

**С. К. Абрамов, В. В. Абрамова, К. Д. Абрамов**

**ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ  
ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»

**С. К. Абрамов, В. В. Абрамова, К. Д. Абрамов**

**ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ  
ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Навчальний посібник

Харків «ХАІ» 2024

УДК 621.372  
А16

Рецензенти: д-р фіз.-мат. наук І. М. Миценко,  
канд. техн. наук, доц. А. А. Акулінічев

**Абрамов, С. К.**

А16 Технології і системи електричного та оптичного зв'язку [Електронний ресурс] : навч. посіб. / С. К. Абрамов, В. В. Абрамова, К. Д. Абрамов. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2024. – 69 с.

Розглянуто основні технології передавання електричних та оптичних сигналів, які застосовуються при побудові сучасних ліній і мереж зв'язку. Подано короткий опис фізичної природи передавання сигналів лініями передачі, наведено формули для розрахунку основних первинних і вторинних параметрів, що їх характеризують. Особливу увагу приділено аналізу волоконно-оптичних ліній передачі, які зараз широко використовуються.

Для студентів, що спеціалізуються у галузі електроніки та телекомунікацій за спеціальностями «Інформаційні мережі зв'язку» та «Інжиніринг і програмування інфокомунікаційних систем».

Іл. 72. Табл. 3. Бібліогр.: 5 назв

**УДК 621.372**

© Абрамов С. К., Абрамова В. В.,  
Абрамов К. Д., 2024

© Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», 2024

# 1. СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ

## 1.1. Структурна схема. Основні визначення й вимоги

**Телекомунікації**, або **зв'язок**, – це галузь техніки, яка займається питаннями передавання повідомлень від джерел повідомлень (ДП) до одержувачів повідомлень (ОП), що знаходяться на деякій, часто великій, відстані один від одного [1].

Термін «зв'язок» використовувався, коли відправником та одержувачем повідомлення безпосередньо була людина. При обміні інформацією між комп'ютерами почали користуватися більш загальним терміном «телекомунікації», що включає й поняття «зв'язок».

Джерела повідомлень створюють певні повідомлення різноманітної фізичної природи (звук, оптичне зображення, механічне переміщення й ін.).

**Система зв'язку** – це сукупність технічних засобів і середовища поширення, які забезпечують передавання повідомлень. Узагальнену схему системи зв'язку [2] зображено на рис. 1.1.

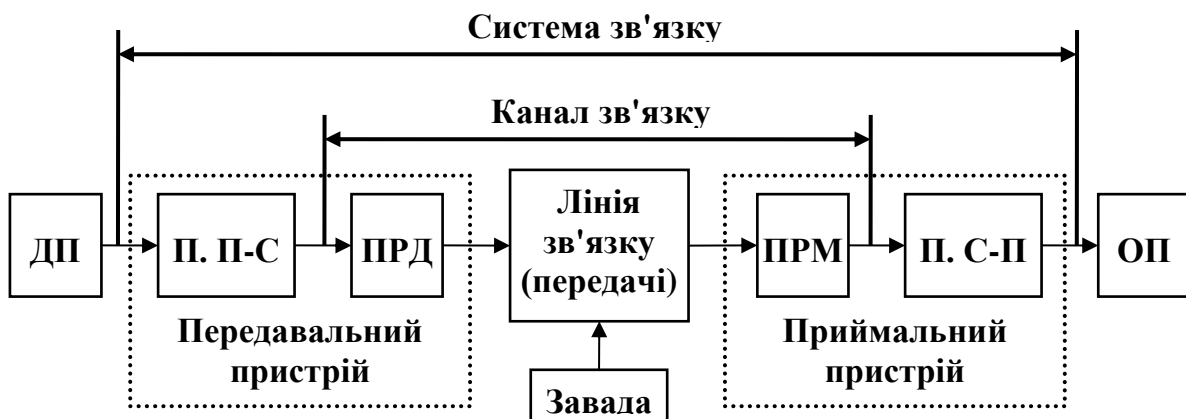


Рис. 1.1

Повідомлення з виходу джерела повідомлення за допомогою перетворювача повідомлення–сигнал (П. П-С) перетворюється на первинний електричний сигнал, який не завжди зручно (а іноді навіть неможливо) безпосередньо передавати лінією зв'язку. Тому первинні сигнали за допомогою передавача (ПРД) перетворюються на вторинні, характеристики яких добре узгоджуються з характеристиками лінії зв'язку. З виходу лінії зв'язку сигнали надходять на вхід приймача (ПРМ), де відновлюються від впливу завад, зазнають зворотного перетворення на повідомлення за допомогою перетворювача сигнал–повідомлення (П. С-П) і спрямовуються до одержувача повідомлення.

**Каналом зв'язку** називається частина системи зв'язку, що використовується для передання одного повідомлення від одного відправника. Система зв'язку може бути одно- або багатоканальною.

**Лінія зв'язку (передачі)** – це інженерна споруда, що складається з прокладеного за певною географічною трасою *кабелю зв'язку* або *радіотраси*, які за необхідності забезпечуються пристроями захисту від сторонніх впливів (грозорозряджувачами тощо), а також підсилювальними й регенераційними пунктами.

Залежно від відстані й необхідної пропускну здатності існує така класифікація кабелів зв'язку.

*Магістральні кабелі* (міжміського зв'язку) призначено для передання великих обсягів інформації на великі відстані.

*Зонові кабелі* (внутрішньообласного зв'язку) призначено для передання багатоканальних даних на відстані до 250 км.

*Міські кабелі* забезпечують з'єднання міських АТС і вузлів зв'язку, вони розраховані для застосування на відстанях до 10 км (без регенераторів) і мають велику кількість каналів.

*Підводні кабелі* мають високу механічну міцність на розрив, надійні вологостійкі покриття, мале загасання й великі довжини регенераційних ділянок.

*Об'єктові кабелі* призначено для створення установчого й відеотелефонного зв'язку, мереж кабельного телебачення, бортових інформаційних систем рухомих об'єктів.

*Монтажні кабелі* застосовуються на малих відстанях, де потрібна велика механічна гнучкість.

Основними вимогами до ліній зв'язку є такі [3]:

– здійснення зв'язку на практично необхідні відстані (від десятків до тисяч кілометрів для зв'язку у межах держави й до десятків тисяч кілометрів для міжнародного зв'язку);

– широкосмуговість і придатність для передавання різноманітних видів сучасної інформації (телефонія, телеграфія, відеотелефонія, телебачення, телеметрія, комп'ютерні дані);

– захищеність кіл від взаємних завадних впливів і зовнішніх завад, а також від фізичних впливів (атмосферних явищ, корозії тощо);

– стабільність електричних параметрів лінії, стійкість і надійність зв'язку;

– економічність системи зв'язку в цілому.

Кабельна лінія зв'язку являє собою складну технічну споруду, що складається з величезної кількості елементів. Оскільки лінію призначено для тривалої роботи (десятки років) і на ній має бути забезпечено безперебійну роботу сотень і тисяч каналів зв'язку, то до всіх елементів лінійного тракту передавання сигналів ставляться високі вимоги.

Вибір типу й конструкції лінії зв'язку визначається не тільки процесом поширення енергії вздовж лінії, але й необхідністю захистити розташовані поруч високочастотні кола від взаємних завадних впливів.

Системи зв'язку, які використовують штучне середовище поширення сигналів (металеві провідники, оптичне волокно), називаються

проводовими, або напрямними, а ті, в яких сигнали передаються через відкритий простір, – безпроводовими, або радіосистемами. Цей навчальний посібник присвячено розгляду саме проводових ліній передачі.

## 1.2. Види ліній передачі та їх основні властивості

*Напрямна система* – це пристрій, призначений для передавання електромагнітної енергії в заданому напрямку. Таку каналізуювальну здатність має будь-яка межа поділу середовищ з різними електричними властивостями:

- метал–діелектрик – металева лінія (кабель, хвилевід);
- діелектрик–повітря – діелектрична лінія із матеріалу з  $\epsilon > 1$  (діелектричний хвилевід, волоконний світловод) та інші лінії.

Напрямні системи передавання височастотної енергії поділяються на повітряні лінії, симетричні кабелі, коаксіальні кабелі, надпровідні кабелі, хвилеводи й оптичні кабелі.

На сучасному етапі найбільшого поширення набули симетричні, коаксіальні й оптичні лінії передачі, тому в посібнику основну увагу буде приділено саме їх розгляду.

## 2. ТЕОРІЯ ЛІНІЙ ПЕРЕДАЧІ

### 2.1. Типи й класи електромагнітних хвиль

Існують такі *класи* хвиль: ТЕМ – поперечно-електромагнітна хвиля; ТМ – поперечно-магнітна, або Е-хвиля; ТЕ – поперечно-електрична, або Н-хвиля; змішані (дипольні) хвилі, які, у свою чергу, поділяються на НЕ-хвилі (з переважанням у поперечному перерізі поля Н) та ЕН-хвилі (з переважанням у поперечному перерізі поля Е).

*Хвиля ТЕМ* – основна хвиля, яка містить тільки поперечні складові електричного Е й магнітного Н полів, поздовжні складові  $E_z$  і  $H_z$  дорівнюють нулю. Силові лінії поля цілком знаходяться у поперечних площинах і точно повторюють картину силових ліній поля при статичній напрузі й постійному струмі (рис. 2.1).

Процес передавання основних хвиль ТЕМ пов'язаний з потенціальним полем. Для передавання хвилі ТЕМ потрібні різниця потенціалів і, відповідно, двовимірне поле в перерізі. Тому вона існує тільки в лініях, які містять не менше двох ізольованих провідників, що мають різні потенціали.

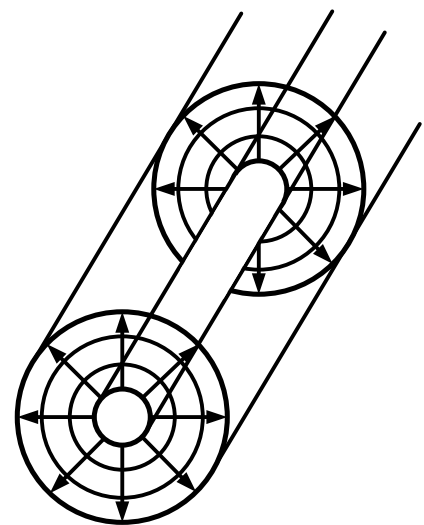


Рис. 2.1

Цей клас хвиль використовується при передаванні енергії у порівняно обмеженому діапазоні частот провідними системами (зокрема при передаванні симетричними й коаксіальними колами), де визначальними є струми провідності  $I_{пр}$ .

Хвилі  $TM$  і  $TE$  – це хвилі вищого порядку. Вони окрім поперечних складових електромагнітного поля ( $E_{\perp}$  і  $H_{\perp}$ ) також обов'язково містять одну поздовжню складову. Для хвиль  $TM$  – це  $E_z \neq 0$  (рис. 2.2), а для хвиль  $TE$  –  $H_z \neq 0$  (рис. 2.3). Тому силові лінії цих хвиль знаходяться як у поперечних, так і в поздовжніх перерізах напрямних систем.

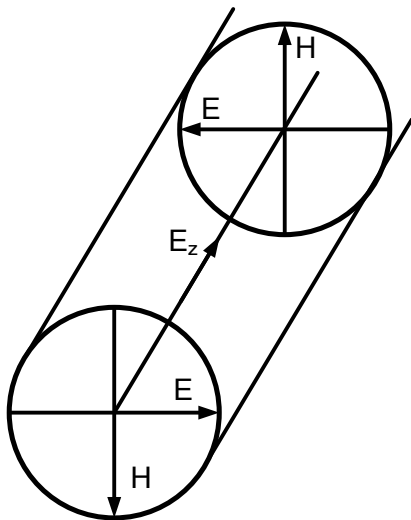


Рис. 2.2

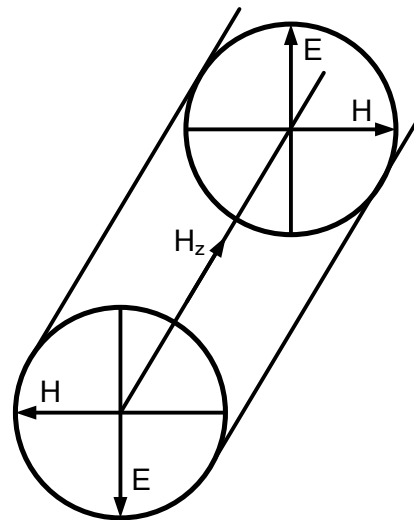


Рис. 2.3

Процес передавання хвиль вищого порядку  $TE$  і  $TM$  пов'язаний з вихровим полем. Ці хвилі збуджуються у досить високому діапазоні частот, де визначальними є струми зміщення  $I_{зм}$ .

Хвилі  $TE$  і  $TM$  можна передавати однопровідними напрямними системами, наприклад металевими й діелектричними хвилеводами або однопровідними лініями. При цьому поздовжня складова поля  $E_z$  або  $H_z$  задає напрямок руху енергії вздовж лінії.

Різниця потенціалів створюється між полюсами хвиль, а також між полюсами й стінками хвилеводу. Тому хвилеводом передаються лише дуже короткі хвилі. Довжина хвилі має бути такою, щоб у перерізі хвилеводу укладалося ціле число півхвиль або хоча б одна півхвиля.

Змішані (дипольні) хвилі являють собою неподільну суму хвиль  $E$  й  $H$  і містять усі шість компонентів поля, зокрема обидві поздовжні складові  $E_z$  і  $H_z$ . До таких змішаних хвиль належать поля в діелектричних хвилеводах.

Окрім поділу за класами електромагнітні хвилі поділяються також за типами. Тип хвилі (мода) визначається складністю структури, тобто кількістю максимумів і мінімумів поля в поперечному перерізі. Мода позначається двома числовими індексами  $n$  і  $m$ , наприклад  $TE_{nm}$ ,  $TM_{nm}$ .

Індекс  $n$  у круглих хвилеводах означає кількість повних змін поля по його окружності, а індекс  $m$  – кількість змін поля по діаметру.

Для передавання енергії вздовж осі напрямної системи поле в ній повинно мати поздовжню компоненту напрямку руху енергії (вектор Пойнтінга  $\Pi_z$ ). Для цього необхідно, щоб електричні й магнітні компоненти поля розташовувалися у поперечній площині. Тому обов'язковою умовою поширення енергії є наявність складових  $E_{\perp}$  і  $H_{\perp}$ , які утворюють з поздовжньою компонентою вектора Пойнтінга правогвинтову систему за правилом гвинта (рис. 2.4).

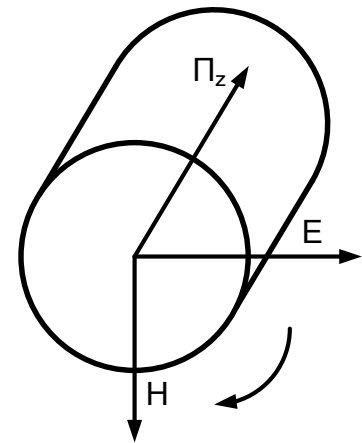


Рис. 2.4

## 2.2. Основні рівняння електромагнітного поля

Якщо до провідників лінії приєднати генератор, що створює ЕРС, то між ними виникне змінне електромагнітне поле. Це поле, оточуючи провідники, рухається вздовж них зі швидкістю, близькою до швидкості світла. Індукована напруга утворює рух електронів, який можна виявити у вигляді струму в провідниках.

Напруженість електричного поля  $E$  відповідає напрузі  $U$ , а напруженість магнітного поля  $H$  – струму  $I$ . Таким чином, напруга й струм у лінії передачі виникають завдяки зміні електромагнітного поля.

Основні закономірності електромагнітного поля описує система рівнянь Максвелла

$$\begin{cases} \text{rot } H = \sigma E + j\omega \epsilon E = I_{\text{пр}} + I_{\text{зм}}, \\ \text{rot } E = -j\omega \mu H, \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $\sigma$  – провідність середовища;  $\epsilon$  – діелектрична проникність середовища;  $\mu$  – магнітна проникність середовища;  $I_{\text{пр}}$  – струм провідності, тобто струм у металевих масах;  $I_{\text{зм}}$  – струм зміщення, тобто струм у діелектрику.

У металевих середовищах  $I_{\text{пр}} \gg I_{\text{зм}}$ , тому можна вважати, що компонент  $j\omega \epsilon E \approx 0$ . У діелектрику  $I_{\text{пр}} \ll I_{\text{зм}}$ , тому  $\sigma E \approx 0$ .

Фізичний зміст першого рівняння системи полягає у тому, що електричне поле створює навколо себе лінії магнітного поля (рис. 2.5, а). Зміст другого рівняння полягає у тому, що будь-яка зміна магнітного поля супроводжується створенням електричного поля (рис. 2.5, б).

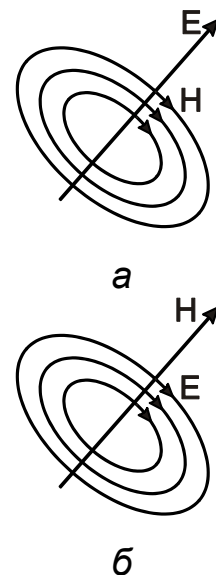


Рис. 2.5



У цілому зміна одного поля спричиняє появу іншого, внаслідок чого діє й поширюється комплексне електромагнітне поле (рис. 2.6), яке переносить енергію в атмосфері, кабелях, хвилеводах і будь-яких напрямних системах.

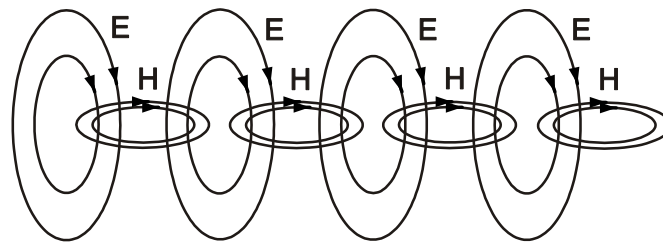


Рис. 2.6

Саме тому енергію можна передавати двома проводами (кабелем), однопроводовою системою (порожнім циліндром, ізольованим проводом) і взагалі без проводів (радіопередача).

Передавання енергії хвилеводами й радіопередача здійснюються за однаковим принципом. Відмінність полягає лише у тому, що у хвилеводі енергія зосереджена в обмеженому об'ємі й каналізується в заданому напрямку. В прямому й зворотному проводах *кабелів* (симетричних і коаксіальних) циркулюють струми провідності  $I_{пр}$  (рис. 2.7, а). При поширенні хвиль в *атмосфері* діють (по замкнутих шляхах) струми зміщення  $I_{зм}$  (рис. 2.7, б). У *хвилеводах* сумарні струми зміщення діють всередині, а струми провідності – в його стінках ( $I_{зм} + I_{пр}$ ) (рис. 2.7, в).

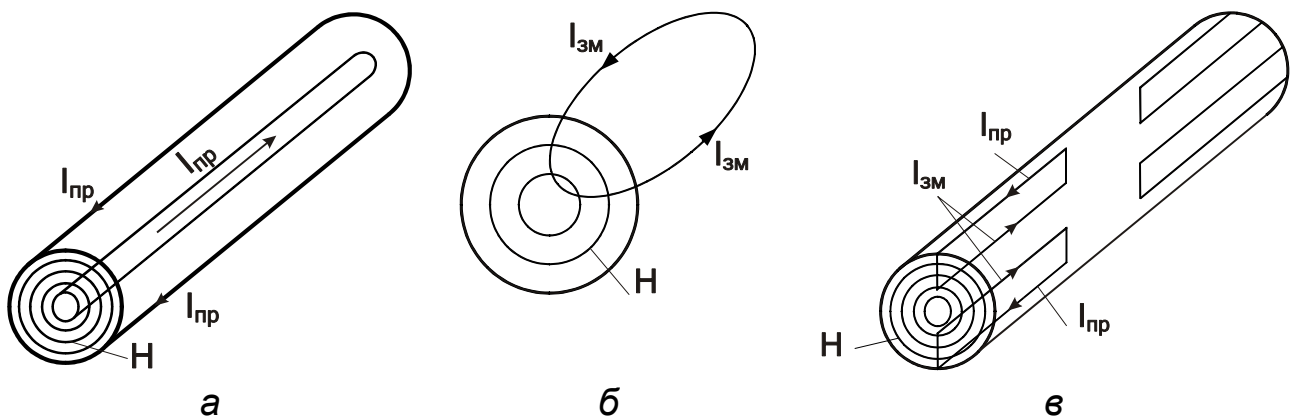


Рис. 2.7

### 2.3. Частотні обмеження при передаванні енергії

Залежність коефіцієнта загасання  $\alpha$  від частоти для різних ліній передачі (кабель (К), хвилевід (В) та атмосфера (А)) показано на рис. 2.8.

*Кабелями* передається смуга частот від 0 до  $f_0$ , при цьому довжина хвилі сумірна з поперечними розмірами кабелю:  $f_0 = c/\lambda$ ,  $\lambda \approx a$ , де  $a$  – відстань між проводами.

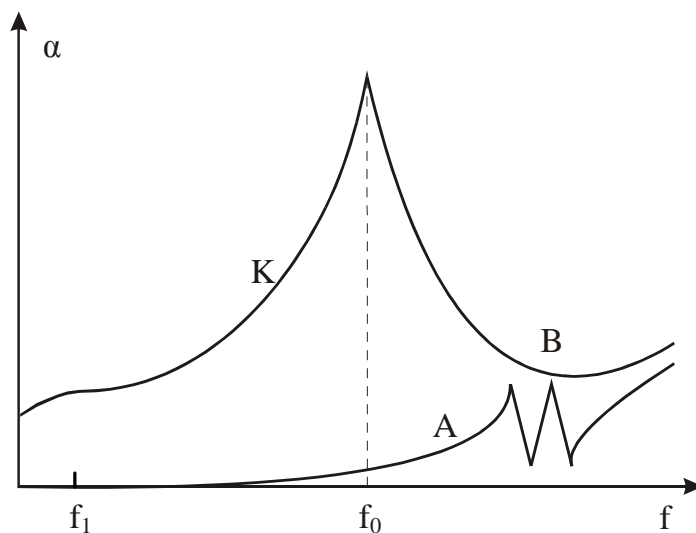


Рис. 2.8

При частотах, вищих за  $f_0$ , у відкритих кабельних лініях з'являються вищі складові поля (хвилі TE і TM), виникає антенний ефект (ефект випромінювання) і передавання вздовж кола стає неможливим.

В атмосфері поширюються хвилі широкого діапазону – від довгохвильового ( $f_1 = 15$  кГц) до короткохвильового (діапазон НВЧ).

*Хвилеводом* можуть передаватися лише височастотні коливання, довжина яких менша від його поперечних розмірів, наприклад від діаметра  $D$  круглого хвилеводу ( $\lambda \leq D$ ), або сумірна з ними.

## 2.4. Режими передавання енергії

Режим передавання енергії залежить від діапазону використаних частот і визначається значеннями правих частин системи рівнянь Максвелла (2.1).

*Статичний режим* відповідає об'ємним статичним зарядам електричного або магнітного характеру:

Рівняння Максвелла	Метал	Діелектрик
rot H	0	0
rot E	0	0

*Стаціонарний режим* належить до випадку передавання проводами постійного струму ( $\sigma E$ ). Постійний струм створює магнітне поле (rot H), а електричне поле не наводиться (rot E = 0):

Рівняння Максвелла	Метал	Діелектрик
rot H	$\sigma E$	0
rot E	0	0

*Квазістаціонарний режим* охоплює поля, що порівняно повільно змінюються, коли струмами зміщення в діелектрику можна знехтувати. Цей режим є справедливим для частот, при яких довжина хвилі значно більша за поперечні розміри лінії ( $\lambda \gg D$ ):

Рівняння Максвелла	Метал	Діелектрик
rot H	$\sigma E$	0
rot E	$-j\omega\mu H$	$-j\omega\mu H$

За цими рівняннями можна розраховувати різноманітні провідні системи (повітряні лінії, симетричні й коаксіальні кабелі) в діапазоні частот до  $10^9$  Гц.

*Хвильовий режим* відповідає процесам у вільному просторі й діелектрику, де струми провідності відсутні:

Рівняння Максвелла	Метал	Діелектрик
rot H	0	$j\omega\varepsilon E$
rot E	0	$-j\omega\mu H$

Цими рівняннями користуються при розрахунку процесів поширення й випромінювання хвиль у радіотехніці.

*Електродинамічний режим* належить до області високих частот і коротких хвиль, коли необхідно враховувати як струми провідності, так і струми зміщення:

Рівняння Максвелла	Метал	Діелектрик
rot H	$\sigma E$	$j\omega\varepsilon E$
rot E	$-j\omega\mu H$	$-j\omega\mu H$

У такому режимі здійснюється передавання енергії хвилеводами, світловодами й радіочастотними лініями в області НВЧ ( $f > 10^{10}$  Гц), тобто коли довжина хвилі менша за поперечні розміри лінії ( $\lambda < D$ ).

## 2.5. Поширення енергії напрямними системами

Процес передавання енергії напрямними системами характеризується поширенням енергії вздовж системи й величиною зовнішнього поля, що створюється в оточуючому просторі.

Поширення енергії вздовж напрямної системи пов'язано з *втратами енергії* і характеризується її *загасанням*. Зовнішнє електромагнітне поле в *ближній зоні* (найближчій до джерела області простору, для якої довжина хвилі значно перевищує відстань від джерела ( $\lambda \gg r$ )) виявляється у вигляді *індукції* і спричиняє перехід енергії на суміжні кола й появу в них завадних впливів.

