

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ  
ТА ТЕХНОЛОГІЙ**

**Кафедра транспортного зв'язку**

**РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ  
У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання практичних робіт**

**з дисциплін**

***«ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ»,  
«ІННОВАЦІЙНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ  
ПЕРЕДАЧІ»***

**Харків – 2022**

Методичні вказівки розглянуто рекомендовано до друку на засіданні кафедри транспортного зв'язку 11 липня 2022 р., протокол № 12.

Дані методичні вказівки містять у собі опис п'яти практичних занять, тематика яких охоплює питання впливу нелінійних ефектів в оптичному волокні на процеси поширення та якість передачі оптичного сигналу в системах волоконно-оптичної передачі, що розглядаються в рамках навчальних дисциплін «Телекомунікаційні системи передачі» та «Інноваційні телекомунікаційні системи передачі».

Методичні вказівки також можуть бути використані під час самостійної підготовки, а також при викладенні певних розділів інших дисциплін відповідно до навчальних програм.

Рекомендуються для здобувачів вищої освіти факультету ІКСТ зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» всіх форм навчання.

Укладач

доц. К. А. Трубчанінова

Рецензент

доц. С. І. Доценко

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Практична робота 1. Ефект самомодуляції.....	6
Практична робота 2. Ефект перехресної фазової модуляції.....	10
Практична робота 3. Вимушене розсіювання Рамана і Бріллюена	13
Практична робота 4. Чотирихвильове змішування.....	21
Практична робота 5. Вплив нелінійних спотворень в оптичному волокні на енергетичні характеристики сигналів.....	29
Список літератури.....	31
Додаток А.....	32

## ВСТУП

Системи телекомунікацій стикаються з постійно зростаючою потребою на частотні ресурси. Це пов'язано зі зростаючою кількістю користувачів «всесвітньої павутини», тобто зростаючим обсягом переданої інформації. Тому при побудові протяжних мереж використовують волоконно-оптичні лінії зв'язку. Оптичне волокно на сьогодні вважається найкращим способом передачі будь-якої інформації на великі відстані. Перевагою ВОСП є висока швидкість і надійність, низький показник помилок, захищеність від несанкціонованого доступу.

Оптичні системи передачі знаходять застосування в будівництві найбільших операторів мереж зв'язку, телевізійних мережах, локально-обчислюваних мережах, організації міських, внутрішньозонових, міжрегіональних мереж зв'язку. Зокрема на мережі залізниці України активно ведеться впровадження технології щільного хвильового мультиплексування DWDM (технологія щільного волоконного мультиплексування з поділом по довжині хвилі, Dense Wavelength – division Multiplexing), яка дає змогу багаторазово збільшити пропускну спроможність існуючих телекомунікаційних систем та об'єднати різні види телекомунікаційних технологій в єдину інформаційну інфраструктуру. Це відіграє величезну роль в зростаючій потребі збільшення обсягів переданої інформації. При даному способі передачі інформації з'являється можливість підвищити пропускну спроможність кожного оптичного волокна, що сприяє збільшенню пропускну спроможності всього тракту без втрати якості передачі.

Дослідження впливу нелінійних ефектів на енергетичні параметри оптичного сигналу необхідне для визначення допустимих значень характеристик оптичного волокна і системи DWDM в умовах забезпечення заданої якості передачі інформації.

Вплив таких нелінійних ефектів, як фазова самомодуляція, перехресна фазова модуляція, вимушене розсіювання Рамана і Бріллюена призводить до зменшення потужності оптичного сигналу і, як наслідок, до зменшення захищеності сигналу від завад. Основною метою даних методичних вказівок є:

- розрахунок впливу нелінійних ефектів на зниження потужності оптичних сигналів у волокні і оптичних шумів;
- розрахунок кількості сигналів, що заважають, утворених при впливі нелінійного ефекту чотирьохвильового змішування, і потужності оптичних шумів при взаємному впливі між каналами.

Дані методичні вказівки містять в собі опис п'яти лабораторних занять, тематика яких охоплює питання впливу нелінійних ефектів в оптичному волокні на процеси поширення оптичного сигналу в системах DWDM та їх впливу на якість передачі даних, що розглядаються в рамках навчальних дисциплін «Телекомунікаційні системи передачі» та «Інноваційні телекомунікаційні системи передачі».

Методичні вказівки також можуть бути використані під час самостійної підготовки, а також при викладенні певних розділів інших дисциплін відповідно до навчальних програм.

Рекомендуються для здобувачів вищої освіти факультету ІКСТ зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка» всіх форм навчання.

# ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

## Ефект фазової самомодуляції

### 1.1 Мета роботи

Виконувати інженерні розрахунки впливу ефекту фазової самомодуляції на енергетичні параметри сигналу волоконно-оптичних систем передачі.

### 1.2 Теоретичні відомості

Вплив ефекту фазової самомодуляції (SPM – Self – Phase Modulation) обумовлено нелінійним набігом фази, який оптичний сигнал набуває при поширенні у світловоді. Самомодуляція – це явище, унаслідок якого сигнал може модулювати свою власну фазу. Це призводить до часового розширення або звуження переданого імпульсу. В результаті відбувається зрушення фронтів імпульсу в бік довгих і коротких хвиль. Отже, SPM призводить до зміни швидкості розширення імпульсу [1].

Ефективна довжина взаємодії електромагнітних хвиль

$$L_{\text{еф}} = \frac{4,343}{\alpha} \left( 1 - e^{\frac{-\alpha L}{4,343}} \right), \text{ км}, \quad (1.1)$$

де  $L$  – довжина підсилювальної ділянки;

$\alpha$  – робоче затухання оптичного волокна, дБ/км.

Початкова тривалість імпульсу

$$t_0 = \frac{1}{2B}, \text{ пс}, \quad (1.2)$$

де  $B$  – швидкість передачі по оптичному каналу, Гбіт/с.

Дисперсійна довжина  $L_D$  і нелінійна довжина  $L_{NL}$  характеризують довжини, на яких дисперсійні або нелінійні ефекти необхідно враховувати при поширенні імпульсу вздовж довжини світловода ( $L$ ).

Дисперсійна довжина обчислюється за формулою:

$$L_D = \frac{t_0^2}{|\beta_2|}, \text{ км}, \quad (1.3)$$

де  $\beta_2$  – постійна поширення, пов'язана з питомою дисперсією  $D(\lambda)$  виразом:

$$\beta_2 = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} D(\lambda), \text{ пс}^2/\text{км}, \quad (1.4)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі сигналу, нм;

$c$  – швидкість розповсюдження світла,  $c = 299792500$  м/с;

$D(\lambda)$  – коефіцієнт питомої дисперсії, залежний від стандарту волокна та довжини хвилі  $\lambda$ , пс/(км·нм).

Нелінійна довжина розраховується за формулою:

$$L_{NL} = \frac{\lambda A_{\text{еф}}}{2\pi k_n P_0}, \quad (1.5)$$

де  $k_n$  – коефіцієнт нелінійності показника заломлення,  $k=3,2 \cdot 10^{-8}$ , мкм<sup>2</sup>/Вт;

$P_0$  – потужність оптичного сигналу на вході каналу, мВт;

$A_{\text{еф}}$  – ефективна площа серцевини волокна залежить від стандарту волокна, мкм<sup>2</sup>.

