповідає множення та ділення величин у разях. Спочатку будемо мати справу з **"дБ – рази"**.

$$1) 13 \text{ дБ} = (10+3) \text{ дБ} = 20 \text{ разів};$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \downarrow \\ 10 \cdot 2 = 20; \end{array}$$

$$2) 16 \text{ дБ} = (10+3+3) \text{ дБ} = 40 \text{ разів};$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ 10 \cdot 2 \cdot 2 = 40; \end{array}$$

$$3) 19 \text{ дБ} = (10+3+3+3) \text{ дБ} = 80 \text{ разів};$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ 10 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 2 = 80; \end{array}$$

$$4) 19 \text{ дБ} = (20 - 1) \text{ дБ} = 80 \text{ разів};$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \downarrow \\ 100 / 1,25 = 80; \end{array}$$

$$5) 17 \text{ дБ} = (10+3+3+1) \text{ дБ} = 50 \text{ разів};$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \\ 10 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 1,25 = 50; \end{array}$$

$$6) 17 \text{ дБ} = (20 - 3) \text{ дБ} = 50 \text{ разів};$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \downarrow \\ 100 / 2 = 50; \end{array}$$

$$7) -19 \text{ дБ} = (-20 + 1) \text{ дБ} = 0,0126 \text{ разів};$$

$$\begin{array}{c} \downarrow \quad \downarrow \\ 0,01 \cdot 1,26 = 0,0126. \end{array}$$

Таким самим чином можна перерахувати будь-яке ціле значення децибелів у рази.

Тепер перейдемо до **"дБм – мВт"**.

Як вже зазначалося раніше, потужність сигналу часто характеризують по відношенню до 1 мВт і характеризують її рівнем потужності, вираженим у дБм. Якщо ми говоримо про загасання сигналу в кабелі у 20 дБ, то це означає, що потужності на вході оптичного волокна та на його виході відрізняються у 100 разів, незалежно від абсолютного значення потужності.

Тобто, у волокно може зайти 100 мкВт, 150 мкВт або 15 мВт світлової потужності, а вийде відповідно 1 мкВт, 1,5 мкВт або 0,15 мВт.

Алгоритм перерахунку залишається тим самим, що і для "дБ – рази". Треба тільки дБ та рази замінити на дБм та мВт відповідно. Використовуючи таблицю, дуже легко знайти значення у мВт відповідно значенню рівня сигналу у дБм. Якщо взяти приклад 7), то рівню потужності – 19 дБм буде відповідати потужність 0,0126 мВт або 12,6 мкВт.

$$- 19 \text{ дБм} \Rightarrow = 0,0126 \text{ мВт} = 12,6 \text{ мкВт}.$$

Це точне значення. А більш грубе – 12,5 мкВт. Як бачимо, все перераховується досить просто і легко та без допомоги обчислювальних пристроїв.

Завдання.

Перевести у відповідні величини - 3 дБм; - 8 дБм; - 47 дБм.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

ТИПИ ХВИЛЬ У НАПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМАХ

1. Розподіл хвиль за хвильовим фронтом.
2. Класи хвиль у направляючих системах.
3. Типи хвиль (моди) у направляючих системах.
4. Побудова структури електричного та магнітного полів для різних типів мод волоконного світловода.

1. Розподіл хвиль за хвильовим фронтом.

Фронт хвилі – геометричне місце точок однакової фази.

Фазова швидкість (V_f) – швидкість розповсюдження фронту хвилі.

Групова швидкість (V_g) – швидкість розповсюдження енергії в заданому напрямку. При цьому $V_g < V_f$.

За фронтом розповсюдження хвилі поділяються на:

- плоскі;
- циліндричні;
- сферичні.

Плоскі хвилі

Хвиля називається плоскою, якщо її хвильові поверхні являють сукупність поверхонь, паралельних одна одній.

Плоска хвиля - це хвиля, в якій всім точкам, що лежать в будь-якій площині, перпендикулярній до напрямку її поширення, в кожен момент часу відповідають однакові зсуви і швидкості часток середовища (для механічних хвиль) або однакові напруженості електричних і магнітних полів (для електромагнітних хвиль). Строго кажучи, жодна реальна хвиля не є плоскою хвилею, оскільки плоска хвиля (що поширюється уздовж осі x) повинна охоплювати всю область простору, що тягнеться по координатах y та z від. Проте у багатьох випадках можна вказати таку обмежену по y та z ділянку хвилі, на якій вона майже збігається з плоскою. Перш за все це можливо у вільному просторі на чималих відстанях від джерела, коли його можна розглядати як точковий. Інколи хвиля, що поширюється в обмеженій області, може приблизно збігатися з "ділянкою плоскої хвилі".

Поверхня, яка може стати джерелом плоских хвиль представлена на рис. 2.1.

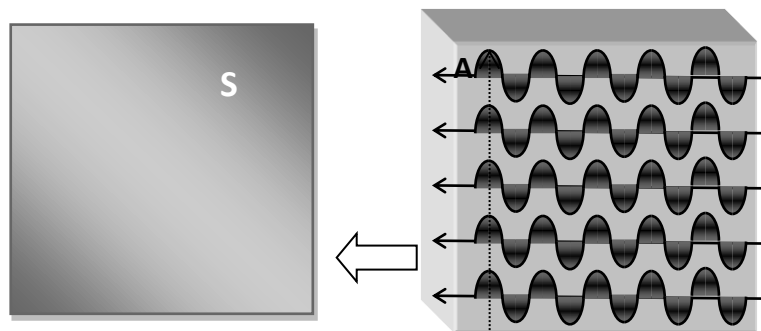


Рисунок 2.1 – Джерело плоских хвиль.

$$P/S = \text{const};$$

$$A = \text{const}.$$

де:

P – потужність; $S_{\text{пл}}$ – площа; P/S – щільність потужності; A – амплітуда.

Хвиля вважається однорідною, якщо геометричне місце точок з однаковою амплітудою співпадає із фронтом хвилі.

Циліндричні хвилі

Джерелом хвиль такого типу може стати тонка циліндрична поверхня, що випаровується під дією струму чи випромінювання високої потужності.

Фронт такої хвилі – бічна поверхня циліндра.

