

**МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ ЗВ'ЯЗКУ**

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

**РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ЛІНІЙНИХ ТРАКТІВ В О С П**

**Навчальний посібник
з дипломного проектування і
виконання магістерських робіт**

Українською та російською мовами

Одеса 2009

ББК 32.886.3

К 67

УДК 681.7.068:621.37/39

Корнійчук В.І. Розрахунок енергетичних параметрів лінійних трактів ВОСП: Навчальний посібник з дипломного проектування і виконання магістерських робіт. Одеса: Видавництво центр ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2008. – 37 с.: іл.

Представлений алгоритм і програми розрахунку енергетичних параметрів лінійних трактів волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП). Метод стосується лінійних трактів з модуляцією інтенсивності (потужності) оптичного переносника на передачі і прямим перетворенням на прийомі в припущенні безінерційності приймально-передавальних пристроїв і відсутності дисперсії сигналів в середовищі розповсюдження.

Програми моделювання лінійних трактів «Power FOTL» і «SimuFOCS» призначені для виконання розрахунків на персональному комп'ютері в ході виконання курсових, дипломних і магістерських робіт. Приведені приклади розрахунку параметрів передачі, шумів і міжканальних перехідних перешкод в безінерційних лінійних трактах одно- та багатохвильових ВОСП.

Для студентів, що навчаються за напрямом «Телекомунікації».

Рис. 17. табл. 11, список посилань 11.

Редактор В.О. Брескін, к.т.н., професор каф. ТКС ОНАЗ ім. О.С. Попова

Рецензент І.П. Панфілов, д. т. н., професор ОНАЗ ім. О.С. Попова

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри
Телекомунікаційних систем
і рекомендовано до друку

Протокол № 2
від 15.04.2008 р.

ЗМІСТ
україномовного варіанту

ВСТУП	5
1 ЛОГАРИФМІЧНІ ОДИНИЦІ	7
1.1 Логарифмічна одиниця дБ	7
1.2 Логарифмічна одиниця дБм	8
1.3 «Електричні» і «оптичні» дБ	9
1.4 Правила виконання розрахунків в логарифмічних одиницях	12
2 МОДЕЛІ КОМПОНЕНТІВ ВОЛТ	14
2.1 Основні компоненти ВОЛТ	14
2.2 Електрооптичний перетворювач	15
2.3 Оптикоелектричний перетворювач	17
2.4 Оптикооптичний перетворювач	18
2.5 Електроелектричний перетворювач	19
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОДНОХВИЛЬОВИХ ВОЛТ	20
3.1 Лінійний тракт «точка-точка» (ЕОП-ООП-ОЕП)	20
3.2 Оптикоелектронний ретранслятор ОЕП-ЕЕП-ЕОП	21
3.3 Лінійний тракт з ретрансляторами	22
3.4 Розрахунок шумових параметрів ВОЛТ	24
4 ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ОДНОХВИЛЬОВИХ ВОЛТ	26
4.1 Опис програми «Power FOTL»	26
4.2 Приклад моделювання	28
5 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ БАГАТОХВИЛЬОВИХ ВОЛТ	30
5.1 Аналіз параметрів передачі і перехідних перешкод багатохвильових ВОЛТ	30
5.2 Приклад розрахунку параметрів ВОЛТ з двома довжинами хвиль	31
5.3 Моделювання багатохвильових ВОЛТ в обчислювальному середовищі Simulink	33
ВИСНОВОК	36
ЛІТЕРАТУРА	36
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	37

СОДЕРЖАНИЕ

русскоязычного варианта

ВВЕДЕНИЕ	40
1. ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ	41
1.1 Логарифмическая единица дБ	41
1.2 Логарифмическая единица дБм	43
1.3 «Электрические» и «оптические» дБ	44
1.4 Правила выполнения расчетов в логарифмических единицах	47
2 МОДЕЛИ КОМПОНЕТОВ ВОЛТ	49
2.1 Основные компоненты ВОЛТ	49
2.2 Электрооптический преобразователь	50
2.3 Оптоэлектрический преобразователь	52
2.4 Оптооптический преобразователь	53
2.5 Электроэлектрооптический преобразователь	54
3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОДНОВОЛНОВЫХ ВОЛТ	55
3.1 Линейный тракт «точка-точка» (ЭОП-ООП-ОЭП)	55
3.2 Оптоэлектронный ретранслятор ОЭП-ЭЭП-ЭОП	56
3.3 Линейный тракт с ретрансляторами	57
3.4 Расчет шумовых параметров ВОЛТ	59
4 ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОДНОВОЛНОВЫХ ВОЛТ	61
4.1 Описание программы «Power FOTL»	61
4.2 Пример моделирования	62
5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МНОГОВОЛНОВЫХ ВОЛТ	65
5.1 Анализ параметров передачи и переходных помех многоволновых ВОЛТ	65
5.2 Пример расчета параметров ВОЛТ с двумя длинами волн	67
5.3 Моделирование многоволновых ВОЛТ в вычислительной среде Simulink	69
ВЫВОДЫ	71
ЛИТЕРАТУРА	71
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	72

ВСТУП

Дослідження волоконно-оптичної системи передачі (ВОСП) і аналіз процесів, що відбуваються в ній, вимагає певних відомостей. Дослідник повинен знати: у якому форматі (аналоговому, цифровому) передаються сигнали; якими мають бути форма і потужність імпульсу при цифровій передачі; максимальні швидкість передачі інформації і втрати в оптичному лінійному тракті; яка необхідна ширина смуги пропускання оптичного волокна (ОВ); припустимі значення шумів і т.п. Частина цих даних відома або задається в технічному завданні на проектування. Інші параметри можуть бути визначені за допомогою відповідних розрахунків на основі математичної моделі ВОСП.

Коректне математичне моделювання ВОСП є досить складною проблемою. Звичайно використовують спектральний (частотна область) метод аналізу, що потребує знання (вимірювання, розрахунку, завдання) передатних характеристик та шумів як приймально-передавального обладнання, так і середовища поширення сигналів – оптичного волокна. Як приклад, програма аналізу ВОСП [1] розраховує наскрізну передатну характеристику лінійного тракту, потужність шумів, відношення сигнал/шум. Для представлення сигналу в часовій області застосовується зворотне перетворення Фур'є, після чого програма будує “око-діаграму” та визначає коефіцієнт помилок та максимальну довжину ділянки регенерації.

Спрощений аналіз ВОСП прийнято виконувати в два наступних етапи.

На першому етапі, який наведено в цьому посібнику, компоненти лінійного тракту приймаються безінерційними (не враховуються спотворення форми сигналу) і аналізується тільки зміна потужності електричного і оптичного сигналів та середньоквадратичного значення шумів при передачі сигналів лінійним трактом. При цьому визначають максимальну довжину ділянки регенерації (підсилення) за потужністю (загасання) за якої забезпечується необхідна якість зв'язку.

*На другому етапі** навпаки враховують тільки параметри інерційності (бистродії) компонентів тракту і не звертають уваги на енергетичні показники. На цьому етапі обчислюють дальність передачі (довжину ділянки регенерації) за допустимим (для даного тракту) часом наростання фронту імпульсу за якого забезпечується певна якість зв'язку. З двох отриманих результатів обирають менший.

В пропонуємому посібнику наведено метод аналізу параметрів передачі і шумів лінійних трактів ВОСП (перший етап аналізу), який ще можна назвати «арифметикою оптоелектронних співвідношень». Наведені формули справедливі для наступних умов:

- безперервних (немодульованих) значень електричних і оптичних величин (аналіз «на постійному світлі», що є аналогічним розрахунку електричних кіл «на постійному струмі»);
- середніх у часі значень електричних і оптичних величин, зокрема, у випадку модуляції інтенсивності (потужності) оптичного переносника на

* Див. учбовий посібник “Проектування інерційних лінійних трактів ВОСП: Вид. центр ОНАЗ, 2008, 72 с.”

передачі та прямим перетворенням на прийомі за умови безінерційності приймально-передавальних пристроїв і відсутності дисперсії сигналів в середовищі передачі.

Такі умови мають місце в наступних лінійних трактах:

- цифрових середньо- та високошвидкісних, що працюють по одномодових кварцових оптичних волокнах (ОВ) в області нульової дисперсії на короткі або середні відстані;
- пасивних оптичних мереж (PON);
- оптичних мереж кабельного телебачення;
- локальних обчислювальних мереж на основі одномодових кварцових і багатомодових ОВ типу кварц/полімер або полімер/полімер.

Використані в посібнику програми моделювання лінійних трактів «Power FOTL» та «SimuFOCS» призначені для виконання розрахунків на персональному комп'ютері в ході курсового, дипломного проектування та виконання магістерських робіт. Наведені приклади розрахунку параметрів передачі, шумів і міжканальних переходів в безінерційних лінійних трактах одно- та багатохвильових (WDM) ВОСП.

Виконуємий файл програми «Power FOTL» (790 КБ), що призначена для розрахунку однохвильових ВОСП, можна записати на кафедрі Телекомунікаційних систем.

1 ЛОГАРИФМІЧНІ ОДИНИЦІ

Волоконно-оптичний лінійний тракт (ВОЛТ) – це комплекс технічних пристроїв, які призначені для передачі оптичного лінійного сигналу з певною довжиною хвилі, компенсації загасання в середовищі передачі, корекції спотворень сигналу, що забезпечують необхідне значення відношення сигнал/шум при аналоговій і коефіцієнту помилок при цифровій передачі.

Основним параметром, вимірюваним в оптичному лінійному тракті, є середнє в часі або імпульсне значення оптичної потужності, Вт. У оптичних системах інтервал значень оптичної потужності вельми великий – від (1...100) мВт на передавальній стороні, до одиниць мкВт і навіть нВт на приймальному боці. В такій ситуації зручно перейти від мультиплікативних операцій (множення, ділення) з величинами, вираженими в абсолютних одиницях (Вт), до аддитивних (складання, віднімання) з величинами, вираженими в логарифмічних одиницях, – дБ і дБм.

1.1 Логарифмічна одиниця «дБ»

Децибел (дБ) (десята частина Бела) є зручним загальноприйнятим способом виразу в логарифмічних одиницях відносин напруг, струмів і потужностей. Нехай потужність дорівнює P_1 (Вт) в одній точці і P_2 (Вт) в іншій, більш видаленій по лінії передачі точці. Відношення P_2/P_1 є *коефіцієнтом передачі за потужністю*. Іншими словами P_2/P_1 – ефективність (ККД) передачі по системі або в логарифмічних одиницях

$$a = 10\lg(P_2/P_1) \text{ дБ} \quad (1.1)$$

де значення P_2 і P_1 треба підставляти в однакових одиницях, наприклад, обидва у Вт або у мВт.

Значення логарифма від числа, меншого за одиницю, є негативним. Тому, у випадку $P_2 < P_1$, значення a (дБ) є негативним. Така ситуація типова для лінії передачі з втратами. Якщо в лінійному тракті включений підсилювач, $P_2 > P_1$ і значення a (дБ) є позитивним. Іноді негативний знак опускають, коли очевидно, що йдеться про втрати. Наприклад, якщо потужність змінилася на –3 дБ, то це можна назвати втратами у 3 дБ. У такій ситуації формулу (1.1) можна переписати

$$a = 10\lg(P_1/P_2), \text{ дБ.} \quad (1.2)$$

і опустити негативний знак. У приведених нижче викладеннях ми будемо, в основному, мати справу з втратами, тобто $a > 0$ дБ.

Якщо відомі значення a (дБ) і P_1 (або P_2), то значення P_2 (або P_1) може бути знайдене в одиницях P_1 (або P_2) за допомогою операції потенціювання

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{a(\text{дБ})/10} \text{ або } P_1 = P_2 / 10^{a(\text{дБ})/10}.$$

Логарифмічні одиниці спрощують розрахунки у випадках, коли компоненти системи з'єднані послідовно (каскадно). Нехай ВОЛТ складається з

трьох компонентів – з'єднувач «джерело-волокно» 1, саме оптичне волокно 2 і з'єднувач «волокно-приймач» 3, рис. 1.1. Потужність світла на виході тракту знаходимо перемножуванням коефіцієнтів передачі за потужністю кожного з блоків

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1}.$$

Відповідні втрати потужності в оптичному тракту на рис. 1.1

$$a = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_4} \right) = 10 \lg \left(\frac{P_3}{P_4} \cdot \frac{P_2}{P_3} \cdot \frac{P_1}{P_2} \right), \text{ дБ.}$$

Враховуючи, що логарифм твору дорівнює сумі логарифмів,

$$a = 10 \lg(P_3/P_4) + 10 \lg(P_2/P_3) + 10 \lg(P_1/P_2) = a_3 + a_2 + a_1, \text{ дБ.} \quad (1.3)$$

Таким чином, *результуючі втрати передачі (у дБ) дорівнюють сумі втрат (у дБ) в окремих каскадно-з'єднаних компонентах*. Цей приклад ілюструє простоту обчислень в логарифмічних одиницях.

Приклад 1.1

Три елементи на рис. 1.1 мають втрати 11, 6 і 3 дБ, відповідно. Знайти результуючі втрати каскадного з'єднання і потужність на виході системи, якщо вхідна потужність 5 мВт.

Розв'язання

Згідно рівнянню (1.3) результуючі втрати дорівнюють сумі $11 + 6 + 3 = 20$ дБ. Згідно формулі (1.2) ослаблення 20 дБ еквівалентно відношенню потужностей $P_1/P_2 = 10^{20/10} = 10^2 = 100$. Потужність на виході системи дорівнює $5 \text{ мВт}/100 = 0,05 \text{ мВт}$.

Приклад 1.2

Система має втрати потужності 23 дБ. Обчислити ефективність передачі системи.

Розв'язання

З формули (1.2), використовуючи потенціювання, знаходимо відношення потужностей

$$P_1/P_2 = 10^{a(\text{дБ})/10}.$$

Підстановка дає $P_1/P_2 = 10^{2,3} = 199,52$. Ефективність передачі потужності $1/199,52 = 0,05$ або 0,5%.

1.2 Логарифмічна одиниця «дБм»

Домовились використовувати логарифмічні одиниці дБм замість абсолютних одиниць потужності (Вт) шляхом порівняння довільного значення потужності P_x з опорним, що дорівнює 1 мВт (типове значення потужності, введеної в одномодове оптичне волокно від лазерного передавача). Десять логарифмів відношення довільної потужності P_x в мВт щодо потужності в 1 мВт ($1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт}$) позначають терміном дБм (читається «дэ-бэ-эм»)

$$p = 10 \lg[P_x(\text{мВт})/1 \text{ мВт}], \text{ дБм.} \quad (1.4)$$

Якщо заданий рівень потужності p^* (дБм), то використовуючи потенціювання, знаходимо шукану потужність

$$P_x = 10^{p(\text{дБм})/10}, \text{ мВт.}$$

Отже, дБм – одиниця вимірювання *рівня потужності*.

Приклад 1.3

Світлодіод (СД) випромінює потужність 2 мВт. Обчислити рівень цієї потужності в дБм. Потужність СД передається через компоненти, що мають сумарні втрати 23 дБ. Обчислити потужність світла на виході системи.

Розв'язання

Випромінювана потужність рівна 2 мВт. Цій потужності відповідає рівень потужності $a = 10 \lg(2 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) = 10 \lg 2 = 3 \text{ дБм}$. Рівень цієї потужності зменшується внаслідок втрат в тракці на 23 дБ. Тобто вихідна потужність на 23 дБ менша за вхідну потужність $3 \text{ дБм} - 23 \text{ дБ} = -20 \text{ дБм}$. Вихідна потужність дорівнює $P_x = 10^{-20/10} = 10^{-2} \text{ мВт} = 10 \text{ мкВт}$.

Взаємозв'язок потужності (мВт) та рівня потужності (дБм) подано в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Взаємозв'язок потужності та рівня потужності

Потужність P , мВт	Рівень потужності p , дБм	Потужність P , мВт	Рівень потужності p , дБм
10	10	0,01	-20
1	0	0,001	-30
0,5	-3	0,0001	-40
0,1	-10	0,00001	-50

1.3 «Електричні» і «оптичні» дБ

Розглянемо (рис. 1.2), як змінюються значення величин, виражених в логарифмічних одиницях, в різних областях спектру електромагнітних хвиль.

1. *Електрична область*. Нехай P_{e1} і P_{e2} – значення електричної (е) потужності в пристрої, а їх логарифмічне відношення

$$a_e = 10 \lg(P_{e1}/P_{e2}), \text{ дБ.} \quad (1.5)$$

Враховуючи, що струм I та напруга U пов'язані з електричною потужністю відомими співвідношеннями $P_e = I^2 R = U^2/R$, де R – активний опір, формулу (1.5) можна записати через відношення квадратів струмів і напруг

$$a_e = \left\{ \begin{array}{l} 10 \lg(I_1^2 / I_2^2) = 20 \lg(I_1 / I_2) \\ 10 \lg(U_1^2 / U_2^2) = 20 \lg(U_1 / U_2) \end{array} \right\}, \text{ дБ} \quad (1.6)$$

де I_1 , U_1 , і I_2 , U_2 – струми і напруги, що відповідають потужностям P_{e1} і P_{e2} .

2. В *оптичній області спектру* є тільки потужність випромінювання, і немає величин, еквівалентних електричному струму або напрузі. Нехай P_{o1} і P_{o2}

* Потужність будемо позначати великою літерою P (мВт), а рівень потужності – малою літерою p (дБм).

– значення оптичної (о) потужності в пристрої. Логарифмічне відношення цих потужностей

$$a_o = 10\lg(P_{o1}/P_{o2}), \text{ дБ.} \quad (1.7)$$

В оптичній системі передачі (рис. 1.2) на *передавальній стороні* електрооптичний перетворювач (ЕОП) лінійно перетворює електричний струм I в оптичну потужність $P_o = R_p I$, де R_p , Вт/А – ваттовий відгук ЕОП (див. нижче). На приймальному боці оптоелектричний перетворювач (ОЕП) лінійно перетворює оптичну потужність $P_{o \text{ вих}}$ в електричний струм $I = P_{o \text{ вих}} R_i$, де R_i , А/Вт – струмовий відгук ОЕП (див. нижче).

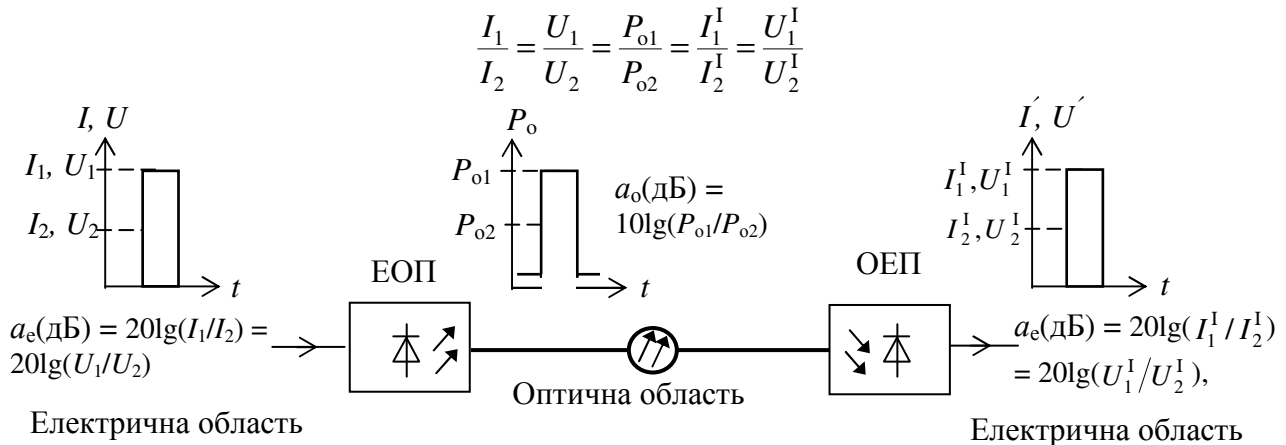


Рисунок 1.2 – До розрахунку логарифмічних значень величин в електричній і оптичній областях спектру

Електричні потужності P_{e1} і P_{e2} , що створюються в навантаженні ОЕП внаслідок протікання струмів $I_1 = R_i P_{o1}$ і $I_2 = R_i P_{o2}$, пропорційні квадратам цих струмів, або в логарифмічних одиницях

$$a_e = 10\lg(P_{e1}/P_{e2}) = 10\lg(R_i^2 I_1^2 / R_i^2 I_2^2) = 20\lg(I_1/I_2), \text{ дБ.} \quad (1.8)$$

Порівнюючи формули (1.7) і (1.8) бачимо, що «електричні» дБ в два рази більші за «оптичні» дБ,

$$a_e(\text{дБ}) = 2a_o(\text{дБ}), \quad a_o(\text{дБ}) = a_e(\text{дБ})/2. \quad (1.9)$$

Підтвердимо отримані співвідношення наступними прикладами.

Приклад 1.4. Розглянемо передачу однакових електричних сигналів спочатку по електричному (рис. 1.3), а потім по оптичному (рис. 1.4) лінійному тракту. Хай на електричних входах цих трактів присутні два значення струму, наприклад, струм імпульсного сигналу I_c і струм шуму з середньквадратическим значенням $I_{ш}$. У цифровій системі це можуть бути струми, що відповідають передачі логічних символів 1 і 0. Для простоти прийемо, що відношення сигнал/шум (ВСШ) = $I_c/I_{ш} = 2/1$ або в логарифмічних одиницях $\text{всш} = 20\lg \text{ВСШ} = 20\lg(2/1) = 6 \text{ дБ}$. Відношення електричних потужностей, що створюють ці струми, дорівнює 4:1. У логарифмічних одиницях це відповідає $\text{всш} = 10\lg(4/1) = 6 \text{ дБ}$.

Розв'язання.

А. При передачі по *електричному лінійному тракту* (рис. 1.3) без власних шумів

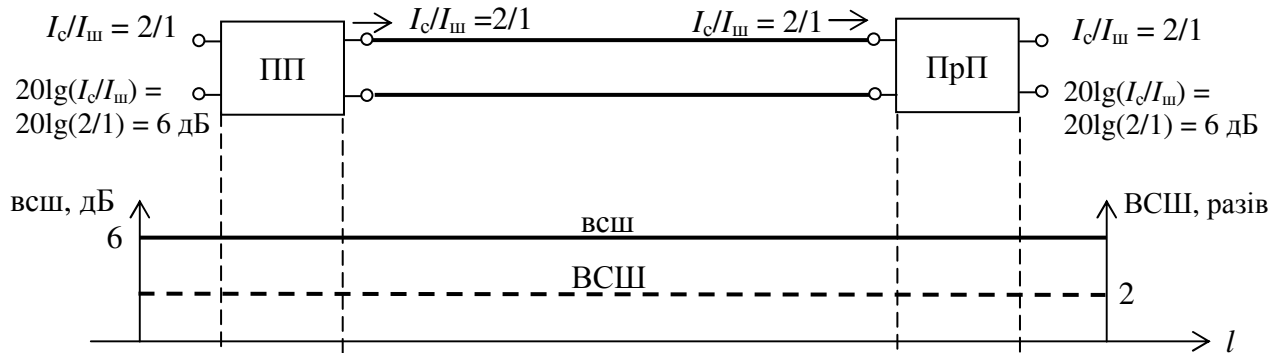


Рисунок 1.3 – Схема електричного лінійного тракту (зверху) та діаграма (знизу) ВСШ (разів) і всш (дБ) в ідеальному тракту без власних шумів для випадку, коли на вході $I_c/I_{ш} = 2/1$. ПП та ПрП – передавальний та приймальний пристрої відповідно

значення $ВСШ = 2/1$ (у разях) і в логарифмічних одиницях $всш = 20\lg(2/1) = 6$ дБ не змінюється – відповідні діаграми мають вид прямої лінії.

Б. В разі передачі цих же сигналів по *оптичному лінійному тракту* (рис. 1.4) входні струми в ЕОП лінійно перетворюються в оптичні потужності, так що зберігається відношення оптичних потужностей 2:1 в середовищі передачі (волокні). У логарифмічних одиницях це відповідає $всш = 10\lg(2/1) = 3$ дБ. На виході волокна оптичні потужності в ОЕП лінійно перетворюються в електричні струми. Графічна ілюстрація цього прикладу приведена на рис. 1.4. З діаграми на рис. 1.4, б витікає, що при передачі по ВОЛТ без власних шумів значення $I_c/I_{ш}$ в разях не змінюється (чого і слід було чекати). Логарифмічна діаграма (рис. 1.4, в) має вид ламаної лінії. При переході з електричної області спектру до оптичної, значення всш (дБ) зменшуються в два рази, а при зворотному переході (з оптичної до електричної) – подвоюються.