У дальній зоні (області простору, в якій відстань від джерела значно більша за довжину хвилі ( $\lambda \ll r$ )) електромагнітне поле приводить до випромінювання енергії і її поширення на великі відстані.

Процеси індукції відбуваються у відносно низькому діапазоні частот при  $\lambda > a$ , а процеси випромінювання – на дуже високих частотах при  $\lambda < a$ , де  $a$  – відстань між проводами.

### 2.5.1. Поширення з урахуванням індукції

Процес поширення вздовж прямої системи характеризується первинними й вторинними параметрами передавання енергії, які наведено в табл. 2.1.

Основний показник системи – загасання  $\alpha$  – складається з двох частин: загасання в металі ( $\alpha_M$ ) й загасання в діелектрику ( $\alpha_D$ ), тобто

$$\alpha = \alpha_M + \alpha_D \quad (2.2)$$

Загасання в металі зумовлено тим, що частина електромагнітної енергії поглинається проводами й розсіюється у вигляді теплових втрат. Це явище характеризується первинними параметрами – опором та індуктивністю.

Таблиця 2.1

Первинні параметри	Вторинні параметри
R – активний опір	$\alpha$ – коефіцієнт загасання
L – індуктивність	$\beta$ – коефіцієнт фази
C – ємність	$Z_B$ – хвильовий опір
G – провідність ізоляції	$v$ – швидкість поширення

Загасання в діелектрику пов'язано з його поляризацією і при змінному полі втратами енергії на діелектричну поляризацію. Ці процеси характеризуються первинними параметрами – ємністю й провідністю ізоляції.

Загасання в металі зі збільшенням частоти збільшується за законом  $\sqrt{f}$ , а загасання в діелектрику – за законом  $f$  (рис. 2.9).

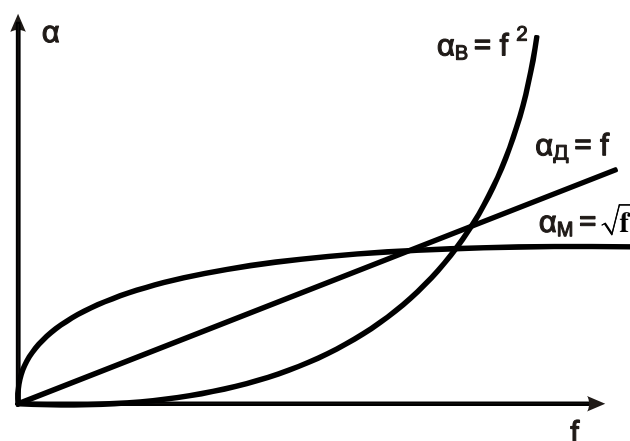


Рис. 2.9

Індукований перехід енергії на сусідні кола у ближній зоні зумовлений електричною й магнітною взаємодією між колами.

Під час проходження струму яким-небудь колом на проводах цього кола виникають заряди. Ці заряди створюють електричне поле, силові лінії якого

стикаються з сусідніми проводами й наводять у них заваду, що виявляється у вигляді завадного впливу *електричного* характеру.

Силві лінії магнітного поля, що створюються навколо проводів, впливають на сусідні проводи й наводять у них струми завад, які виявляються у вигляді завадного впливу *магнітного* характеру.

На еквівалентних електричних схемах електричний вплив характеризується *електричним зв'язком*  $K_{12}$ , а магнітний – *магнітним зв'язком*  $M_{12}$  (рис. 2.10). Обидва коефіцієнти належать до первинних параметрів впливу.

Як вторинні параметри впливу використовуються перехідні загасання на ближньому  $A_0$  й дальньому  $A_\ell$  кінцях лінії. Зі збільшенням частоти змінного струму вплив між колами суттєво збільшується.

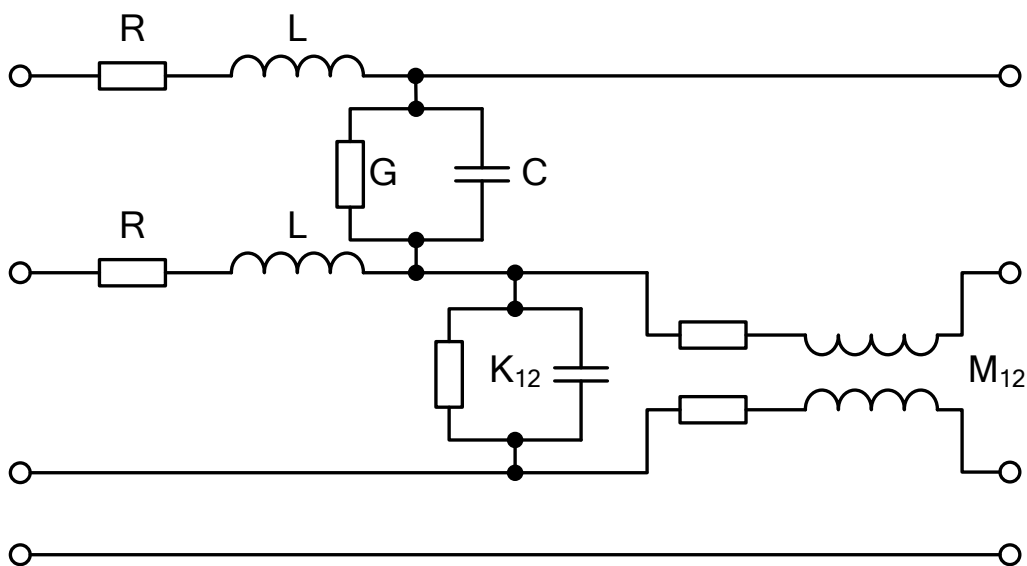


Рис. 2.10

### 2.5.2. Поширення з урахуванням випромінювання

Процес випромінювання високочастотної енергії пов'язаний з *втратами енергії на випромінювання*, тому загасання напрямної системи в цьому режимі складається з трьох компонент:

$$\alpha = \alpha_M + \alpha_D + \alpha_B, \quad (2.3)$$

де  $\alpha_M$  – втрати енергії на нагрівання за рахунок вихрових струмів у проводах, екрані, оболонці кабелю й інших оточуючих металевих масах;  $\alpha_D$  – втрати енергії в ізоляції на діелектричну поляризацію, яка залежить від якості діелектрика;  $\alpha_B$  – втрати високочастотної енергії на випромінювання, пов'язані з антенним ефектом системи.

Частотна залежність цих складових втрат різна. Як уже зазначалося раніше, втрати в металі змінюються за законом  $\sqrt{f}$ , а втрати в діелектрику збільшуються зі збільшенням частоти лінійно. Що стосується втрат на

випромінювання, то вони досить різко збільшуються зі збільшенням частоти за законом  $f^2$  (див. рис. 2.9).

Як видно з графіка, зображеного на рис. 2.9, втрати на випромінювання мають малу питому вагу в області низьких частот і різко збільшуються і стають домінуючими в області надвисоких частот.

## 2.6. Вихідні принципи розрахунку напрямних систем

За допомогою рівнянь Максвелла можна точно розв'язати практично будь-яку електродинамічну задачу, наприклад задачу передавання сигналів зв'язку різними напрямними системами в різних діапазонах частот. Однак у багатьох випадках надзвичайно важко, а іноді й недоцільно шукати точні розв'язки рівнянь на базі електродинаміки, оскільки існують досить точні наближені методи розв'язання задач різних класів.

Такими найбільш характерними методами, які можна вважати граничними для електродинаміки, є, з одного боку, методи *теорії електричних кіл*, а з іншого – методи *теорії геометричної оптики*.

У першому випадку здійснюється перехід від хвильових процесів до коливальних (довжина хвилі  $\lambda \rightarrow \infty$ ), а у другому – до променевих (геометричних) процесів ( $\lambda \rightarrow 0$ ).

Залежно від співвідношення довжини хвилі  $\lambda$  й поперечних геометричних розмірів  $D$  розв'язання задач передавання напрямною системою можна поділити на три області: квазістаціонарних, електродинамічних і квазіоптичних процесів (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Процеси	Квазістаціонарні	Електродинамічні (резонансні)	Квазіоптичні
Співвідношення $D/\lambda$	$\ll 1$	$\approx 1$	$\gg 1$
Частоти, Гц	Від 0 до $10^{6-8}$	$10^{9-12}$	$10^{13-15}$
Довжина хвиль	Кілометрові, метрові	Сантиметрові, міліметрові	Мікронні
Теорія	Теорія кіл	Електродинаміка	Оптика
Явища	Коливальні	Хвильові	Променеві
Рівняння	Однорідної лінії (закони Ома, Кірхгофа)	Максвелла	Гюйгенса, Френеля
Тип хвилі	ТЕМ	Е і Н	НЕ і ЕН
Напрямна система	Повітряна лінія, симетрична лінія, коаксіальна лінія	Хвилевід, коаксіальна лінія	Оптичний світловод

## 2.7. Рівняння однорідної лінії

Розглянемо однорідну довгу лінію з первинними параметрами  $R$ ,  $L$ ,  $C$  і  $G$  (рис. 2.11).

На початку лінії є генератор напруги з ЕРС  $E$  і внутрішнім опором  $Z_0$ , а в кінці лінії знаходиться навантаження  $Z$ . Необхідно встановити взаємозв'язок струму  $I(x)$  і напруги  $U(x)$  у будь-якій точці кола з первинними параметрами  $R$ ,  $L$ ,  $C$  і  $G$ , якщо відомі напруга й струм на початку  $I_0$ ,  $U_0$  або в кінці  $I_\ell$ ,  $U_\ell$  кола.

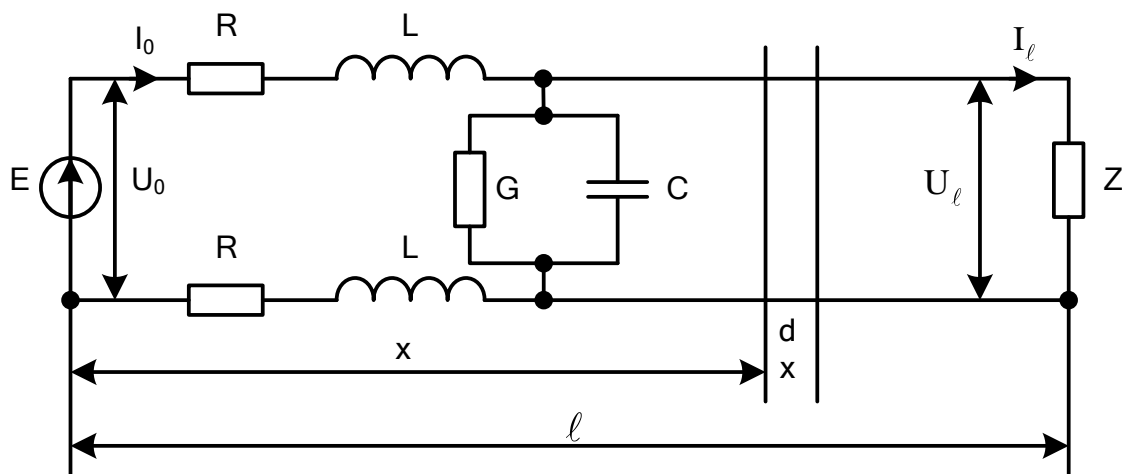


Рис. 2.11

Виділимо на відстані від початку кола нескінченно малу ділянку  $dx$ . Позначимо струм, що проходить елементом кола  $dx$ , через  $I$ , а напругу між проводами – через  $U$ . Тоді для ділянки  $dx$  можна записати:

– спад напруги

$$-\frac{dU}{dx} = I(R + j\omega L); \quad (2.4)$$

– струм

$$-\frac{dI}{dx} = U(G + j\omega C). \quad (2.5)$$

Виключимо з рівняння (2.4) величину  $I$ , взявши другу похідну:

$$-\frac{d^2U}{dx^2} = \frac{dI}{dx}(R + j\omega L). \quad (2.6)$$

Підставимо в отриманий вираз (2.6) рівняння для струму (2.5):

$$\frac{d^2U}{dx^2} = U(R + j\omega L)(G + j\omega C). \quad (2.7)$$

Введемо позначення  $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$ , тоді вираз (2.7) можна записати як

$$\frac{d^2U}{dx^2} = \gamma^2 U. \quad (2.8)$$

Розв'язок рівняння (2.8) має вигляд  $U = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}$ . Диференціюючи це рівняння, отримуємо вираз для струму

$$\frac{dU}{dx} = A\gamma e^{\gamma x} - B\gamma e^{-\gamma x} = \gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}). \quad (2.9)$$

Підставивши вираз (2.9) у вихідне рівняння (2.4) для спаду напруги, одержимо

$$I(R + j\omega L) = -\gamma(Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}). \quad (2.10)$$

Введемо позначення  $Z_x = (R + j\omega L)/\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}$ . Підставляючи його у вираз (2.10), маємо

$$IZ_x = -Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}. \quad (2.11)$$

Отже, отримуємо два рівняння з двома невідомими А і В:

$$U = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}; \quad IZ_x = -Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x}. \quad (2.12)$$

Для знаходження цих невідомих скористаємося граничними умовами  $U|_{x=0} = U_0$ ,  $I|_{x=0} = I_0$ . Підставляючи їх у рівняння (2.12), маємо  $U_0 = A + B$ ,  $I_0 Z_x = -A + B$ , звідки

$$A = (U_0 - I_0 Z_x)/2, \quad B = (U_0 + I_0 Z_x)/2. \quad (2.13)$$

Підставимо ці значення А і В у рівняння (2.12):

$$U = [(U_0 - I_0 Z_x)/2]e^{\gamma x} + [(U_0 + I_0 Z_x)/2]e^{-\gamma x}; \quad (2.14)$$

$$IZ_x = -[(U_0 - I_0 Z_x)/2]e^{\gamma x} + [(U_0 + I_0 Z_x)/2]e^{-\gamma x}. \quad (2.15)$$

Зробивши відповідні перетворення й урахувавши, що  $\text{ch } \gamma x = (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2$  і  $\text{sh } \gamma x = (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2$ , одержимо значення напруги  $U_x$  і струму  $I_x$  у будь-якій точці кола  $x$ :

$$\begin{cases} U_x = U_0 \text{ch } \gamma x - I_0 Z_x \text{sh } \gamma x; \\ I_x = I_0 \text{ch } \gamma x - (U_0/Z_x) \text{sh } \gamma x. \end{cases} \quad (2.16)$$

### 2.7.1. Хвильовий опір

*Хвильовий опір*  $Z_x$  – це опір, який зустрічає електромагнітна хвиля при поширенні вздовж однорідної лінії без відбиття, тобто за умови, що на процес передавання енергії не впливають неузгодженості на кінцях лінії.

Електромагнітну хвилю можна подати у вигляді двох хвиль: хвилі напруги, яка відповідає електричній енергії, і хвилі струму, що відповідає



магнітній енергії. Кількісне співвідношення, яке має місце між цими хвилями в лінії, і є хвильовим опором кола.

Хвильовий опір, властивий цьому типу кабелю, залежить лише від його первинних параметрів і частоти струму, що передається:

$$Z_x = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}. \quad (2.17)$$

За своєю фізичною природою величина  $Z_x$  не залежить від довжини кабельної лінії і є сталою у будь-якій точці кола.

У загальному вигляді хвильовий опір є комплексною величиною, і тому він також може бути виражений через свої дійсну й уявну частини:

$$Z_x = |Z_x| e^{j\varphi_x}. \quad (2.18)$$

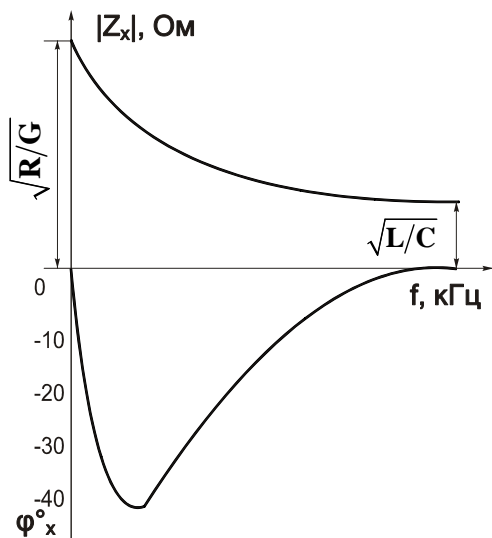


Рис. 2.12

Загальний вигляд частотної залежності хвильового опору кола кабелю показано на рис. 2.12.

Модуль хвильового опору  $Z_x$  зі зміною частоти зменшується від значення  $\sqrt{R/G}$  при  $f = 0$  до  $\sqrt{L/C}$  і зберігає цю величину у всій області високих частот.

Кут хвильового опору  $\varphi_x$  дорівнює нулю при  $f = 0$  і на високих частотах, а на середніх частотах ( $f = 800$  Гц) має максимальне значення. В кабельних лініях кут завжди від'ємний і за абсолютною величиною не перевищує  $45^\circ$ , що свідчить

про переважання ємнісної складової і ємнісний характер хвильового опору кабелів.

### 2.7.2. Коефіцієнт поширення

Електромагнітна енергія, поширюючись уздовж кабельної лінії, зменшується за величиною від початку до кінця лінії. Зменшення або загасання енергії пояснюється втратами її у колах передавання. Ці втрати враховуються за допомогою коефіцієнта поширення  $\gamma$ .

Коефіцієнт поширення є комплексною величиною й може бути поданий у вигляді суми дійсної і уявної частин:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \quad (2.19)$$

Якщо скористатися виразом для струму й напруги у вигляді

$$U_0/U_\ell = I_0/I_\ell = e^{\gamma\ell} = e^{\alpha\ell} e^{j\beta\ell} = Ae^{j\varphi}, \quad (2.20)$$

то можна побачити, що модуль виразу  $A = e^{\alpha\ell}$  характеризує зменшення абсолютного значення струму або напруги при проходженні лінії довжиною

$l$ . Кут  $\varphi = \beta l$  показує зміну кута векторів струму й напруги на цій самій ділянці лінії довжиною  $l$ .

Під час передавання сигналів зв'язку параметри  $\alpha$  і  $\beta$  характеризують, відповідно, загасання й зміну фаз струму, напруги й потужності на ділянці кабельного кола довжиною 1 км і мають назву *коефіцієнтів загасання й фази*. Коефіцієнт загасання вимірюється в децибелах на кілометр, а коефіцієнт фази – в радіанах на кілометр.

Типові частотні залежності коефіцієнтів загасання й фази кабелю показано на рис. 2.13.

Коефіцієнт загасання  $\alpha$ , який при постійному струмі дорівнює  $\sqrt{RG}$ , спочатку збільшується досить різко, а потім – більш плавно. Коефіцієнт фази  $\beta$  збільшується від нуля майже за прямолінійним законом.

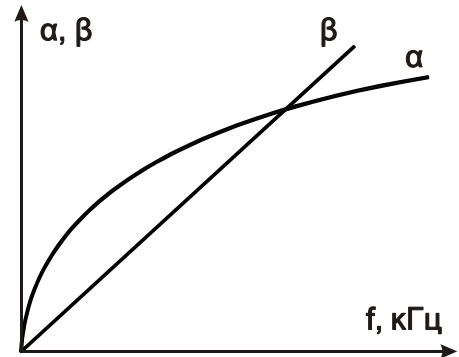


Рис. 2.13

### 2.7.3. Швидкість поширення електромагнітної енергії колами зв'язку

Електромагнітна енергія поширюється лінією зв'язку з певною швидкістю, яка залежить від параметрів кола й частоти струму і визначається як

$$v = \omega / \beta. \quad (2.21)$$

Швидкість поширення є функцією частоти  $f = \omega / 2\pi$  і коефіцієнта фази  $\beta$ . Таким чином, якщо загасання кола визначає якість і дальність зв'язку, то коефіцієнт фази обумовлює швидкість руху енергії лінією.

Швидкість поширення можна визначити:

– при постійному струмі

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC} \left[ \left( \sqrt{LG/RC} + \sqrt{RC/LG} \right) / 2 \right]}; \quad (2.22)$$

– в діапазоні високих частот

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.23)$$

Таким чином, зі збільшенням частоти швидкість поширення електромагнітної енергії кабельними лініями теж значно збільшується.

### 3. СИМЕТРИЧНІ КАБЕЛІ

#### 3.1. Електричні процеси в симетричних колах

Відмітною особливістю симетричних ліній є наявність двох проводів, що мають однакові конструктивні й електричні властивості. В симетричному колі електромагнітне поле відкрите (рис. 3.1) і діє на значній відстані від провідників.

Під впливом змінного поля відбувається перерозподіл електромагнітної енергії по перерізу провідників, при цьому починають

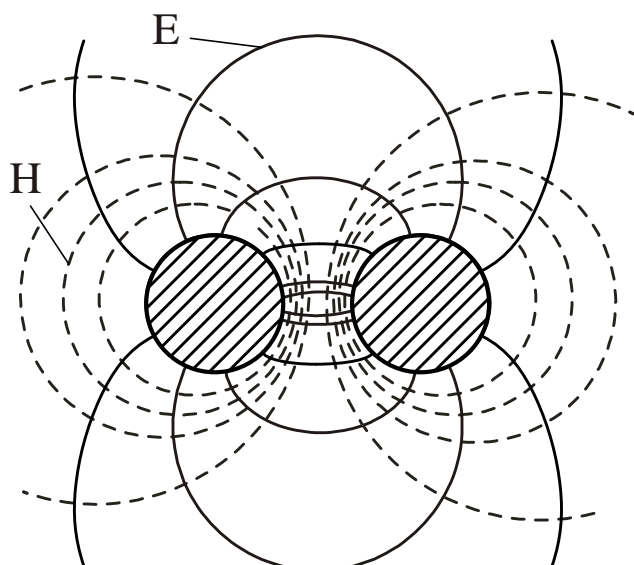


Рис. 3.1

виявлятися такі ефекти:

- *поверхневий ефект*;
- *ефект близькості* сусідніх провідників;
- *ефект впливу оточуючих металевих мас* (сусідніх провідників, екрана, броні тощо) на параметри кіл.

У симетричних кабельних колах спостерігаються всі три ефекти одночасно. В повітряних лініях, де проводи розташовані порівняно далеко один від одного і відсутні зовнішні металеві оболонки, слід враховувати лише

поверхневий ефект. В коаксіальних кабелях, що є закритими системами, дія оточуючих металевих мас не враховується.

За рахунок зазначених явищ відбувається перерозподіл електромагнітного поля й змінюються параметри кіл. Активний опір  $R$  і ємність  $C$  збільшуються, індуктивність  $L$  зменшується. Найбільш суттєво збільшується опір кола

$$R = R_0 + R_{п.е} + R_{е.б} + R_M, \quad (3.1)$$

де  $R_0$  – опір постійному струму;  $R_{п.е}$  – опір за рахунок поверхневого ефекту;  $R_{е.б}$  – опір за рахунок ефекту близькості;  $R_M$  – опір, зумовлений втратами в оточуючих металевих масах.

##### 3.1.1. Поверхневий ефект

*Поверхневий ефект* являє собою такий перерозподіл струму по перерізу провідника, при якому щільність струму збільшується від центра до поверхні провідника.

Струм  $I$ , що протікає крізь провідник, створює навколо нього магнітне поле (рис. 3.2). Силкові лінії внутрішнього поля, перетинаючи товщу

провідника, наводять у ньому вихрові струми  $I_{в.с}$ , які за законом Ленца спрямовані протилежно обертанню рукоятки гвинта.

Вихрові струми у центрі провідника мають напрямок, зворотний руху основного струму, що тече по провіднику, а на периферії, навпаки, їх напрямки збігаються.

Поверхневий ефект збільшується зі збільшенням частоти струму, магнітної проникності, провідності й діаметра провідника. При достатньо високій частоті струм протікає лише поверхнею провідника, що спричиняє збільшення його активного опору.

Інакше поверхневий ефект можна пояснити як проникнення електромагнітного поля в товщу провідника, причому чим вища частота, тим більша глибина проникнення поля в метал.

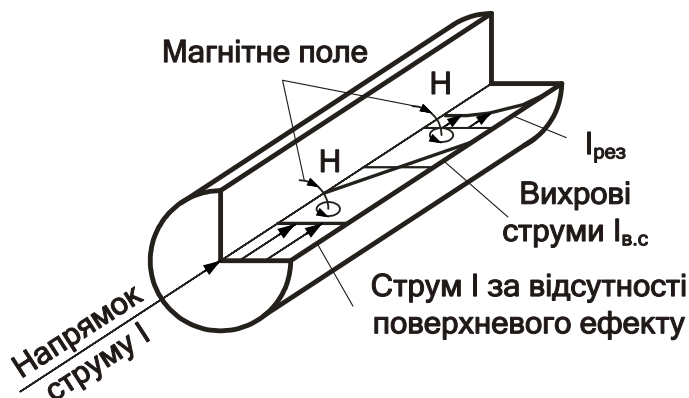


Рис. 3.2

### 3.1.2. Ефект близькості

Зовнішнє поле  $H$  провідника  $a$ , перетинаючи товщу провідника  $b$ , наводить у ньому вихрові струми (рис. 3.3). На поверхні провідника  $b$ , обернутій до провідника  $a$ , вони збігаються за напрямком з основним струмом ( $I + I_{в.с}$ ), а на протилежній поверхні провідника  $b$  спрямовані зустрічно основному струму ( $I - I_{в.с}$ ). Аналогічний перерозподіл струмів відбувається й у провіднику  $a$ .