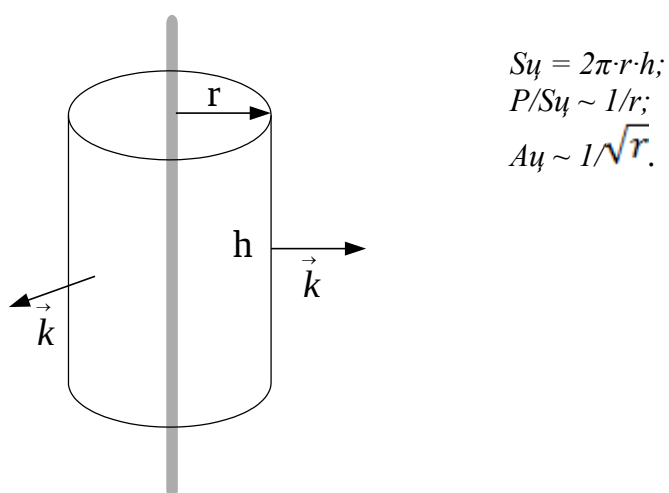


Рисунок 2.2 – Джерело циліндричних хвиль

Сферичні хвилі

Сферичною хвилею називається хвиля, що радіально розходить від джерела або сходиться до приймача

Фронтом такої хвилі є сфера. Джерелом її може стати тіло відносно малих розмірів формою близькою до сферичної, що випаровується під дією струму чи випромінювання високої потужності.

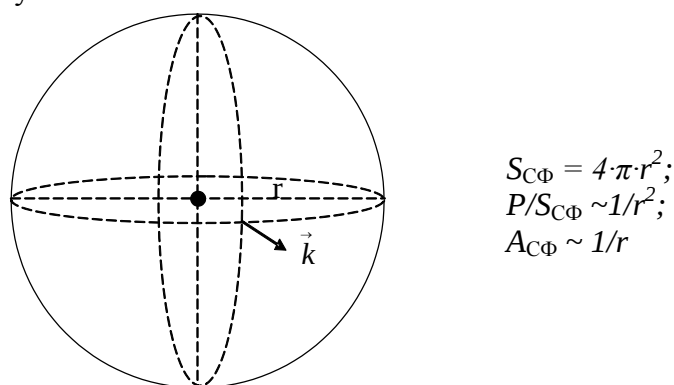


Рисунок 2.3 – Джерело сферичних хвиль

2. Класи електромагнітних хвиль в направляючих системах

Клас хвилі в направляючих системах визначається наявністю повздовжньої складової електромагнітного поля (складової Z при розповсюдженні хвилі вздовж осі Z).

Існує 4-и класи хвиль:

- | | |
|---|---------------------------|
| 1. ТЕМ (Т) – поперечна електромагнітна хвиля; | $E_z = 0; H_z = 0.$ |
| 2. ТЕ (Н) – поперечно-електрична; | $E_z = 0; H_z \neq 0.$ |
| 3. ТМ (Е) – поперечно-магнітна; | $E_z \neq 0; H_z = 0.$ |
| 4. НЕ, ЕН – гібридні хвилі; | $E_z \neq 0, H_z \neq 0.$ |

1. ТЕМ – поперечна електромагнітна хвиля, або Т-хвиля.

Запис ТЕМ або слова "поперечна електромагнітна" означають, що як електричне, так і магнітне поле лежать в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження хвилі, тобто до осі Z . Тому для ТЕМ хвилі

$$E_z = 0; H_z = 0.$$

2. ТЕ – поперечно-електрична, або Н-хвиля.

Запис ТЕ або слова "поперечно-електрична" означають, що електричне поле лежить в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження хвилі, тобто до осі Z . Тому для ТЕ хвилі

$$E_z = 0; H_z \neq 0.$$

3. ТМ – поперечно-магнітна, або Е-хвиля.

Аналогічно запис ТМ або слова "поперечно-магнітна" означають, що магнітне поле лежить в площині, перпендикулярній до напрямку розповсюдження хвилі, тобто до осі Z . Тому для ТМ хвилі

$$E_z \neq 0; H_z = 0.$$

НЕ, ЕН – гібридні хвилі. Для них

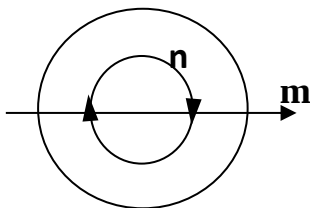
$$E_z \neq 0, H_z \neq 0.$$

3. Типи (моди) електромагнітних хвиль в направляючих системах

Окрім класу, хвилі розділяються також і за типом. Тип хвилі або мода визначається структурою електромагнітного поля і позначається двома індексами – n та m , наприклад, TE_{nm} . Тут :

n – кількість повних змін поля за периметром (азимутом);

m – кількість повних змін поля за діаметром.



Якщо $n = 0$, то такі моди називаються симетричними.

Рисунок 2.4 – До поняття індексів моди

У ВС розповсюджуються: TE_{0m} , TM_{0m} , HE_{nm} , EH_{nm} .

4. Побудова структури електричного та магнітного полів для різних типів мод волоконного світловода

Структура електромагнітного поля моди TE_{01} , або H_{01} (поперечний переріз) представлена на рисунку 2.5 нижче. Силві лінії електричного поля позначені суцільними лініями, а магнітного поля – пунктирними.

H_{01}

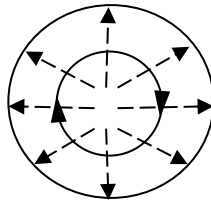


Рисунок 2.5 – Структура електромагнітного поля

Завдання: нарисувати структуру електромагнітного поля моди TE_{02} та HE_{21} .

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ БАГАТОМОДОВИХ ТА ОДНОМОДОВИХ ВС

1. Теоретичний матеріал
 - 1.1 Числова апертура.
 - 1.2 Нормована частота.
 - 1.3 Дисперсія.
2. Розрахунок числової апертури, нормованої частоти та кількості мод.
3. Розрахунок міжмодової дисперсії у ВС.
4. Розрахунок внутрішньомодової дисперсії у ВС.

1. Теоретичний матеріал

1.1 Числова апертура

Апертура ВС визначає здатність ВС сприймати випромінення, що падає на його торець, і передавати його далі за рахунок явища ПВВ на границі серцевина-оболонка. Тобто вона визначає той тілесний кут, в межах якого промені, що падають на торець світловода, розповсюджуються далі як напрямлені моди. ВС характеризують так званою числовою апертурою NA, що визначається формулою (3.1):

$$NA = n_0 \cdot \sin \varphi$$

(3.1)

де φ – апертурний кут,

- n_0 – показник заломлення навколишнього середовища.

Апертурний кут φ - це максимальний кут падіння променів на торець ВС, за якого можливе напрямлене розповсюдження світла у ВС.

Розраховується NA за наступною формулою (3.2):

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (3.2)$$

Для градієнтного волокна використовується поняття локальної числової апертури значення котрої максимальне на осі і спадає до 0 на границі (3.3), значення котрої

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}, \quad (3.3)$$

максимальне на осі і спадає до 0 на границі серцевини з оболонкою. Для градієнтного волокна з параболічним профілем показника заломлення, визначається усереднена числова апертура, що дорівнює (3.4):

$$NA_{ус} = \frac{\sqrt{n_1^2(0) - n_2^2}}{\sqrt{2}} \quad (3.4)$$

де $n_1(0)$ - максимальне значення показника заломлення на осі.