Підкреслимо, що в реальних трактах передачі компоненти вносять власні

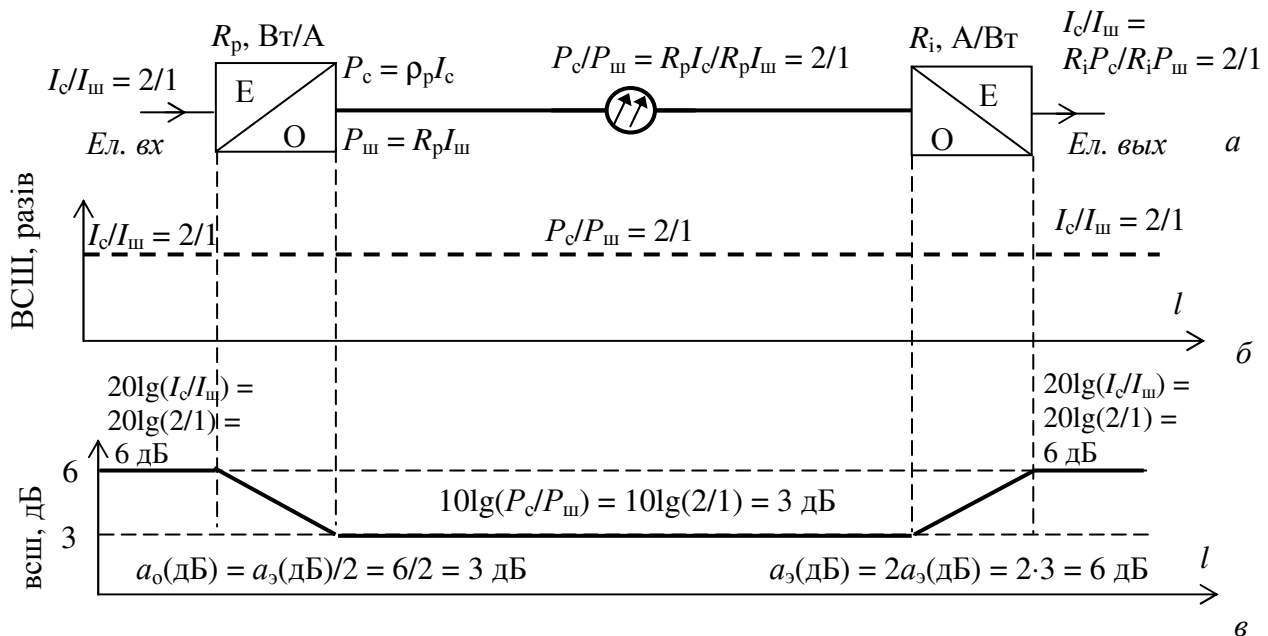


Рисунок 1.4 – Схема оптичного лінійного тракту а та діаграми зміни ВСШ (разів) б та всш (дБ) в для ідеального тракту без власних шумів у випадку, коли на вході $I_c/I_{ш} = 2/1$

шуми, і аналогічні діаграми матимуть спадаючий характер (ВСШ зменшується).

Висновок. При переході від електричної області до оптичної логарифмічні значення ослаблення (підсилення) необхідно зменшити удвічі, а при переході з оптичної області до електричної – їх необхідно подвоїти.

Приклад 1.5. Коефіцієнт загасання α коаксіального або симетричного кабелю виражається в «електричних» дБ/км, а оптичного – в «оптичних» дБ/км. Розрахуємо значення α електричного (з відношенням $U_1/U_2 = 10/1$) і оптичного (з відношенням $P_{o1}/P_{o2} = 10/1$) кабелів, де U_1 і U_2 – напруги, а P_{o1} і P_{o2} – потужності на початку і кінці обох кабелів довжиною 1 км.

Розв’язання.

Для електричного кабелю $\alpha_e = 20\lg(U_1/U_2) = 20\lg(10/1) = 20$ дБ/км ($\alpha_e = 10\lg(U_1^2/U_2^2) = 10\lg(100/1) = 20$ дБ/км). Для оптичного кабелю $\alpha_o = 10\lg(P_{o1}/P_{o2}) = 10\lg(10/1) = 10$ дБ/км. Висновок – електричний кабель з $\alpha_e = 20$ дБ/км є еквівалентним за втратами потужності оптичному кабелю з $\alpha_o = 10$ дБ/км. Знову приходимо до очікуваного (формула (1.9)) результату – $\alpha_o(\text{дБ/км}) = \alpha_e(\text{дБ/км})/2$.

1.4 Правила виконання розрахунків в логарифмічних одиницях [2]

1. (Тривіальне.) Значення величин, виражених в дБ або дБм, не можна перемножувати і ділити, а тільки підсумовувати і віднімати.

2. Результат c підсумовування (віднімання) двох або більше величин, виражених в дБ, наприклад, a і b , завжди має розмірність дБ (див. формулу (1.3) і приклад 1.1)

$$\pm a(\text{дБ}) \pm b(\text{дБ}) = \pm c(\text{дБ}).$$

3. Результат c віднімання двох значень a і b рівнів потужності, виражених в дБм, має розмірність дБ

$$a(\text{дБм}) - b(\text{дБм}) = \pm c(\text{дБ}).$$

Приклад 1.6. Потужність передавального пристрою $P_1 = 1$ мВт, чутливість приймального пристрою $P_2 = 1$ мкВт = 0,001 мВт. Визначити бюджет потужності цієї апаратури.

Розв’язання. Відповідні рівні потужності передавального і приймального пристрою дорівнюють $a = 10\lg 1 = 0$ дБм, $b = 10\lg 0,001 = -30$ дБм. Бюджет потужності апаратури $c = a - b = 0$ дБм – $(-30$ дБм) = 30 дБм $\equiv 30$ дБ.

Перевірка. $c = a(\text{дБм}) - b(\text{дБм}) = 10\lg(1 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}) + 10\lg(1 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}/0,001 \text{ мВт}) = 10\lg(1/0,001) = 10\lg 10^3 = 30$ дБ.

4. Підсумовування рівнів потужності (у дБм) суперечить фізичному сенсу. Покажемо це на наступному прикладі.

Приклад 1.7. На кожний з двох вхідних полюсів оптичного суматора без власних втрат (наприклад, розгалужувача Y-типу) подаються потужності $P_1 = P_2 = 10$ мВт. Розрахувати потужність (мВт) і рівень потужності (дБм) на виході суматора.

Розв’язання. Очевидно, слід очікувати на виході суматора $P_3 = P_1 + P_2 = (10 + 10)$ мВт = 20 мВт. Спробуємо розрахувати рівень потужності на виході суматора, користуючись одиницями дБм. Рівні потужності на кожному з вхідних полюсів суматора згідно співвідношенню (1.4) $a = b = 10\lg 10 = 10$ дБм. Формальний розрахунок рівня потужності на

вихідному полюсі суматора дає $c = a + e = 10 \text{ дБм} + 10 \text{ дБм} = 20 \text{ дБм}$. Потенціюванням знаходимо відповідну потужність $P_3 = 10^{c(\text{дБм})/10} = 10^{20/10} = 10^2 \text{ мВт} = 100 \text{ мВт}$!!! Цей, явно помилковий результат, пояснюється тим, що адитивній операції підсумовування величин, виражених в логарифмічних одиницях, відповідає мультиплікативна операція множення величин, виражених у фізичних одиницях, а це суперечить умові завдання – підсумовування потужностей.

Перевірка. Потужність на виході ідеального суматора $P_3 = P_1 + P_2 = (10 + 10) \text{ мВт} = 20 \text{ мВт}$. Рівень потужності на виході суматора $c = 10\lg[P_3(\text{мВт})] = 10\lg(20) = 10\lg(2 \cdot 10) = 10\lg 2 + 10\lg 10 = 3 \text{ дБм} + 10 \text{ дБм} = 13 \text{ дБм}$ (правильний результат).

Примітка. Операція підсумовування значень в логарифмічних одиницях дБм відповідає операції множення фізичних величин (пристрій множення). У оптичних (фізичних) системах є пристрої, що здійснюють множення і ділення напруженостей електромагнітного поля, але немає фізичних пристроїв, що здійснюють перемножування потужностей.

5. Результат з підсумовування або віднімання двох або більше значень величин, одні з яких виражені в дБм, а інші – в дБ, завжди має розмірність дБм

$$\pm a(\text{дБм}) \pm e(\text{дБ}) = \pm c(\text{дБм}).$$

Приклад 1.8. Випромінювання лазера потужністю $P_1 = 2 \text{ мВт}$ вводиться в оптичне волокно (ОВ) з коефіцієнтом загасання $\alpha = 0,2 \text{ дБ/км}$. Розрахувати рівень потужності на виході ОВ довжиною $l = 100 \text{ км}$.

Розв’язання. Рівень потужності лазера $a = 10\lg 2 = 3 \text{ дБм}$. Ослаблення (зменшення потужності) світла в ОВ $e = \alpha l = 0,2 \text{ дБ/км} \cdot 100 \text{ км} = 20 \text{ дБ}$. Рівень потужності на виході ОВ $c = a - e = 3 \text{ дБм} - 20 \text{ дБ} = -17 \text{ дБм}$.

Перевірка. Ослабленню в ОВ в 20 дБ відповідає коефіцієнт передачі за потужністю 10^{-2} . Потужність на виході ОВ $2 \text{ мВт} \times 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ мВт}$. Рівень потужності на виході $c = 10\lg 2 \cdot 10^{-2} = 10\lg 2 - 10\lg 10^2 = 3 - 20 = -17 \text{ дБм}$ (правильний результат).

Приклад 1.9. Випромінювання лазера потужністю $P_1 = 1 \text{ мВт}$ посилюється в оптичному підсилювачі в 100 разів. Розрахувати рівень потужності на виході передавального пристрою.

Розв’язання. Рівень потужності лазера $a = 10\lg 1 = 0 \text{ дБм}$. Підсилення оптичного підсилювача $e = 10\lg 100 = 10\lg 10^2 = 20 \text{ дБ}$. Рівень потужності на виході передавального пристрою $c = a + e = 0 \text{ дБм} + 20 \text{ дБ} = 20 \text{ дБм}$.

Перевірка. Потужність на виході передавального пристрою $1 \text{ мВт} \times 100 = 100 \text{ мВт}$. Рівень потужності $c = 10\lg 100 = 10\lg 10^2 = 20 \text{ дБм}$ (правильний результат).

Приклад 1.10. Розрахувати коефіцієнт передачі за потужністю ідеального (без втрат) зіркоподібного розгалужувача типу $1 \times N$. Потужність, що поступає на вхідний порт такого розгалужувача, ділиться в рівній мірі між N вихідними портами.

Розв’язання. Коефіцієнт передачі по потужності зіркоподібного розгалужувача $1 \times N$ дорівнює $10\lg N$. Його значення для $N = 4 \dots 128$ приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Залежність коефіцієнта передачі від числа вихідних портів N

N	4	8	16	32	64	128
$a, \text{ дБ}$	6	9	12	15	18	21

2 МОДЕЛІ КОМПОНЕНТІВ ВОЛТ

2.1 Основні компоненти ВОЛТ

Для передачі електричних сигналів по оптичних волокнах (ОВ) застосовують волоконно-оптичні лінійні тракти (ВОЛТ), рис. 2.1.

Основними функціональними компонентами ВОЛТ є наступні: а) електрооптичний (Е/О) перетворювач 2 – джерело випромінювання (ДВ); б) середовище передачі – оптичне волокно 3; в) оптоелектричний (О/Е) перетворювач 4 – приймач випромінювання (ПВ). Передавальний пристрій (ПП) 5 складається з сигнального процесора (підсилювача) 1 та ДВ 2, а приймальний пристрій (ПрП) 6 – з ПВ 4 та сигнального процесора (підсилювача) 1. У протяжних ВОЛТ встановлюють ретранслятори 7 О-Е-О-типу, що складаються з трьох основних блоків – ПрП 6, сигнального процесора 1 (підсилювача в аналогових, регенератора в цифрових системах) і ПП 5. В сучасних ВОЛТ також застосовують оптичні підсилювачі – ретранслятори О-типу (підсилюють оптичний сигнал без перетворення в електричний еквівалент, але і без регенерації).

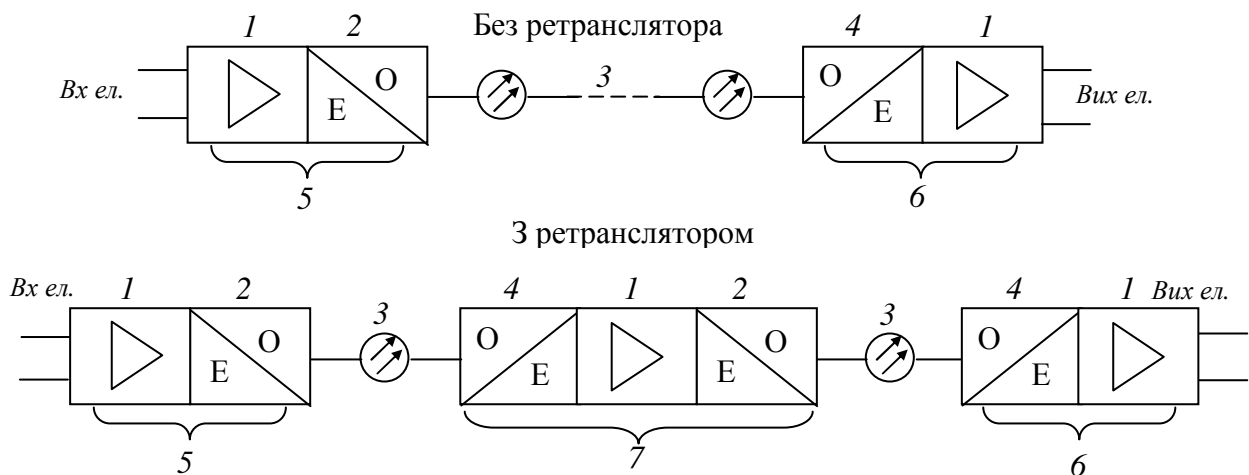


Рисунок 2.1 – Структурні схеми та основні компоненти ВОЛТ: 1 – сигнальний процесор (підсилювач), 2 – джерело випромінювання (Е/О перетворювач), 3 – оптичне волокно, 4 – приймач випромінювання (О/Е перетворювач), 5 – передавальний пристрій, 6 – приймальний пристрій, 7 – ретранслятор О-Е-О типу

Для зручності аналізу параметрів компонентів ВОЛТ представимо їх у вигляді функціональних вузлів, що здійснюють відповідно Е/О, О/Е, О-О і Е-Е перетворення енергії переносника інформації, що має електричну (Е) або оптичну (О) природу, рис. 2.2. В *оптоелектронних перетворювачах* – Е/О (передавальний пристрій) і О/Е (приймальний пристрій) – відбувається перенос спектру передаваного сигналу з Е до О-області і навпаки. В *оптичних компонентах* типу О-О (оптичне волокно, оптичний підсилювач, транспондер та інші) і *електричних компонентах* типу Е-Е (сигнальний процесор) спектральне перетворення відсутнє, а змінюються значення параметрів оптичного і електричного переносника відповідно.

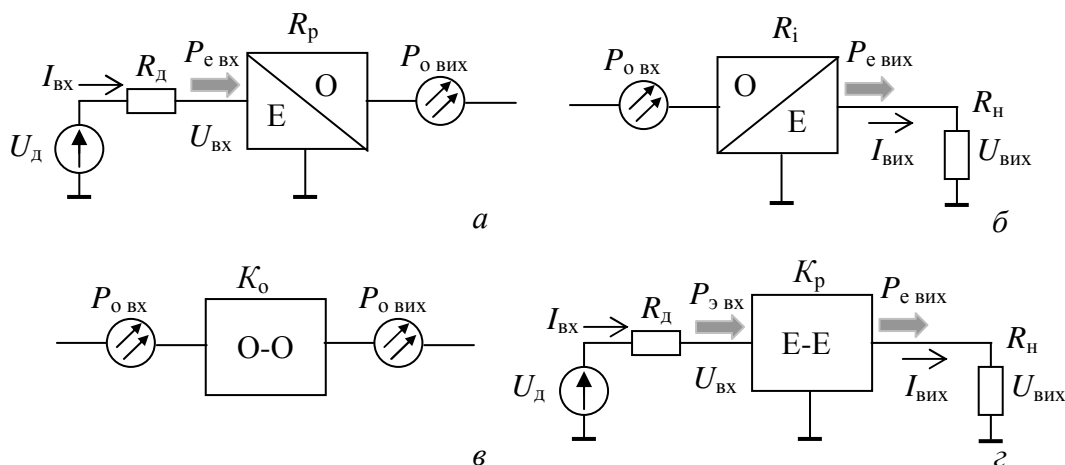


Рисунок 2.2 – Умовні графічні позначення компонентів ВОЛТ: оптоелектронних (електро/оптичного *а*, опто/електричного *б*), опто-оптичного *в* и електро-електричного *г*, де U_d та R_d – напруга та опір джерела сигналу, R_n – опір навантаження (інші пояснення див. в тексті)

Нижче подано метод розрахунку параметрів оптичних лінійних трактів ВОСП [3]. Приведені співвідношення справедливі для наступних умов: 1) безперервних (немодульованих) значень електричних і оптичних величин (аналіз «на постійному світлі», що є аналогічним аналізу електричних кіл «на постійному струмі»); 2) середніх в часі значень електричних і оптичних величин, що змінюються, зокрема, для випадку модуляції інтенсивності (потужності) оптичного переносника на передачі і прямим перетворенням на прийомі за відсутності інерційності приймально-передавальних пристроїв, і дисперсії сигналу в середовищі розповсюдження.

2.2 Електрооптичний перетворювач (ЕОП)

Для ЕОП на рис. 2.2,*а* прийняті наступні позначення: $U_{вх}$, $I_{вх}$, $P_{е вх}$ – напруга, струм і потужність електричного сигналу на вході ЕОП;

$$R_p(\text{Вт/А}) = \Delta P_{о вх}(\text{Вт})/I_{вх}(\text{А}), \rho_p(\text{дБ}) = 20\lg[R_p(\text{Вт/А})/1 \text{ Вт/А}] \quad (2.1)$$

– *диференційний ваттовий відгук** ЕОП-а з урахуванням ефективності введення потужності світла до ОВ, де $\Delta P_{о вх}$ – приріст оптичної потужності на вихідному оптичному полюсі ЕОП, що викликаний приростом електричного струму $\Delta I_{вх}$ на його вхідному електричному полюсі. Індекси «е» і «о» вказують на приналежність параметра до електричної і оптичної областей спектру відповідно. Далі разом з фізичними одиницями (А, В, Вт, Ом) використовуватимуться логарифмічні – дБм, дБ. Перші позначатимемо прописними, а другі – рядковими буквами. Наприклад, у виразі $p_{е вх, вих}(\text{дБм}) = 10\lg[P_{е вх, вих}(\text{мВт})/1 \text{ мВт}]$, $P_{е вх, вх}$ і $p_{е вх, вих}$ – потужність і рівень потужності електричного сигналу на вході (виході) відповідно. Для ЕОП з врахуванням співвідношень (2.1), отримуємо

* Інші назви – нахил ватт-амперної характеристики [2], диференційна ефективність [3].

$$P_{e_{вх}}(Вт) = I_{вх}^2(A) R_{и}(Ом), P_{o_{вих}}(Вт) = I_{вх}(A) R_p(ВТ/А),$$

$$p_{o_{вих}}(дБм) = [p_{e_{вх}}(дБм) + \rho_p(дБ) - r_d(дБ) + 30 дБ]/2, \quad (2.2)$$

$$p_{e_{вх}}(дБм) = 2p_{o_{вих}}(дБм) - \rho_p(дБ) + r_d(дБ) - 30 дБ, \quad (2.3)$$

де $r_d(дБ) = 10\lg[R_d(Ом)/1 Ом]$. Із співвідношення (2.3) виходить правило перерахунку значень параметрів у логарифмічних одиницях при переході з електричної до оптичної області спектру

$$дБм_e = 2 \times дБм_o, дБ_e = 2 \times дБ_o.$$

У табл. 2.1 приведені розрахункові вирази для трьох значень $R_d = 50 Ом$ і $75 Ом$ (цифрові і аналогові ВОЛТ відповідно) та $R_d = 1000 Ом$ при якому формули (3.2) і (3.3) спрощуються.

Таблиця 2.1 – Співвідношення для розрахунку параметрів ЕОП

Опір джерела $R_d, Ом$	Оптичний полюс: $p_{o_{вих}}(дБм) =$	Електричний полюс: $p_{e_{вх}}(дБм) =$
50	$[p_{e_{вх}}(дБм) + \rho_p(дБ)]/2 + 6,05 дБ$	$2p_{o_{вих}}(дБм) - \rho_p(дБ) - 13,01 дБ$
75	$[p_{e_{вх}}(дБм) + \rho_p(дБ)]/2 + 5,625 дБ$	$2p_{o_{вих}}(дБм) - \rho_p(дБ) - 11,25 дБ$
1000	$[p_{e_{вх}}(дБм) + \rho_p(дБ)]/2$	$2p_{o_{вих}}(дБм) - \rho_p(дБ)$

Значення R_p не завжди вказує виробник ДВ. Воно може бути розраховане за паспортними або експериментальними даними за формулою (2.1), якщо відома (зміряна) потужність випромінювання, введена до одно- (ОМ) або багатомодове (БМ) ОВ. В табл. 2.2 приведені значення R_p і ρ_p основних типів напівпровідникових ОЕП і ОВ на довжині хвилі 1300 нм [4, 5]. Тут використані наступні аббревіатури для позначення типу лазерного резонатора: ФП – Фабрі-Перо, РЗЗ – розподілений зворотний зв'язок, РБВ – розподілене Брегівське відбиття, ВР – вертикальний резонатор.

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнтів Е/О перетворення напівпровідникових ЕОП [6]

Тип ДВ і ОВ	Світлодіод + БМ/ОМ волокно		Лазерний діод + ОМ волокно			
	поверхневий	торцевий	Ф-П	РЗЗ	РБВ	ВР
$R_p, Вт/А$	0,00025/0,000013	0,0004/0,00013	0,1...0,2	0,07	0,1	0,5
$\rho_p, дБ$	-72/-97,5	-68/-77,5	-20...-14	-23	-20	-6

Для ЕОП формально може бути введений коефіцієнт передачі за потужністю (з перетворенням спектру) $K_{p_{eоп}} = P_{o_{вих}}(Вт)/P_{e_{вх}}(Вт) = R_p(ВТ/А)/U_{вх}(В)$. Очевидно, що між $K_{p_{eоп}}$ і $U_{вх}$ є зворотно пропорційна залежність. Коефіцієнт передачі за потужністю у відносних одиницях

$$k_{p_{eоп}}(дБ) = [\rho_p(дБ) - u_{вх}(дБ)]/2, де u_{вх}(дБ) = 20\lg[U_{вх}(В)/1 В]. \quad (2.4)$$

Приклад 2.1. Для лазерного діода типу Фабрі-Перо $\rho_p = -20 дБ$ при $R_d = 50 Ом$, $U_{вх} = 0,5 В$ ($u_{вх} = -6 дБ$) знаходимо $k_{p_{eоп}} = -7 дБ$ (ККД = 20%).

