

Загальна структура ВОЛЗ

Для будь-якої ВОЛЗ велике значення мають три фактора:

- інформаційна ємність системи, що визначається числом каналів зв'язку й швидкістю передачі інформації;
- загасання сигналу, що визначає максимальну довжину ВОЛЗ без ретрансляції;
- стійкість стосовно навколишнього середовища.

Основними компонентами волоконних ліній зв'язку є:

- передавач;
- приймач;
- ретранслятор;
- волоконний кабель.

Провідними фірмами, що випускають волоконно-оптичні лінії зв'язку, є:

- GeneralCableCompany (США);
- Siecocor (ФРН);
- BillCable (Великобританія);
- Nokia (Фінляндія);
- Sumitomo (Японія);
- Pirelli (Італія).

Особливість ВОЛЗ полягає в тому, що передача сигналу ведеться тільки однополярними імпульсами. На рис 1 показана структурна схема ВОЛЗ.

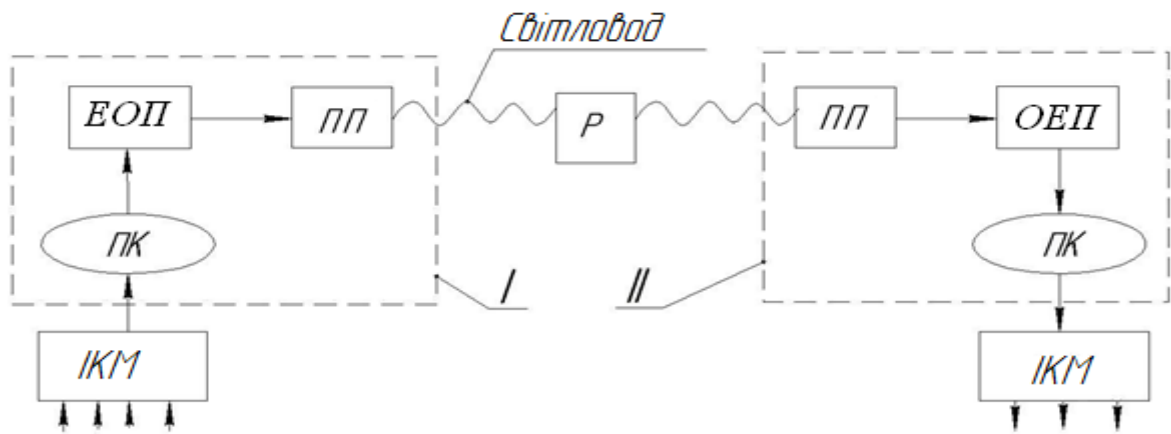


Рис.1. Структурна схема ВОЛЗ: I - передавач; II - приймач; ІКМ - блок імпульсно-кової модуляції; ПК - перетворювач коду; ЕОП - електронно-оптичний перетворювач (лазер); ПП – погоджувачий пристрій; Р - ретранслятор; ОЕП - перетворювач оптичного сигналу в електронний

Ретранслятор (Р) слугує для посилення й відновлення форми оптичного сигналу. Структура ретранслятора показана на рис.2.