На практиці використовують вимірювання **ефективної** числової апертури (е.ч.а.). Вона визначається як (3.5):

$$NA_{\text{еф.}} = n_0 \cdot \sin \varphi_{\text{еф.}} \quad (3.5)$$

1.2 Нормована частота

Режим роботи ВС (одно- чи багатомодовий) визначається нормованою частотою V (3.6):

$$V = 2\pi a \cdot NA / \lambda \quad (3.6)$$

де λ – довжина хвилі світла у вакуумі;
 a – радіус серцевини ВС,
 NA – числова апертура.

Тоді кількість мод N для ВС зі східчастим профілем показника заломлення визначається як (3.7), а для ВС із параболічним ППЗ як (3.8):

$$N = V^2 / 2 \quad (3.7)$$

$$N = V^2 / 4 \quad (3.8)$$

Ці формули справедливі для $V \gg 1$.

1.3 Дисперсія

Повна дисперсія імпульсів (середньоквадратичне уширення імпульсів) на ділянці світловоду довжиною L складає (3.9):

$$\sigma = (\sigma_{мдж}^2 + \sigma_{хр}^2 + \sigma_{пол}^2)^{0,5} = \sigma_1^* L \quad (3.9)$$

де $\sigma_{між.}$, $\sigma_{хр.}$, $\sigma_{пол.}$ – міжмодова, хроматична та поляризаційна складові дисперсії відповідно; σ_1^* – кілометрична або питома дисперсія (ще одна назва – коефіцієнт дисперсії). Поляризаційна і профільна дисперсії мають досить малі значення і тому при розрахунках часто не враховуються. Остання може бути помітною тільки у одномодових ВС. Дисперсія σ вимірюється у $пс$, а σ_1^* – у $пс/км$.

Міжмодова дисперсія

Причиною міжмодової дисперсії є відмінність групових швидкостей (групова швидкість – це швидкість перенесення енергії в заданому напрямку) розповсюдження мод у багатомодовому ВС, які спрямовуються на фіксованій частоті (довжині хвилі) випромінювання джерела. Це призводить до того, що час проходження цих мод по світловоду від входу ВС до виходу неоднаковий. В результаті імпульс, що утвориться ними на виході, розширюється, причому величина розширення дорівнює різниці часу розповсюдження самої повільної і самої швидкої моди. Означене явище носить назву міжмодової дисперсії.

Величину кілометричної дисперсії σ_1^* оцінюється як (3.10):

$$\sigma_1^* = \frac{n_1 \Delta}{C} \quad (3.10)$$

де Δ – відносна різниця показників заломлення матеріалу серцевини та оболонки, C – швидкість світла у вільному просторі.

Для зменшення дисперсії у багатомодових ВС використовують ВС із градієнтним ППЗ (рис. 3.11).

$$\sigma_1^{zp} = n_1 \Delta^2 / 2C \quad (3.11)$$

Хроматична (внутрішньомодова) дисперсія в одномодових волокнах

В одномодових ВС міжмодова дисперсія буде відсутня і розширення імпульсу, що передається, відбувається внаслідок хроматичної дисперсії основної моди.

В одномодових ВС розповсюджується тільки одна мода розширення HE₁₁ (LP₀₁) і розширення імпульсу визначається, головним чином, дисперсією матеріалу і хвилеводною дисперсією (3.12):

$$\sigma_{XP} = \sigma_{BH} = \sigma_\lambda * L * (T1 + T2 + T3) = \sigma_\lambda * L * \tau_{XP} \quad (3.12)$$

де σ_λ - ширина спектральної лінії джерела випромінювання, нм ;

L - довжина ВС, км;

$T1$ - складова дисперсії матеріалу, пс/(нм*км);

$T2$ - складова хвилевдної дисперсії, пс/(нм*км);

$T3$ - дисперсія профілю показника заломлення, пс/(нм*км);

τ_{XP} - коефіцієнт питомої хроматичної дисперсії.

Для подальших розрахунків вираз (3.12) можна записати і таким чином

$$\sigma_{XP} = \sigma_{BH} = \sigma_1 * L, \quad (3.13)$$

$$\text{де } \sigma_1 = \sigma_\lambda * (T1 + T2 + T3) = \sigma_\lambda * \tau_{XP}. \quad (3.14)$$

Відмінність швидкостей розповсюдження кожної з спектральних складових напрямлених мод, що утворюють сигнал, на різних частотах спектру випромінювання джерела, призводить до різної часової затримки частотних складових сигналу, тобто до хроматичної (внутрішньомодової) дисперсії. Причиною хроматичної (внутрішньомодової) дисперсії є кінцева ширина спектральної лінії джерела випромінювання. Чим ширше спектр випромінювання оптичного джерела, тим більше хроматична дисперсія.

Хроматична дисперсія складається з дисперсії матеріалу (матеріальної дисперсії), хвилевдної дисперсії та профільної дисперсії.

Дисперсія матеріалу ОВ зумовлена залежністю показника заломлення матеріалу серцевини і оборонки від довжини хвилі оптичного випромінювання. Спектральна залежність показника заломлення скла найбільш часто описується тричленною формулою Селлмейєра (3.15):

$$n = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - l_i^2}}, \quad (3.15)$$

де A_i , l_i - параметри, що залежать від складу скла (коефіцієнти Селлмейєра). Вони визначаються експериментально. Через залежність показника заломлення матеріалу серцевини і оболонки від довжини хвилі оптичного випромінювання будуть відрізнятися швидкості перенесення енергії різними спектральними складовими оптичного сигналу. Матеріальна

складова дисперсії дорівнює нулеві на довжині хвилі 1,276 мкм (для чистого кварцу).

Хвильоводна дисперсія зумовлена спрямовуючими властивостями світловодної структури, а саме нелінійною залежністю сталої розповсюдження β даної моди ВС від довжини хвилі (частоти) оптичного випромінювання.

2. Розрахунок числової апертури, нормованої частоти та кількості мод.

Спочатку обираємо склад матеріалу серцевини та оболонки. Обираємо такий склад:

для серцевини: $GeO_2 \rightarrow 3.5\%$, $SiO_2 \rightarrow 96.5\%$; оболонки: $SiO_2 \rightarrow 100\%$

Для обраних матеріалів у літературі знаходимо коефіцієнти Селлмейєра, розраховуємо відповідні показники заломлення матеріалів, а далі за наведеними раніше формулами розраховуємо відносну різницю показників заломлення Δ , числову апертуру, нормовану частоту та кількість мод, що розповсюджуються по ВС.

3. Розрахунок міжмодової дисперсії у ВС.

За формулами (3.10) та (3.11) розраховуємо значення питомої кілометричної дисперсії для ВС із східчастим та градієнтним профілем показника заломлення.

4. Розрахунок внутрішньомодової дисперсії у ВС.