2.3 Оптиелектричний перетворювач (ОЕП)

Для ЕОП на рис. 2.2,б прийняті наступні позначення: $P_{o\text{ вх}}$ – середнє в часі значення потужності оптичного сигналу на вході;

$$R_i(\text{А/Вт}) = \Delta I_{\text{вих}}(\text{А})/\Delta P_{o\text{ вх}}(\text{Вт}), \rho_i(\text{дБ}) = 20\lg[R_i(\text{А/Вт})/1 \text{ А/Вт}] \quad (2.5)$$

– диференціальний струмовий відгук (з урахуванням ефективності виведення світла з ОВ), що дорівнює приросту струму $\Delta I_{\text{вих}}$ на вихідному полюсі, викликаному приростом оптичної потужності $\Delta P_{o\text{ вх}}$ на його вхідному полюсі; $U_{\text{вих}}$, $I_{\text{вих}}$ і $P_{e\text{ вих}}$ – відповідно напруга, струм і потужність електричного сигналу на виході; R_n – опір навантаження. Для ОЕП з урахуванням співвідношень (2.5)

$$I_{\text{вих}}(\text{А}) = P_{o\text{ вх}}(\text{Вт})R_i(\text{А/Вт}), P_{e\text{ вих}}(\text{Вт}) = I_{\text{вих}}^2(\text{А}^2)R_n(\text{Ом}),$$

$$p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) = 2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ}) + r_n(\text{дБ}) - 30 \text{ дБ} \quad (2.6)$$

$$p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) = [p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ}) - r_n(\text{дБ}) + 30 \text{ дБ}]/2 \quad (2.7)$$

де $r_n(\text{дБ}) = 10\lg[R_n(\text{Ом})/1 \text{ Ом}]$. Із співвідношення (2.7) виходить правило перерахунку значень параметрів у логарифмічних одиницях при переході з оптичної до електричної області спектру

$$\text{дБ}_o = \text{дБ}_e/2, \text{дБм}_o = \text{дБм}_e/2.$$

В табл. 2.3 приведені розрахункові вирази для трьох значень $R_n = 50 \text{ Ом}$ і 75 Ом (цифрові і аналогові ВОЛТ відповідно) та $R_n = 1000 \text{ Ом}$, при якому формули (2.6) і (2.7) спрощуються.

Таблиця 2.3 – Співвідношення для розрахунку параметрів ОЕП

Опір навантаження R_n , Ом	Електричний полюс: $p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) =$	Оптичний полюс: $p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) =$
50	$2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}$	$[p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ})]/2 + 6,05 \text{ дБ}$
75	$2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ}) - 11,25 \text{ дБ}$	$[p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ})]/2 + 5,625 \text{ дБ}$
1000	$2p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}) + \rho_i(\text{дБ})$	$[p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - \rho_i(\text{дБ})]/2$

Значення R_i зазвичай вказує виготівник ПВ на робочій довжині хвилі λ . В іншому випадку значення може бути розраховане за формулою (3.5) після вимірювання сім'ї вольт-амперних характеристик фотодіода. В табл. 2.4 приведені значення R_i і ρ_i фотодіодів (ФД) без внутрішнього підсилення (p - i - n -типу) і з підсиленням (лавинного типу), виконаних з різних напівпровідникових матеріалів [6].

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнтів О/Е перетворення напівпровідникових ФД [6]

Тип ФД	p - i - n			Лавинний		
нм	850	1300	1550	850	1300	1550
Матеріал	Кремній	Германій	InGaAs	Кремній	Германій	InGaAs
R_i , А/Вт	0,5	0,7	0,6	75	35	12
ρ_i , дБ	-6	-3,1	-4,4	37,5	31	21,6

Диференціальний вольтовий відгук ПрП оцінює ефективність перетворення ОЕП-ом оптичної потужності в електричну напругу

$$R_u(\text{В/Вт}) = \Delta U_{\text{вих}}(\text{В})/\Delta P_{\text{о вх}}(\text{Вт}), \rho_u(\text{дБ}) = 20\lg[R_u(\text{В/Вт})/1 \text{ В/Вт}], \quad (2.8)$$

де $\Delta U_{\text{вих}}$ – приріст напруги на виході, викликаний приростом оптичної потужності $\Delta P_{\text{о вх}}$ на вході. Вольтовий відгук можна виразити через струмовий відгук $\rho_u(\text{дБ}) = \rho_i(\text{дБ}) + 2r_n(\text{дБ})$. Доцільність введення цього параметра продиктована тим, що на виході ПрП зазвичай вимірюється напруга.

Для ОЕП формально може бути введений коефіцієнт передачі за потужністю (з перетворенням спектру) $K_{p \text{ оеп}} = P_{\text{е вих}}(\text{Вт})/P_{\text{о вх}}(\text{Вт}) = R_u(\text{Вт/А})I_{\text{вих}}(\text{А})$, тобто пропорційна вихідному електричному (а значить і вхідному оптичному) сигналу. Коефіцієнт передачі за потужністю у відносних одиницях

$$k_{p \text{ оеп}}(\text{дБ}) = [\rho_u(\text{дБ}) + i_{\text{вих}}(\text{дБ})]/2, \text{ де } i_{\text{вих}}(\text{дБ}) = 20\lg[I_{\text{вих}}(\text{А})/1 \text{ А}]. \quad (2.9)$$

Приклад 2.2. Для *p-i-n*-фотодиода з $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$ і $R_n = 50 \text{ Ом}$, $\rho_u = 28 \text{ дБ}$ і для $P_{\text{о вх}} = 1 \text{ мВт}$ знаходимо $I_{\text{вих}} = 0,5 \text{ мкА}$ ($i_{\text{вих}} = -66 \text{ дБ}$) і $k_{p \text{ оеп}} = -19 \text{ дБ}$ (ККД = 1,2%). Збільшивши значення R_n до 1 кОм, отримаємо $\rho_u = 54 \text{ дБ}$, $k_{p \text{ оеп}} = -6 \text{ дБ}$ (ККД = 25,1%). Висновок – для ОЕП бажане високоомне навантаження.

Приклад 2.3. Використовуючи результати прикладів 2.1 і 2.2 знайти коефіцієнт передачі оптрону «ЕОП+ОЕП» $k_p = k_{p \text{ еоп}}(\text{дБ}) + k_{p \text{ оеп}}(\text{дБ})$. Для $R_d = R_n = 50 \text{ Ом}$ отримуємо $k_p = -7 -19 = -26 \text{ дБ}$ (ККД = 2,5 %); для випадку $R_d = 50 \text{ Ом}$ і $R_n = 1 \text{ кОм}$ знаходимо $k_p = -7 -6 = -13 \text{ дБ}$ (ККД = 5 %), зростання в 2 рази.

2.4 Оптикооптичний перетворювач (ООП)

ООП (рис. 2.2, в) характеризується коефіцієнтом передачі за потужністю

$$K_o = P_{\text{о вих}}(\text{Вт})/P_{\text{о вх}}(\text{Вт}), k_o(\text{дБ}) = p_{\text{о вих}}(\text{дБм}) - p_{\text{о вх}}(\text{дБм})$$

де $P_{\text{о вх}}$ і $P_{\text{о вих}}$ – середні в часі значення потужності оптичного випромінювання на вході і виході відповідно. Для активного ООП, наприклад, оптичного підсилювача $K_o > 1$ ($k_o > 0 \text{ дБ}$), тоді як для пасивного (оптичне волокно, з'єднувач, атенуатор, компенсатор дисперсії, вентиль та ін.) $K_o < 1$ ($k_o < 0 \text{ дБ}$). В табл. 2.5 приведені значення коефіцієнту загасання ОВ різних типів в залежності від довжини хвилі [6]. Для ОВ довжиною $l(\text{км})$ знаходимо коефіцієнт передачі за потужністю $k_o(\text{дБ}) = (\text{дБ/км}) \cdot l(\text{км})$.

Таблиця 2.5 – Типові коефіцієнти загасання (дБ/км) різних типів ОВ [2]

Тип ОВ	Матеріал серцевини/ оболонки	Довжина хвилі оптичного випромінювання, нм				
		580	850	1300	1380 (пік ОН)	1550
ОМ 8,2/125	К/К	-	1,80	0,35	0,55	0,20
БМ 50/125		-	2,80	0,80	1,00	-
БМ 200/400	К/П	-	8,0	-		
БМ 900/1000	П/П	200	-			
Примітка: К – кварц, П – полімер.						

2.5 Електроелектричний перетворювач (ЕЕП)

Сигнальний процесор (ЕЕП) на рис. 2.2, з характеризується коефіцієнтом підсилення за потужністю

$$K_p = P_{e \text{ вих}}(\text{Вт})/P_{e \text{ вх}}(\text{Вт}), k_p(\text{дБ}) = 10\lg K_p,$$

де $P_{e \text{ вх}}$ і $P_{e \text{ вих}}$ – середні в часі значення потужності електричного сигналу на вході і виході відповідно. Якщо відомі рівні потужностей $p_{e \text{ вих}}$, $p_{e \text{ вх}}$, тоді $k_p(\text{дБ}) = p_{e \text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{e \text{ вх}}(\text{дБм})$. Зазвичай ЕЕП встановлюють за ОЕП для підсилення електричного сигналу, тому завжди $K_p > 1$ ($k_p > 0$ дБ). Якщо він працює в режимі підсилення струмів, то коефіцієнт передачі за струмом

$$K_i = I_{\text{вих}}(\text{А})/I_{\text{вх}}(\text{А}), k_i(\text{дБ}) = 20\lg K_i,$$

де $I_{\text{вх}}$ і $I_{\text{вих}}$ – струм сигналу на вході і виході ЕЕП відповідно. Є справедливим співвідношення

$$k_p(\text{дБ}) = 2k_i(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}}).$$

Відзначимо, що значення $k_p(\text{дБ})$ росте із збільшенням відношення $R_{\text{н}}$ до $R_{\text{д}}$.

Використовуємо отримані формули для аналізу типових оптичних лінійних трактів.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ОДНОХВИЛЬОВИХ ВОЛТ

3.1 Лінійний тракт «точка-точка» (ЕОП-ООП-ОЕП) [6]

Каскад ЕОП-ООП-ОЕП є моделлю ВОЛТ симплексної ВОСП «точка-точка» без ретрансляторів, рис. 3.1. Проаналізуємо його основні енергетичні

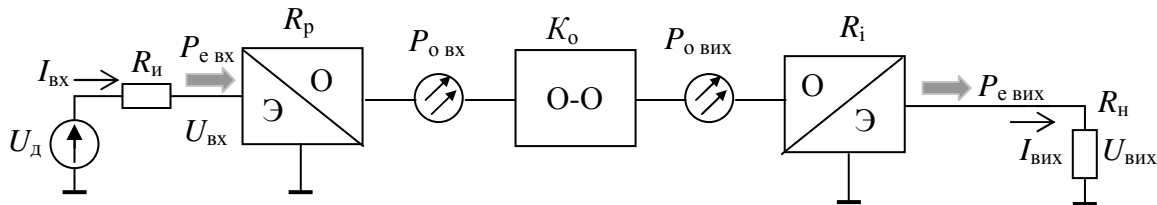


Рисунок 3.1 – Функціональна схема лінійного тракту ЕОП-ООП-ОЕП

параметри. Коефіцієнти передачі за струмом

$$K_i = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = R_p K_o R_i,$$

потужності

$$K_{e\ p} = P_{e\ \text{вих}}/P_{e\ \text{вх}} = (I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}})^2 (R_n/R_d) = (R_p K_o R_i)^2 (R_n/R_d),$$

а також опору передачі

$$R_n = U_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = R_p K_o R_i R_n = R_p K_o R_d, \text{ Ом.}$$

Отримані за допомогою співвідношень в табл. 2.1 і 2.3 формули розрахунку параметрів тракту ЕОП-ООП-ОЕП у відносних одиницях приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Співвідношення та результати розрахунку параметрів тракту ЕОП-ООП-ОЕП

Розрахункове співвідношення		Результати розрахунку для $R_n/R_d =$	
		1	10^3
$k_i(\text{дБ}) = \rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ})$		-46 дБ	-46 дБ
$k_{ep}(\text{дБ}) =$	$\rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + 10\lg(R_n/R_d)$	-46 дБ	-16 дБ
	$k_o(\text{дБ}) + [k_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ})]/2 + 10\lg(R_n/R_d)$		
	$k_o(\text{дБ}) + [\rho_p(\text{дБ}) - u_{\text{вх}}(\text{дБ}) + \rho_u(\text{дБ}) + i_{\text{вх}}(\text{дБ})]/2$		
$r_n(\text{дБ}) = \rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + r_n(\text{дБ})$		-12 дБ (0,25 Ом)	50 дБ (316 Ом)
$p_{e\ \text{вих}}(\text{дБм}) = p_{e\ \text{вх}}(\text{дБм}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + 10\lg(R_n/R_d)$		-39 дБм	-9 дБм

Застосування отриманих співвідношень проілюструємо на наступному прикладі.

Приклад 3.1. Розрахувати параметри ВОЛТ (рис. 3.1) для наступних значень: $R_d = R_n = 50 \text{ Ом}$; $i_{\text{вх}} = 10^{-2} \text{ А}$, $R_p = 10^{-1} \text{ Вт/А}$, $K_o = 10^{-1}$, $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$. Знаходимо $P_{e\ \text{вх}} = i_{\text{вх}}^2 R_n = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ (7 дБм); $\rho_p = 20\lg 10^{-1} = -20 \text{ дБ}$; $k_o = -10 \text{ дБ}$, $P_{o\ \text{вх}} = 10^{-1} \cdot 10^{-2} = 10^{-3} \text{ Вт}$ (0 дБм); $P_{o\ \text{вих}} = 10^{-3} \cdot 10^{-1} = 10^{-4} \text{ Вт}$ (-10 дБм); $\rho_i = 20\lg 0,5 = -6 \text{ дБ}$. Розрахункові значення параметрів тракту ЕОП-ООП-ОЕП приведені в табл. 3.1 для значень $R_n/R_d = 1$ і 10^3 .

Діаграми рівнів потужності ВОЛТ для умов прикладу 3.1 і значень $= 50 \text{ Ом}/50 \text{ Ом} = 1$ і $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} = 50 \text{ кОм}/50 \text{ Ом} = 10^3$ приведені на рис. 3.3, а.

Відзначимо, що коефіцієнт передачі за струмом не залежить від значень $R_{\text{д}}$ і $R_{\text{н}}$, а коефіцієнт передачі по потужності є пропорційний відношенню $R_{\text{н}}$ до $R_{\text{д}}$. Тому, при виборі $R_{\text{н}} \gg R_{\text{д}}$ може бути досягнутий «ефект підсилення потужності» в тракті. Наприклад, збільшення значення $R_{\text{н}}/R_{\text{д}}$ з 1 до 10^3 ($R_{\text{д}} = 50 \text{ Ом}$, $R_{\text{н}} = 50 \text{ кОм}$) дає збільшення значень: $k_{\text{е р}}$ з -46 дБ до -16 дБ (ККД з $0,005\%$ до $15,8\%$); рівня потужності вихідного сигналу з -39 дБм до -9 дБм ; опорю передачі з -12 дБ до $+50 \text{ дБ}$ (з $0,25$ до 316 Ом).

Резистор $R_{\text{д}}$ зазвичай має стандартний номінал (50 або 75 Ом), тому на практиці можна збільшувати лише значення $R_{\text{н}}$. Це, окрім зростання рівня потужності вихідного сигналу, забезпечує зниження середньоквадратичного значення струму теплового шуму, що створюється опором навантаження ОЕП ($\overline{I_{\text{ш}}^2} = 4kT\Delta f/R_{\text{н}}$, де kT – твір постійної Больцмана на абсолютну температуру, Δf – еквівалентна шумова смуга пропускання ОЕП). Таким чином, високоомне навантаження ФД дозволяє поліпшити відношення сигнал/шум на виході ОЕП, що і використовується при побудові високоімпедансних ПрП [4, 6].

3.2 Оптоэлектронный ретранслятор (ОЕП-ЕЕП-ЕОП) [6]

Каскад ОЕП-ЕЕП-ЕОП є моделлю *оптоелектронного ретранслятора* (наприклад, проміжна підсилювальна станція О-Е-О типу аналогового ВОЛТ), рис. 3.2. Знайдемо його основні СЕП. Коефіцієнт передачі ретранслятором оптичної потужності

$$K_o = P_{o \text{ вих}}/P_{o \text{ вх}}, k_o(\text{дБ}) = 10\lg K_o,$$

де $P_{o \text{ вих}}$ і $P_{o \text{ вх}}$ – значення оптичної потужності на виході і вході відповідно. *Енергетичний потенціал* (ЕП) ретранслятора (при заданому нормами коефіцієнті помилок)

$$q_o(\text{дБ}) = p_{o \text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{o \text{ вх}}(\text{дБм}),$$

$$q_o(\text{дБ}) = k_o(\text{дБ}) = \rho_i(\text{дБ}) + k_{\text{е р}}(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}}).$$

Тут $k_{\text{е р}}(\text{дБ}) = p_{\text{е вих}}(\text{дБм}) - p_{\text{е вх}}(\text{дБм})$ – коефіцієнт передачі за потужністю ЕЕП. Якщо ЕП ретранслятора заданий, наприклад, технічними умовами, то важливо розрахувати необхідні коефіцієнти підсилення ЕЕП за потужністю $k_{\text{е р}}(\text{дБ})$ або струмом $k_i(\text{дБ})$. Отримані за допомогою співвідношень з табл. 2.1 і 2.3 формули розрахунку параметрів тракту ЕОП-ЕЕП-ЕОП приведені в табл. 3.2. Тут же

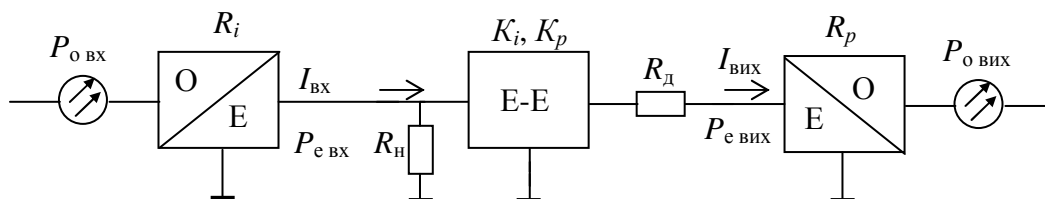


Рисунок 3.2 – Функціональна схема ретранслятора (оптоелектронний тракт ОЕП-ЕЕП-ЕОП)

представлені розраховані значення необхідних коефіцієнтів підсилення ЕЕП за потужністю і струмом, що забезпечують енергетичний потенціал ретранслятора $q_0 = 30$ дБ. На рис. 3.3, б представлені реально вимірювані діаграми рівнів потужності ретранслятора для умов приведених вище прикладів, $p_{0\text{ вх}} = -30$ дБм, $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} = 50 \text{ Ом}/50 \text{ Ом} = 1$ і $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} = 50 \text{ кОм}/50 \text{ Ом} = 10^3$.

Таблиця 3.2 – Співвідношення та результати розрахунку параметрів тракту ОЕП-ЕЕП-ЕОП

Розрахункове співвідношення		Результати розрахунку для $R_{\text{н}}/R_{\text{д}} =$	
		1	10^3
$k_o(\text{дБ}) \equiv$	$[\rho_i(\text{дБ}) + k_p(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}})]/2$	30 дБ	30 дБ
$q_o(\text{дБ}) =$	$\rho_i(\text{дБ}) + 2k_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ})$		
$k_{\Sigma p}(\text{дБ}) \geq$	$2q_o(\text{дБ}) - \rho_i(\text{дБ}) - \rho_p(\text{дБ}) - 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{д}})$	86 дБ	56 дБ
$k_i(\text{дБ}) \geq$	$[q_o(\text{дБ}) - \rho_i(\text{дБ}) - \rho_p(\text{дБ})]/2$	28 дБ	28 дБ

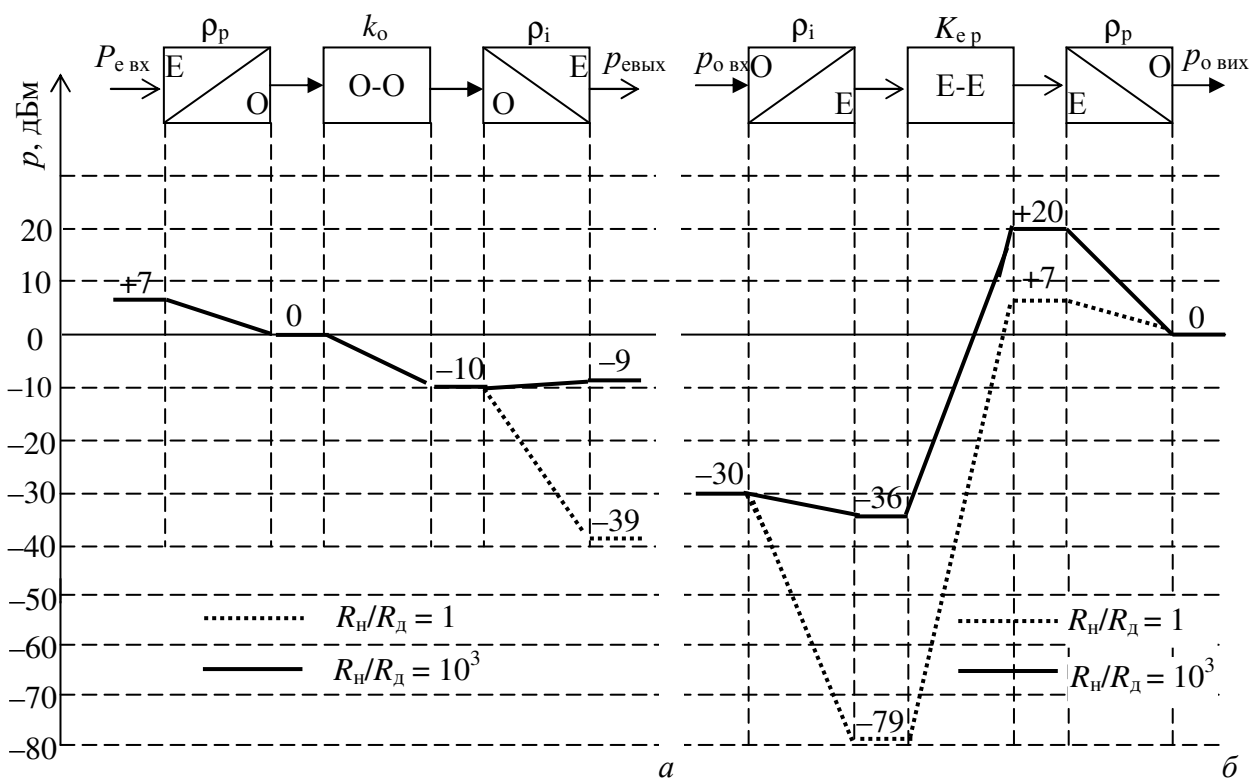


Рисунок 3.3 – Діаграми рівнів потужності оптичного лінійного тракту «точка-точка» а і оптоелектронного ретранслятора б

3.3 Лінійний тракт з ретрансляторами

Проаналізуємо ВОЛТ з топологією «точка-точка», рис. 3.4. Окрім передавальної (ЕОП) і приймальної (ОЕП) станцій він складається з n ретрансляційних ділянок, розділених $n - 1$ ретрансляторами типу ОЕП-ЕЕП-ЕОП розглянутими вище. Тут K_{oi} і $K_{o eo i}$ – коефіцієнти передачі за

потужністю i -го ООП (i -го відрізка ОВ) та i -го ретранслятора відповідно. Коефіцієнт передачі тракту за струмом

$$K_i = I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = R_p(K_{o1} \cdot K_{o2} \cdots K_{on}) (K_{oeo1} \cdot K_{oeo2} \cdots K_{oeo n-1}) R_i,$$

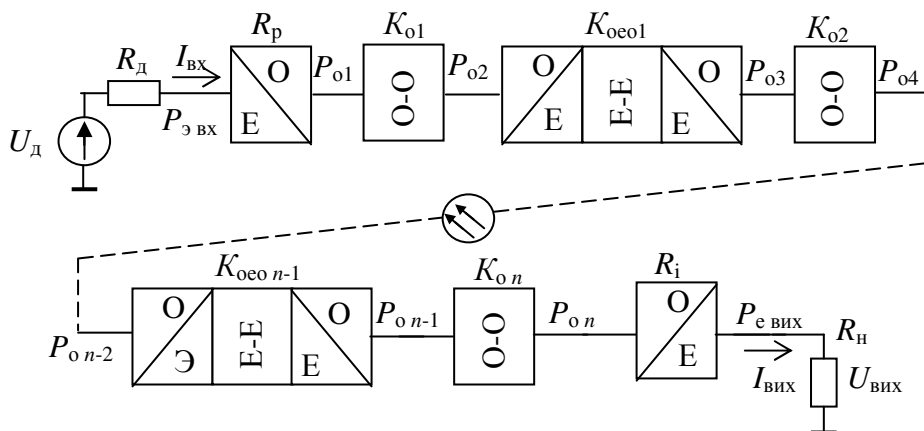
де $K_{oi} = P_{oi}/P_{oi-1}$ і $K_{oeoi} = P_{oeoi}/P_{oeoi-1}$ – коефіцієнти передачі оптичної потужності i -м ООП та i -м оптоелектронним (ОЕО) ретранслятором відповідно. Коефіцієнт передачі трактом електричної потужності

$$K_{ep} = P_{e \text{ вих}}/P_{e \text{ вх}} = (I_{\text{вих}}/I_{\text{вх}})^2 (R_H/R_D) = (K_i)^2 R_H/R_D,$$

а також її опір передачі

$$R_{\Pi} = U_{\text{вих}}/I_{\text{вх}} = K_i R_H, \text{ Ом.}$$

Розрахункові співвідношення для ВОЛТ зі схемою на рис. 3.4 зведені в табл. 3.3. У формулах табл. 3.3 перша сума враховує підсумкові втрати потужності в оптичних волокнах, а друга – загальне підсилення потужності всіма ретрансляторами. За умови точної компенсації (втрати в попередньому відрізку ОВ повністю компенсуються підсиленням в ретрансляторі) член в квадратних дужках дорівнює нулю, а розрахункові формули спрощуються (оптоелектронне коло ЕОП-ОЕП).