Під час взаємодії вихрових струмів з основним щільність результтивного струму на обернутих одна до одної поверхнях провідників  $a$  і  $b$  збільшується, а на віддалених одна від одної поверхнях – зменшується.

Це явище («зближення» струмів у провідниках  $a$  і  $b$ ) має назву ефекту близькості. Через нерівномірний розподіл щільності струму збільшується активний опір кола змінному струму.

Якщо двома сусідніми провідниками струми проходять в одному напрямку (рис. 3.4), то перерозподіл їх щільності через

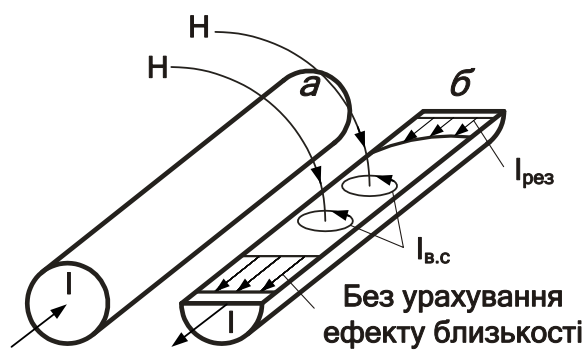


Рис. 3.3

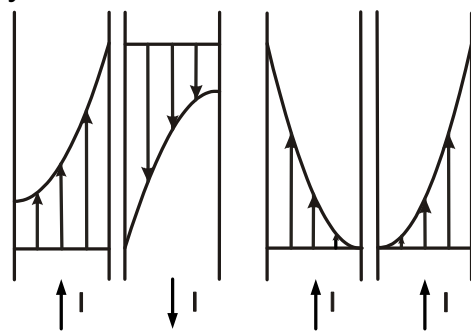


Рис. 3.4

взаємодію зовнішніх електромагнітних полів приводить до збільшення щільності струмів на взаємовіддалених поверхнях провідників *a* і *б*.

Ефект близькості також є прямо пропорційним частоті, магнітній проникності, провідності й діаметру провідника й, окрім того, залежить від відстані між провідниками. Зі зменшенням цієї відстані дія ефекту близькості збільшується в квадраті.

### 3.1.3. Вплив оточуючих металевих мас

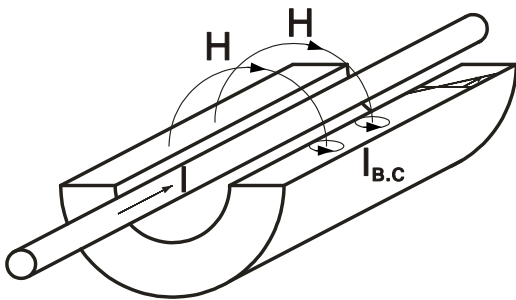


Рис. 3.5

Магнітне поле *H*, що створюється струмом, який протікає проводами кола, наводить вихрові струми  $I_{в.с}$  у сусідніх провідниках кабелю, оточуючому екрані, металевій оболонці й броні (рис. 3.5).

Проходячи металевими частинами кабелю, ці вихрові струми нагрівають їх і створюють додаткові теплові втрати енергії. Іншими словами, відбувається ніби «відсмоктування» деякої частки енергії, що передається, причому найбільшого впливу зазнають близько розташовані до розглядуваного кола металеві частини кабелю.

Окрім того, вихрові струми створюють поле зворотної дії, яке впливає на провідники кола й змінює їх параметри.

## 3.2. Визначення первинних параметрів кабельних ліній

### 3.2.1. Опір та індуктивність

Визначення опору й індуктивності здійснюється на основі врахування енергії, яка поглинається провідником з оточуючого простору.

Вираз для визначення опору  $R$ , Ом/км, має вигляд [3]

$$R = R_a + R_{\sigma} = 2R_0\chi \left[ 1 + F(kr) + \frac{p_c G(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2} \right], \quad (3.2)$$

де  $R_a$ ,  $R_{\sigma}$  – опори провідників *a* і *б*;  $d$  – діаметр провідників;  $a$  – відстань між провідниками;  $r$  – радіус провідників;  $k = \sqrt{\omega\mu_a\sigma}$  – коефіцієнт втрат для метала;  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність провідників;  $p_c$  – параметр, що визначається типом скручування (для парного скручування  $p_c = 1$ );  $\chi$  – коефіцієнт скручування ( $\chi = 1,02 \dots 1,07$  залежить від діаметра кабелю);  $F(kr)$ ,  $G(kr)$ ,  $H(kr)$  – циліндричні функції.

Наведений вираз для розрахунку опору містить такі складові:

– опір постійному струму  $R_0 = 2R_0$ ;

– опір за рахунок поверхневого ефекту  $R_{п.е} = 2R_0F(kr)$ ;

– опір за рахунок ефекту близькості  $R_{e.б} = 2R_0 \frac{\rho_c G(kr)(d/a)^2}{1 - H(kr)(d/a)^2}$ .

Індуктивність кола в цілому  $L$ , Гн/км, визначається сумою зовнішньої  $L_{зоб}$  і внутрішньої  $L_B$  (відносно провідника) індуктивностей:

$$L = L_{зоб} + 2L_B = \left[ 4 \ln \frac{a-r}{r} + \mu Q(kr) \right] \cdot 10^{-4}, \quad (3.3)$$

де  $\mu$  – відносна магнітна проникність провідників;  $Q(kr)$  – циліндрична функція.

### 3.2.2. Ємність і провідність ізоляції

Ємність  $C$ , Ф/км, і провідність  $G$ , См/км, ізоляції пов'язані з процесами в діелектрику. Ємність визначає його здатність до поляризації і величину струмів зміщення, а провідність – величину втрат.

Ємність з урахуванням близькості сусідніх пар провідників і впливу зовнішньої металевої оболонки визначається за формулою

$$C = \frac{\chi \varepsilon \cdot 10^{-6}}{36 \ln(\psi a/r)}, \quad (3.4)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність ізоляції;  $\psi$  – поправковий коефіцієнт, що характеризує близькість металевої оболонки й сусідніх провідників ( $\psi = 0,6 \dots 0,7$ ).

Втрати в діелектрику характеризуються кутом діелектричних втрат  $\delta$ :

$$G = G_0 + G_j = \frac{1}{R_{із}} + \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (3.5)$$

де  $G_0$  – провідність, зумовлена протіканням струму в діелектрику;  $G_j$  – провідність, зумовлена діелектричними втратами;  $R_{із}$  – опір ізоляції кабелю.

Кабелі зв'язку мають зазвичай складну комбіновану ізоляцію, яка складається з твердого діелектрика й повітря. Результивні еквівалентні значення діелектричної проникності й кута діелектричних втрат складної ізоляції визначаються властивостями й співвідношенням об'ємів її складових частин. Еквівалентні значення складної ізоляції близькі до відповідних величин тієї її частини, яка займає найбільший об'єм.

### 3.2.3. Визначення поправкових коефіцієнтів

У формулах для розрахунку первинних параметрів симетричних кабелів присутні три важливих поправкових коефіцієнти: коефіцієнт скручування  $\chi$ , що враховує подовження жил кабелю за рахунок їх

укладання по гвинтовій лінії, параметр  $p_c$ , що залежить від типу скручування і визначає інтенсивність ефекту близькості провідників групи, і коефіцієнт близькості металевої оболонки і сусідніх провідників  $\psi$ .

При парному скручуванні  $p_c = 1$ , при зоряному –  $p_c = 5$ , при подвійному парному –  $p_c = 2$ .

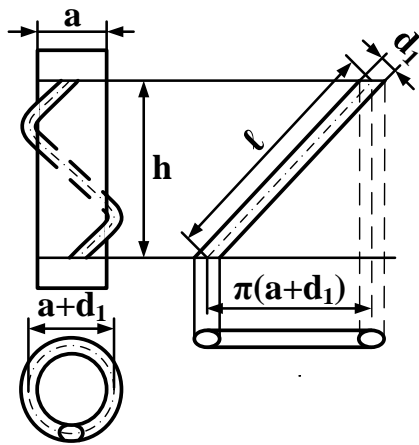


Рис. 3.6

Подовження жил кабелю порівняно з його довжиною (рис. 3.6) відбувається за рахунок того, що групи провідників кожного наступного витка накладаються на попередній по гвинтовій лінії. Це подовження враховується через коефіцієнт скручування, який визначається за формулою

$$\chi = \sqrt{1 + \pi^2 \left( \frac{a + d_1}{h} \right)^2}, \quad (3.6)$$

де  $a$  – відстань між провідниками, мм;  $d$  – діаметр провідника, мм;  $d_1$  – діаметр провідника в ізоляції, мм;  $h$  – крок скручування (крок намотування спіралі), мм.

Коефіцієнт близькості металевої оболонки і сусідніх провідників  $\psi$  залежить від типу скручування й обчислюється за формулою

$$\psi_{\pi} = \frac{(d_r + d_1 - d)^2 - a^2}{(d_r + d_1 - d)^2 + a^2}, \quad (3.7)$$

де  $d_r$  – діаметр групи провідників, мм.

### 3.3. Основні залежності первинних параметрів симетричних ліній

Параметри  $R$  і  $G$  зі збільшенням частоти  $f$  збільшуються за рахунок втрат у провідниках на вихрові струми й в ізоляції на діелектричну поляризацію (рис. 3.7).

Індуктивність  $L$  зі збільшенням частоти зменшується, тому що зменшується внутрішня індуктивність провідників за рахунок поверхневого ефекту. Ємність  $C$  від частоти не залежить.

При збільшенні відстані між провідниками  $a$  параметри  $R$ ,  $C$  і  $G$  закономірно зменшуються, а індуктивність  $L$  збільшується (рис. 3.8).

Зменшення  $R$  зумовлено зменшенням втрат на ефект близькості. Збільшення  $L$  пов'язано зі збільшенням контуру, що пронизується магнітним потоком. Ємність  $C$  зменшується, оскільки провідники віддаляються один від одного й зменшується їх взаємодія. Зменшення  $G$  пов'язано зі збільшенням товщини діелектричного матеріалу між провідниками при збільшенні відстані між ними.

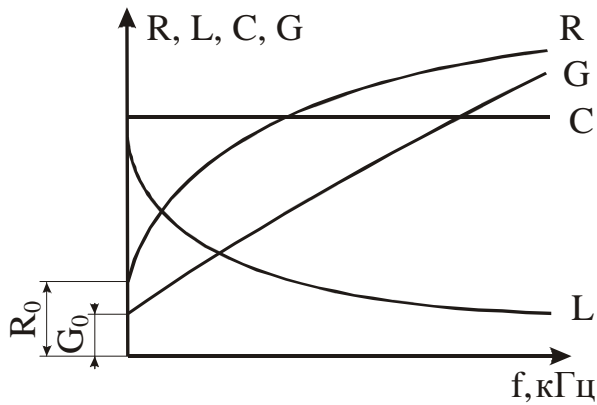


Рис. 3.7

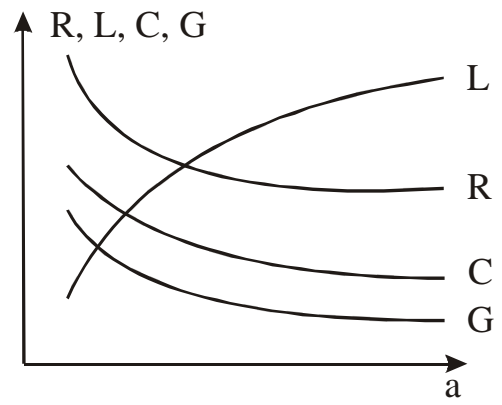


Рис. 3.8

Зі збільшенням діаметра провідників  $d$  параметри  $C$  і  $G$  збільшуються, а  $L$  зменшується (рис. 3.9). Зміна активного опору має складний характер. Це зумовлено тим, що зі збільшенням діаметра провідника опір постійному струму різко зменшується, а опір за рахунок поверхневого ефекту й ефекту близькості збільшується. Тому спочатку  $R$  різко зменшується, а потім це зменшення сповільнюється й при великих значеннях діаметра починає збільшуватися.

Типові значення первинних параметрів наявних типів симетричних ліній становлять:  $R = 5 \dots 200$  Ом/км;  $L = 0,6 \dots 2$  мГ/км;  $C = 6 \dots 50$  нФ/км;  $G = 1 \dots 200$  мкСм/км.

У кабельних лініях за рахунок тонких провідників і близького їх розташування превалюють параметри  $R$  і  $C$ .

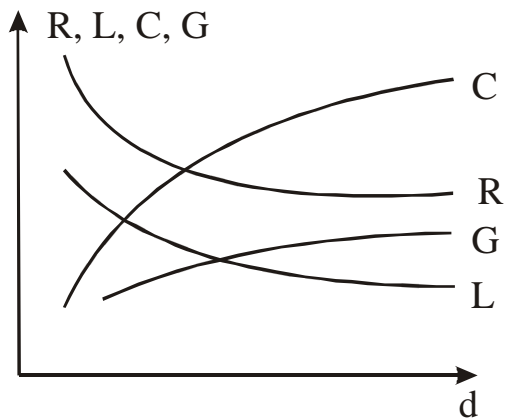


Рис. 3.9

### 3.4. Визначення вторинних параметрів симетричних ліній

Вторинні параметри симетричних ліній ( $Z_x$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $v$ ) розраховуються за загальними формулами (2.17), (2.19) і (2.22). У деяких випадках їх можна виразити безпосередньо через габаритні розміри кіл ( $a$ ,  $d$ ) і якість вихідних матеріалів ( $\epsilon$ ,  $\text{tg}\delta$ ):

– хвильовий опір симетричної лінії, Ом,

$$Z_x = \frac{120}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{a-r}{r}\right); \quad (3.8)$$

– коефіцієнт загасання, дБ/км,

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad (3.9)$$

– коефіцієнт фази, рад/км,



$$\beta = \omega\sqrt{LC} = \omega\sqrt{\varepsilon}/c; \quad (3.10)$$

– швидкість поширення енергії, км/с,

$$v = 1/\sqrt{LC} = c/\sqrt{\varepsilon}. \quad (3.11)$$

### 3.5. Оптимальні співвідношення параметрів симетричних ліній зв'язку

Однією з актуальних проблем кабельної техніки є збільшення дальності зв'язку без додаткових витрат кольорових металів (за рахунок збільшення перерізу провідників кабелю й зменшення їх опору). Для розв'язання цієї проблеми вдосконалюють апаратуру зв'язку й зменшують загасання кабельного кола.

Коефіцієнт загасання визначається виразом

$$\alpha = R/2\sqrt{C/L} + G/2\sqrt{L/C} = \alpha_M + \alpha_D, \quad (3.12)$$

де  $\alpha_M$ ,  $\alpha_D$  – коефіцієнти загасання в металі й діелектрику.

Створити таку лінію, в якій би  $R = G = 0$ , неможливо, оскільки будь-яке реальне кабельне коло має активний опір  $R$  і провідність  $G$ . Можна лише підібрати таке співвідношення між параметрами кола, щоб його загасання було найменшим.

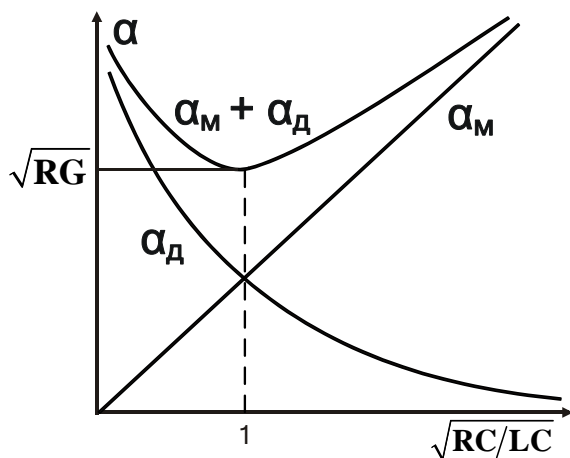


Рис. 3.10

Характер зміни коефіцієнтів  $\alpha_M$  і  $\alpha_D$  при різних співвідношеннях  $X = \sqrt{RC/LG}$  наведено на рис. 3.10.

Зі збільшенням  $X$  величина  $\alpha_M$  збільшується, а  $\alpha_D$  різко зменшується. При  $X = 1$  втрати в металі дорівнюють втратам у діелектрику ( $\alpha_M = \alpha_D$ ) і загасання кабелю має найменшу величину:

$$\alpha_{\min} = \alpha_0 = \sqrt{RG}.$$

Це має місце у тому випадку, коли первинні параметри кола знаходяться у співвідношенні  $RC = LG$ . Таке співвідношення є оптимальним, і до нього слід наближатися при конструюванні кабелів зв'язку. В кабелях наявних типів  $R$  і  $C$  перевищують за величинами  $L$  і  $G$ , тобто  $RC \gg LG$ . Тому необхідно вживати спеціальних заходів для зменшення загасання:

- зменшувати опір  $R$  – складно, оскільки величина  $R$  регламентована допустимими витратами міді (діаметром жили);
- зменшувати ємність  $C$  – недоцільно, оскільки потребує збільшення відстані між жилами кабелю (тобто збільшення габаритних розмірів);
- збільшувати індуктивність  $L$  – єдиний реальний шлях зменшення загасання.

Існують декілька різних способів штучного збільшення індуктивності кабельних кіл зв'язку:

- *пупінізація* – ввімкнення у кабельне коло через певні відстані пупінівських (на честь автора Пупіна) котушок індуктивності;
- *кратупізація* – застосування феромагнітної обмотки на струмопровідній жилі;
- *біметалізація* – застосування біметалевих озалізненних жил;
- використання *магнітодіелектрика*.

### **3.6. Конструкція симетричних кабелів і їх характеристики**

*Кабелем* називається електротехнічний виріб, що містить ізольовані провідники, об'єднані в єдину конструкцію і укладені в загальну металеву або пластмасову оболонку і захисні покриття [3].

Існують різні критерії класифікації кабелів:

- за елементами, що входять до їх складу – однорідні й комбіновані;
- за матеріалом і структурою ізоляції – з повітряно-паперовою, кордельно-паперовою, кордельно-стирофлексною (полістирольною), суцільною поліетиленовою, пористо-поліетиленовою, фторопластною й іншими видами ізоляції;
- за видом скручування ізольованих провідників у групи – парне та четверне (зоряне), в осердя – повивне й пучкове скручування;
- за видом оболонок – металеві (свинець, алюміній, сталь), пластмасові (поліетилен, полівінілхлорид), металопластмасові (альпет, стальпет);
- за видом захисно-броньових покриттів – зі стрічковою або дротяною бронею, джутовим або пластмасовим покритвом.

Кабелям присвоюють певну умовну позначку – марку. Кабелі, що використовують у магістральних мережах зв'язку, маркують літерою М (симетричні) або буквами КМ (коаксіальні); в міських телефонних мережах – буквою Т. Якщо кабель має стирофлексну (полістирольну) ізоляцію, то в його позначення додатково вводять букву С, якщо поліетиленову – букву П. До позначення кабелю, що має алюмінієву оболонку, додають букву А, сталеву оболонку – букву С.

Залежно від виду захисних покриттів кабелі маркують такими буквами: Г – голі (освинцьовані), Б – зі стрічковою бронею й К – з круглодротяною бронею. Наявність зовнішньої пластмасової оболонки позначають буквою П (поліетиленова) або В (ПВХ).

#### **3.6.1. Провідники жил кабелю**

Струмопровідні жили (зазвичай круглої форми) кабелів зв'язку повинні мати високу електричну провідність, гнучкість і достатню механічну

міцність. Найбільш поширеними матеріалами для виготовлення кабельних жил є мідь і алюміній.

*Мідь*, як правило, застосовують відпалену, м'яку, марки ММ з питомим опором  $0,01754 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$  і температурним коефіцієнтом опору постійному струму  $0,004$ .

*Алюміній* має питомий опір  $0,0295 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$ , що в  $1,65$  рази більше, ніж у міді. Його температурний коефіцієнт становить  $0,0042$ .

Мідний дріт діаметром  $0,32$ ;  $0,4$ ;  $0,5$ ;  $0,6$ ;  $0,7$  мм використовують при виготовленні кабелів, що застосовуються в міських телефонних мережах, а діаметром  $0,8$ ;  $0,9$ ;  $1,0$ ;  $1,1$ ;  $1,2$  мм – у магістральних. У міській мережі найбільш широко застосовують кабелі з жилами діаметром  $0,5$  мм, а в магістральній – кабелі з жилами діаметром  $1,2$  мм.

Алюмінієві жили, що застосовуються у виробництві кабелів зв'язку, мають діаметри  $1,15$ ;  $1,55$ ;  $1,8$  мм. За електричною провідністю ці жили є аналогічними мідним з діаметром  $0,9$ ;  $1,2$ ;  $1,4$  мм відповідно. Кращі результати за механічними характеристиками – в алюмінієвих сплавах, що містять присадку з магнію, заліза та інших металів.

Поряд із суцільними циліндричними провідниками (рис. 3.11, а) використовують також провідники дещо складнішої конструкції.

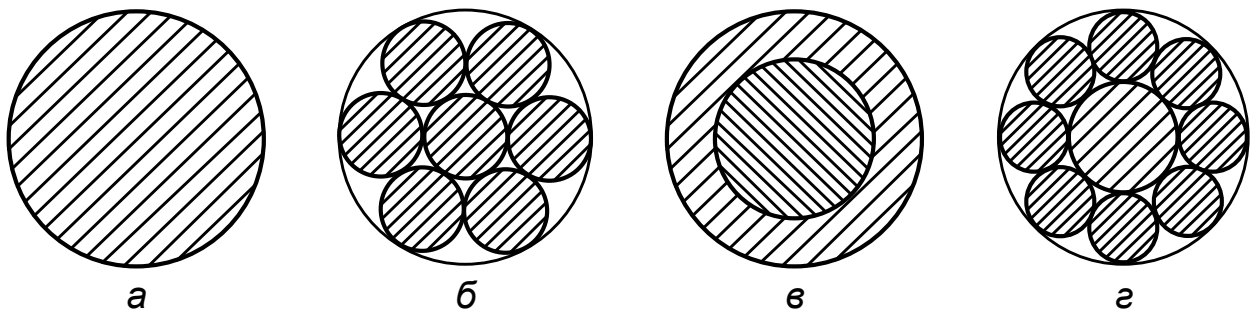


Рис. 3.11

При виробництві кабелів, що мають відрізнятися підвищеною гнучкістю і механічною міцністю, струмопровідну жилу скручують з декількох дротів (частіше  $7$ ,  $12$ ,  $19$  і т. д.) (рис. 3.11, б). Є також біметалеві провідники конструкції алюміній – мідь (рис. 3.11, в). При виготовленні підводних кабелів використовують багатодротову жилу, що складається з дротів різного перерізу (рис. 3.11, г). У центрі такої жили знаходиться товстий провідник, а виток складається з тонких дротів.

### 3.6.2. Ізоляція жил кабелю

Матеріал для ізоляції кабельних жил повинен мати високі й стабільні в часі електричні характеристики, бути гнучким, механічно міцним і не вимагати складного технологічного оброблення. Електричні властивості ізоляції описуються такими параметрами:

– електричною міцністю  $U$ , при якій відбувається пробій ізоляції;

– питомим електричним опором  $\rho$ , що характеризує струм витoku в діелектрику;

– діелектричною проникністю  $\epsilon$ , що характеризує ступінь зміщення (поляризації) зарядів у діелектрику при впливі на нього електричного поля;

– тангенсом кута діелектричних втрат (або величиною діелектричних втрат)  $\operatorname{tg} \delta$ , що характеризує втрати високочастотної енергії в діелектрику.

Найкращим діелектриком є повітря, яке має  $\epsilon \rightarrow 1$ ,  $\rho \rightarrow \infty$  й  $\operatorname{tg} \delta \rightarrow 0$ . Однак створити ізоляцію тільки з повітря практично неможливо. Тому кабельна ізоляція зазвичай є комбінованою і містить як повітря, так і твердий діелектрик, причому кількість твердого діелектрика має бути мінімальною і визначатися вимогою стійкості ізоляції і жорсткості її конструкції. Ізоляція має забезпечити, щоб струмопровідні жили не дотикалися одна до одної, і строго фіксувати взаємне розташування жил у групі по всій довжині кабелю.

Як діелектрики при виготовленні кабелів зв'язку широко використовують полімеризаційні пластмаси – полістирол (стирофлекс), поліетилен, фторопласт, поліхлорвініл та ін. Завдяки високим електричним характеристикам у широкому спектрі частот, вологостійкості до різних агресивних середовищ і порівняно нескладному технологічному обробленню пластмаси широко застосовують для ізоляції як захисні оболонки під час виробництва кабелів зв'язку.