Складова матеріальної дисперсії визначається:

$$T_1 = \frac{\lambda}{c} \cdot \left[A(V) \cdot \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} + [1 - A(V)] \cdot \frac{d^2 n^2}{d\lambda^2} \right], \quad (3.15)$$

$$A(V) = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{dV \cdot b}{dV} + b \right], \quad (3.17)$$

де dVb/dV – нормований час пробігу моди, b – нормована стала розповсюдження.

Складова хвильоводної дисперсії визначається за наступною формулою:

$$T_2 = \frac{n \cdot \Delta}{c \cdot \lambda} \cdot B(n) \cdot V \frac{d^2 V \cdot b}{dV^2}, \quad (3.18)$$

$$B(n) = 1 - \left[\frac{\lambda}{n_2} \cdot \frac{dn_2}{d\lambda} \right]^2, \quad (3.19)$$

де $V(d^2 Vb/dV^2)$ – хвильоводна дисперсія моди.

Складова профільної дисперсії визначається по формулі:

$$T_3 = -\frac{n_2}{c} \cdot C(n) \cdot D(V) \cdot \frac{d\Delta}{d\lambda}, \quad (3.20)$$

$$C(n) = 1 - \frac{\lambda}{n_2} \cdot \frac{dn_2}{d\lambda} - \frac{\lambda}{4 \cdot \Delta} \cdot \frac{d\Delta}{d\lambda}, \quad (3.21)$$

$$D(V) = V \cdot \frac{d^2(V \cdot b)}{dV^2} + \frac{d(V \cdot b)}{dV} - b. \quad (3.22)$$

Враховуючи, що розрахунки за цими формулами дуже складні, можна використати апроксимацію цих функцій поліномами.

$$B = a_0 + a_1x + a_2x^2 \dots\dots$$

Вираз для ϵ :

$$\epsilon = \frac{-0,321 + 3,785V - 3,662V^2 + V^3}{19,744 - 19,349V + 5,116V^2}$$

$$\frac{dVb}{dV} = \frac{-4,161 + 12,07V - 7,1V^2 + V^3}{7,599 - 3,999V - 3,9 \times 10^{-6}V^2}$$

$$\frac{Vd^2Vb}{dV^2} = \frac{-0,983 + 5,988V - 4,804V^2 + V^3}{-6,852 + 10,011V - 3,418V^2}$$

Завдання: Розрахувати складові частини внутрішньомодової (хроматичної) дисперсії та сумарну внутрішньомодову дисперсію за наведеними вище виразами в діапазоні довжин хвиль 0,85 мкм-1, 6 мкм. Побудувати графіки вказаних видів дисперсій. За результатами розрахунків знайти значення довжини хвилі з мінімальною хроматичною дисперсією.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

АНАЛІЗ ДИСПЕРСІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОД ВС

1. Аналіз дисперсійних характеристик мод ВС.
2. Виконання модульної контрольної роботи згідно фонду завдань за Модулем 1.
3. Повторення матеріалу попередньої лекції.

1. Аналіз дисперсійних характеристик мод ВС.

Розв'язуючи електродинамічну задачу розповсюдження світла у ВС, отримують рівняння типу $\beta_i(\omega) = 0$, котрі i є дисперсійними характеристиками мод. Тут β_i – стала розповсюдження i -ої моди, ω - частота. Стала розповсюдження β - головний параметр передачі світловода. Стала розповсюдження визначається виразом (4.1):

$$\beta_i = 2\pi/\Lambda_i \quad (4.1)$$

де Λ_i – довжина хвилі i -ої моди. Стала розповсюдження визначає фазову та групову швидкості розповсюдження мод у волоконному світловоді (4.2):

$$V_\phi = \omega/\beta; \quad V_{gr} = d\omega/d\beta \quad (4.2)$$

Графічно графіки $\beta_i(\omega) = 0$ зручно розглядати в координатах $\beta/k = f(V)$, де $k = 2\pi/\lambda$ - хвильове число у вакуумі. Вивчаючи графіки $\beta_i = f(V)$, де V - нормована частота, доцільно звертати увагу на кількість пересічень перпендикуляра, відновленого від якогось значення V на осі абсцис, з кривими $\beta/k = f(V)$. Їх кількість дає кількість мод, що розповсюджуються по волоконному світловоду. Треба звернути увагу, що дисперсійні криві мод починаються для значень V , що дорівнюють значенням частот відсічки $V_{відс.}$ мод вищого порядку. Треба звернути увагу, що частота відсічки для основної моди - HE_{11} (LP_{01}) дорівнює нулеві, тобто $V_{відс.} = 0$.

Треба зауважити, що наближення до значення $V_{відс.}$ з боку більших значень V з точки зору променевої моделі розповсюдження світла у волоконному світловоді означає, що кут падіння променя на границю серцевина-оболонка наближається до критичного і стає йому рівним в точці, що відповідає значенню $V_{відс.}$

Завдання. Розрахувати значення нормованої частоти для ВС для різних комбінацій радіусу серцевини a , довжини хвилі випромінювання λ , показників заломлення матеріалів серцевини n_1 та оболонки n_2 . Формула для розрахунку нормованої частоти V (4.3):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4.3)$$

Вихідні дані:

$a = 3; 5; 25$ мкм; $\lambda = 1,31; 1,55$ мкм; $n_1 = 1,5; 1,52; 1,55$; $n_2 = 1,48$ мкм.

2. Виконання модульної контрольної роботи згідно фонду завдань за Модулем 1.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СВІТЛА В ОПТИЧНИХ КОМПОНЕНТАХ ВОСП

1. Аналіз поляризаційних властивостей світла.
2. Розрахунок оптичних ізоляторів на основі ефекту Фарадея.
3. Розрахунок оптичних модуляторів на основі ефекту Фарадея.

1. Аналіз поляризаційних властивостей світла.

Поляризація електромагнітної хвилі (світла) пов'язана із напрямком коливань вектора напруженості електричного поля $\vec{E}$. Розрізняють три типи хвиль за станом поляризації: лінійно (плоско) поляризовані, циркулярно (ліво та право) поляризовані та еліптично (ліво та право) поляризовані. Перші два типи поляризації є окремими випадками еліптично поляризованої хвилі. Тобто вектор $\vec{E}$ за час одного періоду коливань коливається в площині, або здійснює один оберт (рис.5.1 а,б,в відповідно до лінійно поляризованої, циркулярно поляризованої та еліптично поляризованої хвилі).