Максимальний фазовий зсув при ефекті можна подати як відношення ефективної довжини до нелінійної довжини:

$$\varphi_{SPM} = \frac{L_{\text{еф}}}{L_{NL}}. \quad (1.6)$$

Втрати потужності сигналу в оптичному каналі унаслідок дії ефекту само модуляції визначаються за такою формулою:

$$\Delta P_{SPM} = 5 \log \left( 1 + \sqrt{2} \cdot \varphi_{SPM} \frac{L}{L_D} + \left( 1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \varphi_{SPM}^2 \right) \frac{L^2}{L_D^2} \right). \quad (1.7)$$

Ефект впливу фазової само модуляції проявляється зі збільшенням швидкості передачі інформації в оптичному каналі і при збільшенні потужності оптичного сигналу. Зменшення частотної відстані між каналами або збільшення числа каналів

зв'язку не роблять вплив на ефект SPM. Вплив фазової самомодуляції зменшується, якщо хроматична дисперсія нульова або незначна за величиною (до 6 пс/(нм·км)), а також при збільшенні ефективної площі серцевини оптичного волокна. Реально вплив SPM значний (втрати становлять кілька дБ) тільки в системах DWDM з високим значенням швидкості передачі ( $B \geq 10$  Гбіт/с), високим значенням питомої дисперсії або в системах великої протяжності [2].

### 1.3 Порядок виконання завдання

1 Вибрати з таблиці А.1 додатку А відповідно до свого номеру варіанту вихідні дані для розрахунку.

2 Здійснити розрахунок ефекту фазової самомодуляції за формулами (1.1)-(1.7).

3 Розрахунок проводити за трьома швидкостями передачі сигналу:  $B=2,5$  Гбіт/с;  $B=10$  Гбіт/с;  $B=40$  Гбіт/с; та за трьома потужностями оптичного сигналу на вході каналу:  $P_0=1$  мВт;  $P_0=5$  мВт;  $P_0=10$  мВт.

4 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки за трьома значеннями швидкості передачі інформації. Всі три графіки мають бути побудовані на одній площині координат.

5 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності оптичного сигналу. Всі три графіки мають бути побудовані на одній площині координат. Швидкість передачі інформації взяти рівною  $B=10$  Гбіт/с.

6 Зробити висновки за результатами розрахунків.



## 1.4 Фрагмент прикладу розрахунку

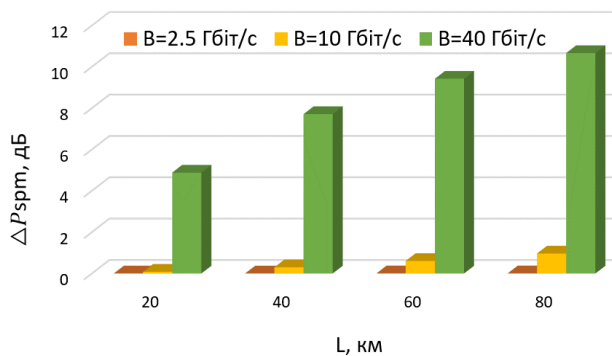


Рисунок 1.1 – Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень швидкості передачі інформації

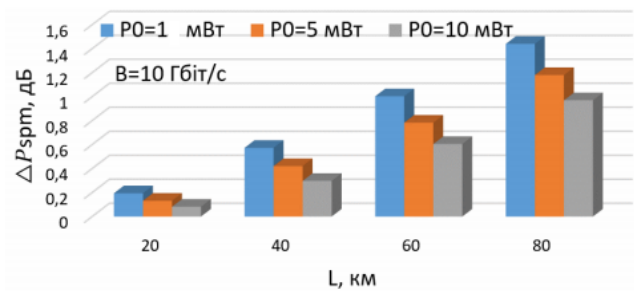


Рисунок 1.2 – Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності оптичного сигналу

### Контрольні питання

- 1 Фізичні процеси, що викликають фазову самомодуляцію.
- 2 Поясніть вплив фазової самомодуляції на характеристики сигналів волоконно-оптичних ліній зв'язку.
- 3 Поясніть вплив фазової самомодуляції на пропускну спроможність волоконно-оптичних систем передачі.
- 4 Вплив фазової самомодуляції в області нормальної дисперсії.
- 5 Вплив фазової самомодуляції в області аномальної дисперсії.
- 6 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки залежно від швидкості передачі інформації.
- 7 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності оптичного сигналу.
- 8 Умови зменшення впливу фазової самомодуляції.
- 9 Позитивні аспекти ефекту фазової самомодуляції.
- 10 Негативні аспекти ефекту фазової самомодуляції.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

### Ефект перехресної фазової модуляції

#### 2.1 Мета роботи

Виконувати інженерні розрахунки впливу ефекту перехресної фазової модуляції на енергетичні параметри сигналу волоконно-оптичних систем передачі.

#### 2.2 Теоретичні відомості

Зміна показника заломлення волокна виникає не тільки через фазові самотуляції хвиль (SPM ефект), а й через СРМ (Cross Phase Modulation) ефект – перехресну фазову модуляцію хвиль, що виникає при взаємодії з хвилями, що поширюються в інших каналах DWDM системи. СРМ ефект обумовлений набігом фази сигналу, наведеного електромагнітним нулем, з іншою довжиною хвилі. СРМ викликає розширення спектра переданого сигналу, зміну потужності оптичного сигналу в каналах системи DWDM, взаємні впливи між сусідніми оптичними каналами. Величина розширення спектра сигналу, що вноситься СРМ, залежить від частотної відстані між каналами.

Оскільки потужність оптичного сигналу в кожному каналі системи DWDM має бути приблизно однаковою, то ефект СРМ збільшує нелінійний фазовий зсув, що виникає через СРМ ефект, приблизно в  $2 \times N$  разів, де  $N$  – число оптичних каналів в системі DWDM [4].

Перехресна фазова модуляція призводить також і до появи амплітудних спотворень і часового джиттера. Ці спотворення проявляються тим сильніше, чим вище швидкість передачі сигналу і менше інтервал частот між каналами.

Фазовий зсув через ефект СРМ розраховується за формулою:

$$\varphi_{\text{СРМ}} = 2\gamma L_{\text{еф}} P_0 (N - 1). \quad (2.1)$$

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{k_n}{A_{\text{еф}}}. \quad (2.2)$$

Втрати потужності сигналу в оптичному каналі унаслідок впливу СРМ визначаються за такою формулою:

$$\Delta P_{CPM} = 5 \log \left( 1 + \sqrt{2} \cdot \varphi_{CPM} \frac{L}{L_D} + \left( 1 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \varphi_{CPM}^2 \right) \frac{L^2}{L_D^2} \right). \quad (2.3)$$

Тут дисперсійна довжина  $L_D$  враховує величину міжканального інтервалу:

$$L_D = \frac{\pi c \Delta f}{2B^2 \lambda^2 D(\lambda)}, \quad (2.4)$$

де  $\Delta f$  – рознос частот між оптичними каналами задається апаратурою,  $\Delta f = 100$  ГГц або  $\Delta f = 50$  ГГц;

$B$  – швидкість передачі по оптичному каналу, Гбіт/с.

В системах DWDM спотворення сигналів, викликаних впливом ефекту СРМ, вносять переважно сусідні за частотою канали. Вплив СРМ може бути знижено раціональним вибором кроку частот між каналами, а також зменшенням потужності сигналу в оптичному каналі [5].

### 2.3 Порядок виконання завдання

1 Вибрати з таблиці А.1 додатку А відповідно до свого номеру варіанту вихідні дані для розрахунку.