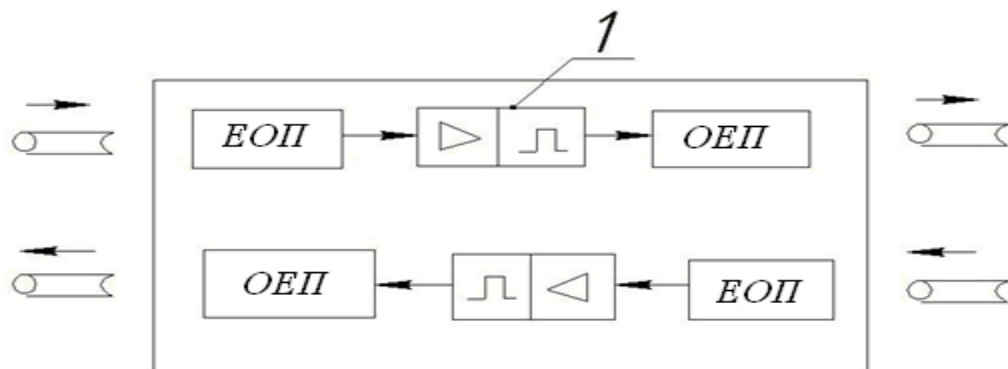


Рис.2. Структурна схема ретранслятора: 1 - підсилювач-коректор; ОЕП і ЕОП – перетворювачі оптичного і електричного сигналів

Структурна схема оптичного передавача (ПОМ) показана на рис.3.

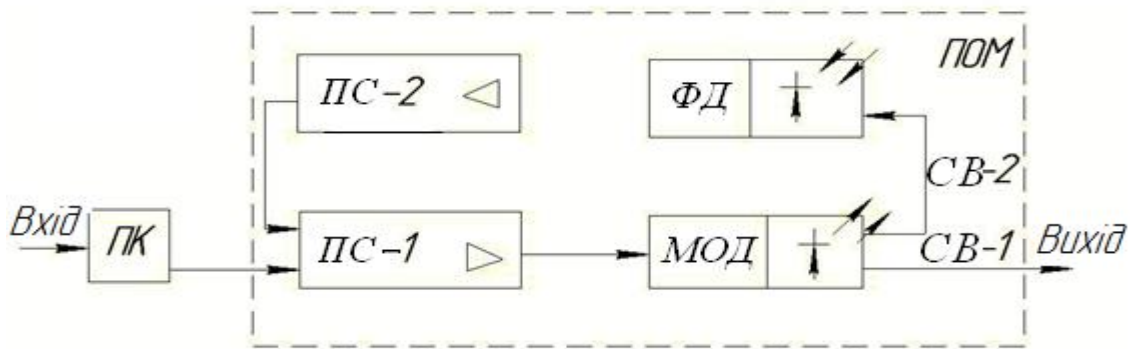


Рис. 3. Структурна схема ПОМ: ПС-1,2-підсилювачі; МОД-модулятор, ПК-перетворювач коду; ФД-фотодіод; СВ1,2- світловоди

ПОМ крім модулятора містить схеми стабілізації потужності й частоти випромінювання напівпровідникового лазера. Перетворювач коду (ПК) перетворює стиковий код у код використовуваний у лінії, після чого сигнал іде на модулятор (МОД). Основна частина сигналу передається в оптичне волокно 1 (ОВ-1). Для контролю потужності випромінювання використовують фотодіод, на який сигнал передається за допомогою волокна 2 (ОВ-2). Напряга на виході фотодіода реєструє всі зміни потужності. Сигнал підсилюється в підсилювачі 2 (ПС-2) і подається на вхід, що інвертує, підсилювача 1 (ПС-1). Реалізується негативний зворотній зв'язок, що стабілізує потужність випромінювання.

Структура фотоприймального блоку показана на рис.4.

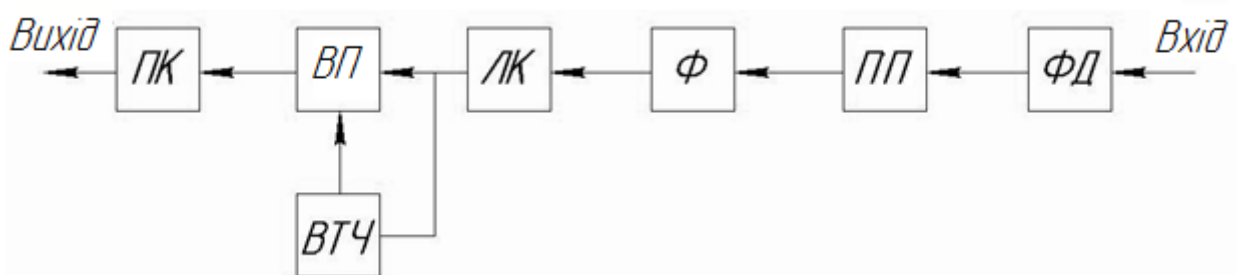


Рис.6.4. Структурна схема фотоприймального блоку: ФД - фотодетектор; ПП - малошумлячий підсилювач; Ф - електронний фільтр; ЛК - блок лінійної