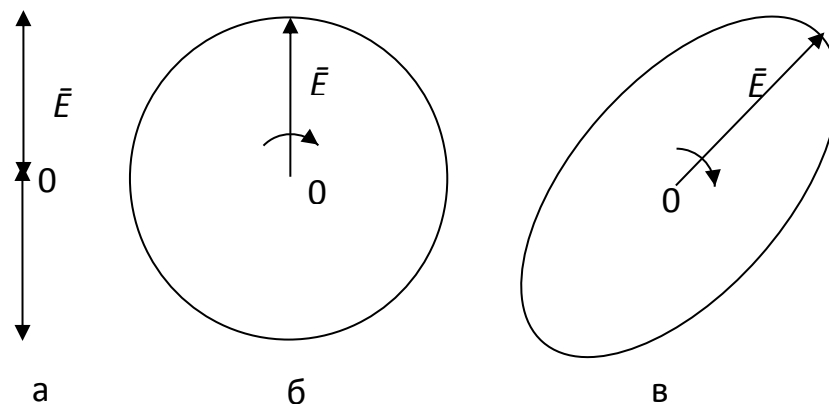


Рисунок 5.1 - Типи поляризації електромагнітних хвиль

Поляризацію світла певного типу отримають із неполяризованого світла за допомогою спеціальних пристроїв - *поляризаторів*. Лінійні поляризатори (П) утворюють на виході лінійно поляризоване світло, що певним чином орієнтовано у просторі. Ця орієнтація визначається напрямком так званої *вісі найбільшого пропускання* – ВНП.

За допомогою поляризатора можна проаналізувати стан поляризації світла (тепер поляризатор назвемо аналізатором - АН), обертаючи його навколо осі - напрямку розповсюдження світла. Якщо ВНП АН співпадає з напрямком ВНП поляризатора, то інтенсивність світла $I(0)$, що послідовно проходить П та АН, на виході такої системи буде максимальна. Якщо їх ВНП будуть розташовані під кутом 90° ("схрещені"), то для ідеальних П та АН інтенсивність світла на виході такої системи $I(90)$ буде нульова. Зміна інтенсивності в залежності від θ - кута між ВНП поляризатора та аналізатора, відбувається за законом Малюса (5.1), де I_0 – інтенсивність світла, що падає на систему "П – АН".

$$I(\theta)/I_0 = \cos^2\theta \quad (5.1)$$

2. Розрахунок оптичних ізоляторів на основі ефекту Фарадея.

На ВОЛЗ використовуються оптичні ізолятори, що побудовані на використанні *ефекту Фарадея*. Оптичні ізолятори призначені для захисту лазерних діодів від зворотних та сторонніх світлових потоків. *Ефект Фарадея* - це явище обертання площини поляризації електромагнітної хвилі (світла) у середовищі при проходженні його в напрямку прикладеного до середовища магнітного поля. Кут обертання площини поляризації світла θ пропорційний довжині шляху світла в середовищі L , напруженості магнітного поля H та сталій Верде χ , що характеризує властивість середовища обертати площину поляризації (5.2):

$$\theta = \chi H L \quad (5,2)$$

Напрямок обертання *залежить* від напрямку магнітного поля і *не залежить* від напрямку розповсюдження світла. Стала Верде парамагнетиків невелика, тому в оптичних ізоляторах використовують інший матеріал – YIG – залізо-іттриєвий гранат, що характеризується високою прозорістю в ближній інфрачервоній ділянці спектру та великим значенням χ (десятки градусів на сантиметр при насиченні).

Структурна схема оптичного ізолятора наведена на рисунку 5.2.

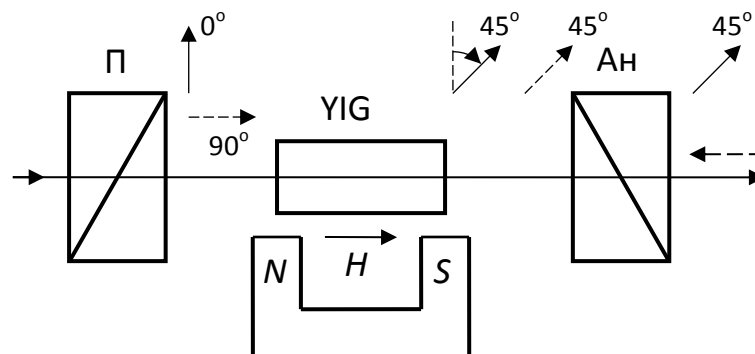


Рисунок 5.2 – Структурна схема оптичного ізолятора

Світло від джерела випромінення поступово проходить зліва направо (суцільні лінії) П, ВНП якого розташована під кутом 0° , циліндр з YIG такої довжини, щоб в магнітному полі напруженості H кут обертання площини поляризації дорівнював 45° . Наступний Ан з ВНП, розташованою під кутом 45° , безперешкодно пропустить світловий потік в лінію. Зворотний потік (відбитий чи сторонній) – пунктирні лінії – поляризується Ан під кутом 45° , площина поляризації потоку обертається на 45° додатково зразком з YIG, і надходить на поляризатор під кутом 90° до ВНП поляризатора. За якісних параметрів поляризатора і аналізатора зворотні та сторонні потоки, що виходять з поляризатора напрямку до джерела випромінення, можуть бути послаблені на 55-60 дБ при прямих втратах оптичного ізолятора 3 дБ.

3. *Розрахунок величини кута обертання площини поляризації лінійно-поляризованого світла.*

1. Розрахувати напруженість магнітного поля H (в ерстедах), необхідну для обертання площини поляризації на кут 45° в "важкому" склі довжиною 10 см із сталою Верде χ , рівною $27 \cdot 10^{-2}$ хвилин/(см*ерстед).
2. Розрахувати довжину зразка з YIG, необхідну для обертання площини поляризації на кут 45° при насиченні матеріалу, якщо питоме обертання площини поляризації становить $60^\circ/\text{см}$.
3. Порівняти отримані результати.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВОСП

1. Розрахунок енергетичного потенціалу ВОСП.
2. Побудова енергетичної діаграми регенераційної ділянки ВОЛЗ.
3. Аналіз енергетичної діаграми регенераційної ділянки ВОЛЗ.
4. Виконання модульної контрольної роботи за Модулем 2.

1. Розрахунок енергетичного потенціалу ВОСП.

Енергетичний потенціал системи передавання (СП) визначається виключно характеристиками системи передавання. З іншого боку, енергетичний потенціал системи передавання визначає максимальні втрати у лінійному тракті (в оптичному кабелі, роз'ємних і нероз'ємних з'єднаннях, оптичних розгалужувачах тощо).

Енергетичний потенціал системи передавання у загальному випадку можна представити у такому вигляді (6.1):

$$P \text{ (дБ)} = p_{\text{ДВ}} - p_{\text{УВ}} - p_{\text{ВВВ}} - p_{\text{Т}} - p_{\text{ОПТ.ПОР.}} = p_{\text{ПЕР.}} - p_{\text{ОПТ.ПОР.}} \quad (6.1)$$

де $p_{\text{ДВ}}$ - рівень потужності джерела випромінювання (ДВ) СП, дБм;

- $p_{\text{УВ}}$ та $p_{\text{ВВВ}}$ - відповідно втрати оптичної потужності при уведенні-світла з ДВ до оптичного волокна (ОВ) та виведенні світла з ОВ до фотоприймача (Фпр.) СП, дБ;

- $p_{\text{Т}}$ - допуск на зміну втрат у СП через зміну температури оточуючого середовища (приймається 1 дБ);

- $p_{\text{ОПТ.ПОР.}}$ - пороговий рівень оптичної потужності на вході фотоприймача Фпр. (тобто на вході оптичного роз'ємного з'єднувача) СП, необхідний для забезпечення заданої якості передавання, дБм;

$p_{\text{ПЕР.}}$ - рівень потужності на виході оптичного передавача (тобто на виході оптичного роз'ємного з'єднувача) СП, дБм.