На основі зазначених діелектриків нині розроблені і застосовуються різні конструкції ізоляційних покривів. При виготовленні кабелів зв'язку в основному використовують такі типи ізоляції:

– трубчаста – з паперової або пластмасової стрічки, накладеної у вигляді трубки (рис. 3.12, а);

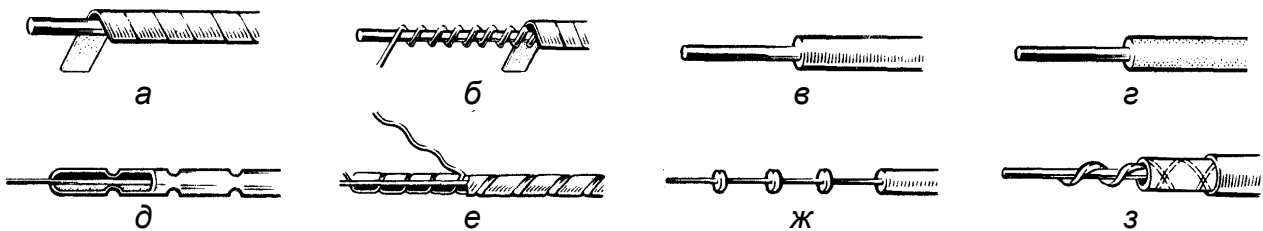


Рис. 3.12

– кордельна – з нитки корделя, розташованого відкритою спіраллю на провіднику, і стрічки, яка накладається поверх корделя (рис. 3.12, б);

– суцільна – з суцільного шару пластмаси (рис. 3.12, в);

– пориста – з шару пінопласту (рис. 3.12, г);

– балонна, що являє собою тонкостінну пластмасову трубку, всередині якої вільно розташовується провідник; трубку періодично в точках або по спіралі обжимають для надійного утримання жили в центрі ізоляції (рис. 3.12, д, е);

– шайбова – у вигляді шайб з твердого діелектрика, посаджених на провідник через певні проміжки (рис. 3.12, ж);

– спіральна (гелікоїдальна), яка являє собою рівномірно розподілену по довжині провідника пластмасову спіраль, що має прямокутний переріз (рис. 3.12, з).

Найбільш вживаними видами ізоляції зараз є:

• для кабелів міського та сільського зв'язку – трубчаста, виконана у вигляді обмотки паперовими стрічками, суцільна поліетиленова, пориста паперова або поліетиленова;

• для симетричних кабелів міжміського зв'язку – кордельно-стирофлексна, балонна, кордельно-трубчаста або пориста з поліетилену.

### 3.6.3. Типи скручування жил у групи

Окремі жили зазвичай скручують у групи. При цьому знижуються електромагнітні зв'язки між колами і підвищується захищеність їх від взаємних і зовнішніх завад. Крім того, скручування полегшує взаємне переміщення жил при вигинах кабелю і забезпечує йому більш стійку і круглу форму. Існує кілька способів скручування жил у групи:

– парне скручування (П) – дві ізольовані жили скручують разом у пару з кроком скручування не більше 300 мм (рис. 3.13, а);

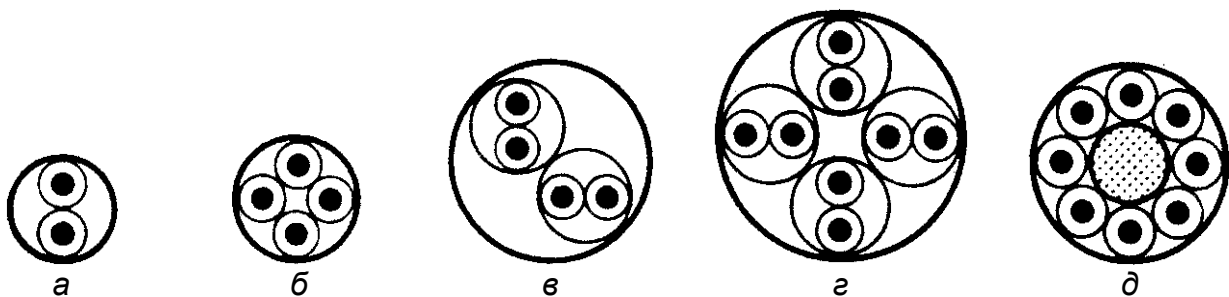


Рис. 3.13

– зоряне скручування (З) – чотири ізольовані жили, розташовані по кутах квадрата, скручують з кроком скручування приблизно 150...300 мм; симетричні пари тут утворюються з діагональних жил (рис. 3.13, б);

– скручування подвійною парою (ПП) – дві попередньо звиті симетричні пари скручують між собою в четвірку (рис. 3.13, в). Кроки скручування пар мають бути відмінними як один від одного, так і від кроку скручування самої четвірки. Крок скручування пар береться в межах 400...800 мм, а крок скручування четвірки – в межах 150...300 мм;

– скручування подвійною зіркою (ПЗ) – чотири попередньо звиті пари знову скручують разом способом зірки, утворюючи вісімку (рис. 3.13, г). Кроки скручування пар, що складають вісімку, роблять різними і беруть зазвичай у межах 150...250 мм, а крок скручування вісімки – в межах 200...400 мм. Напрямки скручування пар і скручування вісімки мають бути протилежними;

– скручування вісімкою (В) – вісім жил групи розташовуються концентрично навколо осердя з ізольованого матеріалу, наприклад стирофлексного (поліетиленового) корделя (рис. 3.13, д). З восьми жил

можуть бути утворені дві четвірки: перша – з жил з непарними номерами, а друга – з жил з парними номерами. Всього може бути отримано чотири основні пари і дві фантомні з однаковими параметрами передавання.

Для зменшення впливу кіл одне на одного систематично змінюють (в сполучних муфтах) взаємне розташування жил по довжині.

Найбільш економічним, що забезпечує кращу стабільність електричних параметрів, є зоряне скручування, яке найчастіше застосовують при виготовленні кабелів, які використовуються в магістральних мережах зв'язку.

Парне скручування є найбільш простим у виготовленні, його застосовують в основному при виробництві кабелів для міських телефонних мереж та структурованих кабельних мереж. Скручування ПП і ПЗ не набули широкого застосування в сучасних конструкціях кабелів зв'язку.

#### **3.6.4. Захисні оболонки кабелю**

Осердя кабелю, що складається зі скручених за певною системою груп, покривають поясною ізоляцією і укладають у герметичну оболонку, яка захищає кабель від вологи і можливих механічних впливів, які можуть виникнути в процесі транспортування, прокладання й експлуатації кабелю. У кабельній промисловості застосовують металеві, пластмасові та металопластмасові кабельні оболонки.

Основні типи конструкцій захисних покривів зображено на рис. 3.14.

До металевих оболонок належать свинцеві, алюмінієві і сталеві. Свинцеві оболонки накладають на кабель методом опресування в гарячому вигляді. Щоб свинцева оболонка мала велику твердість і вібростійкість, її виготовляють з легованого свинцю з присадкою 0,4...0,8 % сурми.

Алюмінієві оболонки випресовують у гарячому вигляді або виготовляють холодним способом зі стрічки із звареним поздовжнім швом. Відомі методи зварювання оболонки з алюмінієвих стрічок високочастотними струмами або способом холодного зварювання тиском. При виготовленні кабелю великого діаметра (понад 20...30 мм) застосовують алюмінієві оболонки гофрованої конструкції.

Використання алюмінієвих оболонок є прогресивним, оскільки вони легкі, дешеві і мають високі екранувальні властивості. Однак алюміній схильний до електрохімічної корозії, тому його надійно захищають поліетиленовим шлангом з попередньо накладеним шаром бітуму.

Сталеві оболонки виготовляють шляхом зварювання стрічок товщиною 0,3...0,5 мм, згорнутих у трубку. Для підвищення гнучкості сталеві оболонки піддають гофруванню, а з метою захисту від корозії покривають поліетиленовим шлангом з попередньо накладеним шаром бітуму. Вартість сталеві оболонки становить 50 % вартості свинцевої

оболонки і 64 % алюмінієвої. Такі оболонки не потребують додаткового механічного захисту.





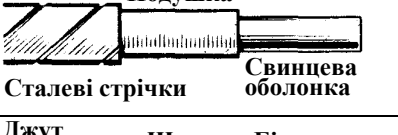
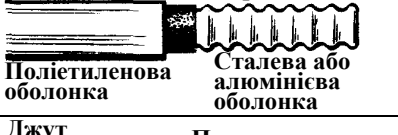




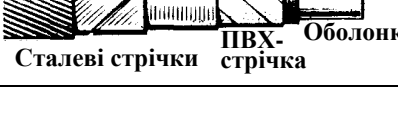

Тип	Конструкція	Тип	Конструкція
Г	 Свинцева оболонка	БпГ	 Сталеві стрічки Бітум Алюмінієва оболонка Поліетиленовий шланг
Б	 Джгут Подушка Свинцева оболонка Сталеві стрічки	БпШп	 Поліетиленова оболонка Бітум Алюмінієва оболонка Сталеві стрічки Поліетиленовий шланг
БГ	 Подушка Свинцева оболонка Сталеві стрічки	Шп	 Клейкий шар Поліетиленова оболонка Сталева або алюмінієва оболонка
БВ	 Джгут Шланг Бітум Оболонка Сталеві стрічки ПВХ-стрічка	К	 Джгут Подушка Оболонка Круглі дроти
Бп	 Джгут Поліетиленовий шланг Бітум Алюмінієва оболонка Сталеві стрічки ПВХ-стрічка	Кл	 Джгут Подушка Бітум Оболонка Круглі дроти ПВХ-стрічка
Бл	 Джгут Подушка Бітум Оболонка Сталеві стрічки ПВХ-стрічка	КпШп	 Круглі дроти Поліетиленовий шланг Бітум Алюмінієва оболонка Поліетиленовий шланг

Рис. 3.14

Як матеріал пластмасових оболонок найбільш широко використовують поліетилен, полівінілхлорид і поліізобутиленові композити. Пластмасові оболонки вигідно поєднують вологостійкість, стійкість проти електричної та хімічної корозії і надають кабелю легкість, гнучкість і вібростійкість. Однак через пластмасу поступово дифундують водні пари, що призводить до падіння опору ізоляції кабелю. Тому пластмасові оболонки застосовують, головним чином, у кабелях з негігроскопічною ізоляцією типу поліетилену, фторопласту, полівінілхлориду та ін.

Існує ціла серія комбінованих металопластмасових оболонок, що складаються з алюмінію, сталі, свинцю і поліетилену: алпет, сталпет, свіпет.

Слід зазначити, що найбільш перспективними є алюмінієві і сталеві оболонки, які надійно захищені поліетиленовим шлангом.

### 3.6.5. Приклади конструкцій симетричних кабелів

Симетричні кабелі широко використовуються на лініях магістрального, зонового, міського й сільського зв'язку.

Для *магістрального зв'язку* застосовуються 4х4 і 7х4 конструкції кабелів, а для *зонового* – конструкція 1х4. В усіх конструкціях використовуються мідні провідники діаметром 1,2 мм, ізоляція може бути стирофлексною (тип МКС), паперовою (тип МК) і поліетиленовою (тип МКП).

Основним типом симетричного кабелю є кабель конструкції 4х4 з кордельно-полістироловою (стирофлексною) ізоляцією МКС-4х4. Залежно від типу оболонки кабель маркують МКС (свинцева), МКСА (алюмінієва) або МКСС (сталева). У всіх випадках конструкція осердя кабелю ідентична. Будівельна довжина кабелю становить 825 м.

Конструкцію кабелю показано на рис. 3.15, де 1 – поліетиленовий шланг; 2 – полівінілхлоридна стрічка; 3 – бітумна суміш; 4 – круглі проволоки; 5 – пряжа; 6 – дві сталеві стрічки; 7 – подушка; 8 – клейкий шар; 9 – алюмінієва оболонка; 10 – поясна ізоляція; 11 – четвірка; 12 – стрічка; 13 – кордель; 14 – жила; 15 – заповнювач.

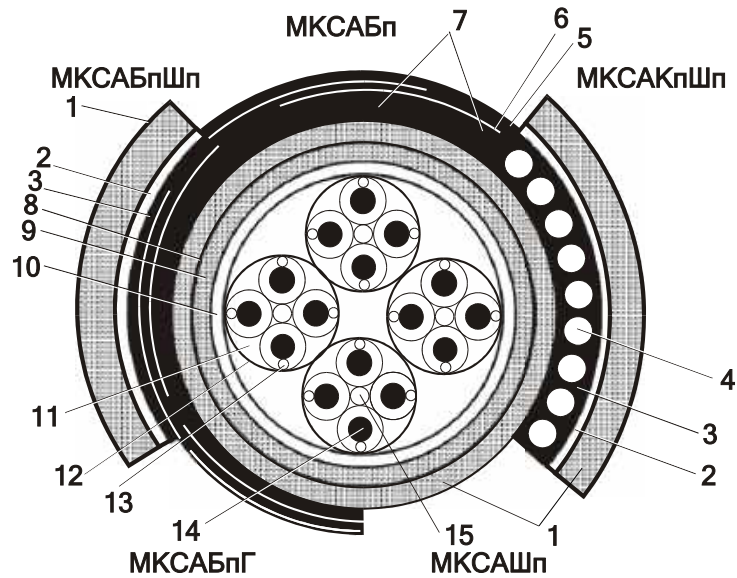


Рис. 3.15

Струмopовідні жили (14) четвірок (11) ізолюють різнобарвними полістирольним корделем (13) і полістирольною стрічкою (12). Перша пара кожної четвірки складається з жил червоного й жовтого кольорів, друга – з жил синього й зеленого кольорів. Центр четвірки заповнюють стирофлексним корделем (15).

Сформоване з четвірок осердя кабелю покривають поясною ізоляцією (10) і поміщають у алюмінієву оболонку (9), що захищає його від вологи й механічних впливів.

Поверх алюмінієвої оболонки наносять антикорозійне захисне покриття у вигляді бітуму (3) і поліетиленового шланга (1). Залежно від умов прокладання кабелю зверху шланга може бути використано додаткове покриття таких типів:

– Шп – поліетиленовий шланг (1) з клейким шаром (8), який застосовується при прокладанні кабелю в каналізаціях, колекторах,



тунелях, а також у районах з малим зовнішнім електромагнітним впливом;

– БпГ – броня з двох сталевих стрічок (6) з поліетиленовим шлангом (1) без зовнішнього покриття; кабелі з таким покриттям застосовуються при прокладанні в каналізаціях і ґрунтах усіх категорій;

– БпШп – броня з двох сталевих стрічок (6) із зовнішнім поліетиленовим шлангом (1), яка застосовується для кабелів, що прокладаються в агресивних ґрунтах у районах з підвищеною грозовою діяльністю;

– Бп – броня з двох сталевих стрічок (6) з поліетиленовим шлангом (1) і зовнішнім покриттям з кабельної пряжі (5), яка застосовується для кабелів, що прокладаються у ґрунтах усіх категорій;

– КпШп – броня з круглих дротів (4) із зовнішнім поліетиленовим шлангом (1), яка застосовується для кабелів, що призначені для прокладання в річках і районах вічної мерзлоти при великих розтяжних зусиллях.

Для кабелів МКС є нормованими такі електричні характеристики:

– опір кола постійному струму – 31,7 Ом/км;

– опір ізоляції – не менше 10 000 МОм·км;

– ємність –  $24,5 \pm 1,0$  нФ/км;

– перехідне загасання на ближньому кінці лінії – не менше 61,7 дБ;

– перехідне загасання на дальньому кінці лінії – не менше 73,8 дБ;

– електрична міцність ізоляції між жилами – 1500 В.

Для мереж *міського зв'язку* використовуються кабелі двох призначень:

– *абонентські*, які забезпечують зв'язок між АТС і абонентами, для чого застосовуються багатопарні телефонні кабелі до 2400x2;

– *з'єднувальні*, які забезпечують зв'язок між АТС і з міжміською станцією (МТС), для чого окрім телефонних також застосовуються симетричні або коаксіальні кабелі міжміського типу.

Абонентські телефонні кабелі поділяються на два типи:

– з *паперовою ізоляцією* (трубчатою або пористою) в металевій захисній оболонці (свинцевій, алюмінієвій або сталевій) без броні (ТГ) або з різними броньованими покриттями: сталевими стрічками (ТБ) або круглими дротами (ТК);

– з *пластмасовою ізоляцією* з суцільного поліетилену в поліетиленовій (ТПП), полівінілхлоридній (ТПВ) або сталевій (ТПС) оболонці.

В обох випадках жили кабелів виготовляються з міді.

Скручені в групи ізольовані жили систематизують за певним законом і об'єднують у загальне кабельне осердя.

Залежно від характеру формування осердя розрізняють дві системи скручування: повивну і пучкову. При пучковому скручуванні групи спочатку скручують у пучки, що містять по кілька десятків груп (найбільш поширені пучки з 50 або 100 груп), після чого пучки скручують разом і отримують осердя кабелю (рис. 3.16, а).

Основним методом загального скручування в сучасних кабелях телекомунікації є повивне скручування (рис. 3.16, б). Пучкове скручування застосовують лише при виготовленні низькочастотних кабелів, які використовуються в міських мережах зв'язку. Групи укладають послідовними концентричними шарами (повивами) навколо центрального повиву, що складається з однієї-п'яти груп. Суміжні (поруч розташовані) повиви скручують у протилежні боки з метою зменшення взаємного впливу між групами суміжних повивів і додання кабельному осерддю більшої механічної стійкості. Таке розташування повивів полегшує також відділення їх один від одного при монтажі кабелю.

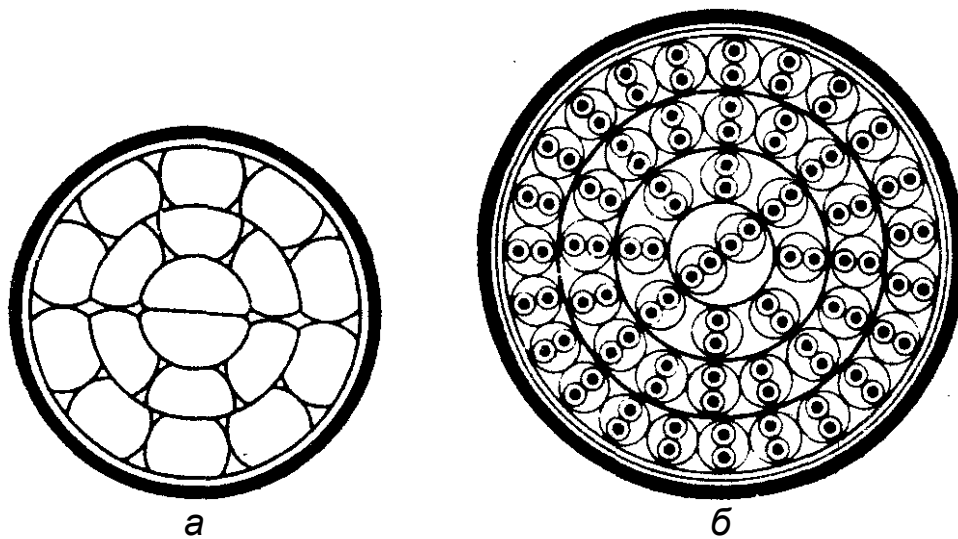


Рис. 3.16

Кабелі сільського зв'язку поділяються на такі:

1. *Міжстанційні* – зазвичай застосовуються високочастотні одно- і двочетвірочні кабелі типів КСПП-1х4 і КСПП-2х4 (рис. 3.17), де 1 – мідна жила; 2 – ізоляція; 3 – гідрофобний заповнювач; 4 – поясна ізоляція; 5 – алюмінієвий екран; 6 – сталева стрічкова броня; 7 – поліетиленова оболонка.

Залежно від умов прокладання кабелю може бути використано покриття таких типів:

– Б – броня з двох сталевих стрічок із зовнішнім покриттям, що застосовується при прокладанні кабелю в ґрунті;

– К – броня з круглих дротів, яка використовується при прокладанні кабелю в річках і районах вічної мерзлоти.

Дальність міжстанційного передавання може сягати 100 км.

2. *Абонентські* – зазвичай використовуються звичайні кабелі міського телефонного зв'язку ємністю до 50х2 (в основному 10–20 пар), при цьому довжина абонентських ліній не перевищує 15 км (у середньому 2...3 км). Застосовуються також однопарні кабелі типу ПРППМ-1х2 (рис. 3.18), де 1 – мідна жила; 2 – поліетилен; 3 – поліетиленова оболонка.

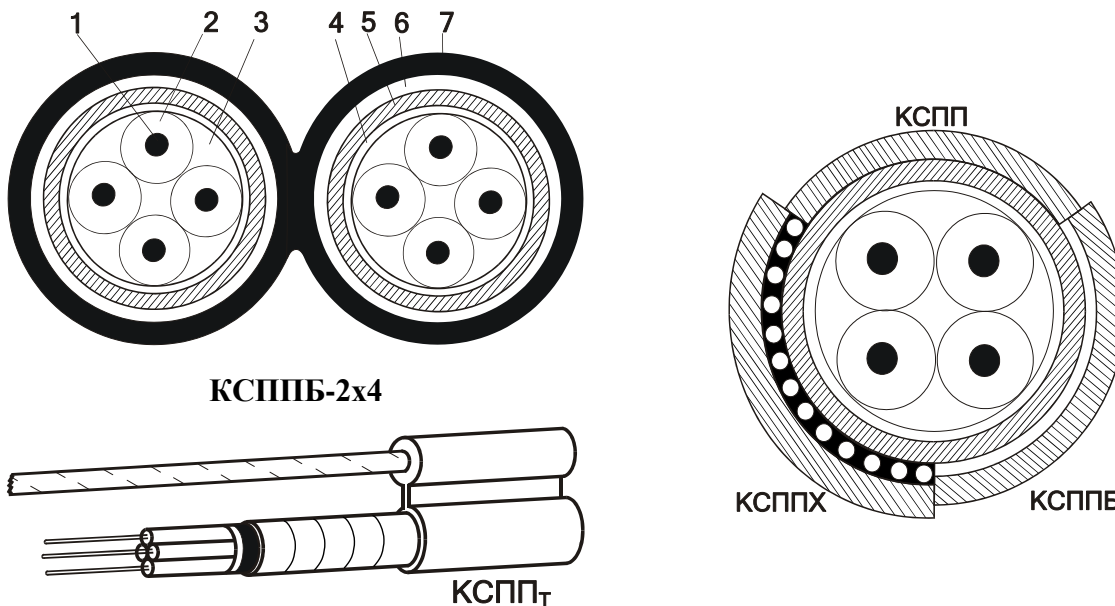


Рис. 3.17

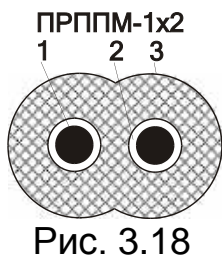


Рис. 3.18

Перевагами симетричних кабелів є технологічність конструкції й висока надійність зв'язку. Однак ці кабелі через відкрите поле мають порівняно низьку завадозахищеність, потребують виконання складних робіт з балансування й можуть застосовуватися лише для передавання сигналів в обмеженому діапазоні частот.

## 4. КОАКСІАЛЬНІ КАБЕЛІ

### 4.1. Електричні процеси в коаксіальних колах

Здатність коаксіальної пари пропускати широкий спектр частот конструктивно забезпечується коаксіальним розташуванням внутрішнього й зовнішнього провідників. Взаємодія електромагнітних полів провідників коаксіальної пари така, що зовнішнє поле дорівнює нулю.

У металевій товщі провідника  $a$  магнітне поле  $H_{\varphi}^a$  збільшується, а поза ним зменшується за законом  $H_{\varphi}^a = I/2\pi r$ , де  $r$  – відстань від центра провідника (рис. 4.1). Поле  $H_{\varphi}^b$  провідника  $b$  усередині порожнього циліндра відсутнє, а поза ним виражається таким самим рівнянням:  $H_{\varphi}^b = -I/2\pi r$ , де  $r$  – відстань від порожнього провідника.

Ураховуючи, що струми в провідниках  $a$  і  $b$  однакові за величиною й протилежні за знаком, магнітні поля внутрішнього й зовнішнього провідників  $H_{\varphi}^a$  і  $H_{\varphi}^b$  у будь-якій точці простору поза коаксіальною парою також будуть однаковими за величиною й спрямовані в різні боки. Отже, результівне магнітне поле поза коаксіальною парою буде дорівнювати нулю.

Таким чином, силові лінії магнітного поля розташовані всередині коаксіальної пари у вигляді концентричних кіл, а поза коаксіальною парою магнітне поле відсутнє. Електричне поле всередині коаксіальної пари також замикається по радіальних напрямках між провідниками, а поза її межами дорівнює нулю (рис. 4.2).

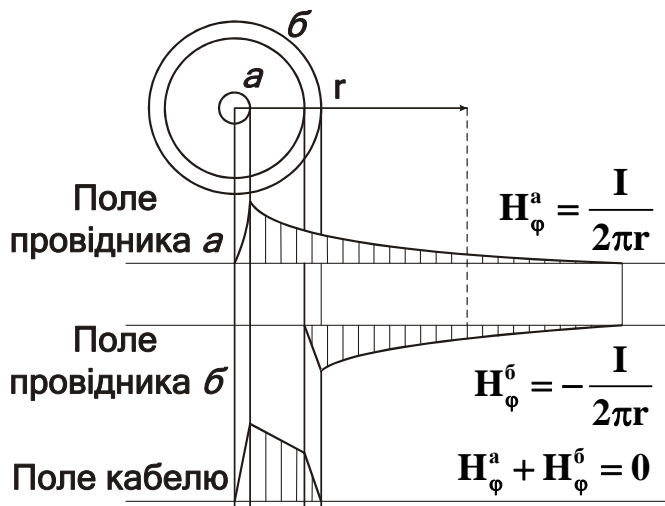


Рис. 4.1

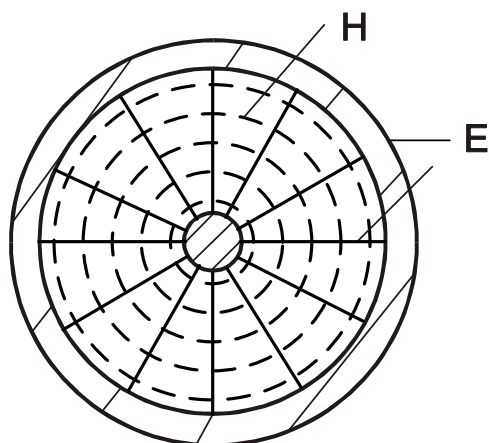


Рис. 4.2

Відсутність зовнішнього електромагнітного поля обумовлює такі основні переваги коаксіальних кабелів: широкий діапазон частот, велика кількість інформаційних каналів, захищеність від завад, можливість організації однокабельного зв'язку.