корекції сигналу; ВП - вирішуючий пристрій; ВТЧ - пристрій виділення тактової частоти; ПК - перетворювач кода.

2. Розрахунок довжини регенераційної ділянки

Регенераційна ділянка (РД) – це відстань між двома ретрансляторами оптичного сигналу.

Довжину РД обмежує один із двох факторів - загасання або дисперсія. При визначенні довжини РД необхідно на першому етапі знайти максимально припустиму відстань (обмежену загасанням світловодного тракту), на яку можна передати сигнал, а потім його відновити. Другим етапом визначають пропускну здатність оптичного кабелю й знаходять довжину траси, на яку ще можливо передавати оптичні сигнали із заданою швидкістю. У багатомодових світловодах довжина РД звичайно обмежується дисперсією, а в одномодових світловодах - загасанням.

Довжина регенераційної ділянки лінії зв'язку визначається виходячи з наступних вимог.

- 1) Потужність сигналу на виході повинна перевищувати задану граничну потужність приймача [8], що визначається співвідношенням (1):

$$P_{пер} - P_{\epsilon} - P_p \cdot n_p - P_n \cdot n_n - \alpha \cdot L - P_m - P_{\epsilon p} > P_{пор}, \quad (1)$$

де $P_{пер}$ – потужність передавача випромінювання, мВт;

P_{ϵ} – втрати потужності при вводі випромінювання у світловод;

P_p – втрати потужності в роз'ємному з'єднанні;

n_p – кількість роз'ємних з'єднань;

P_n – втрати потужності в нероз'ємному з'єднанні;

n_n – кількість нероз'ємних з'єднань;

α – коефіцієнт втрат потужності в кабелі на одиницю довжини;

L – довжина кабелю від передавача до ретранслятора;

$P_m = 0,5 \div 1,5$ – втрати, пов'язані з температурними змінами, дБ;

$\Pi_{ep} = 2 \div 6$ – часові втрати, зв'язані зі старінням кабеля, дБ;

$P_{пор}$ – гранична потужність приймача

Співвідношення (1) часто записують і в іншому виді:

$$\theta = P_{пер} - P_{пор} - \Pi_{\epsilon} , \quad (2)$$

де θ – енергетичний потенціал апаратури;

$P_{пер}$ – потужність передавача;

$P_{пор}$ – гранична потужність приймача;

Π_{ϵ} – втрати при введенні випромінювання у світловод.

З урахуванням співвідношень (1) і (2) довжина регенераційної ділянки може бути визначена з наступної нерівності:

$$L \leq \frac{\theta - \Pi_m - \Pi_{ep} - \Pi_{\epsilon}}{\alpha} . \quad (3)$$

- 2) Наявність дисперсійних перекручень сигналу в оптичному кабелі, в наслідок чого спотворюється форма оптичного імпульсу, як це показано на рис. 5.

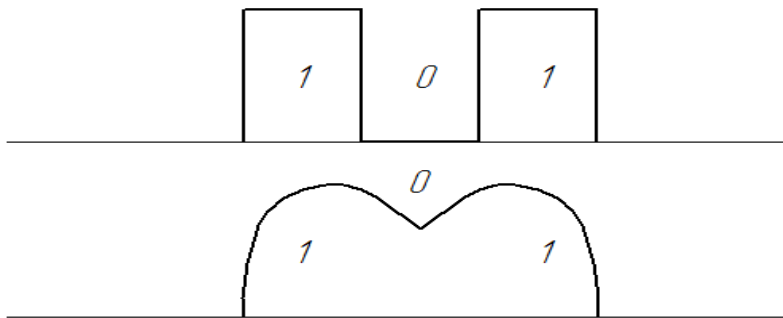


Рис.5. Спотворення оптичного імпульсу в наслідок дисперсійних перекручень

Довжина лінії зв'язку на підставі дисперсійних перекручень форми імпульсу визначається співвідношенням:

$$L = \frac{1}{B \cdot \sigma_{\Delta}} , \quad (4)$$

де B - тактова частота передачі сигналу;