2 Здійснити розрахунок ефекту фазової перехресної само модуляції за формулами (2.1)-(2.4).

3 Розрахунок проводити за трьома швидкостями передачі сигналу:  $B=2,5$  Гбіт/с;  $B=10$  Гбіт/с;  $B=40$  Гбіт/с; та за трьома потужностями оптичного сигналу на вході каналу:  $P_0=1$  мВт;  $P_0=5$  мВт;  $P_0=10$  мВт.

4 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки за трьома значеннями швидкості передачі інформації. Всі три графіки мають бути побудовані на одній площині координат.

5 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу від довжини

підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності оптичного сигналу. Всі три графіки мають бути побудовані на одній площині координат. Швидкість передачі інформації взяти рівною  $V=10$  Гбіт/с.

6 Зробити висновки за результатами розрахунків.

## 2.4 Фрагмент прикладу розрахунку

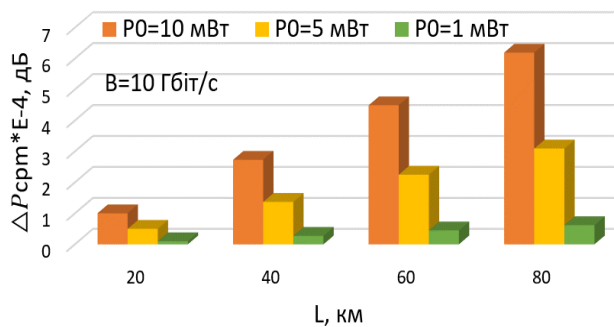


Рисунок 2.1 – Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності сигналу

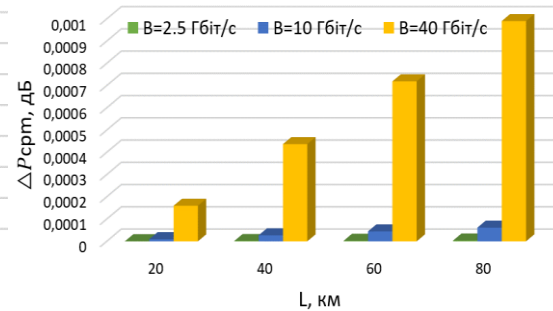


Рисунок 2.2 – Залежність втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень швидкості передачі інформації

## Контрольні питання

1 Фізичні процеси, що викликають перехресну фазову модуляцію.

2 В чому різниця фазової самомодуляції від перехресної модуляції?

3 Поясніть вплив перехресної фазової модуляції на характеристики сигналів волоконно-оптичних ліній зв'язку.

4 Поясніть вплив перехресної фазової модуляції на пропускну спроможність волоконно-оптичних систем передачі.

5 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки залежно від швидкості передачі інформації.

6 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу від довжини підсилювальної ділянки для різних значень вхідної потужності оптичного сигналу.

7 Умови зменшення впливу перехресної фазової модуляції.

- 8 Позитивні аспекти перехресної фазової модуляції
- 9 Негативні аспекти перехресної фазової модуляції.
- 10 Сумісний вплив фазової самотуляції та перехресної фазової модуляції на співвідношення «сигнал/шум» багатоканальної волоконно-оптичної лінії зв'язку.

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА 3**

### **Ефект вимушеного розсіювання Рамана і Бріллюена**

#### **3.1 Мета роботи**

Виконувати інженерні розрахунки впливу вимушеного розсіювання Рамана і Бріллюена на енергетичні параметри сигналу волоконно-оптичних систем передачі.

#### **3.2 Теоретичні відомості**

Явища вимушеного розсіювання SRS і SBS проявляються в тому, що потужність оптичного сигналу, що вводиться в волокно, розсіюється, відповідно, на звукових хвилях, що поширюються в волокні (акустичних фотонах) і на молекулярних коливаннях волокна (оптичних фотонах). При цьому спектр сигналу зміщується в область більш довгих хвиль. При вимушеному розсіюванні Рамана (SRS) спектр спонтанного випромінювання широкий (близько 7 ТГц або 55 нм) і зміщений в довгохвильовий бік на величину порядку 13 ТГц. При вимушеному розсіюванні Бріллюена (SBS) спектр спонтанного випромінювання вузький (3.0 + 60 МГц) і зміщений в довгохвильовий бік на 11 ГГц.

Хоча явища і багато в чому схожі, можна виділити кілька суттєвих відмінностей:

- SBS спостерігається тільки для зустрічної хвилі (розсіювання відбувається тільки тому). SRS спостерігається не тільки для зустрічних хвиль, але і для хвиль співнапрямів;
- при SRS спектр спонтанного випромінювання зміщений значно сильніше, і ширина його набагато більше ніж при SBS;
- порогова потужність SBS набагато менше ніж SRS [6].

### 3.2.1 Вплив ефекту вимушеного розсіювання Рамана

Фізична причина явища вимушеного розсіювання Рамана (SRS – Stimulated Raman Scattering) складається в поглинанні фотона молекулою і використанні частини енергії фотона на збудження коливань цієї молекули. Частина енергії використовується на випускання фотона з більш низькою частотою. Цей ефект використовується для посилення сигналів в спектральних каналах DWDM систем.

Негативний прояв ефекту вимушеного розсіювання Рамана SRS полягає в тому, що сигнали в оптичних каналах системи DWDM відчують погіршення ставлення сигнал/шум, оскільки частина потужності сигналів перекачується в довгохвильові канали.

Розрахунок втрат потужності сигналу в оптичному каналі зв'язку проводиться за такою формулою:

$$\Delta P_{SRS} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{D_p}\right), \text{дБ}, \quad (3.1)$$

де  $D_p$  – фактор виснаження сигналу, що визначається за формулою:

$$D_p = \frac{1+r_0}{1+r_0 G_A^{1+r_0}}, \quad (3.2)$$

де  $r_0$  – коефіцієнт, що дорівнює відношенню частоти основного сигналу до частоти, на якій проявляється посилення, для раманівського посилення може бути прийнятим  $r_0 = 1,07$ ;

$G_A$  – коефіцієнт ненасиченого посилення, розраховується за формулою:

$$G_A = \exp(g_R P_0 L_{\text{еф}} / A_{\text{еф}}), \quad (3.3)$$

де  $g_R$  – коефіцієнт раманівського посилення, для довжин хвиль в області 1550 нм приблизно дорівнює  $6 \cdot 10^{-14}$  м/Вт.

Наведений метод розрахунку впливу SRS не враховує кількості каналів  $N$  в системі DWDM. Для визначення впливу ефекту раманівського розсіювання в багатоканальних системах

необхідно розглядати коефіцієнт раманівського посилення  $g(\Delta\lambda)$  залежно від інтервалу довжини хвилі  $\Delta\lambda$ :

$$g(\Delta\lambda) = g_R \frac{\Delta\lambda}{\Delta\lambda_c}, \quad (3.4)$$

де  $\Delta\lambda_c$  – ширина смуги пропускання комбінаційного (раманівського) розсіювання,  $\Delta\lambda_c=125$  нм.