Поверхневий ефект у внутрішньому провіднику повністю аналогічний ефекту в провіднику симетричної лінії, а у зовнішньому провіднику щільність струму збільшується у напрямку до його внутрішньої поверхні. Це пояснюється тим, що на струм зовнішнього провідника впливає поле внутрішнього провідника. Якби цього провідника не було, то змінний струм, проходячи зовнішнім провідником, унаслідок поверхневого ефекту витіснявся б на зовнішню поверхню.

Вплив внутрішнього провідника *a* полягає у тому, що змінне магнітне поле, що створюється струмом, який протікає у ньому, наводить у металевій товщі порожнього провідника *b* вихрові струми  $I_{в.с}$ . На внутрішній поверхні провідника *b* вихрові струми збігаються за напрямком з основним струмом ( $I + I_{в.с}$ ), а на зовнішній – прямують проти нього ( $I - I_{в.с}$ ) (рис. 4.3).

Унаслідок цього струм у провіднику перерозподіляється таким чином, що його щільність збільшується у напрямку до внутрішньої поверхні. Отже, струми в провідниках *a* і *b* ніби зміщаються й концентруються на взаємно обернених поверхнях провідників (рис. 4.4).

Чим вища частота, тим сильніший ефект зміщення струму на зовнішню поверхню провідника *a* і внутрішню поверхню провідника *b*. Унаслідок цього енергія зосереджується всередині коаксіального кабелю в

діелектрику, а провідники лише задають напрямок поширення електромагнітної хвилі.

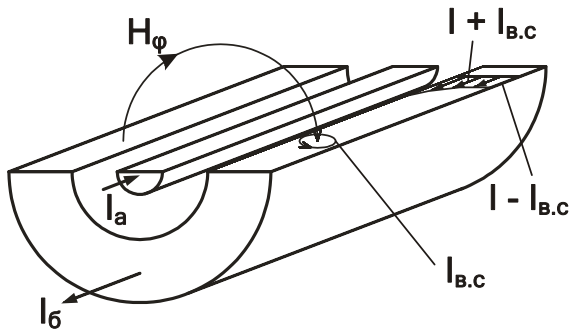


Рис. 4.3

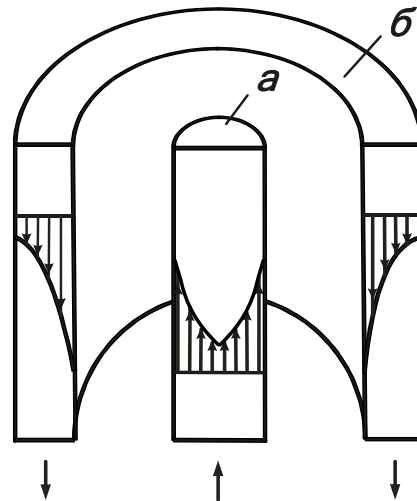


Рис. 4.4

Завadne електромагнітне поле високої частоти, що створюється сусідніми колами передавання або іншими джерелами завад, діючи на зовнішній провідник коаксіальної пари, також буде поширюватися не по всьому перерізу кабелю, а лише по його зовнішній поверхні.

Зовнішній провідник коаксіальної пари виконує дві функції: є зворотним провідником кола передачі й захищає (екранує) передачу, що здійснюється кабелем, від заважальних впливів.

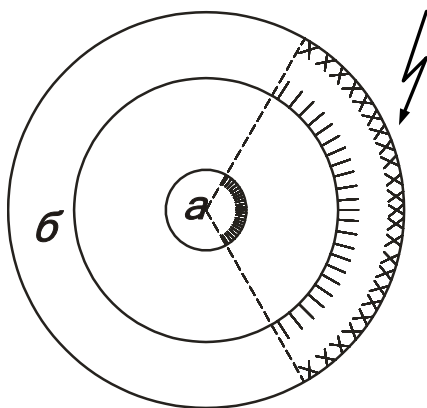


Рис. 4.5

Основний струм передавання концентрується на внутрішній поверхні зовнішнього провідника, а струм завад – на його зовнішній поверхні (рис. 4.5).

Як основний струм, так і струм завад проникають у товщу провідника лише на глибину, що визначається коефіцієнтом вихрових струмів  $k = \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ . Чим вища частота, тим більше віддаляються один від одного зазначені струми й, відповідно, кабель краще захищений від впливу сторонніх завад.

Таким чином, основні переваги коаксіального кабелю особливо яскраво виявляються у високочастотній частині спектра, що передається.

## 4.2. Визначення первинних параметрів коаксіальних ліній

### 4.2.1. Опір та індуктивність

Визначення цих параметрів здійснюється на основі врахування поглиненої провідниками енергії, що спрямована всередину коаксіального кабелю.

Повний опір коаксіальної пари складається з опору внутрішнього  $R_a$  і зовнішнього  $R_b$  провідників.

Під час визначення загальної індуктивності коаксіального кабелю окрім внутрішньої індуктивності провідників  $L_a$  і  $L_b$  необхідно також врахувати зовнішню міжпровідникову індуктивність  $L_{зов}$ .

Для високих частот (60...100 кГц і вище), які мають велике практичне значення при застосуванні коаксіального кабелю, розрахунок опору  $R$ , Ом/км, та індуктивності  $L$ , Гн/км, можна здійснювати за такими спрощеними формулами:

$$R = R_a + R_b = \frac{\sqrt{2}k}{4\pi\sigma} \left( \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right), \quad (4.1)$$

де  $r_a$  – радіус внутрішнього провідника;  $r_b$  – внутрішній радіус зовнішнього провідника;  $k$  – коефіцієнт вихрових струмів;  $\sigma$  – провідність провідників;

$$L = L_a + L_b + L_{зов} = \left[ \frac{\sqrt{2}\mu_a}{4\pi k} \left( \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_b} \right) + 2 \ln \frac{r_b}{r_a} \cdot 10^{-4} \right], \quad (4.2)$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність провідників.

#### 4.2.2. Ємність і провідність ізоляції

Під час визначення ємності  $C$ , Ф/км, коаксіального кабелю враховують, що він аналогічний циліндричному конденсатору і його електричне поле створюється двома циліндричними поверхнями зі спільною віссю:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-6}}{18 \ln(r_b/r_a)}, \quad (4.3)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність ізоляції.

Провідність ізоляції  $G$ , См/км, коаксіального кабелю визначається за тією ж самою формулою, що й провідність ізоляції симетричного кабелю:

$$G = \frac{1}{R_{із}} + \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (4.4)$$

На практиці  $R_{із}$  нормується на рівні  $10^4$  МОм·км, тому у використовуваному діапазоні частот провідність ізоляції можна не враховувати.

#### 4.3. Основні залежності первинних параметрів коаксіальних ліній

Частотні залежності первинних параметрів коаксіальних ліній повністю аналогічні залежностям параметрів симетричних ліній. Зі збільшенням частоти активний опір закономірно збільшується за рахунок поверхневого

ефекту й ефекту близькості, причому найбільшу питому вагу має опір внутрішнього провідника, тобто величина  $R_a$  більша за  $R_b$  у 3–4 рази.

Індуктивність зі збільшенням частоти зменшується. Це зумовлено зменшенням внутрішньої індуктивності провідників  $L_a$  і  $L_b$  через поверхневий ефект. Зовнішня індуктивність зі зміною частоти не змінюється.

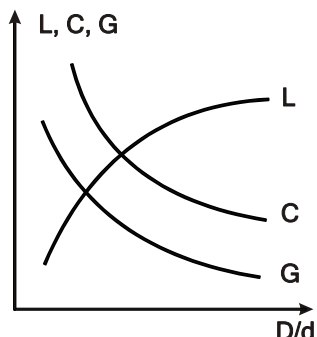


Рис. 4.6

Ємність коаксіального кабелю від частоти не залежить. Провідність зі збільшенням частоти збільшується лінійно, а її величина залежить від якості діелектрика, що використовується в кабелі.

Зміна первинних параметрів зі збільшенням співвідношення радіусів (діаметрів) зовнішнього й внутрішнього провідників коаксіального кабелю має такий вигляд, як показано на рис. 4.6.

Зі збільшенням  $D/d$  ( $r_b/r_a$ ) індуктивність кабелю збільшується, а його ємність і провідність ізоляції зменшуються. Активний опір  $R$  не залежить від співвідношення  $D/d$ , а визначається абсолютними значеннями радіусів зовнішнього й внутрішнього провідників. Чим товстіше провідники, тим менші їх активні опори.

#### 4.4. Визначення вторинних параметрів коаксіальних ліній

Оскільки коаксіальні кабелі практично використовуються в спектрі частот від 60 кГц і вище, де  $R \ll \omega L$  і  $G \ll \omega C$ , вторинні параметри передавання можна визначити за такими формулами:

$$Z_x = \sqrt{L/C}; \quad (4.5)$$

$$\alpha = 8,69 \left( \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \right); \quad (4.6)$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC}; \quad (4.7)$$

$$v = 1/\sqrt{LC}. \quad (4.8)$$

Зазвичай вторинні параметри прийнято виражати безпосередньо через габаритні розміри ( $d$  і  $D$ ) і параметри ізоляції ( $\epsilon$ ,  $\text{tg} \delta$ ). В цьому випадку можна користуватися такими формулами:

– для хвильового опору

$$Z_x = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln \left( \frac{D}{d} \right); \quad (4.9)$$

– для коефіцієнта загасання

$$\alpha = \frac{2,6\sqrt{f\epsilon}}{\ln(D/d)} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \cdot 10^{-3} + 9,08 \cdot f \sqrt{\epsilon} \text{tg} \delta \cdot 10^{-5}; \quad (4.10)$$

– для коефіцієнта фази

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a} = \omega \sqrt{\varepsilon} / c; \quad (4.11)$$

– для швидкості поширення енергії

$$v = \omega / \beta = c / \sqrt{\varepsilon}. \quad (4.12)$$

#### 4.5. Оптимальне співвідношення діаметрів провідників коаксіального кола

Оптимізація параметрів у випадку коаксіальної лінії полягає, в першу чергу, у виборі співвідношення діаметрів зовнішнього й внутрішнього провідників кабелю, при якому будуть мінімальними затрати матеріалів і ресурсів на його виготовлення, а також забезпечуватиметься мінімізація або максимізація одного з передатних параметрів.

Для кабелів зв'язку, за допомогою яких необхідно забезпечити найбільшу дальність зв'язку, основною задачею є задача *мінімізації загасання*.

Під час використання сучасних високоякісних діелектриків коефіцієнт загасання  $\alpha$  коаксіального кабелю може бути визначений як

$$\alpha = \frac{2,6\sqrt{f\varepsilon}}{\ln(D/d)} \left( \frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \cdot 10^{-3} = \frac{2,6\sqrt{f\varepsilon}}{\ln(D/d)} \frac{1}{D} \left( \frac{D}{d} + 1 \right) \cdot 10^{-3}. \quad (4.13)$$

Як впливає з виразу (4.13), зі збільшенням  $D/d$  чисельник збільшується лінійно, а знаменник – пропорційно логарифму співвідношення  $D/d$ , що свідчить про наявність у залежності  $\alpha(D/d)$  оптимуму (рис. 4.7). За допомогою диференціального аналізу при  $D = \text{const}$  маємо, що  $\alpha$  мінімальне при співвідношенні

$$D/d = 3,6. \quad (4.14)$$

Співвідношення (4.14) справедливе для кабелів з однаковими (мідними) провідниками (див. рис. 4.7, крива 3). Якщо ж провідники виготовлені з різних металів (внутрішній – з міді, а зовнішній – зі свинцю (крива 1) або алюмінію (крива 2)), то мінімальне загасання визначається за формулою

$$\ln(D/d) = 1 + d/D \sqrt{\sigma_d / \sigma_D}, \quad (4.15)$$

де  $\sigma_d$  і  $\sigma_D$  – провідності металів внутрішнього й зовнішнього провідників відповідно.

Під час конструювання коаксіального кабелю, якщо величина його хвилевого опору суворо нормована, доводиться відступати від оптимального співвідношення  $D/d$ . При цьому намагаються вибирати відхилення співвідношення  $D/d$  лише у дещо більший бік, оскільки

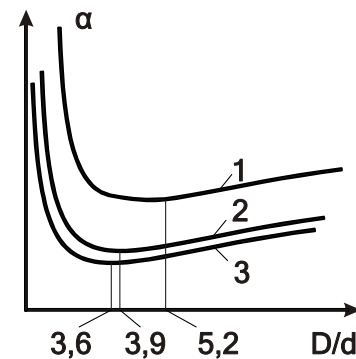


Рис. 4.7



відхилення у менший бік пов'язано з доволі різким збільшенням коефіцієнта загасання (див. рис. 4.7).

Для забезпечення заданого хвильового опору  $Z_x$  співвідношення  $D/d$  визначається як

$$D/d = \exp\left(Z_x \sqrt{\varepsilon} / 60\right). \quad (4.16)$$

Як видно з виразу (4.16), хвильовий опір кабелю значною мірою залежить від величини діелектричної проникності ізоляції  $\varepsilon$ . Наприклад, для забезпечення хвильового опору  $Z_x = 75$  Ом між  $D/d$  і  $\varepsilon$  мають виконуватися певні співвідношення. Деякі з них наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

$\varepsilon$	1,0	1,03	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	2,3
$D/d$	3,5	3,6	3,7	3,9	4,2	4,36	4,5	6,8

Якщо за допомогою кабелю необхідно забезпечити передачу великої потужності або є потреба у кабелі, розрахованому на велику напругу, як це зазвичай буває в коаксіальних радіочастотних кабелях фідерного призначення, то оптимальну конструкцію матимемо при іншому співвідношенні  $D/d$ . Так, для забезпечення максимальної електричної міцності треба дотримуватися співвідношення  $D/d = e = 2,718$ , а для забезпечення максимальної потужності –  $D/d = 1,65$ .

#### 4.6. Конструкція коаксіальних кабелів та їх характеристики

Коаксіальні кабелі завдяки своїй великій пропускній здатності використовуються в основному на лініях магістрального й зоновому зв'язку. Окрім того, вони можуть використовуватися для з'єднувального міського й приміського зв'язку.

Як внутрішній провідник коаксіального кабелю використовуються такі самі струмопровідні жили, як й у симетричному кабелі. Зовнішній провідник коаксіального кабелю, який має форму порожнього циліндра, виготовляють у вигляді тонкої трубки з міді або алюмінію. Найкращі електричні характеристики має коаксіальний кабель із зовнішнім провідником у вигляді однорідної по всій довжині трубки. Однак виготовити досить довгий гнучкий кабель із суцільним циліндричним зовнішнім провідником вкрай важко. Існують різні конструкції гнучких зовнішніх провідників коаксіального кабелю: «блискавка» (рис. 4.8, а), гофрована (рис. 4.8, б), спіральна (рис. 4.8, в) і обплітальна (рис. 4.8, г).

Найбільшого поширення в телекомунікаційних коаксіальних кабелях набула конструкція зовнішнього провідника типу «блискавка» (див. рис. 4.8, а) як більш технологічна й така, що забезпечує необхідну електричну однорідність по довжині.

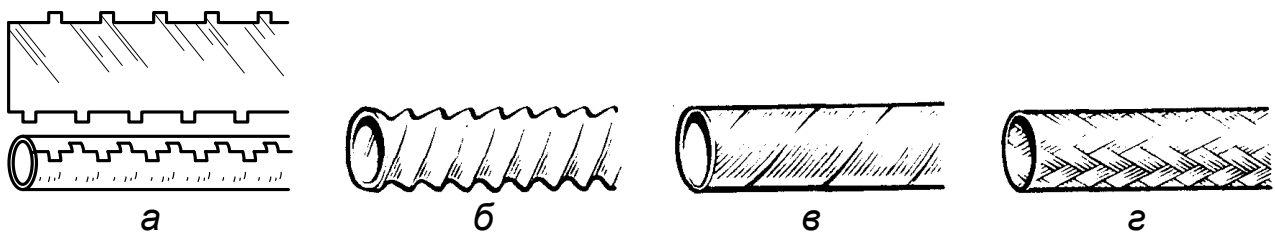


Рис. 4.8

Найбільш вживаними в наш час видами ізоляції жил є:

- для коаксіальних кабелів – шайбова, балонна, спіральна і пориста (у всіх випадках діелектриком є поліетилен);

- для підводних коаксіальних кабелів – суцільна поліетиленова.

Для магістрального зв'язку найчастіше використовуються кабелі:

- середнього (2,6/9,5) типу (КМ-4) – для організації багатоканального зв'язку й телебачення на великі відстані між кінцевими пунктами й великими вузлами зв'язку;

- малогабаритного (1,2/4,6) типу (МКТ-4) – для організації розподільних каналів між проміжними пунктами й міськими вузлами зв'язку, розташованими за трасою магістралі;

- комбіновані, які складаються з чотирьох, шести або восьми коаксіальних пар середнього типу й чотирьох або шести малогабаритних пар, наприклад КМ-8/6 (в чисельнику зазначено кількість коаксіальних пар середнього типу, в знаменнику – кількість малогабаритних пар).

Магістральний коаксіальний кабель 2,6/9,5 типу КМ-4 (рис. 4.9) містить чотири коаксіальні пари і п'ять зіркових четвірок.

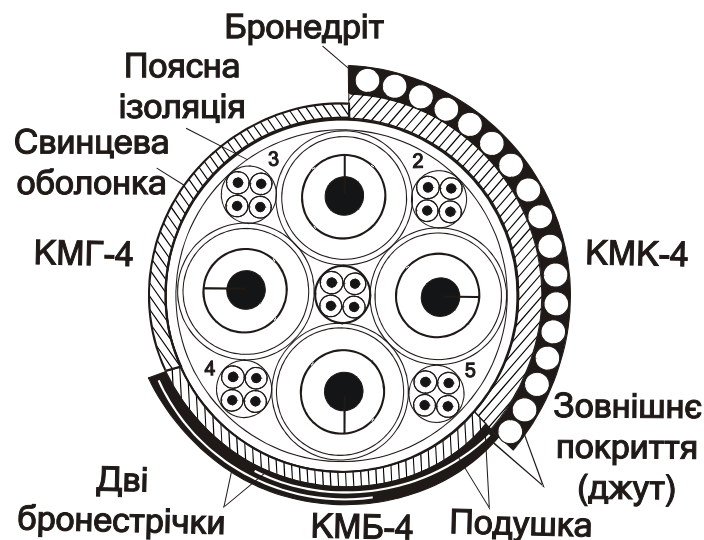


Рис. 4.9

Кожна коаксіальна пара (рис. 4.10) складається з внутрішнього мідного провідника діаметром 2,6 мм (1) і зовнішнього провідника у вигляді мідної трубки діаметром 9,5 мм з одним подовжнім швом (3). Коаксіальна пара має ізоляцію з поліетиленових шайб товщиною 2,2 мм (2) на відстані

25 мм одна від одної. Поверх зовнішнього провідника розташовано додатковий екран у вигляді двох м'яких сталевих стрічок товщиною 0,14...0,2 мм (4), який покривають одним-двома шарами кабельного паперу (5). Кабель має свинцеву оболонку, звичайне броньоване покриття й маркується як КМБ, КМГ, КМК.

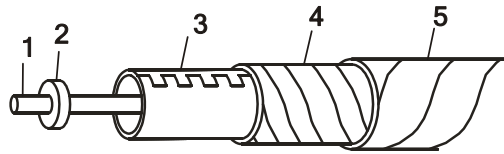


Рис. 4.10

Основні електричні характеристики коаксіальної пари 2,6/9,5:

- номінальний хвильовий опір  $Z_x = 75 \text{ Ом}$ ;
- перехідне загасання  $A_0 = 122 \text{ дБ}$  при частоті 300 кГц;
- коефіцієнт загасання  $\alpha = 2,48 \text{ дБ/км}$  на частоті 1 МГц;
- випробна напруга  $U = 3,7 \text{ кВ}$ .

Коаксіальні кабелі також випускають в алюмінієвій (КМА-4) і комбінованій (свинцева поверх алюмінієвої) оболонках (КМЕ-4). Ці кабелі мають підвищені екранувальні властивості й призначені для прокладання в районах з високою грозовою активністю й на ділянках, близьких до ЛЕП.

Малогабаритний коаксіальний кабель 1,2/4,6 типу МКТ-4 виготовляють у свинцевій (МКТС-4) або алюмінієвій (МКТА-4) оболонці (рис. 4.11).

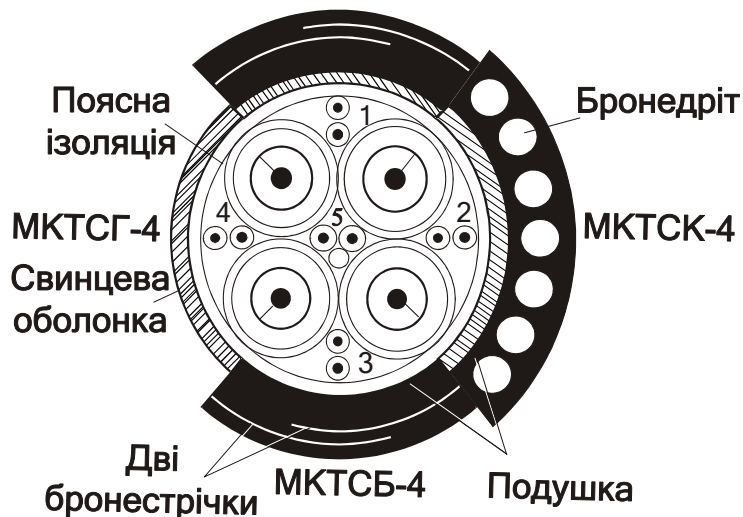


Рис. 4.11

Внутрішній провідник (1) коаксіальної пари (рис. 4.12) кабелю виготовляється з міді діаметром 1,2 мм. Ізоляція (2) повітряно-поліетиленова балонного типу. Зовнішній провідник (3) мідний товщиною 0,1 мм і діаметром 4,6 мм з подовжнім швом. Екран (4) складається з двох сталевих стрічок товщиною по 0,1 мм. Уся конструкція покрита полівінілхлоридною стрічкою (5). Чотири коаксіальні пари скручують разом з п'ятьма сигнальними парами діаметром 0,5 мм і покривають поясною

ізоляцією. Ззовні кабель має свинцеву оболонку й відповідне броньоване покриття.

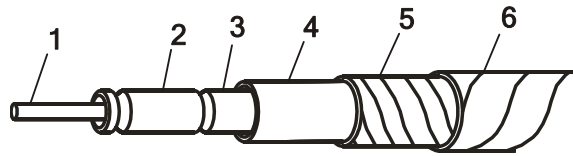


Рис. 4.12

Основні електричні характеристики коаксіальної пари 1,2/4,6:

- номінальний хвильовий опір  $Z_x = 75 \text{ Ом}$ ;
- перехідне загасання  $A_0 = 104 \text{ дБ}$  при частоті 60 кГц;
- коефіцієнт загасання  $\alpha = 5,33 \text{ дБ/км}$  на частоті 1 МГц;
- випробна напруга  $U = 2 \text{ кВ}$ .

Перевагами кабелю є простота конструкції й технологічність виготовлення.

Комбіновані коаксіальні кабелі містять середні пари 2,6/9,5 мм, малогабаритні коаксіальні пари 1,2/4,6 мм і симетричні групи.

Комбіновані кабелі дають можливість:

- організувати потужні пучки телефонних каналів і телевізійну передачу на великі відстані коаксіальними парами 2,6/9,5 мм;
- забезпечити розподільні канали для зв'язку між містами й проміжними пунктами коаксіальними парами 1,2/4,6 мм;
- забезпечити виділення необхідної кількості каналів у будь-якому пункті траси коаксіальними парами 1,2/4,6 мм;
- організувати службовий зв'язок і телесигналізацію симетричними парами й четвірками.

Кабель КМ-8/6 містить (рис. 4.13) вісім коаксіальних пар 2,6/9,5 мм, шість коаксіальних пар 1,2/4,6 мм, одну четвірку, вісім симетричних пар і шість окремих жил.

Усі симетричні пари, четвірки й окремі провідники мають мідні жили діаметром 0,9 мм з трубочасто-поліетиленовою ізоляцією.

Електричні характеристики комбінованих кабелів аналогічні характеристикам кабелю КМБ-4 для пар 2,6/9,5 і кабелю МКТ-4 для пар 1,2/4,6.

Для організації зонового зв'язку на відстані до 600 км призначено однокоаксіальний кабель ВКПАШп-1 (2,1/9,7).