σ_{Δ} – середньквдратичне розширення імпульсу у світловоді довжиною L .

Величина $\sigma_{\Delta t}$ залежить від типу світловода. Крім того, при визначенні $\sigma_{\Delta t}$ потрібно враховувати швидкодію передавального оптичного модуля й прийомного оптичного модуля. Середньоквадратичне розширення імпульсу у світловоді визначається співвідношеннями:

- для багатомодового східчастого світловода:

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{(NA)^2}{2n_c c} \quad , \quad (5)$$

де c – швидкість світла;

- для багатомодового градієнтного світловода:

$$\sigma_{\Delta t} = \frac{(NA)^4}{8n_0^3 c} \quad , \quad (6)$$

- для одномодового світловода:

$$\sigma_{\Delta t} = \Delta\lambda \cdot \sigma_H(\Delta t) \quad , \quad (7)$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра випромінювання лазера;

$\sigma_H(\Delta t)$ – нормоване значення часового розширення імпульса.

Величина енергетичного потенціалу залежить від швидкості передачі, технічного рівня елементів електрооптичних і оптоелектронних перетворювачів, довжини хвилі використовуваного джерела випромінювання й інших факторів. У табл. 1 наведені довідкові дані енергетичного потенціалу деяких систем.

Таблица 1

Енергетичний потенціал систем ВОЛЗ

Система	Довжина хвилі, мкм	Швидкість передачі, Мбіт/с	Число каналів	Енергетичний потенціал, дБ
ІКМ 480-5	1,3	34,368	480	38
Сопка-3М	1,55	34,368	480	38
Сопка-5	1,55	668,4672	7680	25

Енергетичний запас системи (С) звичайно становить 6дБ (6 - 10дБ). Він необхідний для компенсації ефекту старіння елементів апаратури і оптичного кабеля, компенсації додаткових втрат при ремонті оптичного кабеля (втрати на стиках кабельних вставок) і інших відхилень параметрів ділянки в процесі експлуатації.

Додаткові втрати в пасивних компонентах ВОЛЗ (A_a) становлять (3 – 5) дБ і виникають за рахунок роз'ємних з'єднувачів, пристроїв з'єднання лінійного кабеля зі станційним і т.п.

Будівельна довжина оптичного кабеля l_{cd} становить (2-5)км.

Довжина РД обмежується також пропускною здатністю оптичного кабеля. Пропускна здатність ΔF є одним з основних параметрів ВОЛЗ, тому що вона визначає смугу частот переданого сигналу й відповідно об'єм переданої інформації. Пропускна здатність оптичного кабеля істотно залежить від використовуваних у них типів оптичних волокон (одномодові, багатомодові: східчасті, градієнтні), які можуть мати різні дисперсійні параметри.

Дисперсійні перекручування істотно залежать від довжини оптичного волокна, тому величина ΔF нормується на один кілометр оптичного кабеля. Так, якщо на кілометровій довжині оптичного волокна відбувається розширення імпульсу на $\Delta t=10$ нс, то його пропускна здатність ΔF обмежена 44 МГц (при гаусовій формі імпульса).