Таблиця 3.3 – Співвідношення для розрахунку параметрів ВОЛТ з $n - 1$ ретрансляторами

$k_{ep}(\text{дБ}) = 2\left[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{oeoi}(\text{дБ})\right] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_H/R_D)$
$k_i(\text{дБ}) = 2\left[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{oeoi}(\text{дБ})\right] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ})$
$r_{\text{пер}}(\text{дБ}) = 2\left[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{oeoi}(\text{дБ})\right] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 20\lg(R_H/R_D)$

3.4 Розрахунок шумових параметрів ВОЛТ

Проілюструємо корисність отриманих вище співвідношень для аналізу шумових параметрів ВОЛТ. Шумові властивості ЕОП на основі лазерного діода (ЛД) характеризують параметром *відносна інтенсивність шуму* RIN (relative intensity noise) [6]

$$RIN = P_{o\text{ ш}}^2 / P_{o\text{ ср}}^2 \Delta f, \text{ 1/Гц}$$

або у відносних одиницях

$$rin(\text{дБ}) = 10\lg(P_{o\text{ ш}}^2 / P_{o\text{ ср}}^2 \Delta f) = p_{o\text{ ш}}(\text{дБм}) - 2p_{o\text{ ср}}(\text{дБм}) - 10\lg f(\text{Гц}), \quad (3.1)$$

де $P_{o\text{ ш}}$ – середньоквадратичне значення потужності оптичних шуму, $P_{o\text{ ср}}$ – середнє в часі значення потужності випромінювання лазера, Вт; Δf – ширина смуги частот в якій вимірюються шум. З виразів (2.6) і (3.1) отримуємо формулу для розрахунку потужності шуму створюваного лазерним діодом в навантаженні ОЕП ($R_n = 50 \text{ Ом}$)

$$p_{e\text{ ш вих}}(\text{дБм}) = rin(\text{дБ}) + 2p_{o\text{ вих ср}}(\text{дБм}) + 10\lg \Delta f(\text{Гц}) + p_i(\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}. \quad (3.2)$$

Процедуру розрахунку внеску шумів лазера покажемо на прикладі аналогового ВОЛТ.

Приклад 3.2. Нехай ВОЛТ має наступні параметри компонентів: $R_d = R_n = 50 \text{ Ом}$; $i_{\text{вх}} = 10^{-2} \text{ А}$, $R_p = 10^{-1} \text{ Вт/А}$ (лазерний діод), $K_o = 10^{-1}$, $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$ ($p-i-n$ -фотодіод). Розрахуємо рівень потужності шумів створюваних в навантаженні ОЕП лазером, що має $RIN = 10^{-14}$, якщо $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$ (система аналогового кабельного телебачення). Підстановка даних у формулу (3.2) дає

$$p_{e\text{ ш вих}}(\text{дБм}) = -140 \text{ дБ} - 2(-10 \text{ дБм}) + 10\lg 10^9 + (-6 \text{ дБ}) - 13,01 \text{ дБ} = -89,01 \text{ дБм}.$$

Якщо рівень потужності електричного сигналу в навантаженні ОЕП $p_{e\text{ вих}} = -39 \text{ дБм}$, тоді відношення сигнал/шум, обумовлене шумами тільки ЛД $всш_{\text{ЛД}}(\text{дБ}) = p_{e\text{ вих}}(\text{дБм}) - p_{e\text{ ш вих}}(\text{дБм}) = -39 \text{ дБм} - (-89,01 \text{ дБм}) = 50,01 \text{ дБ}$.

По аналогії з електричним $всш_e$, визначимо значення оптичного $всш_o$

$$всш_o(\text{дБ}) = p_{o\text{ вх, вих}}(\text{дБм}) - p_{o\text{ ш вх, вих}}(\text{дБм}) = -[rin(\text{дБ}) + 10\lg \Delta f(\text{Гц})]/2. \quad (3.3)$$

Підстановка даних прикладу 3.2 у формулу (3.3) дає $(всш_o) = -(-140 + 10\lg 10^9)/2 = 25 \text{ дБ}$. Якщо оптичний сигнал з таким значенням $всш_o$ подається на О/Е перетворювач, то, у відповідність з правилом перерахунку, електричне $ВСШ$ за умови ідеального (що не шумить) навантаження ОЕП

$$всш_e(\text{дБ}) = 2 \cdot всш_o(\text{дБ}). \quad (3.4)$$

Для прикладу 3.2 отримуємо $всш_e = 2 \cdot 25 = 50 \text{ дБ}$. У реальному ВОЛТ необхідно враховувати тепловий шум резистора навантаження R_n і шум сигнального процесора (підсилювача), що йде за ОЕП. Потужність теплових

шумів, що створюються резистором з номіналом R_H в смузі частот Δf визначається формулою Найквіста [6]

$$P_{\text{шт}} = (4kT \cdot \Delta f / R_H) R_H = 4kT \cdot f \Delta, \text{ Вт},$$

де $k = 1,3810^{-23}$ Вт/К – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, К. Для $T = 300$ К, $f = 1$ ГГц отримуємо $P_{\text{шт}} = 1,6610^{-11}$ Вт ($p_{\text{шт}} = -77,8$ дБм). Значення $\text{всш}_{\text{е вих}} \text{ (дБ)} = p_{\text{е вих}} \text{ (дБм)} - p_{\text{шт}} \text{ (дБм)} = -39 - (-77,8) = 38,8$ дБ при $R_H = 50$ Ом. Очевидно, що при стандартному значенні опору навантаження (50 Ом) якість сигналу на виході ВОЛТ визначають не шуми ЛД ($\text{всш}_{\text{лд}} = 50$ дБ в смузі 1 ГГц), а шуми резистора навантаження малого номіналу ($\text{всш}_{R_H} = 38,8$ дБ). Для поліпшення ВСШ необхідно збільшувати номінал R_H і використовувати підсилювач з високим входним імпедансом [1, 2]. Якщо відоме значення коефіцієнта шуму електронного підсилювача $k_{\text{ш}} = \text{ВСШ}_{\text{вих}} / \text{ВСШ}_{\text{вх}}$, де $\text{ВСШ}_{\text{вх}}, \text{всш}_{\text{вх}}$ – значення ВСШ на вході і виході підсилювача відповідно, разів. При цьому ВСШ на виході ВОЛТ за наявності підсилювача після ОЕП

$$\text{ВСШ}_{\text{е ВОЛТ}} \text{ (дБ)} = \text{всш}_{\text{е вих}} \text{ (дБ)} - k_{\text{ш}} \text{ (дБ)}, \quad (3.5)$$

де $\text{всш}_{\text{е вих}}$ – значення ВСШ без підсилювача і $k_{\text{ш}} \text{ (дБ)} = 10 \lg(\text{ВСШ}_{\text{вих}} / \text{ВСШ}_{\text{вх}})$ – коефіцієнт шуму підсилювача, дБ. Наприклад, якщо застосований підсилювач з $k_{\text{ш}} = 5$ дБ, то ВСШ на виході ВОЛТ $\text{всш}_{\text{е ВОЛТ}} = 38,8 - 5 = 33,8$ дБ. Відповідна цим розрахункам діаграма, що показує зміну значення всш (дБ) на різних ділянках ВОЛТ показана на рис. 3.5, б.

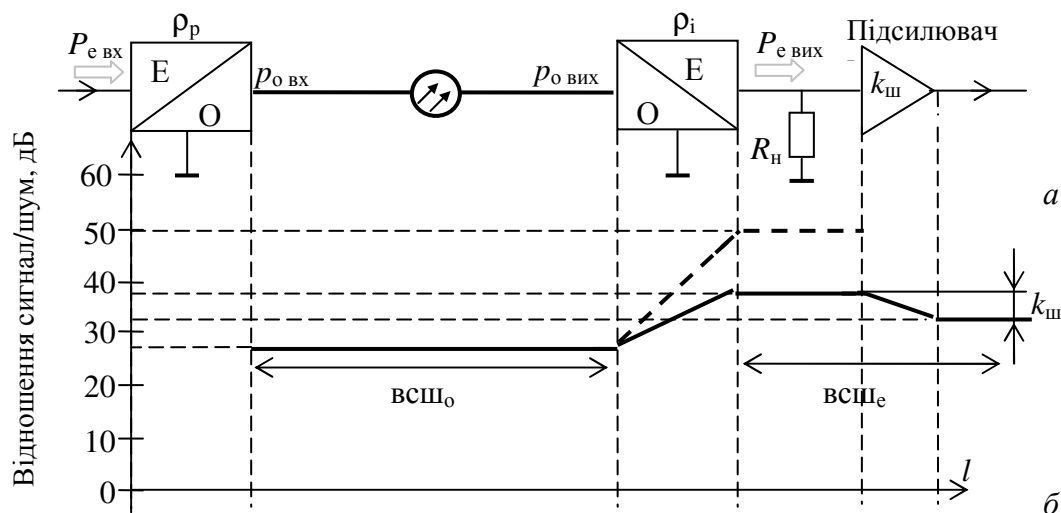


Рисунок 3.5 – Функціональна схема ОЛТ *а* і діаграма залежності всш в тракті *б* (пунктиром показано діаграму при нешумлячому навантаженні ОЕП)

4 ПРОГРАМА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ОДНОХВИЛЬОВИХ ВОЛТ

4.1 Опис програми «Power FOTL» [5]

Програма «Power FOTL» (Fiber Optic Transmission Link), складена за алгоритмом [3] і призначена для моделювання енергетичних процесів у волоконно-оптичних лінійних трактах. Вона написана на об'єктно-орієнтованій мові «Delphi 3.0» в середовищі операційної системи «Windows». Програма складається з основного файлу, що містить розрахункову та інтерфейсну частини, і файлів баз даних зі списком компонентів та їх параметрів.

Структурна схема ВОЛТ, суміщена з функціональною схемою програми «Power FOTL», приведена на рис. 4.1. Досліджувана система передачі

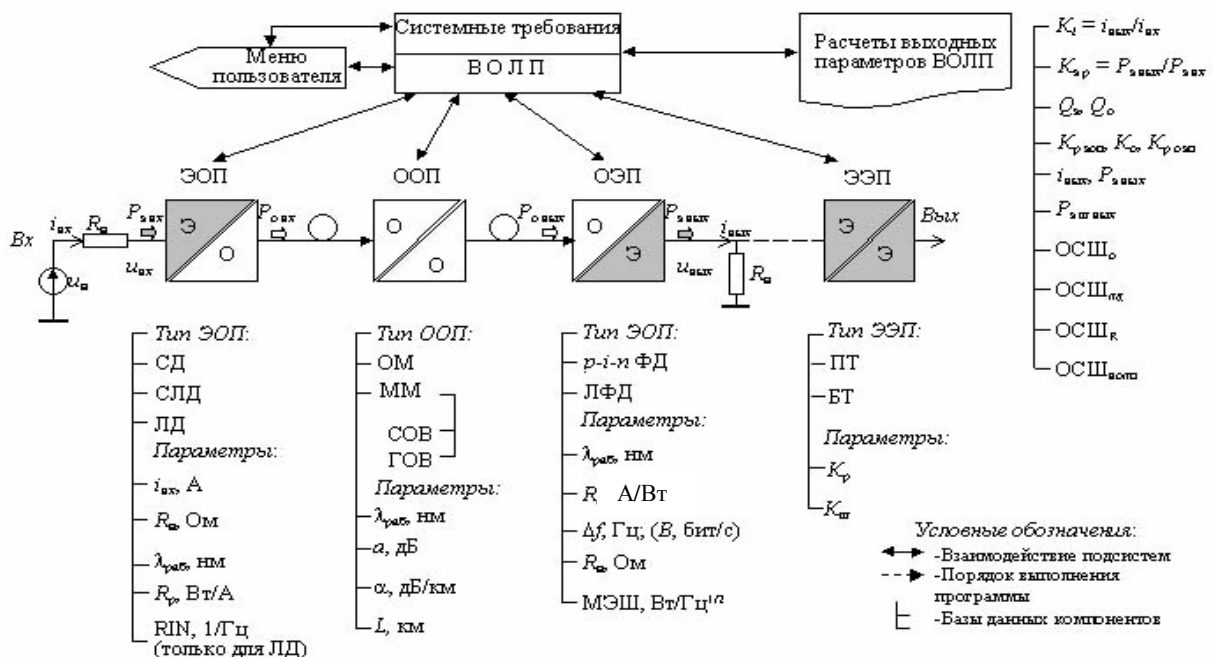


Рисунок 4.1 – Структурна схема ВОЛТ, суміщена з функціональною схемою програми «Power FOTL»

складається з чотирьох послідовно включених підсистем: електрооптичного (ЕОП), оптооптичного (ООП), оптоелектричного (ОЕП) і електроелектричного (ЕЕП) перетворювачів. Вони відповідно моделюють: *джерело випромінювання* (ДВ) – світло- (СД), суперлюмінісцентний – (СЛД) або лазерний (ЛД) діод, керований *підсилювачем накачки*; *оптичне волокно* (ОВ) одно- (ОМ) або багато- (БМ) модове із східчастим (СОВ) або градієнтним (ГОВ) профілем показника заломлення; *приймач випромінювання* (ПВ) – фотодіод (ФД) *p-i-n* або лавинного (ЛФД) типу.

Інтерфейс програми має вид стандартного вікна ОС Windows з сім'ю сторінками-вкладками: «Тип ЭОП», «Тип ООП», «Тип ОЭП», «Тип ЭЭП», «Результаты», «График 1» і «График 2». Кожна така сторінка-вкладка містить дані, що логічно пов'язані з назвою сторінки-вкладки, рис. 4.1. На сторінці-вкладці «Тип ЭОП» задається тип ДВ і його параметри: струм сигналу накачки

$I_{\text{вх}}$, ваттовий відгук R_p , опір джерела сигналу R_d і відносна інтенсивність шуму RIN (для ЛД). На сторінці-вкладці «Тип ООП» задається тип ОВ, його довжина L і коефіцієнт загасання α . На сторінці-вкладці «Тип ОЭП» задається тип ПВ, струмовий відгук R_i , темновий струм I_t , опір навантаження R_n і потужність, що еквівалентна шуму (МЄШ) [1]. На сторінці-вкладці «Тип ЭЭП» задається тип підсилювача – на польовому (ПТ) або біполярному (БТ) транзисторі, коефіцієнт передачі за потужністю K_p і коефіцієнт шуму $K_{\text{ш}}$.

Програма надає користувачеві простий інтерфейс, який дозволяє по черзі вибирати компоненти ВОЛТ, формуючи лінійний тракт, змінювати і уточнювати їх параметри. Сторінки розміщені таким чином, що користувач міг вибирати компоненти «зліва направо» йдучи від ЕОП до ОЕП. Програма має вбудованого редактора, який дозволяє поповнювати, коректувати і змінювати записи в базах даних компонентів.

В результаті роботи програми на сторінці-вкладці «Результати» (табл. 4.1) видаються наступні обчислені програмою значення параметрів в абсолютних і відносних одиницях: коефіцієнтів передачі ВОЛТ за струмом K_i і електричною потужністю $K_{\text{ер}}$, електричного Q_e та оптичного Q_o потенціалів ВОЛТ, вихідного струму $I_{\text{вих}}$ і вихідної електричної потужності $P_{\text{е вих}}$, потужності шуму на виході $P_{\text{е ш вих}}$. Розраховуються наступні значення відношення сигнал/шум (ВСШ): в оптичному тракті – всш_o ; внаслідок шумів ЛД – $\text{всш}_{\text{лд}}$; внаслідок шумів опору навантаження ПВ – всш_R ; унаслідок сумарних шумів тракту – $\text{всш}_{\text{ВОЛТ}}$. При зверненні до сторінок-вкладок «Графік 1» і «Графік 2» користувач спостерігає на екрані монітора відповідно діаграму рівнів потужності сигналу (рис. 4.2) і діаграму зміни всш (рис. 4.3) досліджуваного ВОЛТ.

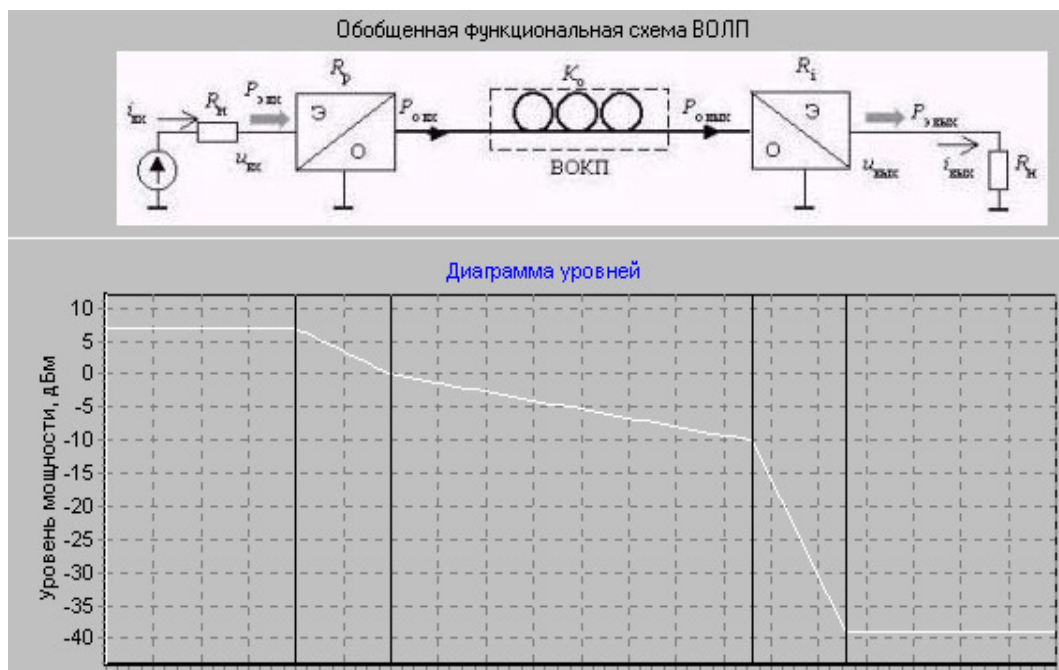


Рисунок 4.2 – Діаграма рівня потужності сигналу в лінійному тракті

4.2 Приклад моделювання ВОЛТ

Для запуску програми необхідно завантажити ОС Windows і запустити виконуваний файл «Progest1.exe». Після запуску програми з'явиться вікно з сім'ю сторінками-вкладками. Як загальносистемні параметри вибираємо довжину хвилі випромінювання $\lambda = 850$ нм і необхідну ширину смуги пропускання $f = 10^9$ Гц. На п сторінці-вкладці «тип ЕОП» вибираємо джерело випромінювання – ЛД з наступними параметрами: струм сигналу $I_{\text{вх}} = 10^{-2}$ А, опір джерела $R_{\text{д}} = 50$ Ом, ваттовий відгук $R_p = 0,1$ Вт/А, відносна інтенсивність шуму $R/N = 10^{-14}$ 1/Гц.

На сторінці-вкладці «Тип ООП» вибираємо БМ ГОВ з коефіцієнтом загасання $\alpha = 3,333$ дБ/км довжиною $L_{\text{ок}} = 3$ км. На сторінці-вкладці «Тип ОЭП» вибираємо ФД *p-i-n*-типа із струмовим відгуком $R_i = 0,5$ А/Вт, темновим струмом $I_{\text{т}} = 10^{-9}$ А, опір навантаження $R_{\text{н}} = 50$ Ом. На сторінці-вкладці «Тип ЭЭП» вибираємо підсилювач з вхідним каскадом на БТ з коефіцієнтом передачі потужності $k_p = 10$ дБ і коефіцієнтом шуму $k_{\text{ш}} = 5$ дБ.

Переходимо на сторіночку-вкладку «Результати». Після натиснення кнопки «Показати розрахунки» з'являються результати розрахунків, табл. 4.1. При зверненні до сторінок-вкладок «Графік 1» і «Графік 2» програма будує діаграми рівня потужності сигналу (рис. 4.2) і значення всш на різних ділянках ВОЛТ (рис. 4.3).

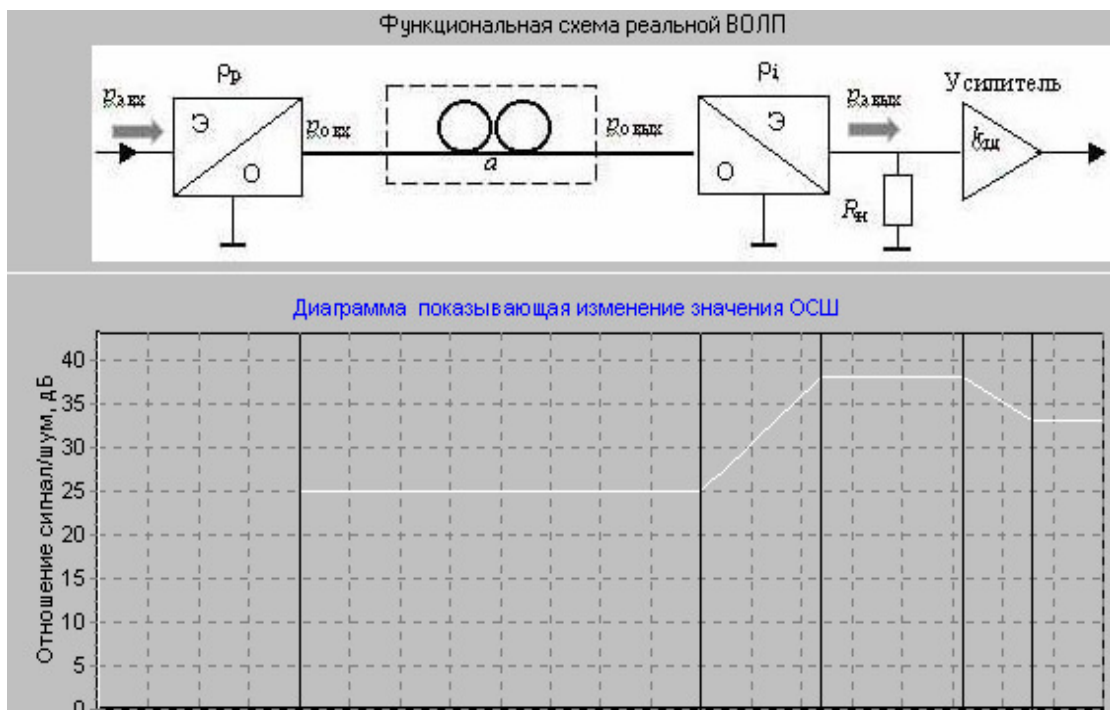


Рисунок 4.3 – Діаграма змінення відношення сигнал/шум (дБ) в лінійному тракті

Таблиця 4.1– Результатів розрахунку параметрів ВОЛТ програмою «Power FOTL»

Розрахунковий параметр	Позначення	Значення	Од. вимірювання
Коефіцієнт передачі за струмом	K_i	0,005	–
Коефіцієнт передачі за потужністю	K_p	$2,5 \cdot 10^{-5}$	–
Коефіцієнт передачі ЕОП	$K_{p \text{ еоп}}$	0,2	Вт
Коефіцієнт передачі ООП	$K_{p \text{ ооп}}$	0,1	–
Коефіцієнт передачі ОЕП	$K_{p \text{ оеп}}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	1/Вт
Струм на виході тракту	$I_{\text{вих}}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$	А
Оптичний потенціал ВОЛТ	q_o	9,999	дБ
Електричний потенціал ВОЛТ	q_e	46,0205	дБ
Рівень потужності шуму на виході	$p_{\text{ш } \epsilon \text{ вих}}$	–89,030	дБм
Відношення сигнал/шум (оптич.)	ВСШ_o	25	дБ
Відношення сигнал/шум (внаслідок ЛД)	$\text{ВСШ}_{\text{ЛД}}$	49,999	дБ
Відношення сигнал/шум (внаслідок R_n)	ВСШ_{R_n}	38,8	дБ
Відношення сигнал/шум ВОЛТ	$\text{ВСШ}_{\text{ВОЛТ}}$	33,8	дБ

Розроблена програма моделювання цифрових ВОЛТ «Power FOTL» призначена для застосування при дипломному проектуванні та виконанні магістерських робіт.