Конструктивно кабель виконується у двох варіантах: підземному (ВКПАШп-1) і підвісному самонесному з умонтованим тросом (ВКПАШпт-1) (рис. 4.14). Довжина підвісного кабелю між опорами становить 50...65 м.

Внутрішній провідник (1) кабелю (див. рис. 4.14) виконано з мідного дроту діаметром 2,1 мм, ізоляцію (2) – з пористого поліетилену зовнішнім діаметром 9,7 мм. Зовнішній провідник (3) являє собою алюмінієву пресовану трубку товщиною 0,8 мм, яка виконує роль екрана. Захисну оболонку (4) виконано зі світлостійкого поліетилену товщиною 2,2 мм.

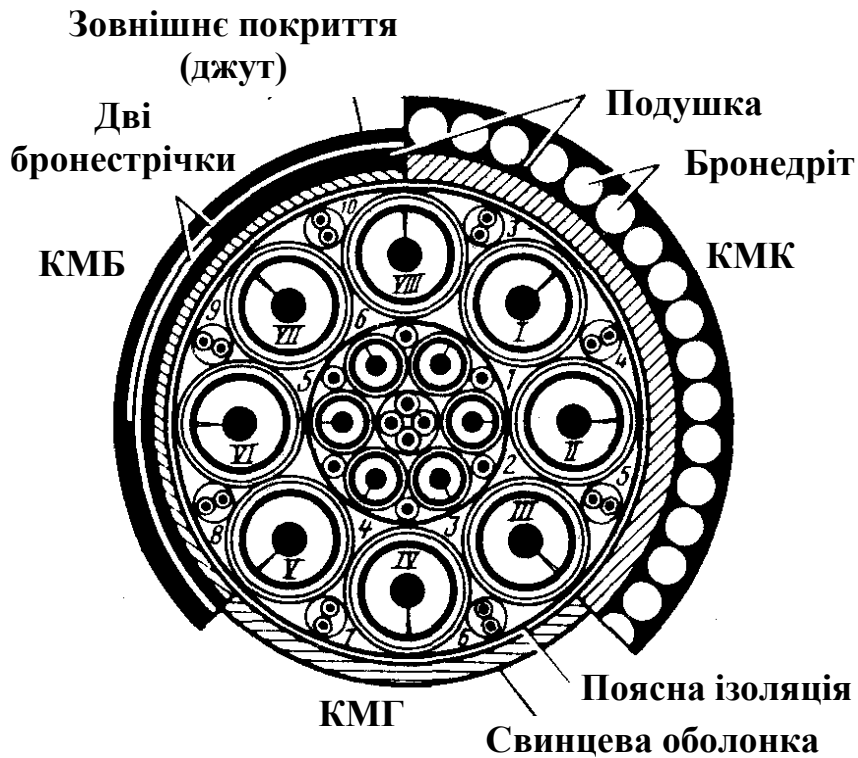


Рис. 4.13

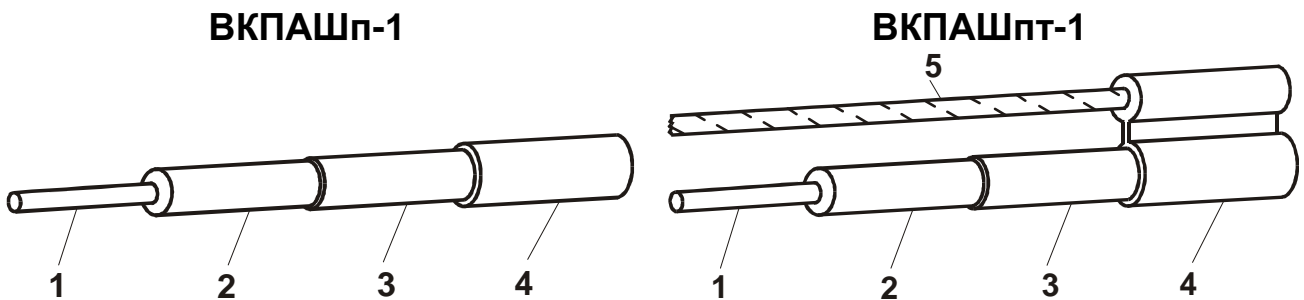


Рис. 4.14

У конструкцію підвісного кабелю в спільну поліетиленову оболонку вмонтовано сталевий трос (5) зі 49 оцинкованих сталевих дротів діаметром 0,34 мм. У поперечному перерізі підвісний кабель має форму вісімки.

## 5. ОПТИЧНІ КАБЕЛІ

Актуальність розвитку волоконно-оптичного зв'язку полягає у тому, що ресурси міді й свинцю вельми обмежені, а кабельна промисловість споживає до 50 % міді й 25 % свинцю від загальних світових ресурсів.

Оптичні кабелі на відміну від електричних з мідними провідниками не потребують дефіцитних матеріалів і виготовляються зі скла й пластмаси.

Основними перевагами оптичних кабелів (ОК) є:

– *широкосмуговість* і здатність передавати великий потік інформації;

- *мале загасання* й незалежність його від частоти у широкому діапазоні;
- *висока завадозахищеність* від зовнішніх електромагнітних впливів;
- *малогабаритність* і *легкість* (маса оптичного кабелю в 10–12 разів менша, ніж маса електричного кабелю при однаковій пропускній здатності);
- *надійна техніка безпеки* (незаймистість, відсутність можливості короткого замикання).

Оптичні лінії передачі можуть бути:

- *відкритими* (атмосферними), які зазнають впливу метеорологічних умов і не забезпечують необхідної надійності зв'язку;
- у вигляді *лінзових світловодів* з періодичною корекцією розбіжності й спрямуванням променя за допомогою системи лінз і дзеркал; вони є досить дорогими, потребують ретельного юстирування й складних пристроїв керування променем;
- у вигляді *волоконних світловодів*, коли можливе створення високонадійних оптичних систем зв'язку на основі оптичних волокон з малими втратами.

Основними областями використання є:

- магістральні й зонові мережі зв'язку;
- міські й сільські мережі зв'язку для створення міжстанційних з'єднань;
- мережі передавання широкосмугової інформації (телебачення, передавання мультимедійних даних, відеотелефонія);
- об'єктові мережі зв'язку (обчислювальні мережі, мережі літальних апаратів, кораблів).

### 5.1. Фізичні процеси у волоконних світловодах

Основною відмінністю оптичних кабелів від електричних є повна відсутність у них струмів провідності  $I_{пр}$ . В оптичному кабелі, як і при радіопередачі, мають місце лише струми зміщення  $I_{зм}$ , однак хвиля поширюється не у вільному просторі, а концентрується в самому об'ємі світловоду й передається ним у заданому напрямку.

Передавання хвилі світловодом здійснюється за рахунок відбиття її від межі поділу осердя й оболонки, які мають різні показники заломлення ( $n_1$  і  $n_2$ ) (рис. 5.1).

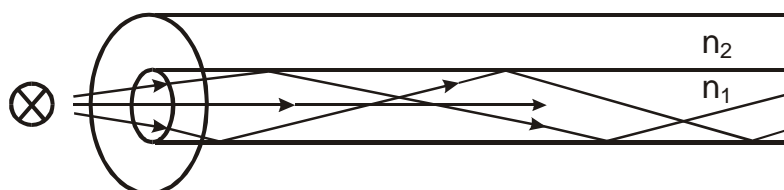


Рис. 5.1

У звичайних кабелях носієм інформації, що передається, є електричний струм, в оптичних кабелях – лазерний промінь. Світло має двоїсту природу: хвильову й квантову.

*Хвильова теорія світла* обґрунтовує, що світло є різновидом електромагнітних коливань дуже високих частот ( $10^{14} \dots 10^{15}$  Гц) і дуже коротких хвиль (мікрони).

Різниця у кольорі пояснюється різницею довжин хвиль. Так, червоному кольору відповідає довжина хвилі  $\lambda = 0,7$  мкм, зеленому – 0,55 мкм, фіолетовому – 0,4 мкм. У межах цього підходу застосовується хвильова теорія електродинаміки й рівняння Максвелла.

За *корпускулярною теорією* світло – це потік швидкорухомих дрібних частинок (корпускул), які випромінюються тілом, що світиться. Корпускули випромінюються окремими порціями (квантами). У межах цього підходу можна користуватися променевою теорією.

Промені світла поширюються за законами геометричної оптики. Таким чином, теорія світла є синтезом його хвильових і квантових властивостей.

Для зв'язку по світловодах використовуються видимі промені (0,4...0,75 мкм) і ближній діапазон інфрачервоних променів (від 0,85...1,3...1,55 до 4...6 мкм).

Порівнюючи хвильову й променеву теорії світловодів, можна зробити висновок, що променеві методи менш громіздкі й дають більш наочне пояснення фізичним процесам, що відбуваються у світловодах.

## 5.2. Променева теорія передавання енергії світловодами

Подемо реальну хвилю у світловоді у вигляді серії плоских хвиль і розглянемо геометрію електромагнітного поля однієї з них. Лінії рівних фаз поля розглядуваної хвилі мають вигляд, зображений на рис. 5.2.

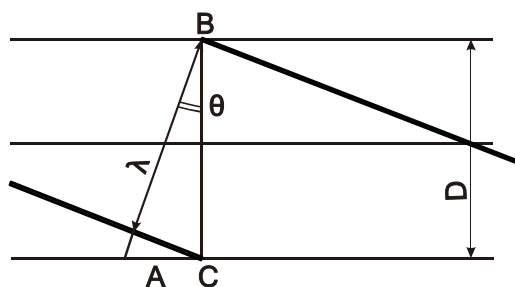


Рис. 5.2

Відстань між цими лініями дорівнює довжині хвилі  $\lambda$ . Хвиля рухається у напрямку А-В перпендикулярно до ліній рівних фаз і утворює з поперечним перерізом світловоду кут  $\theta$ .

Із трикутника АВС можна отримати співвідношення  $\cos \theta = \lambda/D$ , де  $D$  – діаметр світловоду. Зі збільшенням кута  $\theta$  довжина хвилі зменшується, змінюючись від  $\lambda = D$  (при  $\theta = 0^\circ$ ) до  $\lambda = 0$  (при  $\theta = 90^\circ$ ).

Хвилі у світловоді поширюються зигзагоподібно, багаторазово відбиваючись під кутом  $2\theta$  від межі осердя – оболонка. Процес поширення хвилі залежить від частоти (рис. 5.3).

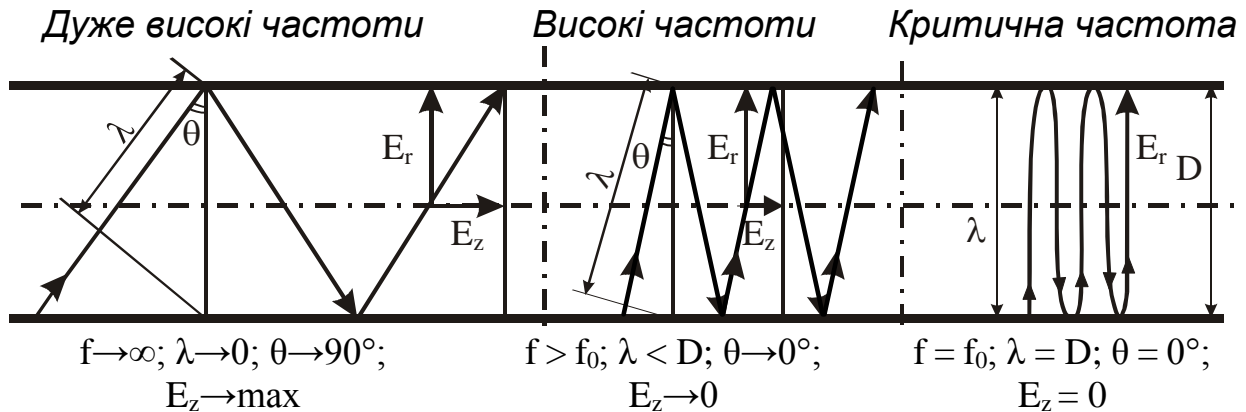


Рис. 5.3

При  $f \rightarrow \infty$  ( $\lambda \rightarrow 0$ ) кут  $\theta \rightarrow 90^\circ$ , хвиля відбивається невелику кількість разів й траєкторія її руху вздовж світловоду наближається до прямолінійної. Подовжня складова поля  $E_z$  (або  $H_z$ ) є максимальною, і передавання енергії відбувається у вигідних умовах.

При  $f > f_0$  ( $\lambda < D$ ) кут  $\theta \rightarrow 0^\circ$ , хвиля відбивається велику кількість разів і її рух уздовж світловоду є повільним. Складова поля  $E_z$  (або  $H_z$ ) є мінімальною, і вздовж світловоду передається незначна частка енергії.

При певній, порівняно низькій, частоті  $f = f_0$  встановлюється режим, коли  $\lambda = D$ , і хвиля, падаючи на межу осердя – оболонка, відбивається перпендикулярно до неї. У світловоді встановлюється режим стійної хвилі, і енергія вздовж нього не передається.

Частота  $f_0$ , при якій встановлюється режим стійної хвилі, має назву *критичної* і являє собою нижню межу частот, які можуть поширюватися по цьому світловоду. Таким чином, світловод діє як фільтр верхніх частот з частотою зрізу, що дорівнює критичній частоті. Критична частота  $f_0$  і відповідна їй *критична довжина хвилі*  $\lambda_0 = c/f_0$  залежать від конструкції світловоду (зокрема його діаметра).

Оскільки межею осердя – оболонка є прозорі стекла, то може відбуватися не тільки відбиття променя, але й його проникнення в оболонку (рис. 5.4).

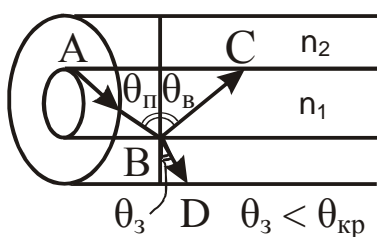


Рис. 5.4

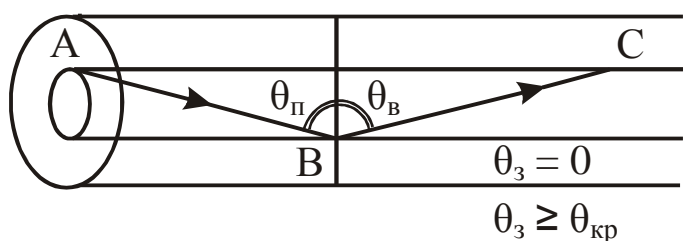


Рис. 5.5



За законами геометричної оптики у загальному вигляді на межі осердя – оболонка будуть спостерігатися падаючий (AB), відбитий (BC) і заломлений (BD) промені (див. рис. 5.4).

Для запобігання переходу енергії в оболонку і її випромінювання необхідно забезпечити виконання умови повного внутрішнього відбиття [4].

Під час переходу з середовища з більшою щільністю в середовище з меншою, тобто при  $n_1 > n_2$  ( $n = \sqrt{\mu\varepsilon}$ ), хвиля при певному куті падіння  $\theta_{\text{п}} \geq \theta_{\text{кр}}$  повністю відбивається і не переходить у інше середовище (рис. 5.5).

Кут падіння  $\theta_{\text{кр}}$ , починаючи з якого вся енергія відбивається від межі поділу середовищ, тобто при  $\theta_{\text{п}} = \theta_{\text{кр}}$ , має назву *кута повного внутрішнього відбиття* і визначається співвідношенням

$$\sin \theta_{\text{кр}} = n_2/n_1 = \sqrt{\varepsilon_2/\varepsilon_1}, \quad (5.1)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність осердя ( $\varepsilon_1$ ) й оболонки ( $\varepsilon_2$ ).

При  $\theta_{\text{п}} = \theta_{\text{кр}}$  енергія, що надійшла в осердя, повністю відбивається й зигзагоподібно поширюється світловодом. Чим більший кут падіння, тобто  $\theta_{\text{п}} > \theta_{\text{кр}}$  у межах від  $\theta_{\text{кр}}$  до  $90^\circ$ , тим умови поширення кращі й енергія швидше досягає приймального кінця. В цьому випадку вся енергія концентрується в осерді світловоду й практично не випромінюється назовні. При куті  $\theta_{\text{п}} < \theta_{\text{кр}}$  енергія проникає в оболонку, випромінюється в зовнішній простір і передавання стає неефективним.

Режим повного внутрішнього відбиття обумовлює умови подання світла на вхідний торець волоконного світловоду – він буде пропускати лише світло, замкнене в межах тілесного кута  $\theta_A$ , який характеризується *апертурою*, тобто кутом між оптичною віссю й однією з твірних світлового конуса, що потрапляє в торець волоконного світловоду (рис. 5.6).

Між кутом повного внутрішнього відбиття  $\theta_{\text{кр}}$  і апертурним кутом  $\theta_A$  існує такий взаємозв'язок: чим більший кут  $\theta_{\text{кр}}$ , тим менша апертура волокна  $\theta_A$ .

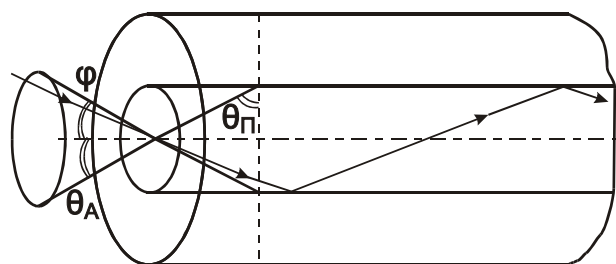


Рис. 5.6

Зазвичай на практиці зручніше користуватися поняттям *числової апертури*, яка визначається за формулою

$$NA = n_0 \sin \theta_A = n_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5.2)$$

де  $n_0$  – показник заломлення повітря  $n_0 = 1$ .

Числова апертура характеризує всі компоненти оптичного каналу: світловоди, джерела й приймачі випромінювання. Для мінімізації втрат енергії апертури з'єднаних елементів мають бути *узгодженими*, тобто слід намагатися зробити так, щоб кут введення променя у світловод  $\varphi$  (або інший оптичний елемент) укладався в апертурний кут ( $\varphi \leq \theta_A$ ), а кут падіння променя на межу осердя – оболонка був більший за кут повного внутрішнього відбиття  $\theta_{кр}$  ( $\theta_{кр} \leq \theta_{п} \leq 90^\circ$ ).

У загальному вигляді у світловодах можуть поширюватися промені двох видів:

– *меридіональні*, розташовані у площині, що проходить крізь вісь світловоду (рис. 5.7, а);

– *косі*, тобто такі, що не перетинають вісь світловоду й проходять за вельми складними траєкторіями (рис. 5.7, б).

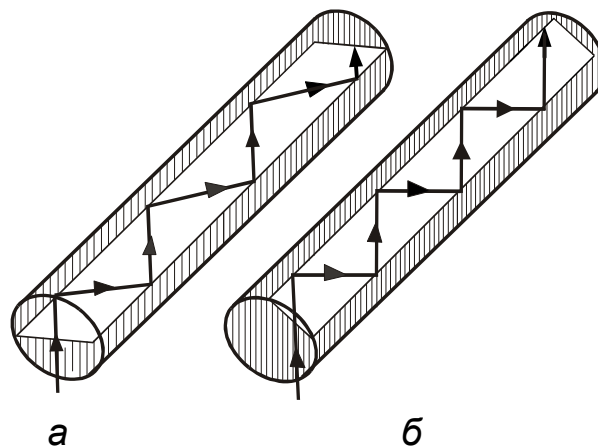


Рис. 5.7

Розглянемо критичні частоти й довжини хвиль волоконних світловодів. Між довжиною хвилі  $\lambda$  і діаметром осердя світловоду  $d$  існує співвідношення  $\cos \theta = \lambda/d$ , де  $\theta$  – кут падіння хвилі на межу поділу осердя – оболонка. Враховуючи, що  $\cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta}$ , і використовуючи умову повного внутрішнього відбиття  $\sin \theta = n_2/n_1$ , маємо  $\cos \theta = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$ . Прирівнявши праві частини виразів косинусів, отримаємо

$$\lambda_0 = d\sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} = d/n_1\sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (5.3)$$

Тоді вираз для критичної частоти буде

$$f_0 = \frac{v_1}{\lambda_0} = v_1 / \left[ d\sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} \right] = c / \left[ d\sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right], \quad (5.4)$$

де  $v_1$  – швидкість поширення хвилі в осерді.

Чим більший діаметр осердя  $d$  і чим більше відрізняються показники заломлення осердя  $n_1$  й оболонки  $n_2$ , тим більша довжина хвилі  $\lambda_0$  і нижча частота  $f_0$ .

При частотах, вищих за критичну  $f_0$ , уся енергія поля концентрується всередині осердя світловоду й ефективно поширюється вздовж нього. Нижче критичної частоти енергія розсіюється в оточуючому просторі й світловодом не передається.

### 5.3. Хвильова теорія передавання енергії світловодами

Хвильова теорія розглядає процес поширення світла як різновиду електромагнітних хвиль. Математичне розв'язання задач здійснюється за допомогою рівнянь Максвелла.

У загальному випадку рівняння мають декілька розв'язків, кожному з яких відповідає певна структура поля, що називається *типом хвилі*, або *модю*.

У світловодах можуть існувати два типи хвиль:

– *симетричні* ( $E_{0m}, H_{0m}$ ), які мають кругову симетрію ( $n = 0$ );

– *несиметричні* (гібридні, дипольні), що позначаються як  $EH_{nm}$ , якщо поле в поперечному перерізі нагадує поле хвилі  $E$ , або як  $HE_{nm}$ , якщо поле в поперечному перерізі ближче до поля хвилі  $H$ ; у світловоді несиметричні хвилі існують лише спільно, їх окреме поширення неможливе.

Променева теорія світла допускає поширення світловодами великої кількості променів – усіх променів, що потрапили в апертурний конус світловоду. За хвильовою теорією, світловодом може поширюватися лише обмежена кількість хвиль з дискретними кутами. Частина проміжних хвиль за рахунок інтерференції гасять одна одну й послабляються. Типи хвиль, що можуть поширюватися світловодом, називаються *модами*.

*Нормована (характеристична) частота* – це узагальнений параметр, який характеризує режим роботи світловоду. Він ураховує радіус осердя  $a$ , довжину хвилі  $\lambda$  і коефіцієнти заломлення осердя  $n_1$  і оболонки  $n_2$ :

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (5.5)$$

З точки зору хвильової теорії критичну частоту й довжину хвилі можна визначити таким чином:

$$f_0 = p_{nm} c / \left( \pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \right); \quad (5.6)$$

$$\lambda_0 = \pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / (p_{nm} n_1), \quad (5.7)$$

де  $p_{nm}$  – корені функції Бесселя  $n$ -го порядку [5],  $p_{nm} = V(\lambda = \lambda_0)$ .

Кожна мода має нормовану частоту  $V_0$ , яка визначає область її існування, а кожній нормованій частоті  $V_0$  відповідає критична частота  $f_0$ .

При  $V < V_0$  маємо  $f < f_0$ , тобто частота менша за критичну й хвиля осердя волокна не поширюється (не існує). Область існування хвилі, що має нормовану частоту відсічки  $V > V_0$ , становить  $f > f_0$ .

Тільки для симетричної хвилі  $HE_{11}$  значення  $V_0 = 0$ , отже, ця хвиля не має критичної частоти й може поширюватися при будь-яких частоті й діаметрі осердя. Усі інші хвилі не поширюються на частотах, нижчих за критичну.

Зі збільшенням частоти з'являються нові типи хвиль:

- при  $V \geq 2,405$  – хвилі  $E_{01}$ ,  $H_{01}$  і  $HE_{21}$ ;
- при  $V \geq 3,832$  – додаткові хвилі  $H_{12}$ ,  $EH_{11}$ ,  $HE_{31}$  і т. ін.

Вибираючи параметри світловоду (товщину осердя, показники заломлення) і частоту таким чином, щоб вищі моди не могли поширюватися ( $0 < V < 2,405$ ), можна отримати одномодовий режим передавання енергії (хвилю  $HE_{11}$ ).

Перевагами одномодових систем є широкий діапазон частот і велика пропускна здатність (зі збільшенням кількості мод смуга частот звужується). Недоліками одномодових систем є менша надійність через малий діаметр осердя волокна й великі втрати на введення випромінювання у світловод. Такі системи в основному застосовуються в міжміських волоконно-оптичних лініях, що забезпечують велику дальність зв'язку й високу пропускну здатність.

Зі збільшенням діаметра осердя кількість мод, що передається, збільшується. Хвильова й променева схеми одно- і багатомодового передавання енергії мають вигляд, показаний на рис. 5.8.