Частина потужності сигналу, що поступила з  $i$ -го каналу в усі канали:

$$\delta_{SRS\ i} = g_R \frac{\Delta\lambda P_0 L_{\text{еф}}}{2\Delta\lambda_c A_{\text{еф}}} \cdot \frac{N(N-1)}{2}. \quad (3.5)$$

Втрати потужності сигналу для  $i$ -го каналу складуть:

$$\Delta P_{SRS\ i} = -10 \log(1 - \delta_{SRS\ i}). \quad (3.6)$$

Ступінь впливу ефекту вимушеного раманівського розсіювання SRS збільшується:

- зі збільшенням потужності сигналу в оптичному каналі;
- зі збільшенням кількості каналів (втрати зростають, наприклад, з  $\Delta P_{SRS}=0,16$  дБ при 40 каналах до  $\Delta P_{SRS}=0,7$  дБ при 80 каналах);
- зі збільшенням міжканального інтервалу (наприклад,  $\Delta P_{SRS}=0,34$  дБ при  $\Delta\lambda=0,4$  нм та  $\Delta P_{SRS}=0,7$  дБ при  $\Delta\lambda=0,8$  нм);
- зі зменшенням ефективної площі волокна (наприклад,  $\Delta P_{SRS}=1,51$  дБ при  $A_{\text{еф}}=80$  мкм<sup>2</sup> та  $\Delta P_{SRS}=2,41$  дБ при  $A_{\text{еф}}=55$  мкм<sup>2</sup>);
- зі збільшенням довжини підсилювальної ділянки.

Ефект SRS практично не вносить погіршення в роботу одноканальних систем зв'язку, однак він може створити серйозні проблеми в системах DWDM з великою кількістю каналів. Для послаблення впливу SRS вимагається зменшення введеної потужності сигналу. При цьому, як результат, зменшиться довжина підсилювальної ділянки. Зменшення міжканального інтервалу дозволить знизити вплив SRS, але при цьому зросте вплив інших нелінійних ефектів [7].



### 3.2.2 Вплив ефекту вимушеного розсіювання Бріллюена

Фізична причина появи вимушеного розсіювання Бріллюена (SBS – Stimulated Brillouin Scattering) полягає в тому, що відбувається взаємодія хвилі світла, що поширюється в прямому напрямку і хвилі світла, розсіяної у зворотному напрямку, а також теплової пружної хвилі. Унаслідок такої взаємодії виникають періодичні області волокна зі змінним показником заломлення. Відображення оптичного сигналу проявляються у вигляді розсіяного світла з доплерівським зниженням частоти (зрушенням в область довгих хвиль). Це призводить як до ослаблення потужності, що вводиться в ОВ сигналу, що передається в прямому напрямку, так і до появи відбитого випромінювання.

Величина зсуву частоти сигналу залежить від того, за якою технологією легована серцевина оптичного волокна. У волокні стандарту G.652 розсіяна зворотна світлова хвиля зміщена по частоті на 11 ГГц (на 0,088 нм) при власній ширині смуги  $\Delta f_B = 30$  МГц. У волокні стандарту G.653 світлова хвиля зміщена на 10.7 ГГц (на 0,085 нм) при ширині смуги  $\Delta f_B = 60$  МГц. У будь-якому випадку лінія спонтанного посилення вузька, а зрушення частот багато менше відстані між оптичними каналами системи DWDM. Із зазначеного можна зробити висновок, що величина обмеження потужності, що вводиться у волокно сигналу, не залежить від кількості оптичних каналів.

Отже, можна зробити висновок, що погіршення якості передачі, викликане ефектом SBS, не виникне в системах DWDM, де ширина смуги джерела значно перевершує ширину смуги Бріллюена (наприклад,  $\Delta f_s = 10$  ГГц при швидкості передачі 2,5 Гбіт/с, а  $\Delta f_B = 30$  МГц).

Ефект впливу SBS має бути врахований і при малих канальних потужностях сигналу, особливо при використанні лазерів з малою шириною спектра.

Вплив ефекту вимушеного розсіювання Бріллюена не залежить від кількості оптичних каналів в системі DWDM, але залежить від швидкості передачі даних в оптичному каналі.

Коефіцієнт ненасиченого посилення  $G_A$  бріллюєнівського розсіювання розраховується за формулою:



$$G_A = \exp(g_0 L_{\text{еф}}), \quad (3.7)$$

де  $g_0$  – коефіцієнт посилення, так званого, слабкого сигналу (сигналу, що з'явився в результаті дії ефекту SBS):

$$g_0 = g_B(B) P_0 / A_{\text{еф}}, \quad (3.8)$$

де  $g_B(B)$  – коефіцієнт SBS, залежний від швидкості передачі B:

$$g_B(B) = \frac{\Delta f_B}{B + \Delta f_B} \cdot g_B, \quad (3.9)$$

де  $g_B$  – коефіцієнт бріллюенівського посилення,  $g_B = 5 \cdot 10^{-11}$  м/Вт.

$\Delta f_B$  – ширина смуги бріллюенівського розсіювання залежить від стандарту волокна, МГц.

Звідси:

$$G_A = \exp\left(\frac{P_0 L_{\text{еф}} \Delta f_B g_B}{A_{\text{еф}}(B + \Delta f_B)}\right). \quad (3.10)$$

Отже, дія ефекту вимушеного розсіювання Бріллюена не залежить від кількості оптичних каналів в системі DWDM, але залежить від швидкості передачі даних в оптичному каналі.

Для розрахунку втрат потужності оптичного сигналу в результаті дії ефекту SBS скористаємося формулою (3.1).

Для бріллюенівського розсіювання значення коефіцієнту  $r_0 = 1$  через малу величину зсуву частоти спектру.

Формула розрахунку втрат потужності оптичного сигналу (3.1) в результаті впливу ефекту SBS набуде вигляду:

$$\Delta P_{\text{SBS}} = 10 \log\left(\frac{1 + G_A^2}{2}\right). \quad (3.11)$$

Отже, втрати потужності сигналу в результаті прояви вимушеного розсіювання Бріллюена (SBS) збільшуються при:

- збільшенні потужності сигналу в оптичному каналі:

- зменшенні швидкості передачі інформації в каналі (наприклад,  $\Delta P_{SBS} = 0,33$  дБ при  $V = 10$  Гбіт/с та  $\Delta P_{SBS} = 0,68$  дБ при  $V = 2,5$  Гбіт/с);

- зменшенні ширини смуги джерела випромінювання (зміна ширини смуги джерела випромінювання пропорційна зміні швидкості передачі);

- зменшенні ефективної площі серцевини волокна (наприклад,  $\Delta P_{SBS} = 0,16$  дБ при  $A_{\text{еф}} = 80$  мкм<sup>2</sup> та  $\Delta P_{SBS} = 0,24$  дБ при  $A_{\text{еф}} = 55$  мкм<sup>2</sup>);

- збільшенні ширини смуги бріллюеновського розсіювання (наприклад,  $\Delta P_{SBS} = 0,16$  дБ при  $\Delta f_B = 30$  МГц та  $\Delta P_{SBS} = 0,325$  дБ при  $\Delta f_B = 60$  МГц);

- збільшенні довжини підсилювальної ділянки.

На відміну від ефекту SRS бріллюенівське розсіювання не залежить від числа каналів в системі і від міжканального інтервалу. Ефект SBS може спостерігатися і в одноканальних системах. Значною мірою на прояв ефекту SBS впливає швидкість передачі і, відповідно, ширина смуги джерела випромінювання. Причому, при збільшенні швидкості передачі, втрати потужності сигналу через ефект SBS стають менше [8].

### 3.3 Порядок виконання завдання

1 Вибрати з таблиці А.1 додатку А відповідно до свого номеру варіанту вихідні дані для розрахунку.

2 Здійснити розрахунок ефекту вимушеного розсіювання Рамана і Бріллюена за формулами (3.1)-(3.11).