5 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ БАГАТОХВИЛЬОВИХ ВОЛТ

5.1 Аналіз параметрів передачі багатохвильових ВОЛТ

Впровадження на телекомунікаційних мережах спектрального мультиплексування каналів (wave-division multiplexing – WDM) висунуло проблему розробки методу аналізу параметрів передачі і перехідних міжканальних перешкод (ПМП) в таких системах.

Метод аналізу параметрів однохвильових ВОЛТ і оптоелектронних ретрансляторів, викладений вище, узагальнено на випадок багатохвильових (Б-ВОЛТ) зі спектральним мультиплексуванням каналів. Запропонований в [7] матричний метод аналізу дозволяє розраховувати, як параметри передачі (від електричного входу до електричного виходу тракту), так і параметри перехідних (міжканальних) перешкод на ближньому (near end crosstalk – NEXT) і дальньому (far end crosstalk – FEXT) кінцях лінії передачі.

Узагальнена структурна схема Б-ВОЛТ з конфігурацією «точка-точка» приведена на рис. 5.1. Тут на передавальному боці (станція А) знаходяться: 1) n джерел електричного сигналу (наприклад, цифрових потоків STM- N , де $N = 4, 16, 64, 256$) з внутрішнім опором $R_{д1}, R_{д2}, \dots, R_{дn}$, що створюють вхідні (модулюючи інтенсивність світла) струми $I_{вх1}, I_{вх2}, \dots, I_{вхn}$; 2) n електрооптичних перетворювачів (ЕОП_{1, 2, \dots, n}), що створюють на своїх оптичних полюсах випромінювання на довжинах хвиль $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$; 3) пристрій спектрального об'єднання (ПСО – мультиплексор) n парціальних сигналів, на виході якого утворюється груповий WDM сигнал.

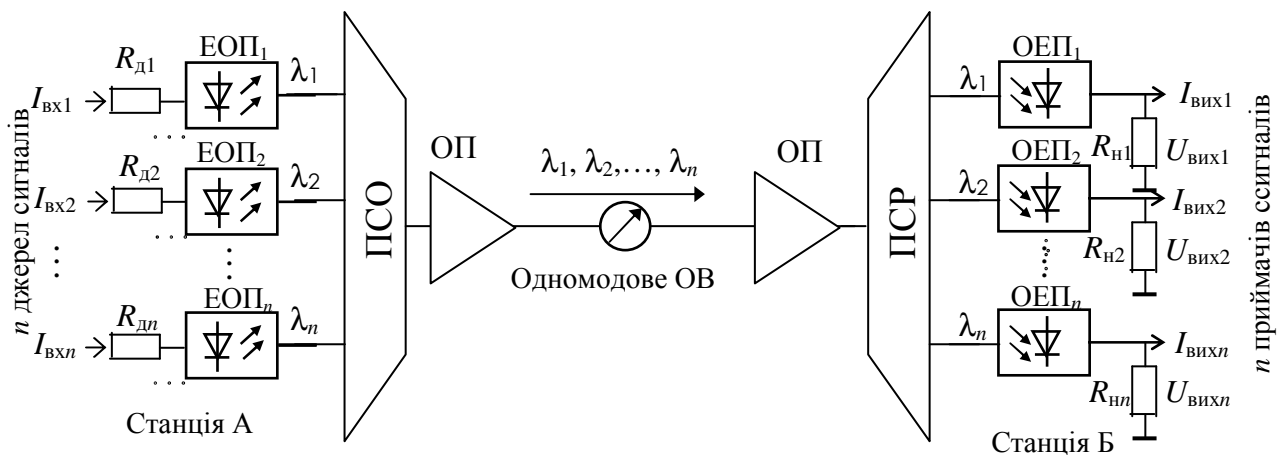


Рисунок 5.1 – Узагальнена структурна схема лінійного тракту з спектральним мультиплексуванням каналів

Цей сигнал передається по одномодовому оптичному волокну (ОВ), що є оптооптичним перетворювачем (ООП). Для компенсації загасання в ПСО, ПСР, ОВ та інших елементах тракту, довжина якого обмежена загасанням, використовуються оптичні підсилювачі (ОП). Це ще один вид ООП.

На приймальному боці (станція Б) знаходяться: 1) пристрій спектрального розділення (ПСР – демультимплексор) групового оптичного сигналу на n парціальних сигналів; 2) n оптоелектричних перетворювачів (ЕОП_{1,2, \dots, n}), що

створюють на своїх електричних полюсах прийнятий сигнал – фотострум $I_{\text{вих}1}, I_{\text{вих}2}, \dots, I_{\text{вих}n}$ або фотонапруга $U_{\text{вих}1}, U_{\text{вих}2}, \dots, U_{\text{вих}n}$, що створюється цим струмом на опорі навантаження $R_{\text{н}1}, R_{\text{н}2}, \dots, R_{\text{н}n}$.

Система з WDM є сукупністю n одноканальних ВОСП [2, 3], що використовують загальне середовище передачі. Топологія n -канального Б-ВОЛТ вимагає залучення матричного апарату аналізу. Такій мережі відповідає математична модель у вигляді твору матриць, що описують процеси перетворення енергії у відповідних компонентах, – ЕОП, ООП і ОЕП [7]. Якщо на вході мережі задані струми $I_{\text{вх}1}, I_{\text{вх}2}, \dots, I_{\text{вх}n}$, відповідні передаваним електричним сигналам, а на її виході потрібно розрахувати значення вихідних струмів $I_{\text{вих}1}, I_{\text{вих}2}, \dots, I_{\text{вих}n}$, справедливий наступний матричний запис

$$\begin{pmatrix} K_{\text{а}01} \\ K_{\text{а}02} \\ \vdots \\ K_{\text{а}0n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{\text{p}1}^2 \\ R_{\text{p}2}^2 \\ \vdots \\ R_{\text{p}n}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} K_{\text{o}11}^2 & K_{\text{o}12}^2 & \dots & K_{\text{o}1n}^2 \\ K_{\text{o}21}^2 & K_{\text{o}22}^2 & \dots & K_{\text{o}2n}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{\text{o}n1}^2 & K_{\text{o}n2}^2 & \dots & K_{\text{o}nn}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{\text{i}1}^2 \\ R_{\text{i}2}^2 \\ \vdots \\ R_{\text{i}n}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} (R_{\text{f}} / R_{\text{а}})_1 \\ (R_{\text{f}} / R_{\text{а}})_2 \\ \vdots \\ (R_{\text{f}} / R_{\text{а}})_n \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

де матриці-стовпці містять: $|K_{\text{е}0j}|$ – шукані коефіцієнти передачі електричній (індекс е) потужності сигналу по j -му каналу $K_{\text{epj}} = P_{\text{вих}j} / P_{\text{вх}j}$, де $j = 1, 2, n$; $|R_{\text{pj}}^2|$ – відомі коефіцієнти Е/О перетворення (ваттового відгуку) ЕОП, Вт/А; $|R_{\text{ij}}^2|$ – відомі коефіцієнти О/Е перетворення (струмового відгуку) ОЕП, А/Вт; $|(R_{\text{f}} / R_{\text{а}})_j|$ – відносини опору навантаження ОЕП і опори джерела сигналу ЕОП в j -му каналі. У формулі (5.1) квадратна матриця розміром $n \times n$ містить: а) діагональні елементи виду $K_{\text{o}jj} = P_{\text{o} \text{ вих}}(\lambda_j) / P_{\text{o} \text{ вх}}(\lambda_j)$ враховують оптичні втрати в j -ому каналі на довжині хвилі λ_j (з урахуванням підсилення потужності в оптичних підсилювачах); б) недіагональні елементи виду $K_{\text{o}jk} = P_{\text{o} \text{ к}}(\lambda_j) / P_{\text{o} \text{ j}}(\lambda_j)$, де $j, k = 1, 2, \dots, n$ враховують міжканальні переходи (перехід оптичної (індекс о) потужності з каналу j до каналу k). Наприклад, коефіцієнт $K_{12} = P_2(\lambda_1) / P_1(\lambda_1)$ враховує перехід оптичної потужності з каналу 1 з довжиною хвилі λ_1 в канал 2, що працює на довжині хвилі λ_2 .

5.2 Приклад розрахунку параметрів ВОЛТ з двома довжинами хвиль [8]

Як приклад розрахуємо параметри передачі і ПМП двооххвильової (робота на λ_1 і λ_2) симплексною і дуплексною ВОСП без ОП довжиною l , км. Для цього випадку вираз (5.1) спрощується

$$\begin{pmatrix} K_{\text{а}01} \\ K_{\text{а}02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{\text{p}1}^2 \\ R_{\text{p}2}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} K_{\text{o}11}^2 & K_{\text{o}12}^2 \\ K_{\text{o}21}^2 & K_{\text{o}22}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{\text{i}1}^2 \\ R_{\text{i}2}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{\text{i}1} / R_{\text{а}1} \\ R_{\text{i}2} / R_{\text{а}2} \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

Тут $K_{011} = P_{01 \text{ вих}}/P_{01 \text{ вх}}$, $A_{11} = 10\lg K_{011} = A_{\text{вн псо}} + \alpha(\lambda_1)l + A_{\text{вн пср}} - \text{втрати в оптичному каналі 1 на довжині хвилі } \lambda_1, \text{ дБ}; K_{022} = P_{02 \text{ вих}}/P_{02 \text{ вх}}$, $A_{22} = 10\lg K_{022} = A_{\text{вн псо}} + \alpha(\lambda_2)l + A_{\text{вн пср}} - \text{втрати в оптичному каналі 2 на довжині хвилі } \lambda_2, \text{ що вносяться відповідно ПСО, ОВ і УСР, дБ}; K_{012} = P_{02 \text{ вих}}/P_{01 \text{ вх}}$, $A_{12} = 10\lg K_{12} = A_{\text{пс псо}} + \alpha_{12 \text{ ов}} + A_{\text{пс пср}}$ перехідна перешкода з оптичного каналу 1 до каналу 2, дБ; $K_{021} = P_{01 \text{ вих}}/P_{02 \text{ вх}}$, $A_{21} = 10\lg K_{21} = A_{\text{пз псо}} + \alpha_{21 \text{ ов}} + A_{\text{пз пср}}$ - перехідна завада з оптичного каналу 2 до каналу 1, дБ; $A_{\text{вн псо}}$ і $A_{\text{вн пср}}$ - втрати, що вносяться ПСО та ПСР на λ_1 або λ_2 , дБ; $A_{\text{пз псо}}$ и $A_{\text{пз пср}}$ - коефіцієнти перехресного зв'язку ПСО і ПСР між портами з 1 і 2 або 2 і 1; $\alpha(\lambda_{1,2}) = P_{\text{о вих}}(\lambda_{1,2})/P_{\text{о вх}}(\lambda_{1,2})$ - коефіцієнт загасання ОВ на довжині хвилі λ_1 і λ_2 (1/км) відповідно, причому $\alpha(\lambda_{1,2}) < 0$.

З виразу (5.2) знаходимо співвідношення для розрахунку параметрів передачі в каналах 1 і 2 відповідно

$$\text{на } \lambda_1 \quad K_{\text{ep11}} = P_{\text{e1 вих}}(\lambda_1)/P_{\text{e1 вх}}(\lambda_1) = (R_{\text{p1}} \cdot A_{11} \cdot R_{\text{i1}})^2 \cdot (R_{\text{н1}}/R_{\text{д1}}), \quad (5.3)$$

$$\text{на } \lambda_2 \quad K_{\text{ep22}} = P_{\text{e2 вих}}(\lambda_2)/P_{\text{e2 вх}}(\lambda_2) = (R_{\text{p2}} \cdot A_{22} \cdot R_{\text{i2}})^2 \cdot (R_{\text{н2}}/R_{\text{д2}})$$

і перехідних (міжканальних) завад

$$\text{з каналу 1 в канал 2} \quad K_{\text{ep12}} = P_{\text{e2 вих}}(\lambda_1)/P_{\text{e1 вх}}(\lambda_1) = (R_{\text{p1}} \cdot A_{12} \cdot R_{\text{i2}})^2 \cdot (R_{\text{н2}}/R_{\text{д1}}), \quad (5.4)$$

$$\text{з каналу 2 в канал 1} \quad K_{\text{ep21}} = P_{\text{e1 вих}}(\lambda_2)/P_{\text{e2 вх}}(\lambda_2) = (R_{\text{p2}} \cdot A_{21} \cdot R_{\text{i1}})^2 \cdot (R_{\text{н1}}/R_{\text{д2}}).$$

Для зручностей розрахунку за формулами (5.2)...(5.4) зручно перейти від мультиплікативних операцій до адитивних з величинами, вираженими в логарифмічних одиницях. З урахуванням сказаного із співвідношень (5.3) отримуємо формули для розрахунку коефіцієнтів передачі за потужністю в спектральних каналах 1 і 2 відповідно

$$k_{\text{ep11}}(\text{дБ}) = 10\lg(K_{\text{ep1}}) = [\rho_{\text{p1}}(\text{дБ}) + 2a_{11}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i1}}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н1}}/R_{\text{д1}})], \quad (5.5)$$

$$k_{\text{ep22}}(\text{дБ}) = 10\lg(K_{\text{ep2}}) = [\rho_{\text{p2}}(\text{дБ}) + 2a_{22}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i2}}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н2}}/R_{\text{д2}})].$$

Із співвідношень (5.2) отримуємо формули розрахунку рівнів перехідних завад на дальньому кінці ВОЛТ для випадку, коли обидва передавальні пристрої знаходяться на станції А, а обидва приймалені пристрої – на станції Б (рис. 5.2,а)

$$\text{FEXT}_{12}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{ep12 дк}}) = -[\rho_{\text{p1}}(\text{дБ}) + 2a_{12 \text{ дк}}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i2}}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н2}}/R_{\text{д1}})], \quad (5.6)$$

$$\text{FEXT}_{21}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{ep21 дк}}) = -[\rho_{\text{p2}}(\text{дБ}) + 2a_{21 \text{ дк}}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i1}}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н1}}/R_{\text{д2}})],$$

де індекс «дк» позначає дальній кінець лінії передачі (станція Б на рис. 5.1, а), $\rho_{\text{p1,2}}(\text{дБ}) = 20\lg[R_{\text{p1,2}}(\text{Вт/А})/1 \text{ Вт/А}]$, і $\rho_{\text{i1,2}}(\text{дБ}) = 20\lg[R_{\text{i1,2}}(\text{А/Вт})/1 \text{ А/Вт}]$ згідно [5],

$a_{12 \text{ дк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн псо}}(\text{дБ}) + \alpha_2(\text{дБ/км})l(\text{км}) + a_{\text{вн пср}}(\text{дБ})$, $a_{21 \text{ дк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн псо}}(\text{дБ}) + \alpha_1(\text{дБ/км}) \cdot l(\text{км}) + a_{\text{вн пср}}(\text{дБ})$, причому $\alpha_{1,2} < 0$ дБ/км.

При повнодуплексній передачі по одному волокну на кожній із станцій встановлюється по парі приймально-передавальних пристроїв (трансиверів). В цьому випадку потрібне знати перехідні завади на ближньому кінці ВОЛТ (вплив передавального пристрою, що працює на довжині хвилі λ_1 , на приймальний пристрій, що приймає сигнал з довжиною хвилі λ_2 на станції А, і навпаки – для станції Б), рис. 5.2, б. В такій ситуації

$$\text{NEXT}_{12}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{еп}12 \text{ бк}}) = -[\rho_{\text{р}1}(\text{дБ}) + 2a_{12 \text{ бк}}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i}2}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}2}/R_{\text{д}1})], \quad (5.7)$$

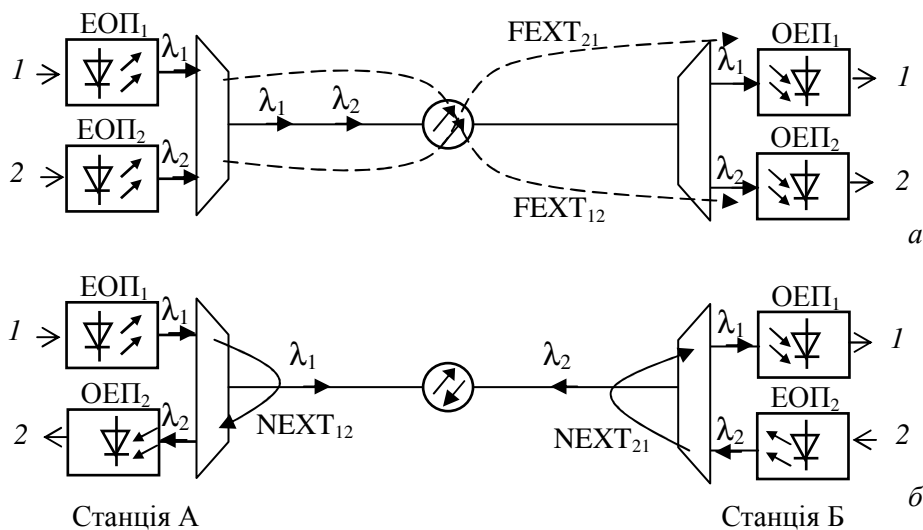


Рисунок 5.2 – До визначення перехідного впливу на дальній (FEXT) а та ближній (NEXT) б кінці ВОЛТ

$$\text{NEXT}_{21}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{еп}21 \text{ бк}}) = -[\rho_{\text{р}2}(\text{дБ}) + 2a_{21 \text{ бк}}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i}1}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}1}/R_{\text{д}2})],$$

де індекс «бк» позначає ближній кінець лінії передачі,

$$a_{12 \text{ бк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн псо}}(\text{дБ}) + a_{\text{вн пср}}(\text{дБ}), a_{21 \text{ бк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн псо}}(\text{дБ}) + a_{\text{вн пср}}(\text{дБ}).$$

Використовувані у формулах (5.5)...(5.7) значення відносних параметрів мультдексів (мутьти- та демультіплексорів) приводять виробники компонентів WDM мереж [10], а для основних типів ЕОП і ОЕП наведені в [3], що дозволяють виконувати інженерні розрахунки значень ПП і ПМП. При значному числі спектральних каналів для розрахунків доцільно використовувати спеціалізоване математичне обчислювальне середовище, наприклад, MATLAB.

Приклад 5.1. Розрахувати параметри передачі та ПМП двоканального ($\lambda_1 = 1,31$ мкм, $\alpha_1(\lambda_1) = 0,5$ дБ/км; $\lambda_2 = 1,55$ мкм, $\alpha_2(\lambda_2) = 0,25$ дБ/км) тракту довжиною 10 км. Нехай в ЕОП застосовані лазерні діоди ФП з $\rho_{\text{р}1} = \rho_{\text{р}2} = -20$ дБ, а в ОЕП – $p-i-n$ -фотодіоди з $\rho_{\text{i}1} = \rho_{\text{i}2} = -6$ дБ, $R_{\text{н}1,2}/R_{\text{д}1,2} = 10^3$; ПСО і ПСР – направлені відгалужувачі з втратами передачі 1,5 дБ і спрямованістю 40 дБ на ближньому і дальньому кінцях на обох довжинах хвиль. Підстановка цих даних у формули (5.5)...(5.7) дає наступні значення

$$k_{ep1} = -10,4 \text{ дБ}, k_{ep2} = -5,8 \text{ дБ}, \text{FEXT}_{12} = 89 \text{ дБ}, \text{FEXT}_{21} = 84 \text{ дБ}, \text{NEXT}_{12} = \text{NEXT}_{21} = 73 \text{ дБ}.$$

Викладений матричний метод дозволяє розраховувати параметри передачі і перехідні міжканальні звади в оптичних WDM мережах (без урахування нелінійних спотворень у волокні). Показано застосування методу до розрахунку параметрів передачі і міжканальних переходів потужності для двоканального одноволоконного ВОЛТ «точка-точка». Отримані аналітичні вирази для розрахунку параметрів передачі і перехідних перешкод на ближньому і дальньому кінцях WDM лінії передачі. Метод дозволяє здійснити експериментальну перевірку розрахункових значень параметрів передачі і ПМП вимірюваннями в електричній області спектру.

5.3 Моделювання багатохвильових ВОЛТ в обчислювальному середовищі SIMULINK

При моделюванні в середовищі SIMULINK [9] використовується наступний підхід. За допомогою стандартних «будівельних» блоків (наявних в середовищі SIMULINK) і нестандартних (спеціально розроблених), наприклад, ЕОП, ПСО, ОП, ПСР, ОЕП та інших, будується модель лінійного тракту системи передачі (мережі). Користувач задає параметри блоків і функціональні залежності, що існують між блоками, а програма розраховує відповідні числові матриці параметрів блоків і мережі в цілому, будує графічні залежності вихідних параметрів, здійснює оптимізацію.

Розроблена програма «SimuFOCS» дозволяє моделювати сигнальний-енергетичні та шумові параметри, а також параметри взаємного (міжканального) впливу обумовленого неідеальністю спектральних характеристик фільтрів, застосованих в пристроях спектрального мульти-демультиплексування (MUX і DEMUX на рис. 5.3).