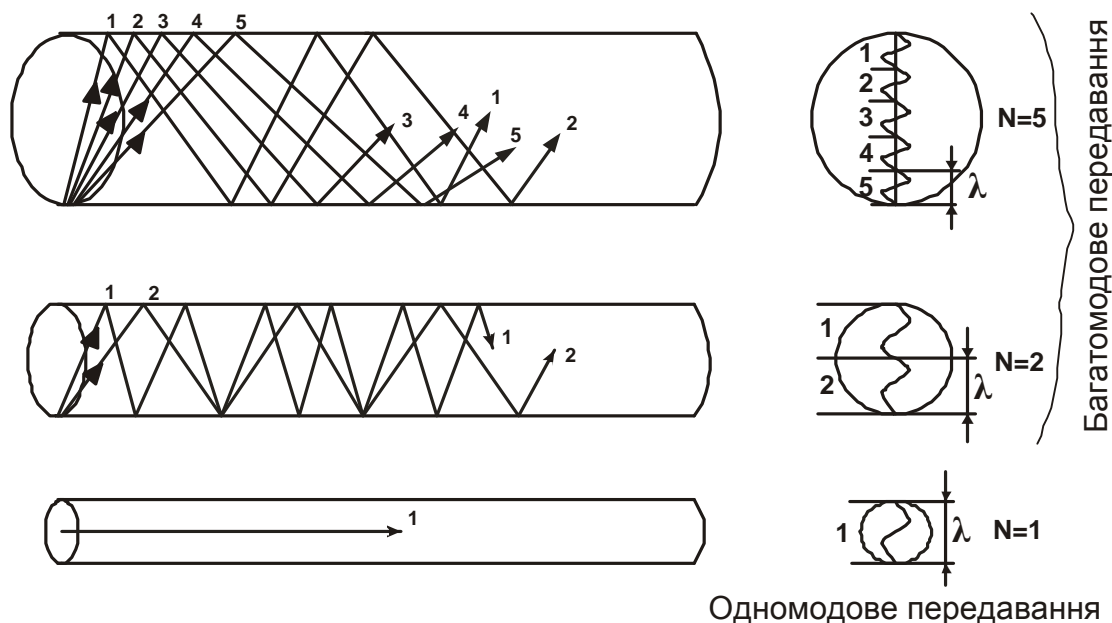


Рис. 5.8

Показник заломлення оболонки світловоду сталий, а показник заломлення осердя у загальному випадку є функцією – профілем показника заломлення. Основні типи профілів зображено на рис. 5.9.

*Профіль одномодового світловоду*

*Профіль багатомодового світловоду*

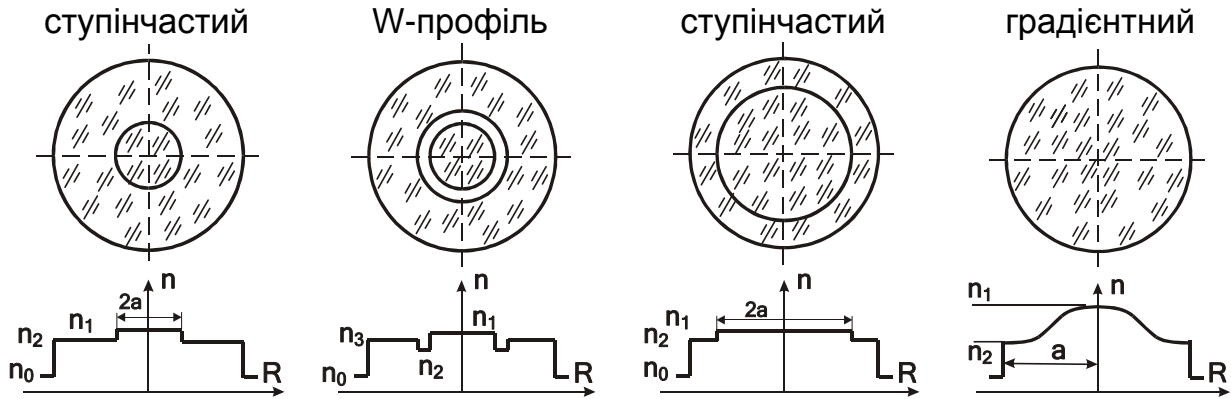


Рис. 5.9

У градієнтному світловоді промені вигинаються у напрямку градієнта показника заломлення замість заломлення або повного відбиття, як у випадку волокна зі ступінчастим профілем (рис. 5.10).

Загальну кількість мод у світловоді зі ступінчастим і градієнтним профілями можна визначати за формулами

$$N_{\text{ст}} = V^2 = (2\pi a/\lambda)^2 \cdot (n_1^2 - n_2^2), \quad (5.8)$$

$$N_{\text{гр}} = V^2/2 = 0,5 \cdot (2\pi a/\lambda)^2 \cdot (n_1^2 - n_2^2). \quad (5.9)$$

Порівнявши вирази (5.8) і (5.9), можна зробити висновок, що кількість мод у градієнтному світловоді у 2 рази менша, ніж у ступінчастому.

*У ступінчастому світловоді*

*У градієнтному світловоді*

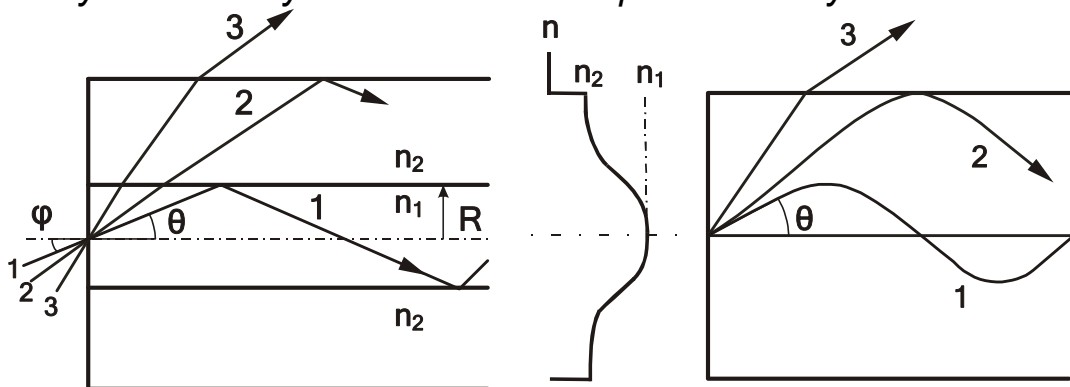


Рис. 5.10

Взагалі неоднорідні у поперечному перерізі світловоди мають велике практичне значення, оскільки у них можна отримати такі характеристики, яких неможливо отримати у однорідних світловодів.

У волоконному світловоді можуть існувати три *типи* хвиль:

– *спрямовані* (хвилі серцевини ХС (див. рис. 5.10, промені 1), які є

основним типом хвиль, що поширюються світловодом; уся енергія зосереджується всередині осердя й забезпечує передавання інформації; вони збуджуються при введенні променів у торець у межах апертури ( $\varphi > \theta_{кр}$ );

– *витічні* (хвилі оболонки ХО (див. рис. 5.10, промені 2), що є паразитним типом хвиль; енергія частково поширюється вздовж світловоду, а частково переходить в оболонку й випромінюється в оточуючий простір; ці хвилі виникають за рахунок косих променів;

– *випромінювані* (просторові хвилі ХП (див. рис. 5.10, промені 3), які також є паразитним типом хвиль; уся енергія вже на початку лінії випромінюється в оточуючий простір і не поширюється вздовж світловоду; вони виникають при введенні випромінювання під кутом поза апертурою ( $\varphi < \theta_{кр}$ ) і також є характерними для нерегулярних світловодів зі згинами й іншими порушеннями однорідності.

Витічні й випромінювані хвилі є паразитними, тобто такими, що відбирають енергію спрямованої хвилі й спотворюють унаслідок інтерференції передавання енергії світловодом. За рахунок цих хвиль виникають перехідні впливи й завади в сусідніх світловодах.

З точки зору хвильової теорії меридіональним променям (які виникають, коли точкове джерело випромінювання розташовано на осі світловоду) відповідають симетричні електричні  $E_{0m}$  і магнітні  $H_{0m}$  хвилі. У свою чергу, косим променям (які виникають, коли точкове джерело розташовано поза віссю волокна або воно має більш складну структуру) відповідають несиметричні гібридні хвилі  $HE_{nm}$  і  $EH_{nm}$ .

Несиметричні хвилі типів  $E_{nm}$  і  $H_{nm}$  у волоконних світловодах існувати не можуть, вони можуть збуджуватися лише в металевих хвилеводах.

Найважливішими параметрами волоконних світловодів є *загасання*, яке характеризує втрати енергії під час передавання її світловодом, і *дисперсія*, що визначає обмеження смуги частот під час передавання енергії світловодом. Обидва фактори обумовлюють довжину регенераційної ділянки, тобто максимальну довжину світловоду, передавання енергії яким можливе без відновлення амплітуди або форми сигналу, що передається.

#### 5.4. Загасання світловодів

Коефіцієнт загасання світловодів оптичних кабелів обумовлений впливом двох основних факторів:

$$\alpha = \alpha_B + \alpha_K, \quad (5.10)$$

де  $\alpha_B$  – власні втрати,  $\alpha_K$  – кабельні втрати.

*Власні втрати* спричинені поглинанням енергії в діелектрику  $\alpha_{\Pi}$ , розсіюванням її на найдрібніших частинках структури світловоду  $\alpha_p$ , а також на сторонніх домішках  $\alpha_d$ . Таким чином,

$$\alpha_B = \alpha_{\Pi} + \alpha_p + \alpha_d. \quad (5.11)$$

*Кабельні втрати* зумовлені скручуванням (втрати на макрозгини  $\alpha_{\text{мак зг}}$ ), а також деформацією й згинами світловодів при накладанні покриттів і захисних оболонок у процесі виготовлення кабелю (втрати на мікрозгини  $\alpha_{\text{мік зг}}$ ). Загальний вираз для розрахунку кабельних втрат має вигляд

$$\alpha_{\text{к}} = \alpha_{\text{мак зг}} + \alpha_{\text{мік зг}}. \quad (5.12)$$

*Загасання поглинання*  $\alpha_{\text{п}}$ , дБ/км, пов'язано з втратами енергії на діелектричну поляризацію. Воно лінійно збільшується зі збільшенням частоти й суттєво залежить від властивостей матеріалу світловоду ( $\text{tg } \delta$ ):

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{\pi n_1}{\lambda} \text{tg } \delta \cdot 8,69 = \frac{\pi f}{v_1} \text{tg } \delta \cdot 8,69. \quad (5.13)$$

*Загасання розсіювання* (втрати на релеївське розсіювання)  $\alpha_{\text{р}}$ , дБ/км, зумовлені неоднорідностями матеріалу волоконного світловоду, розміри яких менші за довжину хвилі, і тепловою флуктуацією показника заломлення:

$$\alpha_{\text{р}} = K_{\text{р}} / \lambda^4, \quad (5.14)$$

де  $K_{\text{р}}$  – коефіцієнт розсіювання (для кварцу  $K_{\text{р}} = 1 \dots 1,5$  (дБ/км)·мкм<sup>4</sup>).

Втрати на релеївське розсіювання визначають нижню межу втрат, які властиві волоконним світловодам. Ця межа є різною для різних довжин хвиль і зі збільшенням довжини хвилі зменшується.

Втрати енергії суттєво збільшуються за рахунок наявності в матеріалі волоконного світловоду *сторонніх домішок* ( $\alpha_{\text{д}}$ ). Окрім того, наявність цих домішок призводить до виникнення резонансних сплесків загасання.

Додаткове загасання за рахунок випромінювання при *макрозгинах*  $\alpha_{\text{мак зг}}$ , дБ, можна визначити за такою формулою:

$$\alpha_{\text{мак зг}} = 10 \lg \left| \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 - \frac{R+1}{R-1} n_2^2} \right|, \quad (5.15)$$

де  $R = R_{\text{зг}}/2a$ ;  $R_{\text{зг}}$  – радіус згину (рис. 5.11);  $a$  – радіус осердя волокна;  $n_1, n_2$  – показники заломлення осердя й оболонки волокна.

Додаткове загасання за рахунок випромінювання при *мікрозгинах*  $\alpha_{\text{мік зг}}$ , дБ, визначається виразом

$$\alpha_{\text{мік зг}} = N \frac{h^2 a^4}{b^6 \Delta^3} \cdot 10^{-3}, \quad (5.16)$$

де  $h$  – радіус мікрозгину (рис. 5.12);  $b$  – діаметр волокна;  $N$  – кількість мікрозгинів;  $\Delta$  – співвідношення коефіцієнтів заломлення, яке визначається як

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (5.17)$$

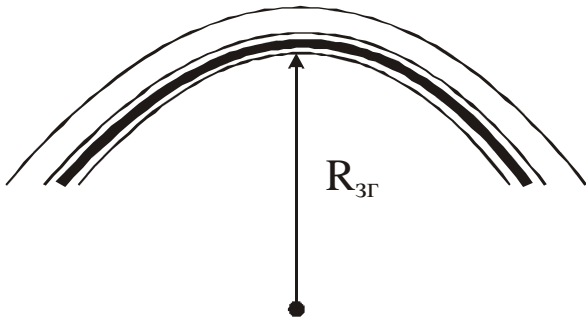


Рис. 5.11

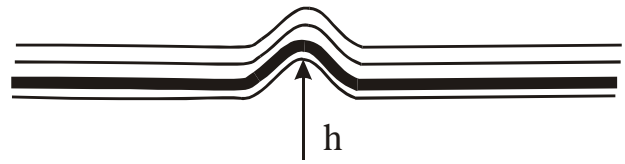


Рис. 5.12

При добре відпрацьованій технології виробництва домінують втрати на мікрозгинах. Наявність оболонки й захисного покриття волокна також призводить до додаткових втрат за рахунок часткового проникнення поля в ці середовища.

На графіку залежності загасання від довжини хвилі для світловоду з очищеного кварцового скла (рис. 5.13) чітко видно три вікна прозорості: 0,85, 1,31 і 1,55 мкм. Зі збільшенням довжини хвилі  $\lambda$  коефіцієнт загасання зменшується.

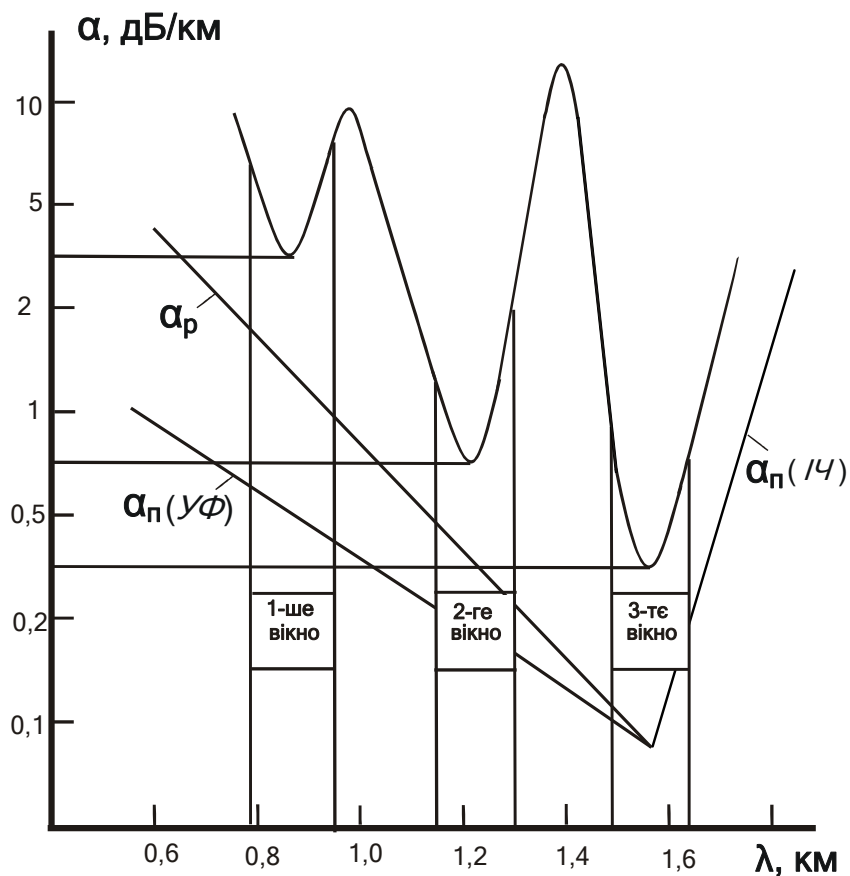


Рис. 5.13



Найбільш доцільним для ліній зв'язку є використання другого й третього вікон прозорості – 1,31 і 1,55 мкм. У цих вікнах можна організувати лінію міжміського зв'язку без використання в оптичному кабелі металевих елементів для дистанційного електроживлення лінійних регенераторів, тому що через 40...80 км (що відповідає типовій довжині регенераційної ділянки для оптичного волокна) можна мати місцеві джерела живлення.

### 5.5. Дисперсія й пропускна здатність світловодів

Пропускна здатність  $\Delta F$  є найважливішим параметром волоконно-оптичних систем передавання, оскільки вона визначає смугу частот, яка пропускається світловодом, і, відповідно, обсяг інформації, що ним передається. Зв'язок між дисперсією  $\tau$ , нс/км, і пропускною здатністю  $\Delta F$ , МГц·км, наближено виражається співвідношенням  $\Delta F = 1/\tau$ .

Дисперсія  $\tau$  – це розсіювання у часі спектральних або модових складових оптичного сигналу, яке призводить до розширення імпульсу на приймальному боці (рис. 5.14). Величина розширення визначається як квадратична різниця між тривалістю імпульсів на виході  $t_{\text{ВИХ}}$  і вході кабелю  $t_{\text{ВХ}}$ :

$$\tau = \sqrt{t_{\text{ВИХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2}, \quad (5.18)$$

де значення  $t_{\text{ВИХ}}$  і  $t_{\text{ВХ}}$  беруться на рівні половини амплітуди імпульсів (див. рис. 5.14).

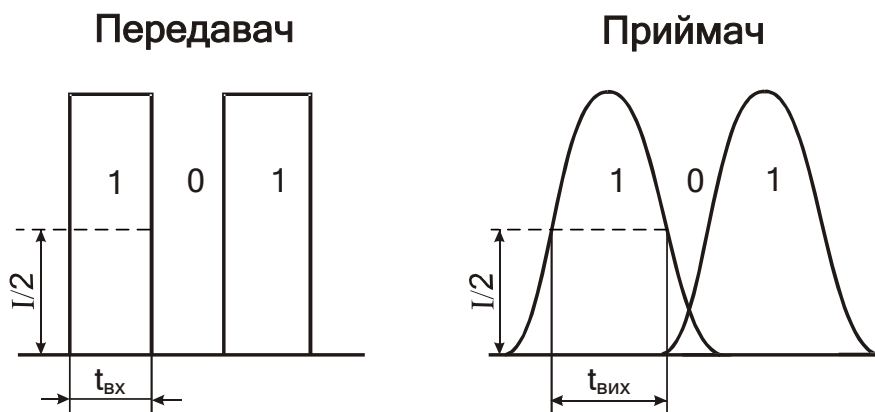


Рис. 5.14

Дисперсія не тільки обмежує пропускну здатність світловодів, але й суттєво знижує дальність передавання, оскільки чим довша лінія, тим більше виявляється дисперсія й більше розширення імпульсу.

Пропускна здатність волоконно-оптичної системи залежить від типу й властивостей світловодів (одно- або багатомодові, градієнтні або ступінчасті тощо) і типу випромінювача (лазер або світлодіод).

Дисперсія у світловоді виникає з двох причин: у зв'язку з існуванням великої кількості мод  $N$  (міжмодова дисперсія) і через некогерентність

джерел випромінювання (хроматична або частотна дисперсія).

Міжмодова дисперсія зумовлена тим, що кожна мода поширюється зі своєю швидкістю  $v = \psi_1(N)$ .

Хроматична дисперсія (рис. 5.15, крива 3) виникає через те, що джерело світла випромінює певний спектр довжин хвиль  $\Delta\lambda$ . Хроматична дисперсія поділяється на *хвилевідну* (внутрішньомодову), яка обумовлена процесами всередині моди, пов'язана з її світловодною структурою і характеризується залежністю коефіцієнта поширення моди від довжини хвилі  $\gamma = \psi_2(\lambda)$  (див. рис. 5.15, крива 1), і *матеріальну*, що обумовлена залежністю показника заломлення від довжини хвилі  $n = \psi_3(\lambda)$  (див. рис. 5.15, крива 2).

Дисперсія виявляється по-різному у різних типах світловодів. У ступінчастих світловодах при багатомодовому передаванні енергії домінує міжмодова дисперсія, яка може сягати великих значень (15...30 нс/км). В одномодових ступінчастих світловодах міжмодова дисперсія відсутня. Тут виявляються хвилевідна й матеріальна дисперсії, але вони майже збігаються за абсолютною величиною і є протилежними за фазою у широкому спектральному діапазоні. Через це відбувається їх взаємна компенсація і результувна дисперсія при  $\lambda = 1,3...1,8$  мкм не перевищує 1 нс/км. У градієнтних світловодах відбувається вирівнювання часу поширення різних мод і визначальною є дисперсія матеріалу, яка зменшується зі збільшенням довжини хвилі. За абсолютною величиною вона коливається у межах 3...5 нс/км.

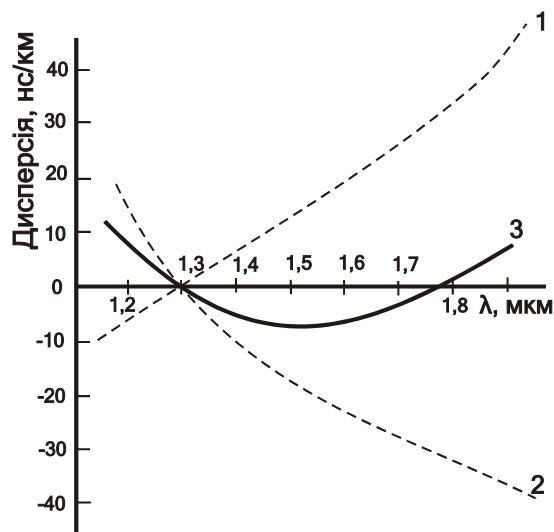


Рис. 5.15

Найменшу дисперсію мають одномодові світловоди. Градієнтні світловоди з плавним профілем також мають хороші дисперсійні характеристики. Найбільш різко дисперсія виявляється у ступінчастих багатомодових світловодах.

Дисперсійні властивості тракту передавання також залежать від джерела випромінювання. Для лазерних джерел завдяки вузькому спектру

випромінювання дисперсія практично не виявляється. Для світлодіодів за рахунок більш широкого спектра випромінювання дисперсія виявляється значно сильніше.

Сумарне розширення імпульсів за рахунок дисперсії розраховується за формулою

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{MM}}^2 + (\tau_{\text{XB}} + \tau_{\text{MT}})^2}, \quad (5.19)$$

де  $\tau_{\text{MM}}$  – розширення за рахунок міжмодової дисперсії;  $\tau_{\text{XB}}$  – розширення за рахунок хвилевідної дисперсії;  $\tau_{\text{MT}}$  – розширення за рахунок матеріальної дисперсії.

Розширення за рахунок міжмодової дисперсії визначається як різниця часу проходження одиничної довжини волокна різними модами:

– для ступінчастого профілю

$$\tau_{\text{MM}} = \Delta n_1 \ell / c = NA^2 \ell / (2n_1 c); \quad (5.20)$$

– для градієнтного профілю

$$\tau_{\text{MM}} = \Delta^2 n_1 \ell / (2c) = NA^4 \ell / (8n_1^3 c), \quad (5.21)$$

де  $\ell$  – довжина світловоду.

Розширення за рахунок хвилевідної дисперсії визначається як різниця часу поширення променя осердяч й оболонкою:

$$\tau_{\text{XB}} = (\Delta\lambda/\lambda)(2n_1^2 \Delta\ell/c), \quad (5.22)$$

де  $\Delta\lambda/\lambda$  – відносна ширина спектра випромінювання;  $\Delta$  – співвідношення коефіцієнтів заломлення.

Розширення за рахунок матеріальної дисперсії визначається як різниця часу проходження волокном випромінювання різних довжин хвиль:

$$\tau_{\text{MT}} = (\Delta\lambda/\lambda)(\lambda^2/c)(d^2 n_1 / d\lambda^2) \ell. \quad (5.23)$$

З урахування реального співвідношення внесків окремих видів дисперсії для багатомодових волокон

$$\tau = \tau_{\text{MM}}, \quad (5.24)$$

а для одномодових

$$\tau = \tau_{\text{XB}} + \tau_{\text{MT}}. \quad (5.25)$$

Пропускна здатність градієнтного світловоду в  $2/\Delta$  рази більша, ніж у ступінчастого при однаковому  $\Delta$ . Враховуючи, що величина  $\Delta$  становить приблизно 1 %, різниця між пропускнуою здатністю цих типів світловодів може сягати двох порядків.

Явище дисперсії призводить як до обмеження пропускнуої здатності оптичних кабелів, так і до зниження дальності передавання по них. Смуга частот  $\Delta F$  і дальність передавання  $\ell$  взаємозв'язані:

– для коротких ліній

$$\Delta F / \Delta F_x = l_x / l,$$

звідки

$$\Delta F_x = \Delta F l / l_x, \quad l_x = \Delta F l / \Delta F_x, \quad (5.26)$$

де значення з індексом  $x$  є шуканими, а без нього – заданими;

– для довгих ліній (приблизно більших за 8 км), в яких процес поширення є усталеним,

$$\Delta F / \Delta F_x = \sqrt{l_x / l},$$

звідки

$$\Delta F_x = \Delta F \sqrt{l / l_x}, \quad l_x = l (\Delta F / \Delta F_x)^2. \quad (5.27)$$

Таким чином, з одного боку, збільшення довжини кабелю призводить до зменшення смуги частот і пропускної здатності системи, а з іншого – розширення смуги частот різко обмежує дальність передавання інформації кабелем.