Для того щоб оцінити спроможність якої-небудь ділянки ВОЛЗ довжиною l_x передавати інформацію з певною шириною смуги частот, при відомій нормованій смузі пропущення оптичного кабеля на один кілометр ΔF_1 , для коротких ліній, менших, чим довжина сталого режиму ($l_x < l_c$), використовують співвідношення:

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F_1}{l_x} . \quad (8)$$

Для ліній, довших, ніж довжина сталого режиму ($l_x \geq l_c$), використовують співвідношення:

$$\Delta F_x = \frac{\Delta F_1}{\sqrt{l_x \cdot l_c}} \quad (9)$$

Для східчастого багатомодового волокна довжина лінії сталого режиму становить 5-7км, для градієнтного волокна - 10-15км, для одномодових волокон - 25-30км.

На рис.6 показаний графік залежності дисперсії й пропускної спроможності від довжини лінії.

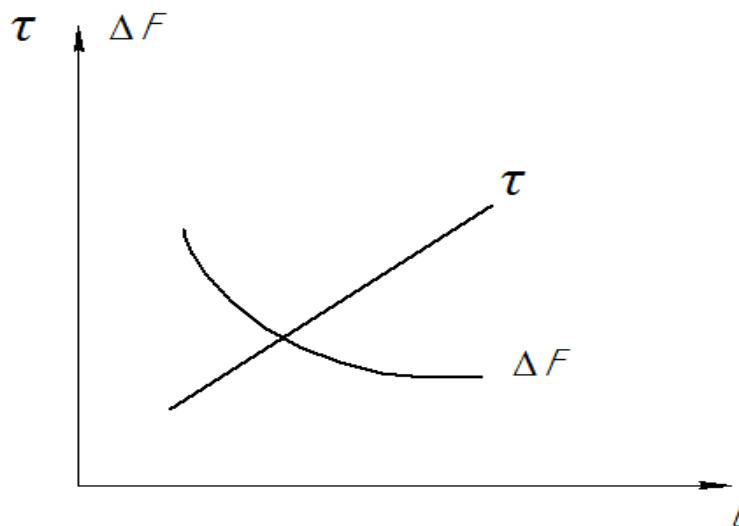


Рис.6. Графік залежності дисперсії й пропускної спроможності від довжини лінії

3. Оцінка взаємних впливів світловодів в оптичних кабелях

Навіть при дотриманні явища ПВВ частина енергії переходить із осердя в оболонку світловода. Ця енергія зменшується за експоненційним законом і може перейти в навколишній простір або в сусідній світловод у кабелі.

Величина напруженості електричного поля за межами осердя й оболонки визначається співвідношенням:

$$E = E_0 \cdot e^{-kx} \quad , \quad (10)$$

де E_0 – напруженість електричного поля для довжини хвилі, що надходить на вхід світловода;

k – параметр загасання в радіальному напрямку;

x – координата в радіальному напрямку.

Коефіцієнт k може бути розрахований на основі уявлень хвильової або геометричної оптики. У першому випадку цей коефіцієнт визначається наступним співвідношенням:

$$k = 2\pi\nu\sqrt{\varepsilon_0\mu_0\varepsilon\mu} , \quad (11)$$

де ν – частота електромагнітного випромінювання;

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\Phi}{\text{м}} \right] = \frac{10^{-9}}{36\pi} \left[\frac{\Phi}{\text{м}} \right] - \text{електрична стала};$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}} \right] - \text{магнітна стала};$$

$\varepsilon = n^2$ – діелектрична проникність відповідного середовища;

$\mu = 1$ – магнітна проникність.

З представлення геометричної оптики коефіцієнт k визначається співвідношенням:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi \cdot \sin^2 \theta}{\frac{n_2}{n_1}}} , \quad (12)$$

де φ – кут падіння на границі середовищ;

θ – кут повного внутрішнього відбиття;

n_1 і n_2 – показники заломлення контактуючих середовищ.

Для визначення енергії, що виходить за межі світловода, використовують модель поширення енергії усередині світловода, показану на рис. 7.