Для демонстрації можливостей розробленої програми «SimuFOCS» нижче наведений приклад розрахунку чотирьоххвильового ВОЛТ з топологією «точка-точка» що працює на довжинах хвиль $\lambda_1 = 1530 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 1540 \text{ нм}$, $\lambda_3 = 1550 \text{ нм}$ і $\lambda_4 = 1560 \text{ нм}$. На рис. 5.3 ліворуч в квадратних рамках поміщені вхідні дані, а праворуч – в прямокутних – розраховані програмою дані (табл. 5.1). Для розрахунку вибрані наступні вхідні дані: джерела повідомлення з

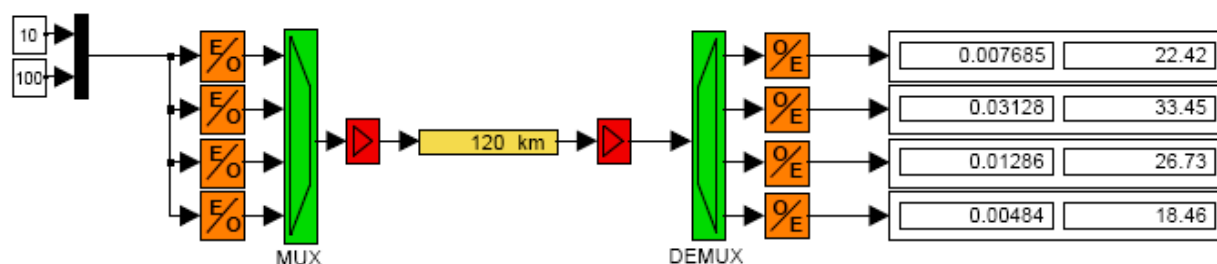


Рисунок 5.3 – Подання моделі чотирьоххвильового ВОЛТ в програмі «SimuFOCS»

внутрішнім опором $R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = R_{d4} = 50 \text{ Ом}$ створюють струми $I_{bx1} = I_{bx2} = I_{bx3} = I_{bx4} = 15 \text{ мА}$; у всіх ЕОП-ах на основі лазерних діодів $R_{p1} = R_{p2} = R_{p3} = R_{p4}$

$= 0,1$ Вт/А і відносна інтенсивність шуму $rin = -140$ дБ/Гц; ОП1 і ОП2 мають ідентичні коефіцієнти підсилення за потужністю K_p і коефіцієнт шуму $K_{ш}$ згідно даних табл. 5.1; довжина лінійного тракту дорівнює 120 км, а коефіцієнти загасання ОМ ОВ на різних довжинах хвиль відповідають даним табл. 5.1; втрати потужності в ПСО і ПСР дорівнюють 6 дБ; ОЕП-и на основі $p-i-n$ -фотодіодов мають $R_{i1} = R_{i2} = R_{i3} = R_{i4} = 0,5$ А/Вт і навантажені на резистори $R_{н1} = R_{н2} = R_{н3} = R_{н4} = 50$ Ом; температура навколишнього середовища 300 К. Розраховані програмою «SimuFOCS» подано в табл. 5.1; в останньому стовпчику записані значення відношення сигнал/шум (всш) за потужністю на виході системи.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку параметрів чотирьоххвильового ВОЛТ з WDM

Канал		ЕОП		ОП1 і ОП2		ОВ	ОЕП		всш _{вих} , дБ
n	λ , нм	$I_{вх}$, мА	R_p , Вт/А	k_p , дБ	$k_{ш}$, дБ	α , дБ/км	R_i , А/Вт	$I_{вих}$, мкА	
1	1530	15	0,1	14	5	0,223	0,5	7,7	22,42
2	1540			17		0,222		31,3	33,45
3	1550			15		0,221		12,9	26,73
4	1560			13		0,223		4,8	18,46

Результати розрахунку (табл. 5.1) свідчать про відмінність значень всш_{вих} в різних спектральних каналах. Це викликано нерівномірністю спектральних характеристик підсилення волоконно-оптичних підсилювачів [2] і вимагає встановлення в лінійному тракті спектральних еквалайзерів для вирівнювання спектральної характеристики тракту ЕОП-ОП1-ОВ-ОП2-ОЕП.

Розроблена програма «SimuFOCS» для аналізу ВОЛТ із спектральним мультиплексуванням каналів дозволяє в діалоговому режимі візуального моделювання розраховувати і будувати графіки залежностей сигнальних і шумових параметрів, оптимізувати мережу (систему) по критерію максимуму ВСШ на виході.

ВИСНОВОК

Розроблено метод розрахунку енергетичних (сигнальних і шумових) параметрів ВОЛТ. Умовою застосовності методу є безінерційність Е/О та О/Е перетворювачів і відсутність дисперсійних спотворень в ООП (останнє справедливо для одномодових середньошвидкісних ВОСП). Показано застосування методу для розрахунку параметрів передачі та шумів ВОЛТ «точка-точка» і оптоелектронних ретрансляторів. Розрахункові формули можуть бути використані і для аналізу локальних оптичних мереж довільної топології.

Розроблені програми розрахунку і моделювання цифрових однохвильових «Model FOTL» та багатохвильових «SimuFOCS» ВОЛТ дозволяють в діалоговому режимі візуального моделювання розраховувати і будувати графіки залежностей сигнальних і шумових параметрів, оптимізувати лінійний тракт за критерієм максимуму ВСШ на виході. Пропоновані програми призначені для виконання розрахунків в ході дипломного проектування, виконанні магістерських робіт.

ЛІТЕРАТУРА

1. Корнейчук В.И., Лесовой И.П. Волоконно-оптические измерения. – К.: Наукова думка, 1999.– 323 с.
2. Корнійчук В.І., Мосорін П.Д. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі.– Одеса, Друк, 2001,– 367 с.
3. Корнейчук В.И. Метод анализа оптоэлектронных цепей. Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, №3, 2001. с. 42-48.
4. Корнейчук В.И., Мосорин П.Д. Расчет энергетических параметров волоконно-оптической линии передачи. Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2001, № 2. с. 68-73.
5. Корнейчук В.И., Васильев В.А., Швайко И.Г. Моделирование энергетических процессов в волоконно-оптической линии передачи. Праці УНДІРТ, № 1 (37), Одесса, 2004. с. 51-55.
6. Kornichuk V.I., Al-Dwairi M.O. Modeling of Optoelectronic Circuits. In: 6th Jordanian International Electrical & Electronics Engineering Conference JIEEEEC-2005, V.2, November 15-17, 2005, Amman-Jordan, p. 399-403.
7. Корнейчук В.И. Метод расчета параметров передачи и переходных помех в оптических WDM сетях. Труды УНИИРТ, №2(34), Одесса, 2003, с. 74-76.
8. Климаш М., Корнійчук В. Розрахунок параметрів передачі та перехідних завад у WDM-мережах. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України, вип. 22, Київ, 2003, с. 111-115.
9. Kornichuk V.I., M.O. Al-Dwairi M.O. Modeling WDM optical networks in Simulink. In: 8-th International Conf. CADSM'2005 «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics», Lviv-Polyana, Ukraine, 23-26 February 2005, p. 198-201.
10. Стерлинг Д. Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. М: Изд. «ЛОРИ», 1998.– 288 с.
11. Черных И.В. SIMULINK: среда для создания инженерных приложений/ Под общ. ред. к.т.н. В.Г Потемкина.– М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

БТ	біполярний транзистор
БМ	– багатомодовий
ВОЛТ	– волоконно-оптичний лінійний тракт
ВОСП	– волоконно-оптична система передачі
ВР	– вертикальний резонатор (тип лазерного резонатора)
всш	– відношення сигнал/шум, дБ
ВСШ	– відношення сигнал/шум, раз
ДВ	– джерело випромінювання
Е	– електричний
Е/О	– електро/оптичне (перетворення)
Е-Е	– електроелектричний
ЕЕП	– електроелектричний перетворювач
ЕОП	– електрооптичний перетворювач
ЕП	– енергетичний потенціал
Б-ВОЛТ	– багатохвильовий ВОЛТ
О	– оптичний
О/Е	– опто/електричне (перетворення)
ОВ	– оптичне волокно
О-Е-О	– опто-електро-оптичний (ретранслятор)
ОЕП	– оптоелектричний перетворювач
ОМ	– одномодовий
О-О	– опто-оптичний
ООП	– оптооптичний перетворювач
ОП	– оптичний підсилювач
ПВ	– приймач випромінювання
ПЕШ	потужність, що еквівалентна шуму
ПМП	– перехідна міжканальна перешкода
ПП	– параметри передачі
ПП	– передавальний пристрій
ПрП	– приймальний пристрій
ПСО	– пристрій спектрального об'єднання (каналів)
ПСР	– пристрій спектрального розділення (каналів)
ПТ	– польовий транзистор
РБВ	– розподілене Брегівське відбиття (тип лазерного резонатора)
РЗЗ	– розподілений зворотній зв'язок (тип лазерного резонатора)
СЛД	– суперлюмінесцентний діод
ФД	– фотодіод
ФП	– Фабрі-Перо (тип лазерного резонатора)
«Model FOTL»	– програма розрахунку однохвильових ВОЛТ
«SimuFOCS»	– програма аналізу багатохвильових ВОЛТ в середовищі Simulink
DEMUX	– демультиплексор
FEXT	– far end crosstalk – перехідне загасання на дальньому кінці
MUX	– мультиплексор
NEXT	– near end crosstalk – перехідне загасання на ближньому кінці
<i>RIN</i>	– відносна інтенсивність шуму (лазера), 1/Гц
<i>rin</i>	– відносна інтенсивність шуму (лазера), дБ/Гц
WDM	– wave-division multiplexing – мультиплексування довжин хвиль

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И СВЯЗИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ДЕПАРТАМЕНТ СВЯЗИ**

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

КАФЕДРА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЛИНЕЙНЫХ ТРАКТОВ В О С П**

**Учебное пособие
по дипломному проектированию
и выполнению магистерских работ**

Одесса 2008

ББК 32.886.3

К 67

УДК 681.7.068:621.37/39

Корнейчук В.И. Расчет энергетических параметров линейных трактов ВОСП: Учебное пособие по дипломному проектированию и выполнению магистерских работ. Одесса: Изд. центр ОНАС им. А.С. Попова, 2008. – 37 с.: ил.

Представлен алгоритм и программы расчета энергетических параметров линейных трактов волоконно-оптических систем передачи (ВОСП). Метод расчета применим для линейных трактов с модуляцией интенсивности (мощности) оптического переносчика на передаче и прямым преобразованием на приеме в предположении безынерционности приемо-передающих устройств и отсутствия дисперсии сигналов в среде распространения.

Программы моделирования линейных трактов «Power FOTL» и «SimuFOCS» предназначены для выполнения курсовых, дипломных и магистерских работ. Приведены примеры расчета параметров передачи, шумов и межканальных переходных помех в безынерционных линейных трактах одноканальных и WDM ВОСП.

Для студентов, обучающихся по специальности «Телекоммуникации».

Ил. 17. табл. 11, список лит. 10.

Редактор В.А. Брескин, к.т.н., профессор каф. ТКС ОНАС им. А.С. Попова

Рецензент И.П. Панфилов, д. т. н., профессор ОНАС им. А.С. Попова

ОДОБРЕНО
на заседании кафедры
Телекоммуникационных систем
и рекомендовано к печати

Протокол № 2
от 15.04.2008 г.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) и анализ процессов, происходящих в ней, требует определенных сведений. Проектировщик должен знать (выбрать, рассчитать) следующее: в каком виде (аналоговом или цифровом) передаются сигналы; каковы должны быть форма и мощность импульса при цифровой передаче; максимальные скорость передачи информации и потери в оптическом линейном тракте; требуемая ширина полосы пропускания оптического волокна (ОВ); допустимые значения шумов и т. д. Часть этих данных известна, например, задается в техническом задании на проектирование; другие параметры могут быть определены при помощи соответствующих расчетов на основе математической модели ВОСП.

Корректное математическое моделирование ВОСП является достаточно сложной проблемой. Обычно используется спектральный (частотная область) метод анализа, что требует знаний (измерения, расчета, задания) передаточных характеристик и шумов как приемно-передающего оборудования, так и среды передачи сигналов – оптического волокна. Например, программа анализа цифровых ВОСП [1] рассчитывает сквозную передаточную характеристику линейного тракта, мощность шумов, отношение сигнал/шум. Для представления сигнала во временной области в ней используется обратное преобразование Фурье, после чего программа строит “глаз-диаграмму” и рассчитывает коэффициент ошибок, длину участка регенерации.

Упрощенный расчет параметров ВОСП принято выполнять в два этапа.

На первом этапе, который представлен в настоящем методическом пособии, компоненты линейного тракта принимают безынерционными (не учитываются искажения сигнала – линейные, нелинейные) и анализируют только изменения мощности электрического и оптического сигналов и среднеквадратического значения шумов при передаче сигналов по линейному тракту. При этом определяют максимальную длину участка регенерации (усиления) по мощности (затуханию) при которой обеспечивается заданное качество связи.

*На втором этапе** учитывают только параметры инерционности компонентов тракта и рассчитывают дальность передачи по допустимому (для данной системы) времени нарастания. Из двух полученных результатов выбирают меньшее значение длины участка регенерации.

В предлагаемом пособии приведен метод расчета параметров передачи и шумов линейных трактов ВОСП (первый этап анализа), который можно назвать «арифметикой оптоэлектронных соотношений». Приведенные ниже соотношения справедливы для следующих условий:

- непрерывных (немодулированных) значений электрических и оптических величин (анализ «на постоянном свете» аналогичный расчету электрических цепей «на постоянном токе»);
- средних во времени значений изменяющихся электрических и оптических величин, в частности, для случая модуляции интенсивности

* См. методическое пособие Проектування інерційних лінійних трактів ВОСП: Вид. центр ОНАЗ, 2008, 72 с.”.

(мощности) оптического переносчика на передаче и прямым преобразованием на приеме при отсутствии инерционности приемо-передающих устройств, и дисперсии среды распространения. Такие условия справедливы для следующих линейных трактов:

- цифровых среднескоростных, работающих на короткие или средние расстояния по одномодовым кварцевым оптическим волокнам (ОВ) вблизи длины нулевой дисперсии;
- пассивных оптических сетей (PON);
- оптических систем кабельного телевидения;
- локальных вычислительных сетях на основе одномодовых кварцевых или многомодовых ОВ типа кварц/полимер или полимер/полимер.

Описанные в пособии программы моделирования линейных трактов «Power FOTL» и «SimuFOCS» предназначены для выполнения расчетов на персональном компьютере в ходе дипломного проектирования и выполнения магистерских работ. Приведены примеры расчета параметров передачи, шумов и межканальных переходов в безынерционных линейных трактах одно- и многоволновых (WDM) ВОСП.

Исполняемый файл программы «Power FOTL» (790 КБ), предназначенной для расчета одноволновых ВОСП, можно записать на кафедре ТКС.

1 ЛОГАРИФМИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ

Под *волоконно-оптическим линейным трактом* (ВОЛТ) понимают комплекс технических устройств, предназначенных для передачи оптического линейного сигнала с определенной длиной волны, компенсации затухания в среде передаче, коррекции искажений сигнала, и обеспечивающих требуемое значение отношения сигнал/шум в аналоговой и коэффициента ошибок в цифровой системе передачи.

Основным параметром, измеряемым в оптическом линейном тракте, является среднее во времени или импульсное значение оптической мощности, Ватт (Вт). В оптических системах интервал значений оптической мощности весьма велик – от (1...100) мВт на передающей – до единиц мкВт и даже нВт на приемной стороне. В такой ситуации удобно перейти от мультипликативных операций (умножение и деление) с величинами, выраженными в абсолютных единицах (Вт), к аддитивным (сложение и вычитание) с величинами, выраженными в логарифмических единицах – дБ и дБм.

1.2 Логарифмическая единица «дБ»

Децибел (дБ) (десятая часть бела Б) является удобным общепринятым способом выражения в логарифмических единицах отношений напряжений, токов, мощностей. Пусть мощность равна P_1 (Вт) в одной точке и P_2 (Вт) в другой, более удаленной по линии передачи точке. Отношение P_2/P_1 является *коэффициентом передачи по мощности*. Другими словами P_2/P_1 – эффективность (КПД) передачи между этими точками или в логарифмических единицах

$$a = 10 \lg(P_2/P_1) \text{ дБ}, \quad (1.1)$$

где значения P_2 и P_1 должны быть выражены в одинаковых единицах, например, оба в Вт или оба в мВт.

Значение логарифма от числа, меньшего единицы, является отрицательным. Поэтому, если $P_2 < P_1$, то значение a (дБ) также отрицательно. Такая ситуация типична для линии передачи с потерями. Если в линейный тракт включен усилитель, то $P_2 > P_1$ и значение a (дБ) положительно. Иногда отрицательный знак опускают, когда ясно, что речь идет о потерях. Например, если коэффициент передачи изменилась на -3 дБ, то это можно назвать потерями в 3 дБ. В такой ситуации формулу (1.1) можно переписать

$$a = 10 \lg(P_1/P_2), \text{ дБ}. \quad (1.2)$$

и опустить отрицательный знак. В приведенных ниже выкладках мы будем, в основном, иметь дело с потерями, т.е. $a > 0$ дБ.

Если известны значения a (дБ) и P_1 (или P_2), то значение P_2 (или P_1) может быть найдено в единицах P_1 (или P_2) при помощи операции потенцирования

$$P_2 = P_1 \cdot 10^{a(\text{дБ})/10} \text{ или } P_1 = P_2 / 10^{a(\text{дБ})/10}.$$

Логарифмические единицы упрощают расчеты в случаях, когда компоненты системы соединены последовательно (каскадно). Пусть ВОЛТ состоит из трех компонентов – соединитель «источник-волокно» I , само

оптическое волокно 2 и соединитель «волокно-приемник» 3, рис. 1.1. Мощность света на выходе тракта находим перемножением коэффициентов передачи по мощности каждого из блоков

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{P_4}{P_3} \cdot \frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1}.$$

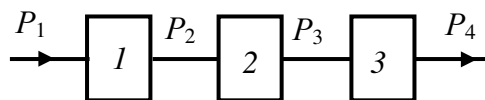


Рисунок 1.1 – Каскадное включение устройств, моделирующих оптический тракт

Соответствующие потери мощности в оптическом тракте на рис. 1.1

$$a = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_4} \right) = 10 \lg \left(\frac{P_3}{P_4} \cdot \frac{P_2}{P_3} \cdot \frac{P_1}{P_2} \right), \text{ дБ.}$$

Учитывая, что логарифм произведения равен сумме логарифмов, получим

$$a = 10 \lg(P_3/P_4) + 10 \lg(P_2/P_3) + 10 \lg(P_1/P_2) = a_3 + a_2 + a_1, \text{ дБ.} \quad (1.3)$$

Таким образом, *результатирующие потери передачи (в дБ) равны сумме потерь (в дБ) отдельных каскадно-соединенных компонентов*. Этот пример иллюстрирует простоту вычислений в логарифмических единицах.

Пример 1.1

Положим, что элементы на рис. 1.1 имеют потери 11, 6 и 3 дБ, соответственно. Найти результирующие потери каскадного соединения и мощность на выходе, если входная мощность равна 5 мВт.

Решение

Согласно уравнению (1.3) результирующие потери равны сумме $11 + 6 + 3 = 20$ дБ. Согласно формуле (1.2) ослабление 20 дБ эквивалентно отношению мощностей $P_1/P_2 = 10^{20/10} = 10^2 = 100$. Мощность на выходе $5 \text{ мВт}/100 = 0,05 \text{ мВт}$.

Пример 1.2

Коэффициент передачи системы 23 дБ. Вычислить эффективность передачи мощности.

Решение

Из формулы (1.2), используя потенцирование, находим отношение мощностей

$$P_1/P_2 = 10^{a(\text{дБ})/10}.$$

Подстановка дает $P_1/P_2 = 10^{2,3} = 199,52$. Эффективность передачи мощности $1/199,52 = 0,05$ или 0,5%.

1.2 Логарифмическая единица «дБм»

Договорились использовать логарифмические единицы дБм вместо абсолютных единиц мощности (Вт) путем сравнения произвольного значения мощности P_x с опорным, равным 1 мВт (типичное значение мощности, введенной в оптическое волокно от лазерного передатчика). Десять логарифмов отношения произвольной мощности P_x в мВт относительно мощности в 1 мВт ($1 \text{ мВт} = 10^{-3} \text{ Вт}$) обозначают термином дБм (читается «дэ-бэ-эм»)

$$p = 10 \lg [P_x(\text{мВт})/1 \text{ мВт}], \text{ дБм.} \quad (1.4)$$

Если задан уровень мощности p^* (дБм), то используя потенцирование, находим искомую мощность

$$P_x = 10^{p(\text{дБм})/10}, \text{ мВт.}$$

Итак, дБм – единица измерения *уровня мощности*.

* Мощность будем обозначать прописной буквой P (мВт), а уровень мощности – строчной p (дБм).

Пример 1.3

Светоизлучающий диод излучает мощность 2 мВт. Вычислить уровень этой мощности в дБм. Мощность СД передается через компоненты, имеющие суммарные потери 23 дБ. Вычислить мощность на выходе системы.

Решение

Излучаемая мощность равна 2 мВт. Этой мощности соответствует уровень мощности $a = 10\lg(2 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) = 10\lg 2 = 3 \text{ дБм}$. Уровень этой мощности уменьшается вследствие потерь в тракте на 23 дБ. То есть выходная мощность на 23 дБ меньше, чем входная мощность $3 \text{ дБм} - 23 \text{ дБ} = -20 \text{ дБм}$ (выходная мощность равна $P_x = 10^{-20/10} = 10^{-2} \text{ мВт} = 10 \text{ мкВт}$).

Взаимосвязь мощности (мВт) и уровня мощности (дБм) приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Взаимосвязь мощности и уровня мощности

Мощность, мВт	Уровень мощности, дБм	Мощность, мВт	Уровень мощности, дБм
10	10	0,01	-20
1	0	0,001	-30
0,5	-3	0,0001	-40
0,1	-10	0,00001	-50

1.3 «Электрические» и «оптические» дБ

Рассмотрим (рис. 1.2), как изменяются значения величин, выраженных в логарифмических единицах, в различных областях спектра электромагнитных волн [1].

1. *Электрическая область*. Пусть $P_{1э}$ и $P_{2э}$ – значения электрической (э) мощности в некотором устройстве, а их логарифмическое отношение

$$a_э = 10\lg(P_{1э}/P_{2э}), \text{ дБ.} \quad (1.5)$$

Учитывая, что ток I и напряжение U связаны с электрической мощностью известными соотношениями $P_э = I^2 R = U^2 / R$ (где R – активное сопротивление), формулу (1.5) можно записать через отношение квадратов напряжений и токов, где I_1 , U_1 , и I_2 , U_2 – токи и напряжения, соответствующие мощностям $P_{э1}$ и $P_{э2}$.

$$a_э = \left\{ \begin{array}{l} 10\lg(I_1^2 / I_2^2) = 20\lg(I_1 / I_2) \\ 10\lg(U_1^2 / U_2^2) = 20\lg(U_1 / U_2) \end{array} \right\}, \text{ дБ,} \quad (1.6)$$

2. В *оптической области спектра* есть только мощность излучения, и нет величин, эквивалентных электрическому току или напряжению. Пусть $P_{о1}$ и $P_{о2}$ – значения оптической (о) мощности в некотором устройстве. Логарифмическое отношение этих мощностей

$$a_о = 10\lg(P_{о1}/P_{о2}), \text{ дБ.} \quad (1.7)$$

В оптической системе передачи (рис. 1.2) на *передающей стороне* электрооптический преобразователь (ЭОП) линейно преобразуют электрический ток I в оптическую мощность $P_о = R_p \cdot I$, где R_p , Вт/А – ваттовый

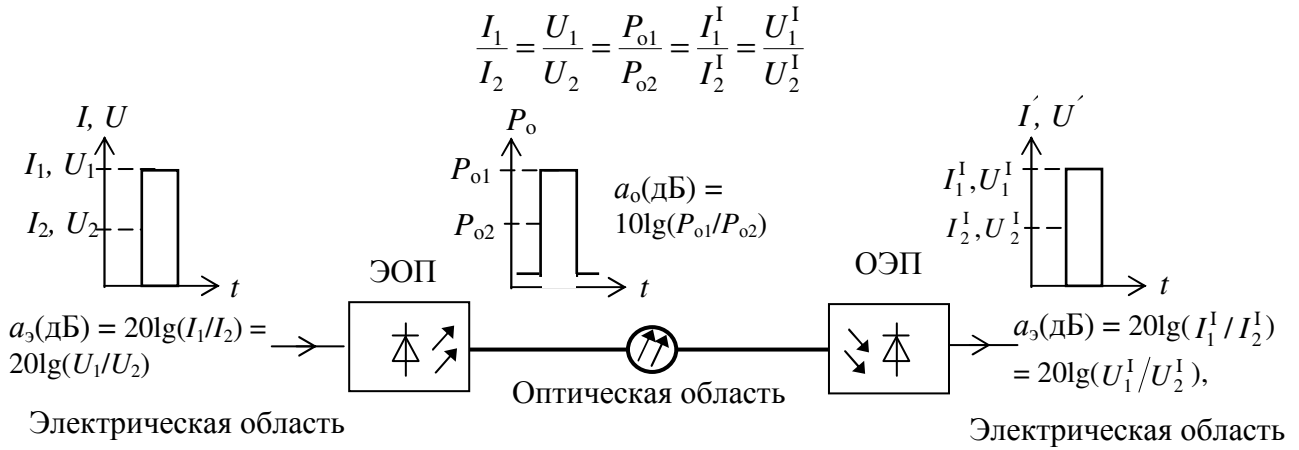


Рисунок 1.2 – К расчету логарифмических значений в электрическом и оптическом диапазоне спектра

отклик ЭОП (см. ниже). На приемной стороне оптоэлектрический преобразователь (ОЭП) линейно преобразует оптическую мощность $P_{o \text{ вых}}$ в электрический ток $I = P_{o \text{ вых}} \cdot R_i$, где R_i , А/Вт – токовый отклик ОЭП (см. ниже).