Пропускна здатність і дальність передавання інформації оптичними кабелями обмежуються не тільки дисперсією, але й загасанням світловодів.

## 5.6. Дальність зв'язку й довжина регенераційної ділянки

Стосовно цифрових оптичних ліній зв'язку, в яких у регенераторах сигнал повністю відтворюється й завади не накопичуються, загальна дальність передавання інформації може бути досить великою, однак при цьому важливо правильно вибрати довжину регенераційної ділянки, яка визначається загасанням і дисперсією.

Загасання  $a$ , дБ, призводить до зменшення потужності імпульсів, що передаються, і може бути розраховано як

$$a = \alpha l_x, \quad (5.28)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт загасання, дБ/км.

Дисперсія  $\tau$  призводить до розширення імпульсів, що передаються, і накладає обмеження на пропускну здатність  $\Delta F$ :

$$\Delta F_x = \Delta F l / l_x \quad \text{або} \quad \Delta F_x = \Delta F \sqrt{l / l_x}, \quad (5.29)$$

де  $\Delta F = 1/\tau$ , ГГц·км;  $\tau$  – дисперсія, нс/км.

Зі збільшенням відстані від початку регенераційної ділянки загасання збільшується, а смуга частот за рахунок збільшення дисперсії, навпаки, зменшується (рис. 5.16).

Довжина регенераційної ділянки вибирається за найменшим значенням  $l_\alpha = \alpha_{\text{доп}}/\alpha$  або  $l_{\Delta F} = (\Delta F/\Delta F_{\text{доп}})^2$  так, щоби не перевищувалися допустимі значення за загасанням світловоду  $\alpha_{\text{доп}}$  і його пропускну здатністю  $\Delta F_{\text{доп}}$ .

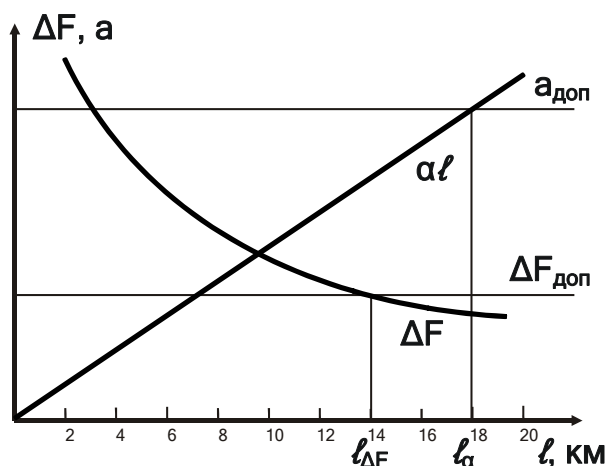


Рис. 5.16

У загальному випадку обмежувальним фактором може бути як дисперсія  $\tau$ , так і загасання  $a$ . Тому довжина регенераційної ділянки залежить від типу використовуваного світловоду. В багатомодових світловодах обмежувальним фактором, у першу чергу, є дисперсія, а в градієнтних і одномодових світловодах – загасання (рис. 5.17).

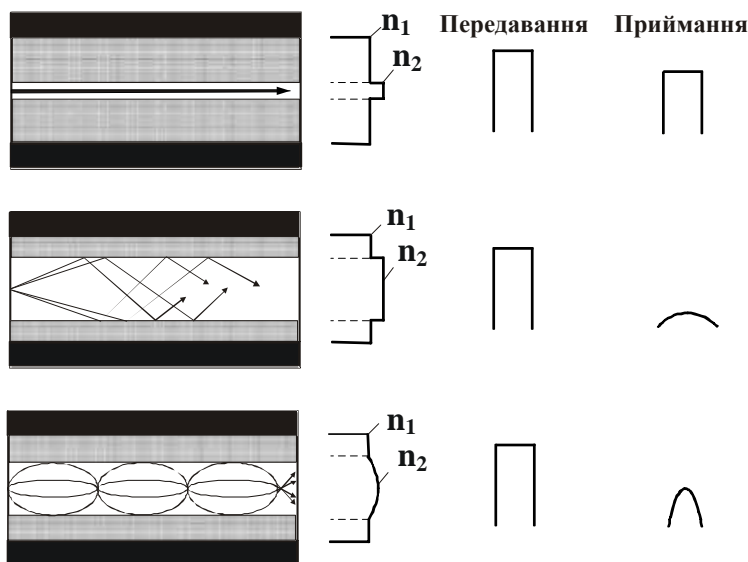


Рис. 5.17

У наявних системах цифрового оптичного зв'язку довжина регенераційної ділянки при  $\lambda = 0,85$  мкм становить 10...20 км, а в системах на довжинах хвиль 1,3 і 1,55 мкм може сягати 100...400 км.

### 5.7. Класифікація типів оптичного волокна

Згідно з рекомендаціями Міжнародної спілки з електрозв'язку в галузі телекомунікацій (МСЕ-Т) існує така класифікація типів оптичного волокна, яка визначається відповідними стандартами.

Стандарт G.650 дає загальні визначення типів волокон, перелік основних характеристик і параметрів одномодових волокон, а також методів вимірювання цих параметрів і контролю за ними.

*Стандарт G.651* поширюється на багатомодове оптичне волокно з діаметром світлопровідної жили 50 мкм і оболонки 125 мкм і на кабелі на його основі. В ньому містяться рекомендації щодо основних параметрів цих волокон, контрольованих характеристик і допустимих норм. На цей час такий тип волокна використовується тільки в коротких, внутрішньооб'єктових системах передавання з робочою довжиною хвилі 0,85 і рідко 1,31 мкм.

*Стандартом G.652* визначається одномодове волокно з незміщеною дисперсією. Його параметри оптимізовані для діапазону довжин хвиль 1,31 мкм, в якому волокно має нульову хроматичну дисперсію й мінімальне загасання. Діаметр світлопровідної жили волокна – 9 мкм, оболонки –  $125 \pm 2$  мкм; профіль показника заломлення має вигляд сходинки.

Волокно G.652 використовується для одно- і багатохвильового передавання інформації (зокрема в діапазоні довжин хвиль 1,55 мкм) зі швидкостями до 10 Гбіт/с на середні відстані (до 50 км).

*Стандарт G.653* поширюється на одномодове волокно зі зміщеною нульовою дисперсією в області 1,55 мкм – DSF (Dispersion Shifted Fiber). Це волокно має нульову дисперсію в області мінімальних втрат, що досягається за рахунок більш складного профілю коефіцієнта заломлення, варіанти якого показано на рис. 5.18, а-г.



Рис. 5.18

Волокно стандарту G.653 використовується в протяжних магістральних широкосмугових лініях і мережах зв'язку, воно забезпечує передавання інформації на декілька сотень кілометрів зі швидкостями до 40 Гбіт/с.

Однак ним можна передавати лише один спектральний канал інформації, оскільки необхідна для багатохвильових систем висока концентрація світлової потужності у волокні G.653 через особливості структури жили призводить до появи нелінійних ефектів, які, у свою чергу, спричиняють перехресні завади у лінії.

*Стандарт G.654* містить опис характеристик одномодового волокна й кабелю, що мають мінімальні втрати на довжині хвилі 1,55 мкм. Це волокно було розроблено для застосування в підводних системах. За рахунок більших, ніж у волокна стандарту G.653, розмірів світлопровідної жили воно дає змогу передавати більш високі рівні оптичної потужності, але водночас воно має більш високу хроматичну дисперсію в діапазоні 1,55 мкм. Волокно типу G.654 не призначено для роботи на якій-небудь іншій довжині хвилі, окрім 1,55 мкм.

*Стандарт G.655* описує волокно зі сплющеною дисперсією, що також має назву волокна зі зміщеною ненульовою дисперсією – NZ-DSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Це досягається за рахунок застосування спеціального профілю показника заломлення (рис. 5.19).

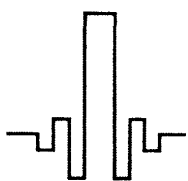


Рис. 5.19

Це волокно призначено для застосування в магістральних волоконно-оптичних лініях і глобальних мережах зв'язку, що використовують DWDM-технології в діапазоні довжин хвиль 1,55 мкм.

Волокно G.655 має слабку контрольовану дисперсію в смузі (1,53...1,56 мкм) і великий діаметр світлопровідної жили порівняно з волокном типу G.653. Це зменшує проблему нелінійних ефектів і дає можливість застосовувати ефективні волоконно-оптичні підсилювачі.

## 5.8. Конструкція оптичних кабелів

Основними елементами оптичного кабелю є такі:

- *оптичні волокна*, звиті за певною системою;
- *силові* (зміцнювальні) *елементи*, які сприймають поздовжні навантаження на розрив, оскільки через малі розміри волокон і дуже мале допустиме відносне подовження скла волокна можуть бути зруйновані навіть при незначному поздовжньому розтягненні;
- *заповнювачі*, що призначені для зберігання стабільності розташування оптичних волокон по перерізу кабелю;
- *армувальні елементи*, які підвищують стійкість кабелю до зовнішніх механічних впливів;
- *зовнішні демпфувальні й захисні оболонки*, які запобігають проникненню вологи й парів шкідливих речовин.

На основі оптичного волокна виготовляють кабелі всіх типів.

Для *магістральних кабелів* необхідні малі рівні загасання й дисперсії для забезпечення великої пропускної здатності й великої довжини регенераційних ділянок, тому для їх виготовлення використовують одномодове волокно (8/125 мкм) на довжині хвилі 1,3...1,55 мкм.

Для виготовлення *зонових кабелів*, у яких вимоги до пропускної здатності й довжини регенераційної ділянки менш суворі, використовують градієнтне багатомодове волокно (50/125 мкм) на довжині хвилі 1,3 мкм.

У *міських кабелях*, де відстані передавання інформації становлять одиниці кілометрів, застосовують градієнтне багатомодове волокно (50/125 мкм) на довжині хвилі 0,85 мкм.

*Підводні кабелі* для забезпечення малих рівнів загасання й великих довжин регенераційних ділянок виготовляють на основі одномодового волокна (8/125 мкм) на довжині хвилі 1,3...1,55 мкм.

В *об'єктових кабелях* застосовується ступінчасте багатомодове волокно (100/200 мкм) на довжині хвилі 0,85 мкм.

Монтажні кабелі, для яких потрібна велика механічна гнучкість, виконують у вигляді джгутів або плоских стрічок з використанням ступінчастого багатомодового волокна (100/200 мкм) на довжині хвилі 0,85 мкм.

### 5.8.1. Методи виготовлення оптичних волокон

Існують дві основні групи методів виготовлення оптичного волокна:

1. Методи осадження з рідкої фази, або тигельні методи, з використанням яких волокна виготовляють зі скла з низькою температурою плавлення (1000...1200 °С). Для волокон, виготовлених такими методами, втрати на загасання становлять 3...4 дБ/км.

2. Методи осадження з газової фази, за допомогою яких волокна виготовляють зі скла з високою температурою плавлення (порядку 1500° С). Для цієї технології втрати на загасання становлять 0,4...0,5 дБ/км.

Спільною вимогою для обох груп методів є суворий контроль за чистотою похідних матеріалів і виключення потрапляння в них сторонніх речовин протягом усього технологічного процесу. Чим більш високий ступінь чистоти матиме сировина, тим нижчими будуть втрати на загасання в отримуваному волокні.

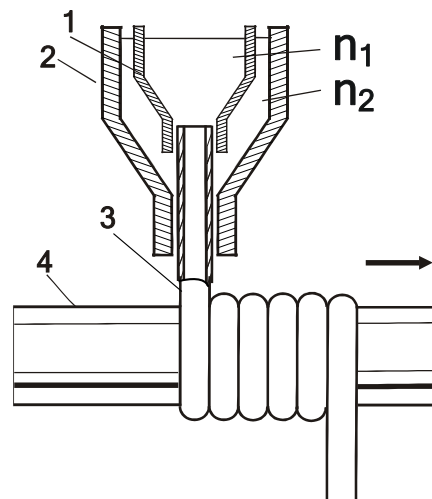
Розглянемо реалізацію технології осадження з рідкої фази на прикладі методу *подвійного тигля*. За цим методом волокно формують шляхом безперервного витягування з розплаву, який міститься в платиновій посудині (тиглі), що підігрівається, через фільтр, розташований у його дні.

Двошарове волокно отримують за допомогою двох тиглів (рис. 5.20), один з яких оточує інший. Внутрішній тигель (1) формує осердя волокна зі скла з показником заломлення  $n_1$ , зовнішній (2) – оболонку зі скла з показником заломлення  $n_2$ . Одержане таким чином двошарове волокно (3) намотується на приймальний барабан (4).

Хімічне осадження з газової фази виконується в два етапи. Спочатку створюється двошарова заготовка, а потім з неї витягується волокно.

Заготовка має вигляд порожнистої кварцової трубки (1) (рис. 5.21) довжиною 0,5...1 м і діаметром 16...18 мм з показником заломлення  $n_2$ , всередину якої подаються хлорований кварц  $\text{SiCl}_4$  і кисень  $\text{O}_2$ .

Унаслідок хімічної реакції при високій температурі (1500...1700 °С), що створюється нагрівальною спіраллю (3), на внутрішній поверхні трубки шарами (2) осаджується чистий кварц  $\text{SiO}_2$  (4).





Так заповнюється вся внутрішня порожнина трубки, окрім самого центра. Для усунення цього повітряного каналу температуру підвищують до 1900 °С, унаслідок чого відбувається сплескування трубочасті заготовки в суцільну циліндричну.

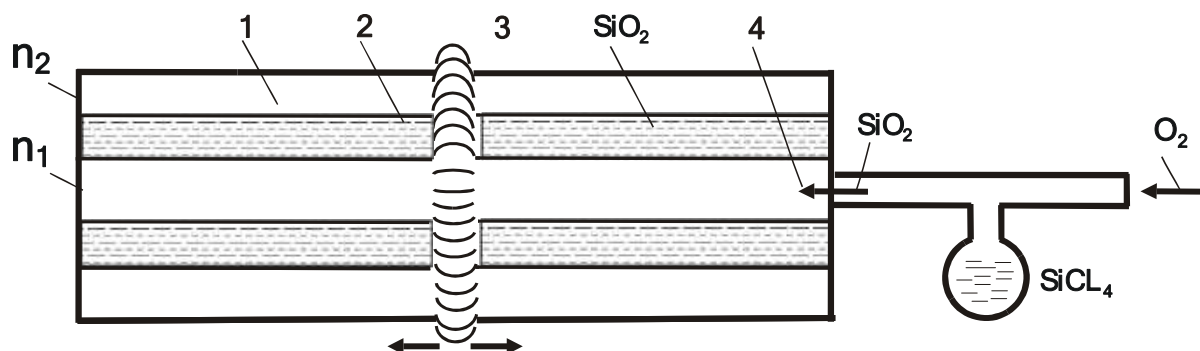


Рис. 5.21

Чистий осаджений кварц стає осердям оптичного волокна з показником заломлення  $n_1$ , а сама трубка виконує роль оболонки з показником заломлення  $n_2$ .

На другому етапі виготовлення волокна в печі (2) (рис. 5.22) відбуваються розм'якшення скла й витяжка волокна (3) із заготовки (1), а потім його намотування на приймальний барабан (4).

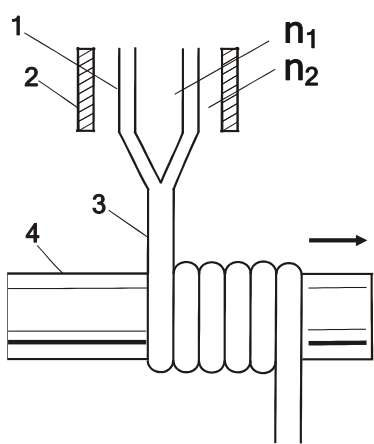


Рис. 5.22

Із заготовки діаметром 20 мм і довжиною 500 мм можна одержати 40...50 км волокна діаметром 100 мкм. Відрізок цього волокна довжиною 1 км, намотаний на циліндр діаметром 30 см з кроком 5 волокон на 1 мм, займає 20 см довжини циліндра і має вагу, яка не перевищує 20 г.

Перевагами тигельного методу є простота технології й безперервність процесу виготовлення волокна. Однак метод осадження з газової фази забезпечує кращу якість осердя волокна й дає змогу отримувати градієнтне волокно за рахунок зміни ступеня легування кварцу.

### 5.8.2. Типові конструкції оптичних кабелів

Серед наявних конструкцій оптичних кабелів можна виділити три типи.

*Кабелі повивного скручування* (рис. 5.23, а), в яких кожен наступний повив осердя порівняно з попереднім має на шість волокон більше. Загальна кількість волокон (1) становить 7, 12 або 19 шт., які вільно розташовані в пластмасових трубках. Скручені волокна покриваються внутрішньою оболонкою (3). Силові елементи (2) в такому кабелі зазвичай розміщуються в зовнішній поліетиленовій оболонці (4).

У кабелі з профільованим осердям (5) (рис. 5.23, б), пази якого розташовуються по гелікоїду (по одному з видів гвинтової поверхні), волокна не зазнають поздовжнього впливу на розрив. Кількість волокон у цих кабелях становить 4, 6, 8 або 10 шт. Силовий елемент розміщується всередині осердя.

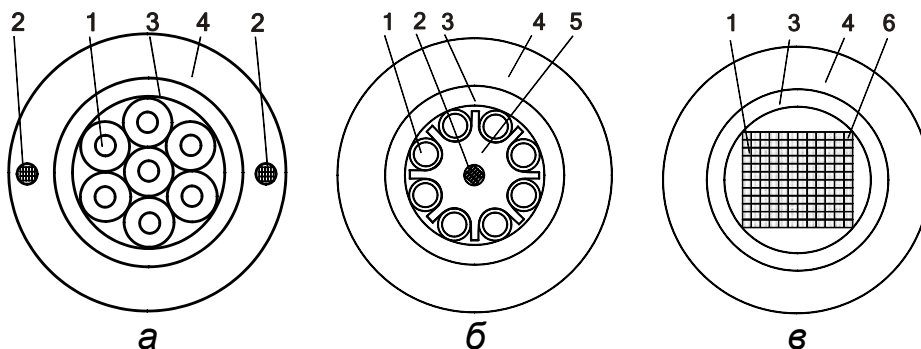


Рис. 5.23

Кабелі стрічкового типу (рис. 5.23, в) складаються з купи плоских пластмасових стрічок (6) (з 6, 8 або 12 стрічок), у кожній з яких зазвичай розміщуються 12 волокон. Кабелі такої конструкції використовуються у США. Перевагою такого типу волокна є більш проста технологія їх з'єднання, оскільки цю операцію можна проводити зі всіма волокнами одразу.

Конструкція кабелю великою мірою визначається його призначенням, тому для кожного з видів системи зв'язку існує певна типова конструкція.

Для кабелів міського зв'язку типова конструкція має вигляд, показаний на рис. 5.24, де 1 – оптичні волокна; 2 – пластмасові трубки; 3 – зміцнювальний силовий елемент з ниток СВМ (синтетичної високомолекулярної пластмаси); 4 – лавсанова стрічка; 5 – пластмасова оболонка. Її особливістю є повністю діелектрична конструкція, що дає змогу розміщувати ці кабелі в умовах впливу потужних електромагнітних завад від міського електричного транспорту й міських електромереж. Окрім того, оскільки такі кабелі прокладають в каналізації, то для їх захисту достатньо застосовувати пластмасові захисні оболонки.

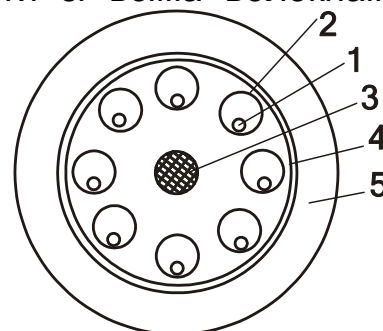


Рис. 5.24

Конструкцію кабелю зонового зв'язку наведено на рис. 5.25, де 1 – оптичні волокна; 2 – профільоване пластмасове осердя; 3 – обмотувальна лавсанова стрічка; 4 – броньовані дроти; 5 – мідні дроти; 6 – поліетиленова оболонка. Оскільки ці кабелі прокладають у ґрунті й вони зазнають істотних розтяжних зусиль, у їх конструкції використовуються більш потужні

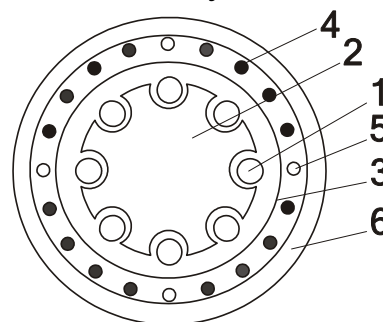


Рис. 5.25

засоби захисту у вигляді броньованих дротів і профільованих осердь. Додаткова відмінність цих кабелів полягає у тому, що разом з броньованими дротами також прокладають мідні, за допомогою яких забезпечується дистанційне живлення регенераторів.

Кабелі *магістрального зв'язку* мають ще більш захищену конструкцію, що зображено на рис. 5.26, де 1 – оптичні волокна; 2 – мідні дроти для дистанційного живлення; 3 – силовий елемент; 4 – сталеві броньовані дроти; 5, 6 – внутрішня й зовнішня пластмасові оболонки. Вона містить не тільки радіальні, а й центральні силові елементи й більш міцні броньовані дроти. Для дистанційного живлення регенераторів передбачено окремі мідні дроти, які розташовуються в осерді кабелю.

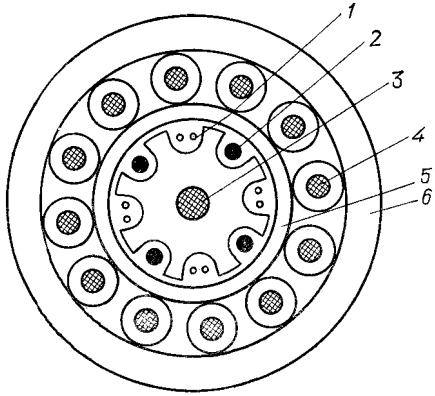


Рис. 5.26

Слід зазначити, що чим більш захищену конструкцію має кабель, тим більша його вартість, тому при виборі типу кабелю слід також враховувати й цей показник.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Comer, D. E. The Internet book: everything you need to know about computer networking and how the Internet works / D. E. Comer. – New York (USA) : CRC Press, 2018. – 404 p.
2. Bertsekas, D. Data networks / D. Bertsekas, R. Gallager. – Belmont (USA) : Athena Scientific, 2021. – 570 p.
3. Гроднев, И. И. Линии связи : учеб. для вузов / И. И. Гроднев, С. М. Верник. – М. : Радио и связь, 1988. – 544 с.
4. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1965. – 848 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров : пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1978. – 832 с.

## ЗМІСТ

1. Системи зв'язку .....	3
1.1. Структурна схема. Основні визначення й вимоги .....	3
1.2. Види ліній передачі та їх основні властивості .....	5
2. Теорія ліній передачі .....	5
2.1. Типи й класи електромагнітних хвиль.....	5
2.2. Основні рівняння електромагнітного поля.....	7
2.3. Частотні обмеження при передаванні енергії.....	8
2.4. Режими передавання енергії.....	9
2.5. Поширення енергії напрямними системами .....	10
2.6. Вихідні принципи розрахунку напрямних систем .....	13
2.7. Рівняння однорідної лінії .....	14
3. Симетричні кабелі .....	18
3.1. Електричні процеси в симетричних колах .....	18
3.2. Визначення первинних параметрів кабельних ліній .....	20
3.3. Основні залежності первинних параметрів симетричних ліній...22	
3.4. Визначення вторинних параметрів симетричних ліній .....	23
3.5. Оптимальні співвідношення параметрів симетричних ліній зв'язку.....	24
3.6. Конструкція симетричних кабелів і їх характеристики .....	25
4. Коаксіальні кабелі.....	34
4.1. Електричні процеси в коаксіальних колах .....	34
4.2. Визначення первинних параметрів коаксіальних ліній .....	36
4.3. Основні залежності первинних параметрів коаксіальних ліній...37	
4.4. Визначення вторинних параметрів коаксіальних ліній.....	38
4.5. Оптимальне співвідношення діаметрів провідників коаксіального кола .....	39
4.6. Конструкція коаксіальних кабелів та їх характеристики.....	40
5. Оптичні кабелі.....	44
5.1. Фізичні процеси у волоконних світловодах .....	45
5.2. Променева теорія передавання енергії світловодами.....	46
5.3. Хвильова теорія передавання енергії світловодами .....	50
5.4. Загасання світловодів.....	53
5.5. Дисперсія й пропускна здатність світловодів .....	56
5.6. Дальність зв'язку й довжина регенераційної ділянки.....	59
5.7. Класифікація типів оптичного волокна .....	60
5.8. Конструкція оптичних кабелів.....	62
Бібліографічний список .....	67

Навчальне видання

**Абрамов Сергій Клавдійович  
Абрамова Вікторія Валеріївна  
Абрамов Клавдій Данилович**

**ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ  
ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ОПТИЧНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

Редактор Н. В. Мазепа

Зв. план, 2024

Підписано до видання 23.12.2024

Ум. друк. арк. 3,8. Обл.-вид. арк. 4,31. Електронний ресурс

---

Видавець і виготовлювач  
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
<http://www.khai.edu>  
Видавничий центр «ХАІ»  
61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17  
[izdat@khai.edu](mailto:izdat@khai.edu)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів  
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001