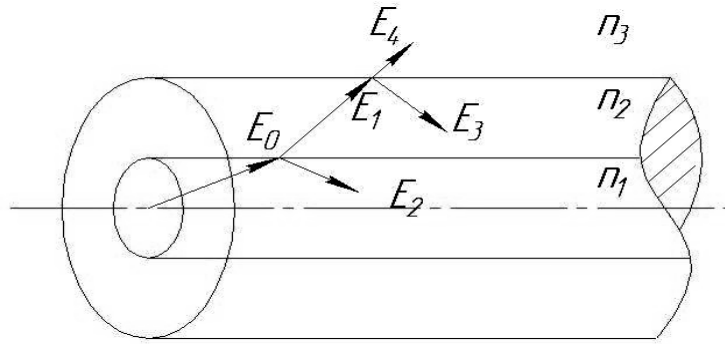


Рис.7. Модель поширення енергії усередині світловода

Характер проходження електромагнітного випромінювання через зони 1, 2, 3 можна охарактеризувати коефіцієнтами проходження випромінювання (q_{12} і q_{23}) і коефіцієнтами відбиття (p_{12} і p_{23}).

Енергія, що частково пройде покриття, визначається зі співвідношення:

$$E_1 = E_0 \cdot q_{12} \cdot e^{-k_2 \Delta_2} \quad , \quad (13)$$

де k_2 – коефіцієнт радіальних втрат у покритті;

Δ_2 - товщина покриття.

Енергія, що відіб'ється усередину осердя, визначається співвідношеннями:

$$E_2 = E_0 \cdot p_{12} \quad ; \quad (14)$$

$$E_3 = E_1 \cdot p_{23} = E_0 \cdot q_{12} \cdot p_{23} \cdot e^{-k_2 \Delta_2} \quad ; \quad (15)$$

$$E_4 = E_1 \cdot q_{23} = E_0 \cdot q_{12} \cdot q_{23} \cdot e^{-k_2 \Delta_2} \quad . \quad (16)$$

Напруженість зовнішнього електричного поля в просторі, що оточує світловод, визначається співвідношенням:

$$E_{\parallel} = E_0 \cdot \frac{q_{12} \cdot q_{23} \cdot e^{-k_2 \Delta_2}}{1 - p_{12} \cdot p_{23} \cdot e^{-2k_2 \Delta_2}} \quad . \quad (17)$$

Спрощені формули для визначення коефіцієнтів проходження випромінювання q_{12} і q_{23} , і коефіцієнтів відбиття p_{12} і p_{23} наведені нижче:

$$q_{12} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad ; \quad (18)$$

$$q_{23} = \frac{2n_2}{n_2 + n_3} \quad ; \quad (19)$$

$$p_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad ; \quad (20)$$

$$p_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \quad . \quad (21)$$

Часто при подібних розрахунках використовують коефіцієнт ослаблення перешкод, що визначається наступним співвідношенням:

$$N = N_n \cdot N_{гр} \cdot N_{вз} \quad , \quad (22)$$

де N_n – коефіцієнт ослаблення енергії за рахунок поглинання в оболонці;

$N_{гр}$ – коефіцієнт втрат енергії за рахунок відбиття електромагнітного випромінювання на межах осердя-оболонка, оболонка-повітря;

$N_{вз}$ – коефіцієнт втрат випромінювання за рахунок взаємодії (інтерференції) хвиль при багаторазовому відбитті.

З урахуванням коефіцієнта ослаблення перешкод напруженість електричного поля за межами осердя й оболонки можна знайти з наступного співвідношення:

$$E_{IV} = NE_0 \quad . \quad (23)$$

Вище наведені коефіцієнти втрат визначаються наступними співвідношеннями:

$$N_n = e^{-k_2 \Delta_2} \quad ; \quad (24)$$

$$N_{гр} = q_{12} \cdot q_{23} \quad ; \quad (25)$$

$$N_{вз} = \frac{1}{1 - p_{12} \cdot p_{23} \cdot e^{-2k_2 \Delta_2}} \quad . \quad (26)$$

Якщо в співвідношення (25) і (26) підставити (18) - (21), то в результаті будемо мати:

$$N_{гр} = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)(n_2 + n_3)} \quad ; \quad (27)$$

$$N_{вз} = \frac{1}{1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right) e^{-2k_2 \Delta_2}} \quad . \quad (28)$$

У більшості випадків світловоди являють собою тришарову структуру - осердя і двох покриттів. Зовнішнє захисне покриття передбачає поліпшення перешкодостійкості світловода й виготовляється із синтетичних матеріалів.