Якщо рівень потужності джерела випромінювання $p_{\text{ДВ}}$ (або потужність у Вт) та $p_{\text{ВВВ}}$ задається, то $p_{\text{УВ}}$ та $p_{\text{ОПТ.ПОР.}}$ необхідно розрахувати.

Задача 1.1

У відповідності до варіанту розрахувати втрати при уведенні світла з ДВ до ОВ.

Вказівки до задачі 1.1

Через те, що світло, яке виходить з ДВ, повинно пройти через середовище (**повітря або рідина**), щоб потрапити до ОВ, то втрати оптичної потужності **при уведенні** світла з ДВ до ОВ виникають через френелівське відбиття світла на границях "ДВ - середовище" та "середовище - ОВ" (Аналогічно при **виведенні** з ОВ світло знов таки, щоб потрапити до фотоприймача Фпр., **проходить середовище**, відбиваючись

частково на границях "ОВ - середовище" та "середовище - Фпр."). Коефіцієнт френелівського відбиття R (за потужністю) на границі розділу двох середовищ з показниками заломлення n_1 та n_2 відповідно розраховується за формулою (6.2):

$$R = [(n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)]^2 \quad (6.2)$$

Тоді втрати світла на уведення в ОВ розраховуються за формулою (6.3):

$$p_{ув.(вив.)} = -10 \lg(1 - R), \text{ дБ} \quad (6.3)$$

Через те, що при уведенні світла з ДВ до ОВ воно проходить крізь дві границі, то сумарний коефіцієнт відбиття R буде складатися з двох: R_1 , що характеризує відбиття на границі "ДВ – середовище" з показниками заломлення матеріалів ДВ та середовища n_1 та n_2 відповідно, та R_2 , що характеризує відбиття на границі "середовище - ОВ" з показниками заломлення матеріалів середовища та ОВ n_2 та n_3 відповідно. Тобто $R = R_1 + R_2$. Розрахувавши значення R , треба за формулою (6.3) розрахувати значення втрат на уведення світла з ДВ до ОВ.

Завдання.

Розрахувати енергетичний потенціал системи передавання за такими вихідними даними.

1. $n_1 = 3,5$.
2. $n_2 = 1,0$.
3. $n_3 = 1,5$.
4. $R_{вив.} = 0,3$.
5. $p_{опт.пор.} = -24,76$ дБм.

2. Побудова енергетичної діаграми регенераційної ділянки ВОЛЗ.

Енергетична діаграма відображує розподіл втрат світла у волоконно-оптичному тракті на шляху від передавача до фотоприймача. Ці втрати не повинні перевищувати енергетичного потенціалу СП (6.4):

$$P = 2a_{pz.} + \alpha * L + a_{нз.} * (L/l_{буд.} - 1) + p_{зап.} \quad (6.4)$$

- $p_{зап.}$ ~ експлуатаційний запас системи;
- $a_{pz.}$ та $a_{нз.}$ - втрати в роз'ємних та нероз'ємних з'єднаннях відповідно;
- α ~ коефіцієнт загасання в оптичному кабелі;
- $l_{буд.}$ - будівельна довжина кабелю;
- L - довжина кабелю (довжина регенераційної ділянки).

Одиницею, що в дужках, можна знехтувати. Енергетична діаграма за (6.4) практично повністю відтворена на (рис.6).

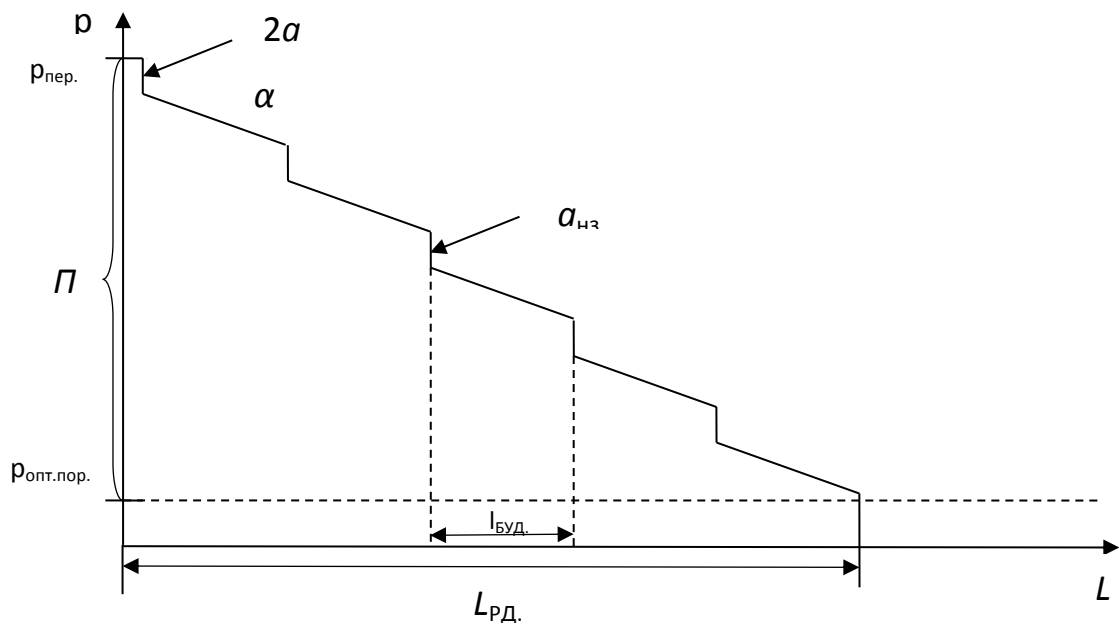


Рисунок 6 - Енергетична діаграма

3. Аналіз енергетичної діаграми регенераційної ділянки ВОЛЗ.

Необхідно проаналізувати вплив параметрів, що входять до виразу (6.4), на вигляд енергетичної діаграми. Також треба проаналізувати взаємний вплив параметрів.

4. Виконання модульної контрольної роботи за Модулем 2.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7

РОЗРАХУНОК ЧУТЛИВОСТІ ФОТОПРИЙМАЧА ВОСП

1. Розрахунок чутливості різних типів фотодіодів для аналогових сигналів.
2. Розрахунок чутливості різних типів фотодіодів для цифрових сигналів.

1. Розрахунок чутливості різних типів фотодіодів для аналогових сигналів.