Электрические мощности $P_{\text{э1}}$ и $P_{\text{э2}}$, создаваемые в нагрузке ОЭП вследствие протекания токов $I_1 = R_i P_{o1}$ и $I_2 = R_i P_{o2}$, пропорциональны квадратам этих токов, или в логарифмических единицах

$$a_{\text{э}} = 10\lg(P_{\text{э1}}/P_{\text{э2}}) = 10\lg(R_i^2 I_1^2 / R_i^2 I_2^2) = 20\lg(I_1/I_2), \text{ дБ}. \quad (1.8)$$

Из сравнения формул (1.7) и (1.8) следует, что «электрические» дБ в два раза отличаются от «оптических» дБ, т.е.

$$a_{\text{э}}(\text{дБ}) = 2a_{\text{о}}(\text{дБ}), \quad a_{\text{о}}(\text{дБ}) = a_{\text{э}}(\text{дБ})/2. \quad (1.9)$$

Поясним полученные соотношения на следующих примерах.

Пример 1.4. Рассмотрим передачу одинаковых электрических сигналов сначала по электрическому (рис. 1.3), а затем по оптическому (рис. 1.4) линейному тракту. Пусть на электрических входах этих трактов присутствуют два значения тока, например, ток импульсного сигнала $I_{\text{с}}$ и ток шума со среднеквадратическим значением $I_{\text{ш}}$. В цифровой системе это могут быть токи, соответствующие передаче логических символов 1 и 0. Для простоты примем, что отношение сигнал/шум (ОСШ) = $I_{\text{с}}/I_{\text{ш}} = 2/1$ или в логарифмических единицах $\text{осш} = 20\lg \text{ОСШ} = 20\lg(2/1) = 6 \text{ дБ}$. Отношение электрических мощностей, создаваемых этими токами, равно 4:1. В логарифмических единицах это соответствует $\text{осш} = 10\lg(4/1) = 6 \text{ дБ}$.

Решение.

А. При передаче по электрическому линейному тракту (рис. 1.3) без собственных шумов значение ОСШ = 2/1 (в разах) и в логарифмических единицах $\text{осш} = 20\lg(2/1) = 6 \text{ дБ}$ не изменяется – соответствующие диаграммы имеют вид прямой линии.

Б. В случае передачи этих же сигналов по оптическому линейному тракту (рис. 1.4) входные токи в ЭОП линейно преобразуются в оптические мощности, так что сохраняется отношение оптических мощностей 2:1 в среде передачи (волокне). В логарифмических единицах это соответствует $\text{осш} = 10\lg(2/1) = 3 \text{ дБ}$. На выходе волокна оптические мощности в ОЭП линейно преобразуются в электрические токи. Графическая иллюстрация этого примера приведена на рис. 1.4.

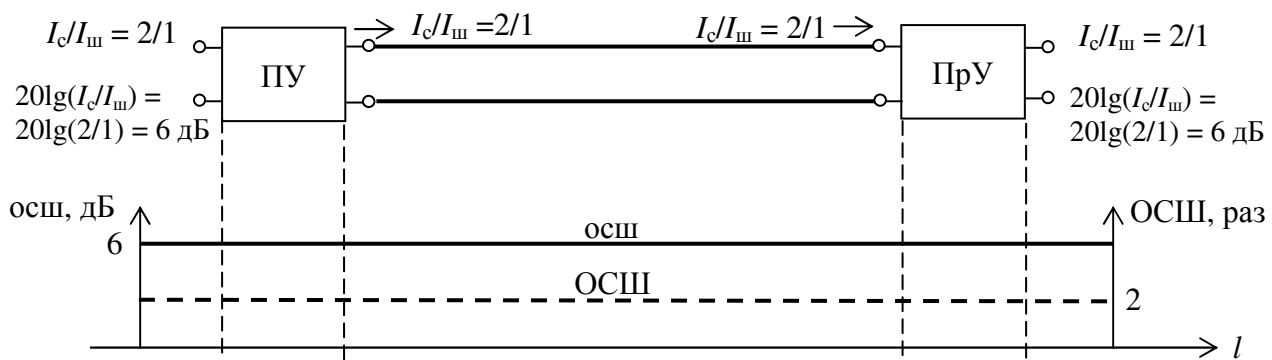


Рисунок 1.3 – Схема электрического линейного тракта (вверху) и диаграмма (внизу), изменения ОСШ (раз) и осш (дБ) в идеальном тракте без собственных шумов для случая, когда на входе $I_c/I_{ш} = 2/1$. Здесь ПУ и ПрУ – передающее и приемное устройство соответственно

Из диаграммы на рис. 1,4, б следует, что при передаче по ВОЛТ без собственных шумов значение $I_c/I_{ш}$ в разях не изменяется (чего и следовало ожидать). Логарифмическая диаграмма (рис. 1.4, в) имеет вид ломаной линии. При переходе из электрической области спектра в оптическую значения осш (дБ) уменьшаются в два раза, а при обратном переходе (из оптической в электрическую) – удваиваются.

Подчеркнем, что в реальных трактах передачи компоненты вносят собственные шумы, и аналогичные диаграммы будут иметь спадающий характер (ОСШ будет уменьшаться).

Вывод. При переходе от электрической области к оптической логарифмические значения ослабления (усиления) необходимо уменьшить вдвое, а при переходе из оптической области в электрическую – их необходимо удвоить.

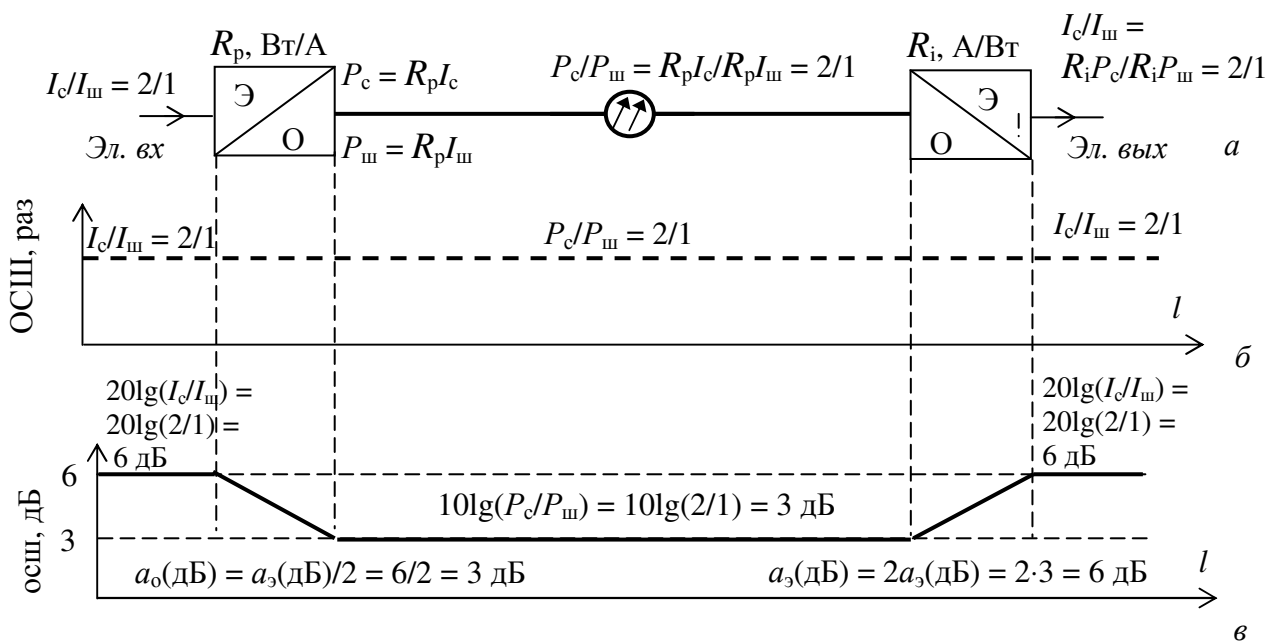


Рисунок 1.4 – Схема оптического линейного тракта а и диаграммы изменения ОСШ (раз) б и осш (дБ) в для идеального тракта без собственных шумов для случая, когда на входе $I_c/I_{ш} = 2/1$

Пример 1.5. Коэффициент затухания α цепи коаксиального или симметричного кабеля выражается в «электрических» дБ/км, а оптического – в «оптических» дБ/км. Рассчитаем значение α электрического (с отношением $U_1/U_2 = 10/1$) и оптического (с отношением $P_{o1}/P_{o2} = 10/1$) кабелей, где U_1 и U_2 – напряжения, а P_{o1} и P_{o2} – мощности в начале и конце обоих кабелей длиной 1 км.

Решение.

Для электрического кабеля $\alpha_e = 20\lg(U_1/U_2) = 20\lg(10/1) = 20$ дБ/км ($\alpha_e = 10\lg(U_1^2/U_2^2) = 10\lg(100/1) = 20$ дБ/км). Для оптического кабеля $\alpha_o = 10\lg(P_{o1}/P_{o2}) = 10\lg(10/1) = 10$ дБ/км. Вывод – электрический кабель с $\alpha_e = 20$ дБ/км эквивалентен по потерям мощности оптическому кабелю с $\alpha_o = 10$ дБ/км. Приходим к ожидаемому (формула (1.9)) результату – $\alpha_o(\text{дБ/км}) = \alpha_e(\text{дБ/км})/2$.

1.4 Правила выполнения расчетов в логарифмических единицах [2]

1. (Тривиальное.) Значения величин, выраженных в дБ или дБм, *нельзя перемножать и делить, а можно только суммировать и вычитать*.

2. Результат с суммирования или вычитания двух или более значений величин, выраженных в дБ, например, a и b , всегда имеет размерность дБ (см. формулу (1.3 и пример 1.1))

$$\pm a(\text{дБ}) \pm b(\text{дБ}) = \pm c(\text{дБ}).$$

3. Результат с вычитания двух значений a и b уровней мощности, выраженных в дБм, имеет размерность дБ

$$a(\text{дБм}) - b(\text{дБм}) = \pm c(\text{дБ}).$$

Пример 1.6. Мощность передающего устройства $P_1 = 1$ мВт, чувствительность приемного устройства $P_2 = 1$ мкВт = 0,001 мВт. Определить бюджет мощности этой аппаратуры.

Решение. Уровни мощности передающего и приемного устройства соответственно равны $a = 10\lg 1 = 0$ дБм, $b = 10\lg 0,001 = -30$ дБм. Бюджет мощности аппаратуры $c = a - b = 0 \text{ дБм} - (-30 \text{ дБм}) = 30 \text{ дБм} \equiv 30 \text{ дБ}$.

Проверка. $c = a(\text{дБм}) - b(\text{дБм}) = 10\lg(1 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}/1 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}) + 10\lg(1 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}) - 10\lg(0,001 \text{ мВт}) = 10\lg(1 \text{ мВт}/0,001 \text{ мВт}) = 10\lg(1/0,001) = 10\lg 10^3 = 30 \text{ дБ}$.

4. Суммирование уровней мощности, выраженных в дБм, противоречит физическому смыслу. Покажем это на следующем примере.

Пример 1.7. На каждый из двух входных полюсов оптического сумматора (например, разветвителя Y-типа) подаются мощности $P_1 = P_2 = 10$ мВт. Рассчитать мощность (мВт) и уровень мощности (дБм) на выходе сумматора.

Решение. Очевидно, следует ожидать на выходе сумматора $P_3 = P_1 + P_2 = (10 + 10) \text{ мВт} = 20 \text{ мВт}$. Попытаемся рассчитать уровень мощности на выходе сумматора, пользуясь единицами дБм. Уровни мощности на каждом из входных полюсов сумматора согласно соотношению (1.4) $a = b = 10\lg 10 = 10$ дБм. Формальный расчет уровня мощности на выходном полюсе сумматора дает $c = a + b = 10 \text{ дБм} + 10 \text{ дБм} = 20 \text{ дБм}$. Потенцированием находим соответствующую мощность $P_3 = 10^{c(\text{дБм})/10} = 10^{20/10} = 10^2 \text{ мВт} = 100 \text{ мВт}$!!! Этот, явно ошибочный результат, объясняется тем, что аддитивной операции суммирования величин, выраженных в логарифмических единицах, соответствует мультипликативная операция умножения величин, выраженных в физических единицах, а это противоречит условию задачи – суммирование мощностей.

Проверка. Мощность на выходе идеального сумматора $P_3 = P_1 + P_2 = (10 + 10) \text{ мВт} = 20 \text{ мВт}$. Уровень мощности на выходе сумматора $c = 10\lg[P_3(\text{мВт})] = 10\lg(20) = 10\lg(2 \cdot 10) = 10\lg 2 + 10\lg 10 = 3 \text{ дБм} + 10 \text{ дБм} = 13 \text{ дБм}$ (правильный результат).

Примечание. Операция суммирования значений в логарифмических единицах дБм соответствует операции умножения физических величин (устройство умножения). В оптических (физических) системах есть устройства, осуществляющие умножение и деление напряженностей электромагнитного поля, но нет физических устройств, осуществляющих перемножение мощностей.

5. Результат с суммирования или вычитания двух или больше значений величин, одни из которых выражены в дБм, а другие – в дБ, всегда имеет размерность дБм,

$$\pm a(\text{дБм}) \pm b(\text{дБ}) = \pm c(\text{дБм}).$$

Пример 1.8. Излучение лазера мощностью $P_1 = 2 \text{ мВт}$ вводится в оптическое волокно (ОВ) с коэффициентом затухания $\alpha = 0,2 \text{ дБ/км}$. Рассчитать уровень мощности на выходе ОВ длиной $l = 100 \text{ км}$.

Решение. Уровень мощности лазера $a = 10\lg 2 = 3 \text{ дБм}$. Ослабление (уменьшение мощности) света в ОВ $b = \alpha l = 0,2 \text{ дБ/км} \cdot 100 \text{ км} = 20 \text{ дБ}$. Уровень мощности на выходе ОВ $c = a - b = 3 \text{ дБм} - 20 \text{ дБ} = -17 \text{ дБм}$.

Проверка. Ослаблению в ОВ в 20 дБ соответствует коэффициент передачи по мощности 10^{-2} . Мощность на выходе ОВ $2 \text{ мВт} \times 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ мВт}$. Уровень мощности на выходе $c = 10\lg 2 \cdot 10^{-2} = 10\lg 2 - 10\lg 10^{-2} = 3 - 20 = -17 \text{ дБм}$ (правильный результат).

Пример 1.9. Излучение лазера мощностью $P_1 = 1 \text{ мВт}$ усиливается в оптическом усилителе с коэффициентом усиления по мощности 100 раз. Рассчитать уровень мощности на выходе этого передающего устройства.

Решение. Уровень мощности лазера $a = 10\lg 1 = 0 \text{ дБм}$. Усиление оптического усилителя $b = 10\lg 100 = 10\lg 10^2 = 20 \text{ дБ}$. Уровень мощности на выходе передающего устройства $c = a + b = 0 \text{ дБм} + 20 \text{ дБ} = 20 \text{ дБм}$.

Проверка. Мощность на выходе передающего устройства $1 \text{ мВт} \times 100 = 100 \text{ мВт}$. Уровень мощности $c = 10\lg 100 = 10\lg 10^2 = 20 \text{ дБм}$ (правильный результат).

Пример 1.10. Рассчитать коэффициент передачи по мощности идеального (без вносимых потерь) звездообразного разветвителя типа $1 \times N$. Мощность, поступающая на входной порт, делится в равной мере между N выходными портами.

Решение. Коэффициент передачи по мощности звездообразного разветвителя $1 \times N$ $a = 10\lg(N)$ и его значение для $N = 4 \dots 128$ приведено в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Зависимость коэффициента передачи по мощности от числа выходных портов

N	4	8	16	32	64	128
$a, \text{ дБ}$	6	9	12	15	18	21

2 МОДЕЛИ КОМПОНЕНТОВ ВОЛТ

2.1 Основные компоненты ВОЛТ

Для передачи электрических сигналов по оптическим волокнам (ОВ) применяют волоконно-оптические линейные тракты (ВОЛТ), рис. 2.1.

Основными функциональными компонентами ВОЛТ являются: а) электрооптический (Э/О) преобразователь 2 – источник излучения (ИИ); б) среда передачи в виде оптического волокна 3; в) оптоэлектрический (О/Э) преобразователь 4 – приемник излучения (ПИ). Передающее устройство (ПУ) 5 состоит из сигнального процессора (усилителя) 1 и ИИ 2, а приемное устройство (ПрУ) 6 – из ПИ 4 и сигнального процессора (усилителя, регенератора) 1. В протяженных ВОЛТ устанавливают ретрансляторы 7 О-Э-О-типа, состоящие из трех основных блоков – ПрУ 6, сигнального процессора 1 (усилителя в аналоговых, регенератора в цифровых системах) и ПУ 5. В современных ВОЛТ также применяют оптические усилители – ретрансляторы О-типа (усиливают оптический сигнал без преобразования в электрический, но и без регенерации).

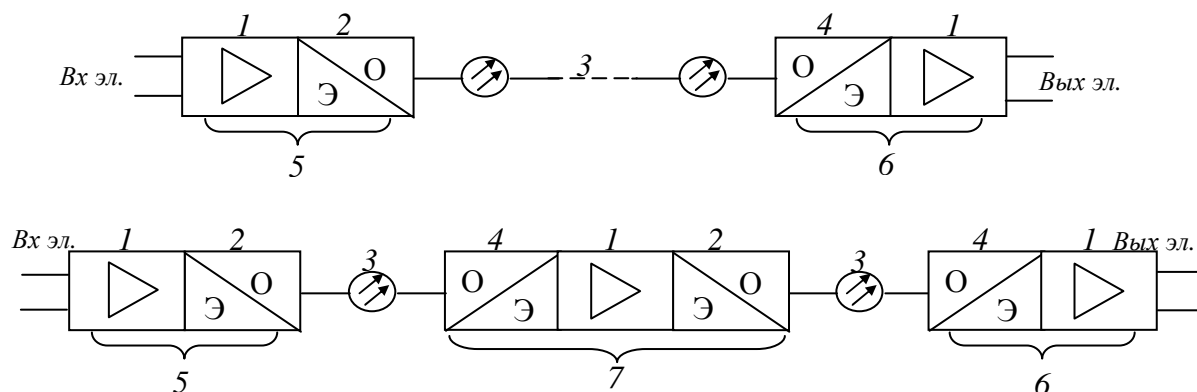


Рисунок 2.1 – Структурные схемы и основные компоненты ВОЛТ: 1 – сигнальный процессор (усилитель), 2 – источник излучения (Э/О преобразователь), 3 – оптическое волокно, 4 – приемник излучения (О/Э преобразователь), 5 – передающее устройство, 6 – приемное устройство, 7 – ретранслятор О-Э-О типа

Для удобства анализа параметров компонентов ВОЛТ представим их в виде функциональных узлов, осуществляющих соответственно Э/О, О/Э, О-О и Э-Э преобразования энергии переносчика информации, имеющего электрическую (Э) или оптическую (О) природу, рис. 2.2. В *оптоэлектронных преобразователях* – Э/О (передающее устройство) и О/Э (приемное устройство) – происходит перенос спектра передаваемого сигнала из Э- в О-область и наоборот. В *оптических двухполюсниках* типа О-О (оптическое волокно, оптический усилитель, транспондер и др.) и *электрических двухполюсниках* типа Э-Э (сигнальный процессор) спектральное преобразование отсутствует, а изменяются значения параметров оптического и электрического переносчика соответственно.

Ниже представлен метод анализа параметров оптических линейных трактов ВОСП [3]. Приведенные соотношения справедливы для следующих условий: 1) непрерывных (немодулированных) значений электрических и оптических величин (анализ «на постоянном свете», аналогичный анализу

электрических цепей «на постоянном токе»); 2) средних во времени значений изменяющихся электрических и оптических величин, в частности, для случая модуляции интенсивности (мощности) оптического переносчика на передаче и прямым преобразованием на приеме при отсутствии и инерционности приемопередающих устройств, и дисперсии среды распространения.

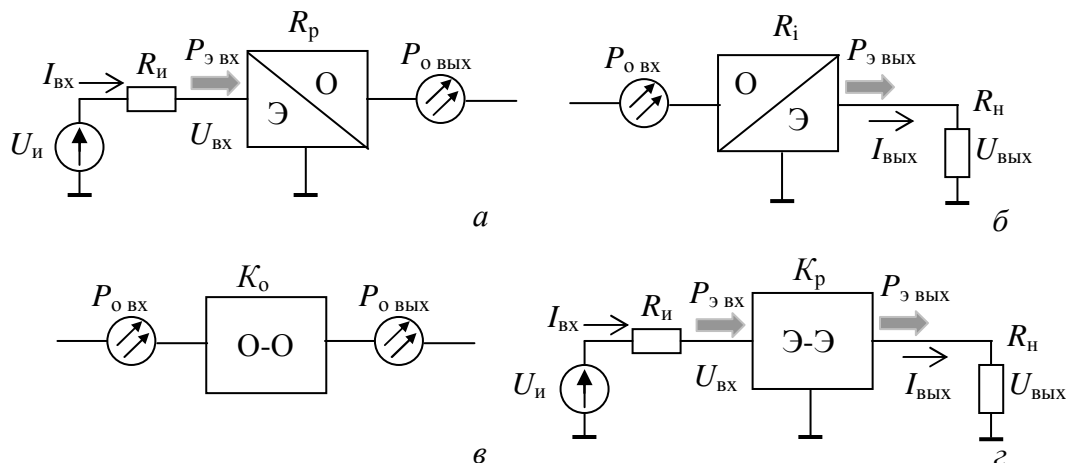


Рисунок 2.2 – Условные графические обозначения компонентов ВОЛТ: оптоэлектронных (электро/оптического *a*, опто/электрического *б*), опто-оптического *в* и электро-электрического *г*, где $U_{и}$ и $R_{и}$ – напряжение и сопротивление источника сигнала соответственно, $R_{н}$ – сопротивление нагрузки (остальные пояснения см. в тексте)

2.2 Электрооптический преобразователь (ЭОП)

Для ЭОП на рис. 2.2,*a* приняты обозначения: $U_{вх}$, $I_{вх}$, $P_{э вх}$ – напряжение, ток и мощность электрического сигнала на входе ЭОП;

$$R_p(\text{Вт/А}) = \Delta P_{о вх}(\text{Вт})/\Delta I_{вх}(\text{А}), \quad \rho_p(\text{дБ}) = 20 \lg[R_p(\text{Вт/А})/1 \text{ Вт/А}] \quad (2.1)$$

– *ваттовый отклик** ЭОП-а с учетом эффективности ввода мощности света в ОВ, где $\Delta P_{о вх}$ – приращение оптической мощности на выходном оптическом полюсе ЭОП, вызванное приращением электрического тока $\Delta I_{вх}$ на его входном электрическом полюсе. Индексы «э» и «о» указывают на принадлежность параметра к электрической и оптической областям спектра соответственно. Далее наряду с физическими единицами (А, В, Вт, Ом) будут использоваться логарифмические – дБм, дБ. Первые будем обозначать прописными, а вторые – строчными буквами. Например, в выражении $p_{э вх, вых}(\text{дБм}) = 10 \lg[P_{э вх, вых}(\text{мВт})/1 \text{ мВт}]$, $P_{э вх, вых}$ и $p_{э вх, вых}$ – мощность и уровень мощности электрического сигнала на входе (выходе) соответственно. Для ЭОП с учетом соотношений (2.1), получаем

$$P_{э вх}(\text{Вт}) = I_{вх}^2(\text{А}) R_{и}(\text{Ом}), \quad P_{о вх}(\text{Вт}) = I_{вх}(\text{А}) R_p(\text{Вт/А}),$$

$$p_{о вх}(\text{дБм}) = [p_{э вх}(\text{дБм}) + \rho_p(\text{дБ}) - r_{и}(\text{дБ}) + 30 \text{ дБ}]/2, \quad (2.2)$$

$$p_{э вх}(\text{дБм}) = 2p_{о вх}(\text{дБм}) - \rho_p(\text{дБ}) + r_{и}(\text{дБ}) - 30 \text{ дБ}, \quad (2.3)$$

где $r_{и}(\text{дБ}) = 10 \lg[R_{и}(\text{Ом})/1 \text{ Ом}]$. Из соотношения (2.3) следует правило пересчета значений параметров в логарифмических единицах при переходе из электрической (э) в оптическую (о) область спектра

* Другие названия – наклон ваттамперной характеристики [2], дифференциальная эффективность [3].

$$\text{дБ}_3 = 2 \times \text{дБ}_0, \text{дБМ}_3 = 2 \times \text{дБМ}_0.$$

В табл. 2.1 приведены расчетные выражения для трех значений $R_{\text{и}} = 50 \text{ Ом}$ и 75 Ом (цифровые и аналоговые ВОЛТ соответственно) и $R_{\text{и}} = 1000 \text{ Ом}$ при котором формулы (3.2) и (3.3) упрощаются.