3 Розрахунок проводити за трьома швидкостями передачі сигналу:  $V=2,5$  Гбіт/с;  $V=10$  Гбіт/с;  $V=40$  Гбіт/с; та за трьома потужностями оптичного сигналу на вході каналу:  $P_0=1$  мВт;  $P_0=5$  мВт;  $P_0=10$  мВт.

4 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SRS від введеної в ОВ потужності сигналу.

5 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SRS від довжини підсилювальної ділянки. Всі три графіки мають бути побудовані на одній площині координат.

6 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу у результаті дії SBS від введеної в ОВ потужності сигналу.

7 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності втрат потужності сигналу у результаті дії SBS від довжини підсилювальної ділянки. Всі три графіки мають бути побудовані на одній площині координат.

8 Зробити висновки за результатами розрахунків.

### 3.4 Фрагмент прикладу розрахунку

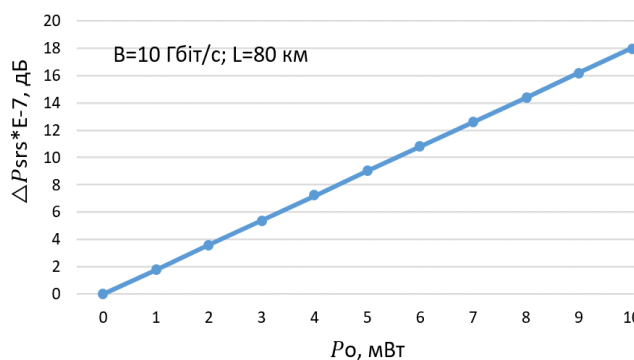


Рисунок 3.1 – Залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SRS від введеної в ОВ потужності сигналу

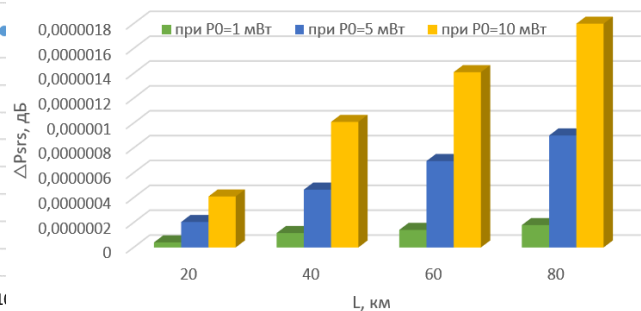


Рисунок 3.2 – Залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SRS від довжини підсилювальної ділянки

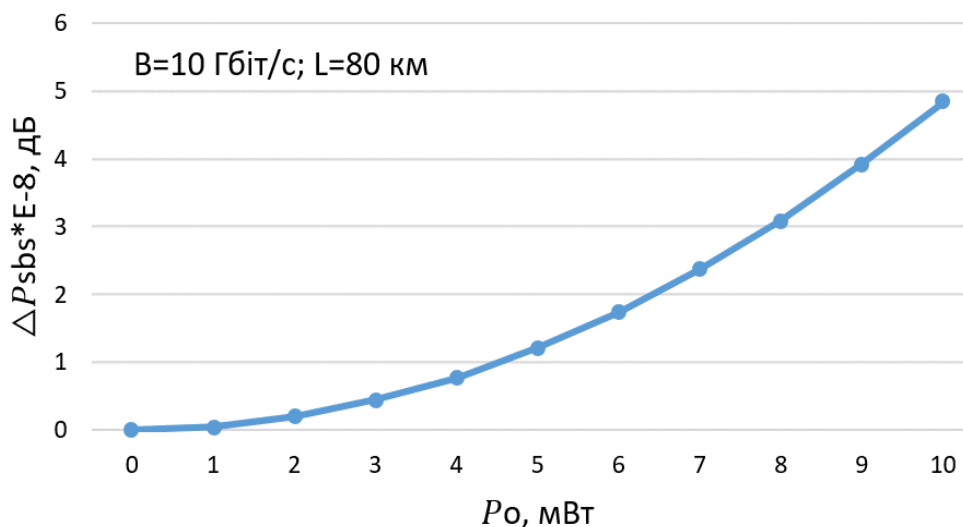


Рисунок 3.3 – Залежності втрат потужності сигналу в результаті дії ефекту SBS від введеної потужності сигналу

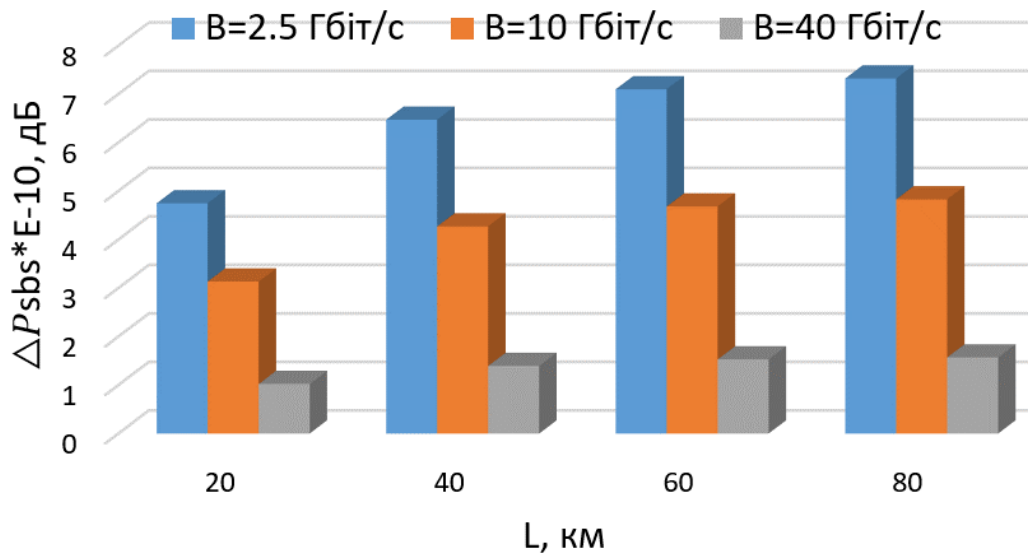


Рисунок 3.4 – Залежності втрат потужності сигналу в результаті дії ефекту SBS від довжини підсилювальної ділянки

### Контрольні питання

1 Фізичні процеси, що викликають вимушене розсіювання Рамана та Бріллюена.

2 В чому різниця впливу вимушеного розсіювання Рамана від вимушеного розсіювання Бріллюена?

3 Поясніть вплив вимушеного розсіювання Рамана та вимушеного розсіювання Бріллюена на характеристики сигналів волоконно-оптичних ліній зв'язку.

4 Поясніть вплив вимушеного розсіювання Рамана та вимушеного розсіювання Бріллюена на пропускну спроможність волоконно-оптичних систем передачі.

5 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SRS від довжини підсилювальної ділянки.

6 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SRS від введеної в ОБ потужності сигналу.

7 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SBS від довжини підсилювальної ділянки.

8 Пояснити характер залежності втрат потужності сигналу в результаті дії SBS від введеної в ОБ потужності сигналу.

9 Умови зменшення впливу SBS та SRS.

10 Позитивні та негативні аспекти SBS та SRS.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 4

### Чотирихвильове змішування

#### 4.1 Мета роботи

Виконувати інженерні розрахунки впливу чотирихвильового змішування на енергетичні параметри оптичного сигналу.