У волоконно-оптичних системах передавання (ВОСП) використовуються два типи напівпровідникових приймачів оптичного випромінювання - так звані **p-i-n** діоди та лавинні фотодіоди (ЛФД). Якщо у **p-i-n** діодів при поглинанні фотону народжується одна електронно-діркова пара і носії заряду створюють фотострум, що пропорційний інтенсивності світла, що падає на фотоприймач то в ЛФД присутнє ще додаткове підсилення первинного фотоструму за рахунок лавинної іонізації. Остання характеризується коефіцієнтом лавинного підсилення фотоструму **G**.

При детектуванні у системах волоконно-оптичного зв'язку доводиться мати справу з дуже слабкими сигналами. Суттєвими характеристиками пари "фотодетектор (фотоприймач) - підсилювач", що описує чутливість детектуючої системи, є відношення сигнал/шум (С/Ш) на виході підсилювача, що забезпечується, та мінімально виявлена оптична потужність - **Р_{опт.мін.}** Ця потужність залежить від квантової ефективності фотоприймача та рівня шумів.

У якості **Р_{опт.мін.}** зазвичай приймають величину потужності, що викликає у фотодетекторі струм $\langle i_c \rangle$, який співпадає за величиною із середньоквадратичним значенням шумового струму $\langle i_{ш} \rangle$.

Для **p-i-n** фотодіоду

$$\frac{C}{Ш} = \langle i_c \rangle^2 / \langle i_{ш} \rangle^2 \quad (7.1)$$

а для ЛФД

$$\frac{C}{Ш} = \langle i_c \rangle^2 G^2 / \langle i_{ш} \rangle^2 \quad (7.2)$$

Можна показати, що для $C/Ш = 1$ значення мінімально виявленої оптичної потужності описується виразом (7.3) та (7.4):

$$P_{\text{опт.мін.}} = A \cdot B, \quad B_{\text{т}} - \text{для } \mathbf{p-i-n} \text{ фотодіоду} \quad (7.3)$$

$$P_{\text{опт.мін.}} = A \cdot B / G, \quad B_{\text{т}} - \text{для ЛФД} \quad (7.4)$$

де **A** (у Вт*с) – параметр, величина якого залежить від довжини хвилі світла та квантової ефективності фотоприймача. Як можна побачити з (7.3) та (7.4), **Р_{опт.мін.}** прямо пропорційна швидкості передавання **B** (біт/с). Якщо ж необхідно забезпечити передачу оптичних сигналів із заданою швидкістю **B** та заданим коефіцієнтом помилок **Р_{пом.}** то вирази (7.3) та (7.4) перетворюються у вирази для *порогової оптичної потужності* (у Вт) на вході фотоприймача **Р_{опт.пор.}** (7.5) та (7.6):

$$P_{\text{опт.пор.}} = A \cdot B \cdot \langle i_c \rangle / \langle i_{ш} \rangle, \quad B_{\text{т}} - \text{для } \mathbf{p-i-n} \text{ фотодіоду} \quad (7.5)$$

$$P_{\text{опт.пор.}} = A \cdot (B/G) \cdot (\langle i_c \rangle / \langle i_{ш} \rangle), \quad B_{\text{т}} - \text{для ЛФД} \quad (7.6)$$

2. Розрахунок чутливості різних типів фотодіодів для цифрових сигналів.

Фотоприймач є пристроєм, що сприймає як аналогові, так і цифрові сигнали. В аналогових СП якість зв'язку визначається відношенням С/Ш, а в цифрових – коефіцієнтом помилок $P_{\text{пом.}}$. Між ними існує певний взаємозв'язок. Залежність між $P_{\text{пом.}}$ та $i_c / i_{\text{ш}}$ наведена на рисунку 1. За цим графіком для заданого значення $P_{\text{пом.}}$, можна знайти значення $20\lg[i_c / i_{\text{ш}}]$ у децибелах, а з нього вже значення $i_c / i_{\text{ш}}$ в разях. Отримані значення $P_{\text{опт.пор.}}$ необхідно перевести у дБм (рівень потужності).



Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта помилок від співвідношення струму сигналу до струму шумів

Формула переводу потужності P (у Вт) у рівень потужності p (у дБм) виконується за формулою (7.7):

$$p(\text{дБм}) = 10 \lg[P/1\text{мВт}] \quad (7.7)$$

Завдання.

Задача 1. Розрахувати чутливість для $p-i-n$ фотодіода та для ЛФД для наступних вихідних даних:

1. $A = 0,04 \text{ пВт} \cdot \text{с}$.
2. $B = 167 \text{ Мбіт/с}$.
3. $G = 20$.
4. $P_{\text{пом.}} = 10^{-9}$.

Задача 2. Визначити потужність опромінення $p-i-n$ фотодіода та ЛФД відповідно за умов:

1. $G = 20$.
2. $S = 0,9 \text{ А/Вт}$, $I = 5 \text{ мА}$.
3. $S = 0,6 \text{ А/Вт}$, $I = 10 \text{ мА}$.
4. $S = 0,8 \text{ А/Вт}$, $I = 1 \text{ мА}$.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8

РОЗРАХУНОК ДОВЖИНИ РЕГЕНЕРАЦІЙНОЇ ДІЛЯНКИ ВОЛЗ.

1. Розрахунок довжини регенераційної ділянки
 - 1.1 Розрахунок довжини регенераційної ділянки за часовими характеристиками.
 - 1.2 Розрахунок довжини регенераційної ділянки за енергетичними характеристиками.
2. Аналіз широкосмуговості волоконного світловода.

1. Розрахунок довжини регенераційної ділянки

Довжиною регенераційної ділянки **Лрд.** називається довжина кабелю, на якій зберігається задана якість передавання, тобто коефіцієнт помилок не перевищує допустимий за заданої швидкості передавання. Інакше це та довжина кабелю, на якій ще можна *регенерувати*, тобто *відновити* сигнал – форму (або тривалість) та амплітуду імпульсу, а також його положення на часовій осі.

Значення довжини регенераційної ділянки (РД) **Лрд.** визначається заданими параметрами передачі інформації по ВОСП: ймовірністю помилки в прийнятому повідомленні $P_{\text{пом.}}$, потрібною швидкістю передачі сигналів ***V*** і елементною базою ВОЛЗ (приймачем, передавачем, ОК). Довжина регенераційної ділянки **Лрд.** повинна бути максимальною з точки зору економічності та забезпечення високої якості передачі інформації. Характеристики оптичного волокна повинні забезпечити максимальну довжину ділянки регенерації.

Найбільша довжина регенераційної ділянки визначається загальними втратами в лінійному тракті і розширенням імпульсів у волоконному світловоді.

Причиною обмеження величини **Лрд.** при заданих значеннях $P_{\text{пом}}$ та ***V*** є два фактора:

- 1) спотворення форми імпульсів, що передаються по ВОЛЗ, за рахунок неідеальних часових характеристик лінійного тракту, тобто дисперсії імпульсів;
- 2) загасання сигналів в лінійному тракті.