У цьому випадку маємо три межі розділу середовищ:

- $n_1 - n_2$ (осердя – оболонка);
- $n_2 - n_3$ (оболонка – захисне покриття);
- $n_3 - n_4$ (захисне покриття-повітря).

У випадки двох покриттів $N_n, N_{гр}$ і $N_{вз}$ визначаються з наступних співвідношень:

$$N_n = e^{-(k_2\Delta_2 + k_3\Delta_3)} ; \quad (29)$$

$$N_{гр} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \left(\frac{2n_2}{n_2 + n_3} \right)^2 \frac{2n_3}{n_3 + n_4} ; \quad (30)$$

$$N_{вз} = \left[1 - \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right) \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \right) \cdot e^{-2k_3\Delta_3} \right]^{-1} . \quad (31)$$

Коефіцієнти k_2 й k_3 можна знайти з наступних співвідношень:

$$k_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\sin^2\varphi - \sin^2\theta}{n_2/n_1}} ; \quad (32)$$

$$k_3 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\sin^2\varphi - \sin^2\theta}{n_3/n_2}} . \quad (33)$$

Коефіцієнт втрат N – це основний параметр, що характеризує просочування енергії через оболонку. Він змінюється в межах $[1;0]$. При $N = 0$ забезпечується найбільша захисна дія. Чим менше N , тим краще захисна дія. N зменшується при збільшенні частоти ν і збільшенні різниці показників заломлення.

При визначенні втрат часто вводять параметр ξ , що характеризує коефіцієнт зв'язку між світловодами в одному кабелі. Його можна знайти, користуючись наступним співвідношенням:

$$\xi = \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot r} , \quad (34)$$

де d – діаметр світловода;

r – відстань між центрами світловодів.

При розрахунках необхідно враховувати також загальне ослаблення випромінювання на довжині світловода. Тому визначають енергію, що перейшла на початковій і кінцевій ділянках лінії зв'язку.

На початковій ділянці лінії зв'язку використовується співвідношення

$$E_{4-0} = E_{1-0} \cdot N^2 \cdot \frac{n_3}{n_1} \cdot \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot r} (NA)^2 \cdot \frac{1 - e^{-2\alpha \cdot l}}{4\alpha} , \quad (35)$$

де E_{1-0} – енергія на початковій ділянці лінії зв'язку;

l – довжина світловода;

α – коефіцієнт перехідних втрат на одиницю довжини світловода.

Наприкінці лінії зв'язку застосовується наступне співвідношення

$$E_{4-l} = E_{1-l} \cdot N^2 \cdot \frac{n_3}{n_1} \cdot \frac{d}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot (NA)^2 \cdot \frac{l}{2} \cdot e^{-\alpha l} ; \quad (36)$$

де E_{1-l} – енергія, збережена в серцевині світловода наприкінці лінії зв'язку.

У лініях зв'язку перехідний взаємний вплив світловодів визначається через параметр перехідного загасання A в логарифмічних одиницях.