#### 4.2 Теоретичні відомості

Для систем DWDM одним з найважливіших нелінійних ефектів є чотирихвильове змішування (FWM – Four Wave Mixing). Цей ефект не залежить від швидкості передачі, а визначається в основному міжканальними інтервалами, потужністю сигналу, що вводиться в волокно, та питомою дисперсією волокна.

Чотирихвильове змішування призводить до появи нових сигналів, частина з них потрапляє в канали системи DWDM і викликає перехресні завади (сигнали, що заважають). Для появи нових сигналів досить, щоб при взаємодії в нелінійному середовищі брали участь, принаймні, дві світлові хвилі з близькими частотами  $w_1$  та  $w_2$  ( $w_1 < w_2$ ).

Оскільки частотний план (Рекомендація ITU-TG.692) передбачає рівномірний крок між частотами в системах DWDM, то сигнали, що заважають, які з'являються, близькі за частотою робочим сигналам. Це призводить до значних перехресних завад в оптичних каналах.

В системах DWDM з кількістю каналів  $N$  в результаті дії ефекту FWM загальну кількість сигналів, що заважають,  $m$  можна оцінити за формулою:

$$m = N(N - 1)^2, \quad (4.1)$$

де  $N$  – кількість оптичних каналів в системі відповідає кількості ділянок, на які ділиться лінія зв'язку.

Особливо серйозні проблеми виникають в системах DWDM, що використовують волокно зі зрушенням дисперсії стандарту

G.653. Ступінь прояву ефекту FWM зростає зі зменшенням величини питомої хроматичної дисперсії. При використанні волокна з незміщеною дисперсією стандарту G.652 вплив ефекту FWM зменшується при збільшенні міжканального інтервалу.

Завади в результаті впливу ефекту FWM викликають закриття очей-діаграми на виході фотоприймача, приводячи до погіршення коефіцієнта бітових помилок (BER). Збільшення кроку частот між каналами і вплив хроматичної дисперсії зменшують появу ефекту FWM за рахунок руйнування фазових співвідношень між взаємодіючими хвилями. Для придушення впливу ефекту FWM доцільно використовувати оптичне волокно з ненульовою зміщеною дисперсією стандарту G.655.

При трьох і більше несучих  $N$  в системі DWDM працюють дві схеми формування сигналів, що заважають, – вироджене і невироджене чотирехвильове змішування. В цьому випадку в волокні з'являється велика кількість сигналів, що заважають. Ці два види FWM необхідно розділити, тому що потужності сигналів, що з'являються при цьому різні внаслідок різних коефіцієнтів виродження [6, 7].

Кількість сигналів  $m_2$ , що заважають, в кожному з  $N$  каналів системи DWDM в разі виродженого чотирехвильового змішування:

- при парній кількості оптичних каналів в кожному каналі з'являється:

$$m_{2ч} = \frac{N}{2} - 1 \quad (4.2)$$

сигналів, що заважають, всього в системі;

$$m_2 = \frac{(N-2) \cdot N}{2} \quad (4.3)$$

сигналів, що заважають;

- при непарній кількості оптичних каналів в непарних каналах з'являється:

$$m_{2\text{нч-нч}} = \frac{N-1}{2} \quad (4.4)$$

сигналів, що заважають, в парних каналах;

$$m_{2 \text{ нч-ч}} = \frac{N-3}{2} \quad (4.5)$$

сигналів, всього в системі;

$$m_2 = \frac{(N-1)^2}{2} \quad (4.6)$$

сигналів, що заважають.

Кількість сигналів  $m_1$ , що заважають, в кожному  $i$ -му каналі системи DWDM в разі невиродженого чотиривхвильового змішування:

- при парній кількості оптичних каналів  $N$  в кожному  $i$ -му каналі системи DWDM з'являється:

$$m_{1 \text{ ч}} = \frac{1}{2}N^2 + N(i-3) - i(i-1) + 2 \quad (4.7)$$

сигналів, що заважають;

- при непарній кількості оптичних каналів  $N$  в непарних каналах з'являється:

$$m_{1 \text{ нч-нч}} = \frac{1}{2}N^2 + N(i-3) - i(i-1) + 1,5 \quad (4.8)$$

сигналів, що заважають, а в парних каналах –

$$m_{1 \text{ нч-ч}} = \frac{1}{2}N^2 + N(i-3) - i(i-1) + 2,5 \quad (4.9)$$

сигналів, що заважають.

Кількість сигналів, що заважають, для невиродженого і виродженого FWM:

$$m_1 = N(N-1)(N-2) - \text{для невиродженого FWM, } i \neq j; \quad (4.10)$$

$$m_2 = N(N-1) - \text{для виродженого FWM, } i=j; \quad (4.11)$$

Потужності сигналу, що заважає, на частоті  $f_{ijk}$  проводиться за формулою:

$$P_{ijk} = n_{ijk} \left( \frac{2\pi f_{ijk} k_n d_{ijk} L_{\text{еф}}}{3cA_{\text{еф}}} \right)^2 \cdot P_i P_j P_k 10^{-0,1 \cdot \alpha L}, \quad (4.12)$$

де  $P_i, P_j, P_k$  – потужності сигналів на вході волокна з круговими частотами  $w_i, w_j$  та  $w_k$  дорівнюють значенню вхідної потужності ( $P_0$ );

$f_{ijk}$  беремо з сітки частот для систем WDM; коефіцієнт виродження  $d_{ijk}$  якої дорівнює 3, якщо  $i=j$  (вироджене FWM) та  $d_{ijk} = 6$  при  $i \neq j$ .

Коефіцієнт ефективності чотиривхвильового змішування розраховується за формулою:

$$n_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2} \left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right], \quad (4.13)$$

де  $\Delta\beta$  – різниця постійних поширення взаємодіючих хвиль.

Для лінії довжиною понад 20 км складова  $\left[ 1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right] \approx 1$ , тому коефіцієнт  $n_{ijk}$  будемо розраховувати за спрощеною формулою:

$$n_{ijk} = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + (\Delta\beta)^2}. \quad (4.14)$$

Для обліку дисперсійного параметра  $D(\lambda)$  використовується постійна поширення  $\beta_2$ .

Функціональний зв'язок між  $\beta_2$  та  $D$  встановлює вираз:

$$D(\lambda) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2. \quad (4.15)$$

Різницю постійних поширення  $\Delta\beta$  оцінимо за формулою:

$$\Delta\beta = \frac{1}{2} \cdot \beta_2 (\Delta w)^2 = 2\pi^2 \beta_2 (\Delta f)^2 = -\frac{\pi D(\lambda) \lambda^2}{c} \cdot (\Delta f)^2, \quad (4.16)$$



де  $D(\lambda)$  – питома хроматична дисперсія, пс/(нм·км);  
 $\lambda$  – довжина хвилі, що відповідає робочій частоті каналу, нм;  
 $c$  – швидкість поширення світла, км/с;  
 $\Delta f$  – різниця несучих частот між сусідніми каналами, ТГц.

Питома хроматична дисперсія  $D(\lambda)$  залежить від довжини хвилі, тому її значення для різних каналів системи DWDM будуть різними.

Питому хроматичну дисперсію для волокон SMF (Рекомендація G.652) розраховуємо за формулою:

$$D(\lambda) = \frac{S_0 \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right)}{4}, \quad (4.17)$$

де  $\lambda_0$  – довжина хвилі нульової дисперсії,  $\lambda_0=1310$  нм для волокна G.652;

$S_0$  – нахил дисперсійної кривої в точці нульової дисперсії,  $S_0=0.092$  пс/(нм<sup>2</sup>·км) для волокна стандарту G.652.