1.1 Розрахунок довжини регенераційної ділянки за часовими характеристиками

При розповсюдженні по ВС імпульси розширюються і може настати момент, коли перекриття імпульсів буде настільки великим – *міжсимвольна інтерференція*, що на приймальному кінці не можна буде правильно приймати передачу, тобто збільшиться кількість помилок і погіршиться якість передавання (рис. 8.1).

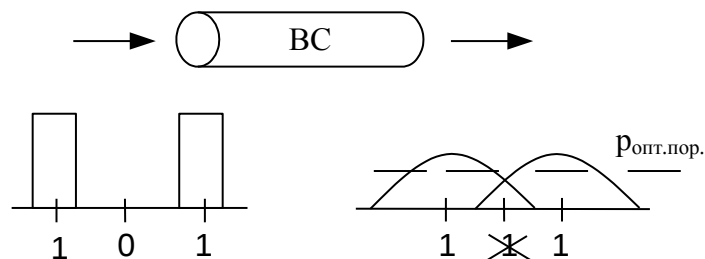


Рисунок 8.1 – Міжсимвольна інтерференція

Досліджено, що максимальна швидкість передавання B наступним чином залежить від дисперсії (8.1):

$$B \leq 0,25/(\sigma_1 * L) \quad (8.1)$$

Тоді для розрахунку довжини РД використовується формула (8.2):

$$L_{рд.} \leq \frac{0,25}{\sigma_1 * B_{онт}}, \quad (8.2)$$

де σ_1 – погонна дисперсія з урахуванням ширини спектральної лінії джерела випромінювання;

$B_{онт.}$ – швидкість передавання в оптичному тракті.

1.2 Розрахунок довжини регенераційної ділянки за енергетичними характеристиками

Для забезпечення заданої якості передачі необхідно щоб (8.3):

$$P_{ф.} \geq P_{онт.порог.} \quad (8.3)$$

де: $P_{ф.}$ – рівень оптичної потужності на вході фотоприймача, дБм;

$P_{онт.порог.}$ – мінімально необхідний рівень потужності сигналу для даного типу фотоприймача для забезпечення заданої якості передавання.

Величину $\Pi = P_{пер.} - P_{онт.порог.}$, дБ називають енергетичним потенціалом системи передавання. Рівень потужності визначається виразом (8.4):

$$P, \text{ дБм} = 10 \lg P / 1 \text{ мВт} \quad (8.4)$$

Цей енергетичний потенціал йде на покриття втрат в оптичному тракті – ОК, з'єднаннях будівельних довжин ОК, роз'ємних з'єднаннях та на експлуатаційний запас.

Тоді формула для розрахунку максимальної $L_{рд}$ має вигляд (8.5):

$$L_{рд.макс.} \leq (\Pi - P_{зап.} - 2 * \alpha_{рз.}) / (\alpha + \alpha_{нз.} / l_{буд.}), \quad (8.5)$$

де $P_{зап.}$ - експлуатаційний запас системи зв'язку, ($P_{зап.} = (6 - 10)$ дБ у нас, на Заході – 1 дБ);

$\alpha_{рз.}$ - втрати в оптичному роз'ємному з'єднанні, ($\alpha_{рз.} = 0,2 - 1$ дБ/з'єднання);

α - кілометричні втрати в оптичному кабелі, дБ/км (паспортні дані кабелі для робочої довжини хвилі);

$\alpha_{нз.}$ - загасання в нероз'ємному з'єднанні ($\alpha_{нз.} = (0,05 - 0,15)$ дБ/з'єднання);

$l_{буд.}$ - середня будівельна довжина кабелю, ($l_{буд.} = (2 - 4)$ км);

Π - енергетичний потенціал системи передавання, ($\Pi = (30 - 36)$ дБ).

Якщо наближати фотоприймач до передавача, сигнал на його вході буде зростати, а якість передавання буде зберігатися доти, поки спрацює система регулювання рівня. При подальшому зближенні будуть спотворення і якість передавання погіршиться. Тому довжина регенераційної ділянки також не може бути менше певної довжини U випадку, якщо необхідна довжина лінії зв'язку менше мінімально припустимої довжини, необхідно ставити оптичні послаблювачі (атенюатори) або вносити необхідне загасання під час зварювання оптичних волокон апаратом для зварювання (якщо апарат може здійснювати таку операцію)..

Мінімально припустима довжина РД визначається з виразу (8.6):

$$L_{рд.мін.} \geq (\Pi - P_{срр.} - 2 * \alpha_{рз.}) / (\alpha + \alpha_{нз.} / l_{буд.}), \quad (8.6)$$

де $P_{срр.}$ - динамічний діапазон автоматичного регулювання рівня (СРР), (зазвичай $P_{срр.} = 20$ дБ).

Із розрахованих **максимальних** довжин регенераційної ділянки для подальших розрахунків обирають найменшу з них.

2. Аналіз широкосмуговості волоконного світловода.

Розрахунками доведено, що найбільша швидкість передавання B не може перевищувати певної величини (8.7):

$$B \leq 0,25/\sigma = \sigma_1^{-1} * L \quad (8.7)$$

Величина $B*L$ чисельно дорівнює ΔF_1 , яка зветься *коефіцієнтом широкосмуговості*. Розмірність ΔF_1 – МГц·км. Коефіцієнт широкосмуговості показує, яку смугу частот у МГц можна передати по ВС довжиною 1 км. Або з якою швидкістю у Мбіт/с можна передавати інформацію по ВС довжиною 1 км. Смуга частот ΔF_L , яку можна передати по ВС довжиною L , визначається формулами (8.8):

$$\Delta F_L = \Delta F_1 / L \quad \text{або} \quad \Delta F_L = \Delta F_1 / (L * L_{3\sigma})^{0,5} \quad (8.8)$$

Завдання.

Розрахувати максимальну та мінімальну довжину регенераційної ділянки за такими вихідними енергетичними даними:

- потужність джерела випромінення - 1 мВт;
- чутливість фотоприймача (рівень порогової оптичної потужності) - – 30 дБм;
- коефіцієнт загасання в ОК - 0,2 дБ/км;
- втрати на нероз'ємних з'єднаннях – 0,1 дБ;
- втрати на роз'ємних з'єднаннях – 0,1 дБ;
- будівельна довжина ОК – 4 км;
- експлуатаційний запас – 3 дБ;
- динамічний діапазон автоматичного регулювання рівня – 20 дБ.

Розрахувати максимальну довжину регенераційної ділянки за такими вихідними часовими даними:

- швидкість передавання – 155 Мбіт/с;
- ширина спектральної лінії джерела випромінення – 0,5 нм;
- коефіцієнт питомої хроматичної дисперсії – 3,5 пс/(нм*км).