Перехідне загасання на ближньому A_0 й дальньому A_1 кінці лінії зв'язку визначаються наступними співвідношеннями:

$$A_0 = 20 \lg \left| \frac{E_{10}}{E_{40}} \right| = 20 \lg \frac{8\pi \cdot r \cdot n_1 \cdot \alpha}{N^2 d \cdot n_3 (NA)^2 (1 - e^{-2\alpha l})} , \quad (37)$$

де r – відстань між центрами світловодів;

N – коефіцієнт втрат в оболонці;

d – діаметр світловода;

n_3 – показник заломлення третього середовища;

l – довжина лінії зв'язку.

$$A_1 = 20 \lg \left| \frac{E_{11}}{E_{4el}} \right| = 20 \lg \frac{4\pi \cdot r \cdot n_1}{N^2 d \cdot n_3 (NA)^2 l \cdot \alpha} + \alpha l . \quad (38)$$

4. Надійність ВОЛЗ

Узагальнюючим показником якості роботи засобів зв'язку є надійність. У даному параграфі будуть розглянуті два основних показники надійності ВОЛЗ:

- інтенсивність відмов $\lambda_1(t)$;
- ймовірність безвідмовної роботи для заданого інтервалу часу $P_i(t)$.

Для зручності розрахунків показників надійності доцільно скласти структурну схему, що характеризує надійність зонової лінії зв'язку. На рис.8 показана схема, на якій показані елементи, які повинні бути працездатними для збереження працездатності всієї системи. Оскільки вихід з ладу кожного з цих вузлів приводить до втрати працездатності лінії зв'язку, то на схемі вони з'єднані послідовно.

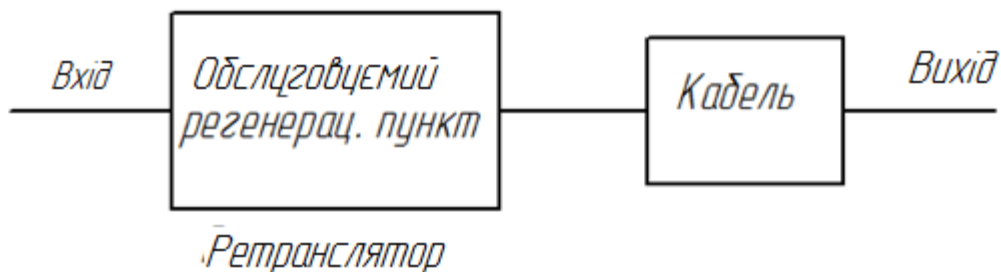


Рис. 8. Структурна схема, використовувана для розрахунку показників надійності лінії зв'язку

Обслуговуємий регенераційний пункт (ОРП) - ділянка, на якій відбувається відновлення й корекція форми сигналу.

Ймовірність безвідмовної роботи всієї лінії зв'язку підпорядковується експоненціальному закону розподілу й визначається з наступного співвідношення:

$$P(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\lambda t}, \quad (40)$$

де:

λ_i – інтенсивність відмови кожного елемента ліній зв'язку;

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (41)$$

де n – кількість всіх елементів на лінії зв'язку, які можуть відмовити.

Інтенсивність відмови ВОЛЗ визначається наступним співвідношенням:

$$\lambda = \lambda_{ОРП} \cdot n_{ОРП} + \lambda_{каб} \cdot L, \quad (42)$$

де $\lambda_{ОРП}$ – інтенсивність відмови ОРП;

$n_{ОРП}$ – кількість ОРП на лінії зв'язку;

$\lambda_{каб}$ – інтенсивність відмови кабелю;

L – довжина лінії зв'язку.

Крім цього, може бути визначений час відновлення зв'язку відповідно до співвідношення:

$$T_B = \frac{\lambda_{ОРП} \cdot n_{ОРП} \cdot t_{B_{ОРП}} + \lambda_{каб} \cdot L \cdot t_{B_{каб}}}{\lambda}, \quad (43)$$

де $t_{B_{ОРП}}$, $t_{B_{каб}}$ – час відновлення ушкодження ОРП і кабелю відповідно, у годинах.

Знаючи T_B можна знайти інтенсивність відновлення зв'язку:

$$\mu = \frac{1}{T_B} \cdot 1/\text{год} \quad (44)$$