Питому хроматичну дисперсію для волокон NZDSF (Рекомендація G.655) розраховуємо за формулою:

$$D(\lambda) = \lambda_0 S_0 \ln \left( \frac{\lambda}{\lambda_0} \right), \quad (4.18)$$

де  $\lambda_0=1500$  нм та  $S_0=0,08$  пс/(нм<sup>2</sup>·км) для волокна стандарту G.655.

Отже, знаючи значення питомої дисперсії для кожної довжини хвилі оптичного каналу, можна визначити різницю постійних поширення  $\Delta \beta$  і коефіцієнт ефективності FWM  $n_{ijk}$ . За величиною коефіцієнта ефективності визначається потужність сигналу, що заважає, нелінійному ефекту чотирьоххвильового змішування  $P_{ijk}$ . Для визначення загальної потужності завади FWM в оптичному каналі необхідно розрахувати кількість сигналів, що заважають, які з'явилися в даному каналі [8].

Якщо визначена потужність завади, створюваної невідродженим FWM  $P_{1ijk}$ , і потужність завади, створюваної

виродженням FWM  $P_{2ijk}$ , то загальна потужність шуму  $P_{FWM}$  в оптичному каналі з частотою розраховується за формулою:

$$P_{FWM} = \sqrt{m_1 P_{1ijk}^2 + m_2 P_{2ijk}^2}. \quad (4.19)$$

На потужність шуму при впливі ефекту чотирехвильового змішування в ОВ впливають такі чинники: потужність сигналу  $P_0$ , що вводиться у волокно, ефективна площа серцевини волокна  $A_{ef}$ , кількість каналів в системі  $N$ , рознос частот між сусідніми каналами  $\Delta f$ , довжина хвилі оптичного каналу  $\lambda$ , дисперсійні характеристики оптичного волокна. Кожен із зазначених факторів різною мірою впливає на величину потужності завади. Зменшення впливу ефекту FWM при збільшенні дисперсії волокна пояснюється тим, що дисперсія призводить до порушення фазового синхронізму змішуваних хвиль. З цієї причини FWM більше проявляється в волокнах з ненульовою зміщеною дисперсією (стандарт G.655) ніж в системах DWDM, що використовують стандартне волокно (стандарт G.652). Крім того, на різних довжинах хвиль дисперсія буде різною: зі збільшенням довжини хвилі дисперсія зростає, отже, прояв FWM зменшується зі збільшенням довжини хвилі.

На відміну від інших нелінійних ефектів, прояв чотирехвильового змішування не залежить від швидкості передачі інформації по каналах системи DWDM та приводить до виникнення завад у всіх оптичних каналах. Інші ж нелінійні ефекти (SPM, CPM, SRS, SBS) призводять до втрат потужності корисного сигналу. Потужність шуму FWM приймає максимальні значення на ділянках лінії, де захищеність сигналу мінімальна. При подальшому поширенні сигналу потужність шуму FWM знижується, відповідно ймовірність виникнення помилки також зменшується.

### 4.3 Порядок виконання завдання

1 Вибрати з таблиці А.1 додатку А відповідно до свого номеру варіанту вихідні дані для розрахунку.

2 Здійснити розрахунок чотирихвильового змішування за формулами (4.1)-(4.19) для парної та непарної кількості сигналів в парній та непарній кількості каналів системи. Звести всі розрахунки до єдиної таблиці.

3 Зробити висновки за результатами розрахунків.

#### 4.4 Фрагмент прикладу розрахунку

Таблиця 4.1 – Кількість сигналів, що заважають, в кожному з 40 каналів у разі невиродженого чотирихвильового змішування

$i_{\text{ч}}$	$m_{1\text{ч}}$	$i_{\text{нч}}$	$m_{1\text{нч-нч}}$	$m_{1\text{нч-ч}}$
2	760	1	721,5	722,5
4	830	3	795,5	796,5
6	892	5	861,5	862,5
8	946	7	919,5	920,5
10	992	9	969,5	970,5
12	1030	11	1012,5	1012,5
14	1060	13	1046,5	1046,5
16	1082	15	1071,5	1073,5
18	1096	17	1089,5	1091,5
20	1102	19	1099,5	1101,5
22	1100	21	1101,5	1103,5
24	1090	23	1095,5	1097,5
26	1072	25	1081,5	1083,5
28	1046	27	1060,5	1061,5
30	1012	29	1030,5	1030,5
32	970	31	991,5	992,5
34	920	33	945,5	946,5
36	862	35	891,5	892,5
38	796	37	829,5	830,5
40	722	39	759,5	760,5

#### Контрольні питання

1 Фізичні процеси, що викликають чотирихвильове змішування.

2 Поясніть вплив чотирихвильового змішування на характеристики сигналів волоконно-оптичних ліній зв'язку.

3 Поясніть вплив чотирихвильового змішування на пропускну спроможність волоконно-оптичних систем передачі.

4 Вироджене і неvirоджене чотирихвильове змішування.

5 Чинники, що впливають на потужність шуму при впливі ефекту чотирихвильового змішування в ОВ.

6 Залежність хроматичної дисперсії ОВ та чотирихвильового змішування.

7 Який характер зміни має кількість сигналів, що заважають, для неvirодженого і virодженого чотирихвильового змішування?

8 Пояснити залежність чотирихвильового змішування від швидкості передачі інформації по каналах системи DWDM.

9 Умови зменшення впливу чотирихвильового змішування.

10 Позитивні та негативні аспекти чотирихвильового змішування.

## **ПРАКТИЧНА РОБОТА 5**

### **Вплив нелінійних спотворень в оптичному волокні на енергетичні характеристики сигналів**

#### **5.1 Мета роботи**

Виконувати інженерні розрахунки впливу нелінійних спотворень в оптичному волокні на енергетичні характеристики сигналів.

#### **5.2 Теоретичні відомості**

Нелінійні ефекти прийнято розділяти на непружні і пружні взаємодії. До непружних взаємодій відносяться вимушене (стимульоване) розсіювання Рамана (SRS – Stimulated Raman Scattering) і вимушене розсіювання Бріллюена (SBS – Stimulated Brillouin Scattering). До пружних взаємодій відносяться явища, обумовлені залежністю показника заломлення від інтенсивності світла (ефектом Керра): фазова самомодуляція хвиль,

чотирихвильове змішування, перехресна фазова модуляція. Явища, зумовлені ефектом Керра, можуть призводити до значних змін ширини і форми імпульсів, а також до появи перехресних завад, що залежать від числа каналів в системі DWDM.

Рівень потужності сигналу з урахуванням втрат через вплив нелінійних ефектів:

$$P_c = P_0 - \alpha_1 - \Delta P, \quad (5.1)$$

де  $P_0$  – потужність сигналу на вході оптичного волокна;

$\alpha_1$  – власне затухання волокна;

$\Delta P$  – загальні втрати потужності оптичного сигналу [3];

$$\Delta P = \Delta P_{SPM} + \Delta P_{CPM} + \Delta P_{SRS} + \Delta P_{SBS}, \quad (5.2)$$

де  $\Delta P_{SPM}$  – вплив ефекту самомодуляції;

$\Delta P_{CPM}$  – ефект перехресної фазової модуляції;

$\Delta P_{SRS}$  – розсіювання Рамана;

$\Delta P_{SBS}$  – розсіювання Бріллюена.

### 5.3 Порядок виконання завдання

1 Здійснити розрахунок впливів нелінійних спотворень в оптичному волокні на енергетичні характеристики сигналів за формулами (5.1)-(5.2).

2 Розрахунок проводити за трьома швидкостями передачі сигналу:  $V=2,5$  Гбіт/с;  $V=10$  Гбіт/с;  $V=40$  Гбіт/с.

3 За отриманими значеннями втрат побудувати графіки залежності загальних втрат потужності сигналу унаслідок дії нелінійних ефектів від довжини підсилювальної ділянки. Всі три графіки мають бути побудовані на одній площині координат.

4 Зробити висновки за результатами розрахунків.

## 5.4 Фрагмент прикладу розрахунку

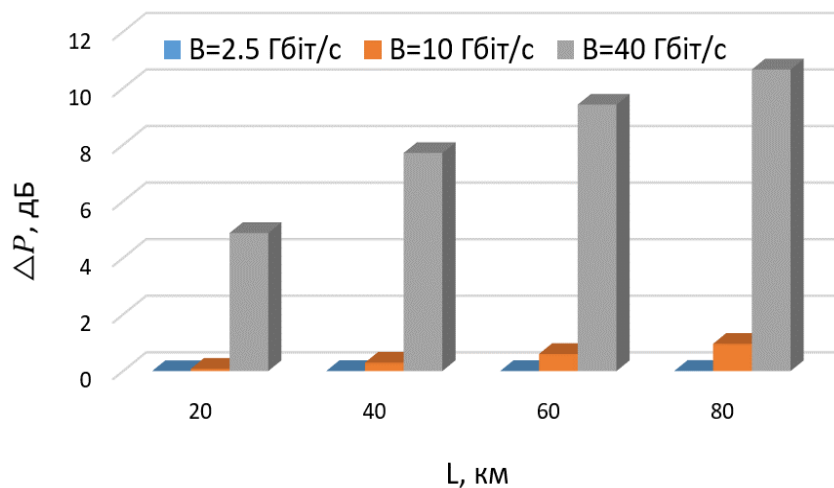


Рисунок 5.1 – Залежності загальних втрат потужності сигналу в результаті дії нелінійних ефектів від довжини підсилувальної ділянки

### Контрольні питання

- 1 Дайте визначення енергетичним характеристикам сигналів в оптичному волокні.
- 2 Фізичні процеси, що викликають нелінійні спотворення в оптичному волокні.
- 3 Поясніть вплив нелінійних спотворень на характеристики сигналів волоконно-оптичних ліній зв'язку.
- 4 Поясніть вплив нелінійних спотворень на пропускну здатність волоконно-оптичних систем передачі.
- 5 Залежність хроматичної дисперсії ОВ на величину та вплив нелінійних спотворень на характеристики волоконно-оптичних ліній зв'язку.
- 6 Пояснити залежність загальних втрат потужності сигналу в результаті дії нелінійних ефектів від довжини підсилувальної ділянки.
- 7 Пояснити залежність загальних втрат потужності сигналу в результаті дії нелінійних ефектів при різних швидкостях передачі даних.
- 8 Умови зменшення впливу нелінійних спотворень.
- 9 Оптичні волокна систем ВОСП, що рекомендовано використовувати для зменшення нелінійних спотворень.
- 10 Конструктивні методи зменшення нелінійних спотворень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Shestakov I. I., Salifov I. I., Gnilomyodov E. I. Inter-channel encoding in DWDM systems, as a new way to improve the spectral efficiency. *T-Comm*. 2016. Vol. 10, No.5. P. 27–31.

2 Кись О. М. Проектування волоконно-оптичної транспортної мережі: навч. посіб. Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. 92 с.

3 Трубчанінова К. А., Юр'єва Ю. Д., Панченко А. С. Розрахунок впливу нелінійних ефектів в системах DWDM на енергетичні характеристики сигналу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2018. № 3. С. 44-49.

4 Інформаційні матеріали сайту Cisco. URL: <https://www.cisco.com> (дата звернення: 19.06.2022).

5 Optical Fibers and Fiber-Optic Communications. URL: <http://what-when-how.com/fiber-optics/optical-fibers-and-fiber-optic-communications-part-1/> (дата звернення: 19.06.2022).

6 Nonlinear effects. URL: [https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/21\\_nonlinear.html](https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/21_nonlinear.html) (дата звернення: 29.06.2022).

7 Бердников О. М., Щирий А. В. Напрямки побільшування швидкостей передачі лінійних трактів телекомунікаційних транспортних систем. «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2017: зб. матер. XI Міжнар. наук.-техн. конф. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. С. 75–77.

8 Кайдан М. В., Климаш М. М., Стрихалюк Б. М. Напрямні системи телекомунікаційних мереж. Львів: Львівська політехніка, 2021. 488 с.

## ДОДАТОК А

### Варіанти вихідних даних для розрахунків

Варі- ант	$P_0$ , мВт	$\alpha$ , дБ/км	$\lambda$ , нм	$\Delta f$ , ГГц	$\Delta \lambda$ , нм	$N$	$\Delta f$ , ТГц	$f_{ijk}$ , ТГц
1	2	0,276	1565,50	50	1,56	20	100	196
2	3	0,27	1564,68	50	1,57	22	110	197
3	4	0,267	1563,86	100	0,78	18	120	198
4	5	0,262	1563,05	100	0,79	19	130	199
5	6	0,258	1562,23	50	1,58	24	140	200
6	7	0,253	1560,42	100	0,8	16	150	201
7	8	0,249	1561,42	50	1,59	26	90	202
8	9	0,246	1559,79	100	0,78	15	80	203
9	10	0,241	1558,17	50	1,6	28	70	204
10	2	0,239	1557,36	50	1,56	30	60	195
11	3	0,232	1556,55	50	1,57	32	50	194
12	4	0,216	1554,75	100	0,79	20	100	193
13	5	0,22	1554,94	100	0,8	10	110	192
14	6	0,2	1553,33	50	1,58	40	120	191
15	7	0,195	1551,72	50	1,59	21	130	190
16	8	0,19	1550,92	100	0,78	11	140	189
17	9	0,18	1550,12	50	1,6	23	150	187
18	10	0,193	1546,92	100	0,79	12	90	186
19	2	0,197	1546,12	100	0,8	13	80	196
20	3	0,2	1545,32	50	1,56	25	70	197
21	4	0,214	1544,53	100	0,78	14	60	198
22	5	0,219	1543,73	50	1,57	27	50	199
23	6	0,223	1542,94	100	0,79	16	100	200
24	7	0,228	1542,14	50	1,58	29	110	201
25	8	0,231	1541,35	100	0,8	15	120	202
26	9	0,237	1540,56	50	1,59	31	130	203
27	10	0,242	1539,77	50	1,6	33	140	204
28	2	0,251	1538,98	100	0,78	17	150	195
29	3	0,265	1538,19	50	1,56	35	90	194
30	4	0,27	1536,61	100	0,79	20	80	193



РОЗРАХУНОК ВПЛИВУ НЕЛІНІЙНИХ ЕФЕКТІВ  
У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧІ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт

з дисциплін  
*«ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ»,*  
*«ІННОВАЦІЙНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СИСТЕМИ*  
*ПЕРЕДАЧІ»*

Відповідальний за випуск Трубчанінова К. А.

---

Підписано до друку 2022 р.  
Умовн. друк. арк. 1,5. Тираж . Замовлення № .  
Видавець та виготовлювач Український державний  
університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.