Таблица 2.1 – Соотношения для расчета параметров ЭОП

Сопротивление источника $R_{\text{и}}, \text{Ом}$	Оптический полюс: $P_{\text{о вых}} (\text{дБм}) =$	Электрический полюс: $P_{\text{э вх}} (\text{дБм}) =$
50	$[P_{\text{э вх}} (\text{дБм}) + \rho_{\text{р}} (\text{дБ})]/2 + 6,05 \text{ дБ}$	$2P_{\text{о вых}} (\text{дБм}) - \rho_{\text{р}} (\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}$
75	$[P_{\text{э вх}} (\text{дБм}) + \rho_{\text{р}} (\text{дБ})]/2 + 5,625 \text{ дБ}$	$2P_{\text{о вых}} (\text{дБм}) - \rho_{\text{р}} (\text{дБ}) - 11,25 \text{ дБ}$
1000	$[P_{\text{э вх}} (\text{дБм}) + \rho_{\text{р}} (\text{дБ})]/2$	$2P_{\text{о вых}} (\text{дБм}) - \rho_{\text{р}} (\text{дБ})$

Значение $R_{\text{р}}$ не всегда указывает изготовитель ИИ. Оно может быть рассчитано по паспортным или экспериментальным данным по формуле (2.1), если известна (измерена) мощность излучения, введенная в одно- (ОМ) или многомодовое (ММ) ОВ. В табл. 2.2 приведены значения $R_{\text{р}}$ и $\rho_{\text{р}}$ основных типов полупроводниковых ОЭП и ОВ на длине волны 1300 нм [4, 5]. Здесь использованы следующие аббревиатуры для обозначения типа лазерного резонатора: ФП – Фабри-Перо, РОС – распределенная обратная связь, РБО – распределенное Брэгговское отражение, ВР – вертикальный резонатор.

Таблица 2.2 – Значения коэффициентов Э/О преобразования полупроводниковых ЭОП [6]

Тип ИИ и ОВ	Светодиод + ММ/ОМ волокно		Лазерный диод + ОМ волокно			
	поверхностный	торцевой	Ф-П	РОС	РБО	ВР
$R_{\text{р}}, \text{Вт/А}$	0,00025/0,000013	0,0004/0,00013	0,1...0,2	0,07	0,1	0,5
$\rho_{\text{р}}, \text{дБ}$	-72/-97,5	-68/-77,5	-20...-14	-23	-20	-6

Для ЭОП формально может быть введен коэффициент передачи по мощности (с преобразованием спектра) $K_{\text{р эоп}} = P_{\text{о вых}} (\text{Вт})/P_{\text{э вх}} (\text{Вт}) = R_{\text{р}} (\text{Вт/А})/U_{\text{вх}} (\text{В})$. Очевидно, что между $K_{\text{р эоп}}$ и $U_{\text{вх}}$ имеется обратно пропорциональная зависимость. Коэффициент передачи по мощности в относительных единицах

$$k_{\text{р эоп}} (\text{дБ}) = [\rho_{\text{р}} (\text{дБ}) - u_{\text{вх}} (\text{дБ})]/2, \text{ где } u_{\text{вх}} (\text{дБ}) = 20 \lg [U_{\text{вх}} (\text{В})/1 \text{ В}]. \quad (2.4)$$

Пример 2.1. Для лазерного диода типа Фабри-Перо $\rho_{\text{р}} = -20 \text{ дБ}$ при $R_{\text{и}} = 50 \text{ Ом}$, $U_{\text{вх}} = 0,5 \text{ В}$ ($u_{\text{вх}} = -6 \text{ дБ}$) находим $k_{\text{р эоп}} = -7 \text{ дБ}$ (КПД = 20%).

2.3 Оптоэлектрический преобразователь (ОЭП)

Для ОЭП на рис. 2.2,б приняты обозначения: $P_{\text{о вх}}$ – среднее во времени значение мощности оптического сигнала на входе;

$$R_i (\text{А/Вт}) = \Delta I_{\text{вых}} (\text{А})/\Delta P_{\text{о вх}} (\text{Вт}), \rho_i (\text{дБ}) = 20 \lg [R_i (\text{А/Вт})/1 \text{ А/Вт}] \quad (2.5)$$

– дифференциальный токовый отклик (с учетом эффективности вывода света из ОВ), равный приращению тока $\Delta I_{\text{вых}}$ на выходном полюсе, вызванному приращением оптической мощности $\Delta P_{\text{о вх}}$ на его входном полюсе; $U_{\text{вых}}, I_{\text{вых}}$ и

$P_{\text{э вых}}$ – соответственно напряжение, ток и мощность электрического сигнала на выходе; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки. Для ОЭП с учетом соотношений (2.5)

$$I_{\text{вых}} (\text{А}) = P_{\text{о вх}} (\text{Вт}) R_i (\text{А/Вт}), P_{\text{о вх}} (\text{Вт}), P_{\text{э вых}} (\text{Вт}) = I_{\text{вых}}^2 (\text{А}) R_{\text{н}} (\text{Ом}),$$

$$p_{\text{э вых}} (\text{дБм}) = 2p_{\text{о вх}} (\text{дБм}) + \rho_i (\text{дБ}) + r_{\text{н}} (\text{дБ}) - 30 \text{ дБ}, \quad (2.6)$$

$$p_{\text{о вх}} (\text{дБм}) = [p_{\text{э вых}} (\text{дБм}) - \rho_i (\text{дБ}) - r_{\text{н}} (\text{дБ}) + 30 \text{ дБ}]/2, \quad (2.7)$$

где $r_{\text{н}} (\text{дБ}) = 10 \lg [R_{\text{н}} (\text{Ом}) / 1 \text{ Ом}]$. Из соотношения (2.7) следует правило пересчета значений параметров в логарифмических единицах при переходе из оптической (о) в электрическую (э) область спектра

$$\text{дБ}_o = \text{дБ}_э/2, \text{дБ}_{\text{м}_o} = \text{дБ}_{\text{м}_э}/2.$$

В табл. 2.3 приведены расчетные выражения для трех значений $R_{\text{н}} = 50 \text{ Ом}$ и 75 Ом (цифровые и аналоговые ВОЛТ соответственно) и $R_{\text{н}} = 1000 \text{ Ом}$, при котором формулы (2.6) и (2.7) упрощаются.

Таблица 2.3 – Соотношения для расчета параметров ОЭП

Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$, Ом	Электрический полюс:	Оптический полюс:
	$p_{\text{э вых}} (\text{дБм}) =$	$p_{\text{о вх}} (\text{дБм}) =$
50	$2p_{\text{о вх}} (\text{дБм}) + \rho_i (\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}$	$[p_{\text{э вых}} (\text{дБм}) - \rho_i (\text{дБ})]/2 + 6,05 \text{ дБ}$
75	$2p_{\text{о вх}} (\text{дБм}) + \rho_i (\text{дБ}) - 11,25 \text{ дБ}$	$[p_{\text{э вых}} (\text{дБм}) - \rho_i (\text{дБ})]/2 + 5,625 \text{ дБ}$
1000	$2p_{\text{о вх}} (\text{дБм}) + \rho_i (\text{дБ})$	$[p_{\text{э вых}} (\text{дБм}) - \rho_i (\text{дБ})]/2$

Значение R_i обычно указывает изготовитель ПИ на рабочей длине волны λ . В противном случае это значение может быть рассчитано по формуле (3.5) после измерения семейства вольтамперных характеристик фотодиода. В табл. 2.4 приведены значения R_i и ρ_i фотодиодов (ФД) без внутреннего усиления (p - i - n -типа) и с таковым (лавинного типа), выполненных из различных полупроводниковых материалов [6].

Таблица 2.4 – Значения коэффициентов О/Э преобразования фотодиодов [6]

Тип ФД	p - i - n			Лавинный		
λ , нм	850	1300	1550	850	1300	1550
Материал	Кремний	Германий	InGaAs	Кремний	Германий	InGaAs
R_i , А/Вт	0,5	0,7	0,6	75	35	12
ρ_i , дБ	-6	-3,1	-4,4	37,5	31	21,6

Дифференциальный вольтовый отклик ПрУ оценивает эффективность преобразования ОЭП-ом оптической мощности в электрическое напряжение

$$R_u (\text{В/Вт}) = \Delta U_{\text{вых}} (\text{В}) / \Delta P_{\text{о вх}} (\text{Вт}), \rho_u (\text{дБ}) = 20 \lg [R_u (\text{В/Вт}) / 1 \text{ В/Вт}], \quad (2.8)$$

где $\Delta U_{\text{вых}}$ – приращение напряжения на выходе, вызванное приращением оптической мощности $\Delta P_{\text{о вх}}$ на входе. Вольтовой отклик можно выразить через токовый отклик $\rho_u (\text{дБ}) = \rho_i (\text{дБ}) + 2r_{\text{н}} (\text{дБ})$. Целесообразность введения этого параметра продиктована тем, что на выходе ПрУ обычно измеряется напряжение.

Для ОЭП формально может быть введен коэффициент передачи мощности (с преобразованием спектра) $K_{\text{р оэп}} = P_{\text{э вых}} (\text{Вт}) / P_{\text{о вх}} (\text{Вт}) = R_u (\text{В/А}) I_{\text{вых}} (\text{А})$, т.е. пропорциональна выходному электрическому (а значит и входному оптическому) сигналу. Коэффициент передачи мощности в относительных единицах

$$k_{p \text{ оэп}}(\text{дБ}) = [\rho_u(\text{дБ}) + i_{\text{вых}}(\text{дБ})]/2, \text{ где } i_{\text{вых}}(\text{дБ}) = 20\lg[I_{\text{вых}}(\text{А})/1\text{А}]. \quad (2.9)$$

Пример 2.2. Для $p-i-n$ -фотодиода с $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$ и $R_n = 50 \text{ Ом}$, $\rho_u = 28 \text{ дБ}$ и для $P_{\text{о вх}} = 1 \text{ мВт}$ находим $I_{\text{вых}} = 0,5 \text{ мкА}$ ($i_{\text{вых}} = -66 \text{ дБ}$) и $k_{p \text{ оэп}} = -19 \text{ дБ}$ (КПД 1,2%). Увеличив значение R_n до 1 кОм, получим $\rho_u = 54 \text{ дБ}$, $k_{p \text{ оэп}} = -6 \text{ дБ}$ (КПД = 25,1%). Вывод – для ОЭП желательна высокоомная нагрузка.

Пример 2.3. Используя результаты примеров 2.1 и 2.2 найти коэффициент передачи оптрона «ЭОП+ОЭП» $k_p = k_{p \text{ эоп}}(\text{дБ}) + k_{p \text{ оэп}}(\text{дБ})$. Для $R_{\text{и}} = R_n = 50 \text{ Ом}$ получаем $k_p = -7 - 19 = -26 \text{ дБ}$ (КПД = 2,5 %); для случая $R_{\text{и}} = 50 \text{ Ом}$ и $R_n = 1 \text{ кОм}$ находим $k_p = -7 - 6 = -13 \text{ дБ}$ (КПД = 5 %), рост в 2 раза.

2.4 Оптикооптический преобразователь (ООП)

ООП (рис. 2.2,в) будем характеризовать коэффициентом передачи по мощности

$$K_o = P_{\text{о вх}}(\text{Вт})/P_{\text{о вых}}(\text{Вт}), \quad k_o(\text{дБ}) = p_{\text{о вх}}(\text{дБм}) - p_{\text{о вых}}(\text{дБм}),$$

где $P_{\text{о вх}}$ и $P_{\text{о вых}}$ – средние во времени значения мощности оптического излучения на входе и выходе соответственно. Для активного ООП, например, оптического усилителя $K_o > 1$ ($k_o > 0 \text{ дБ}$), в то время как для пассивного (оптическое волокно, соединитель, аттенюатор, компенсатор дисперсии, вентиль и др.) $K_o < 1$ ($k_o < 0 \text{ дБ}$). В табл. 2.5 приведены значения коэффициента затухания α различных типов ОВ на различных длинах волн [6]. Для ОВ длиной $l(\text{км})$ находим коэффициентом передачи по мощности $k_o(\text{дБ}) = \alpha(\text{дБ/км}) \cdot l(\text{км})$.

Таблица 2.5 – Коэффициент затухания (дБ/км) ОВ различных типов [2]

Тип ОВ	Материал сердцевины/ оболочки	Длина волны оптического излучения, нм				
		580	850	1300	1380 (пик ОН)	1550
ОМ 50/125	К/К	-	1,80	0,35	0,55	0,20
ММ 8,2/125		-	2,80	0,80	1,00	0,60
ММ 200/400	К/П	-	8,0	-		
ММ 900/1000	П/П	200	-			
Примечание: К – кварц, П – полимер.						

Примечание: К – кварц, П – полимер.

2.5 Электроэлектрический преобразователь (ЭЭП)

Сигнальный процессор (ЭЭП) на рис. 2.2,г характеризуется коэффициентом усиления по мощности

$$K_p = P_{\text{э вых}}(\text{Вт})/P_{\text{э вх}}(\text{Вт}), \quad k_p(\text{дБ}) = 10\lg K_p,$$

где $P_{\text{э вх}}$ и $P_{\text{э вых}}$ – средние во времени значения мощности электрического сигнала на входе и выходе соответственно. Если эти мощности выражены в единицах дБм, то $k_p(\text{дБ}) = p_{\text{э вых}}(\text{дБм}) - p_{\text{э вх}}(\text{дБм})$. Обычно ЭЭП устанавливают за ОЭП для усиления электрического сигнала, поэтому всегда $K_p > 1$ ($k_p > 0 \text{ дБ}$). Если он работает в режиме усиления токов, то коэффициент передачи по току

$$K_i = I_{\text{вых}}(\text{А})/I_{\text{вх}}(\text{А}), \quad k_i(\text{дБ}) = 20\lg K_i,$$

где $I_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вых}}$ – ток сигнала на входе и выходе ЭЭП соответственно. Справедливо соотношение

$$k_p(\text{дБ}) = 2k_i(\text{дБ}) + 10\lg(R_n/R_{\text{и}}).$$

Отметим, что значение $k_p(\text{дБ})$ растет с увеличением отношения R_n к $R_{\text{и}}$.

Используем полученные формулы для анализа типовых оптических линейных трактов.

3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОДНОВОЛНОВЫХ ВОЛТ

3.1 Линейный тракт «точка-точка» (ЭОП-ООП-ОЭП) [6]

Каскад ЭОП-ООП-ОЭП является моделью ВОЛТ симплексной ВОСП «из точки в точку» без ретрансляторов, рис. 3.1. Проанализируем его основные СЭП. Коэффициенты передачи по току

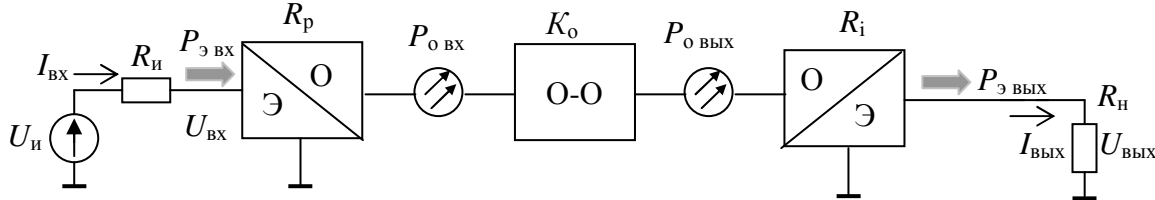


Рисунок 3.1 – Функциональная схема линейного тракта ЭОП-ООП-ОЭП

$$K_i = I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = R_p K_o R_i,$$

МОЩНОСТИ

$$K_{\varepsilon p} = P_{\varepsilon \text{ вых}}/P_{\varepsilon \text{ вх}} = (I_{\text{вых}}/I_{\text{вх}})^2 (R_{\text{н}}/R_{\text{и}}) = (R_p K_o R_i)^2 (R_{\text{н}}/R_{\text{и}}),$$

а также передаточное сопротивление

$$R_{\Pi} = U_{\text{вых}}/I_{\text{вх}} = R_p K_o R_i R_{\text{н}} = R_p K_o R_{\Pi}, \text{ Ом.}$$

Полученные при помощи соотношений из табл. 2.1 и 2.3 формулы расчета параметров тракта ЭОП-ООП-ОЭП в относительных единицах приведены в табл. 3.1. Применение полученных соотношений проиллюстрируем на следующем примере.

Пример 3.1. Рассчитать параметры ВОЛТ (рис. 3.1) для следующих значений: $R_{\text{и}} = R_{\text{н}} = 50 \text{ Ом}$; $i_{\text{вх}} = 10^{-2} \text{ А}$, $R_p = 10^{-1} \text{ Вт/А}$, $K_o = 10^{-1}$, $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$. Находим $P_{\varepsilon \text{ вх}} = I_{\text{вх}}^2 R_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$ (7 дБм); $\rho_p = 20 \lg 10^{-1} = -20 \text{ дБ}$; $k_o = -10 \text{ дБ}$, $P_{o \text{ вх}} = 10^{-1} \cdot 10^{-2} = 10^{-3} \text{ Вт}$ (0 дБм); $P_{o \text{ вых}} = 10^{-3} \cdot 10^{-1} = 10^{-4} \text{ Вт}$ (-10 дБм); $\rho_i = 20 \lg 0,5 = -6 \text{ дБ}$. Расчетные значения параметров тракта ЭОП-ООП-ОЭП приведены в табл. 3.1 для значений $R_{\text{н}}/R_{\text{и}} = 1$ и 10^3 .

Таблица 3.1 – Расчетные соотношения и результаты расчета параметров тракта ЭОП-ООП-ОЭП

Расчетное соотношение		Результаты расчета для $R_{\text{н}}/R_{\text{и}} =$	
		1	10^3
$k_i(\text{дБ}) = \rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ})$		-46 дБ	-46 дБ
$k_{\varepsilon p}(\text{дБ}) =$	$\rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + 10 \lg(R_{\text{н}}/R_{\text{и}});$	-46 дБ	-16 дБ
	$k_o(\text{дБ}) + [k_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ})]/2 + 10 \lg(R_{\text{н}}/R_{\text{и}});$		
	$k_o(\text{дБ}) + [\rho_p(\text{дБ}) - u_{\text{вх}}(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + i_{\text{вх}}(\text{дБ})]/2.$		
$r_{\Pi}(\text{дБ}) = \rho_p(\text{дБ}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + r_{\text{н}}(\text{дБ})$		-12 дБ (0,25 Ом)	50 дБ (316 Ом)
$p_{\varepsilon \text{ вых}}(\text{дБм}) = p_{\varepsilon \text{ вх}}(\text{дБм}) + 2k_o(\text{дБ}) + \rho_i(\text{дБ}) + 10 \lg(R_{\text{н}}/R_{\text{и}})$		-39 дБм	-9 дБм

Диаграммы уровней мощности ВОЛТ для условий примера 3.1 и значений $R_n/R_{in} = 50 \text{ Ом}/50 \text{ Ом} = 1$ и $50 \text{ кОм}/50 \text{ Ом} = 10^3$ приведены на рис. 3.3,а.

Отметим, что коэффициент передачи по току не зависит от значений R_{in} и R_n , а коэффициент передачи по мощности пропорционален отношению R_n к R_{in} . Поэтому, при выборе $R_n \gg R_{in}$ может быть достигнут «эффект усиления по мощности» тракта. Например, увеличение значения R_n/R_{in} с 1 до 10^3 ($R_{in} = 50 \text{ Ом}$, $R_n = 50 \text{ кОм}$) дает увеличение значений: $k_{эп}$ с -46 дБ до -16 дБ (КПД с $0,005\%$ до $15,8\%$); уровня мощности выходного сигнала с -39 дБм до -9 дБм ; передаточного сопротивления с -12 дБ до $+50 \text{ дБ}$ (с $0,25$ до 316 Ом).

Резистор R_{in} обычно имеет стандартный номинал (50 или 75 Ом), поэтому на практике позволительно увеличивать лишь значение R_n . Это, кроме роста уровня мощности выходного сигнала, обеспечивает снижение среднеквадратического значения тока теплового шума, создаваемого сопротивлением нагрузки ОЭП ($\overline{I_{ш}^2} = 4kT \cdot \Delta f / R_n$, где kT – произведение постоянной Больцмана на абсолютную температуру, Δf – эквивалентная шумовая полоса пропускания ОЭП). Таким образом, высокоомная нагрузка ФД позволяет улучшить отношение сигнал/шум на выходе ОЭП, что используется при построении высокоимпедансных ПрУ [4, 6].

3.2 Оптоэлектронный ретранслятор (ОЭП-ЭЭП-ЭОП) [6]

Каскад ОЭП-ЭЭП-ЭОП моделирует *оптоэлектронный ретранслятор*, например, промежуточную усилительную станцию О-Э-О типа аналогового ВОЛТ, рис. 3.2. Найдем его основные СЭП. Коэффициент передачи ретранслятором оптической мощности

$$K_o = P_{o \text{ Вых}} / P_{o \text{ Вх}}, k_o(\text{дБ}) = 10 \lg K_o,$$

где $P_{o \text{ Вых}}$ и $P_{o \text{ Вх}}$ – значения оптической мощности на выходе и входе соответственно. *Энергетический потенциал* (ЭП) ретранслятора (при заданном нормами коэффициенте ошибок)

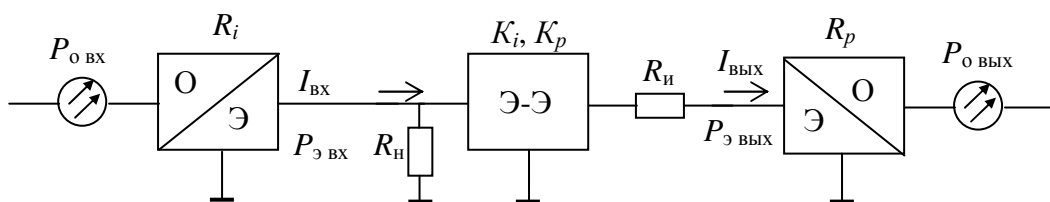


Рисунок 3.2 – Функциональная схема ретранслятора (оптоэлектронный тракт ОЭП-ЭЭП-ЭОП)

$$q_o(\text{дБ}) = p_{o \text{ Вых}}(\text{дБм}) - p_{o \text{ Вх}}(\text{дБм}),$$

$$q_o(\text{дБ}) = k_o(\text{дБ}) = \rho_i(\text{дБ}) + k_{эп}(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10 \lg(R_n/R_{in}).$$

Здесь $k_{эп}(\text{дБ}) = p_{э \text{ Вых}}(\text{дБм}) - p_{э \text{ Вх}}(\text{дБм})$ – коэффициент передачи мощности ЭЭП. Если ЭП ретранслятора задан, например, техническими условиями, то важно рассчитать необходимые коэффициенты усиления ЭЭП по мощности $k_{эп}(\text{дБ})$

или току k_i (дБ). Полученные при помощи соотношений из табл. 2.1 и 2.3 формулы расчета параметров тракта ОЭП-ЭЭП-ЭОП приведены в табл. 3.2.

Здесь же представлены расчетные значения требуемых коэффициентов усиления ЭЭП по мощности и току, обеспечивающие энергетический потенциал ретранслятора $q_o = 30$ дБ. На рис. 3.3,б представлены реально измеряемые диаграммы уровней мощности ретранслятора для условий приведенных выше примеров, $p_{o\text{ вх}} = -30$ дБм, $R_H/R_H = 50 \text{ Ом}/50 \text{ Ом} = 1$ и $R_H/R_H = 50 \text{ кОм}/50 \text{ Ом} = 10^3$.

Таблица 3.2 – Расчетные соотношения и результаты расчета параметров тракта ОЭП-ЭЭП-ЭОП

Расчетное соотношение		Результаты расчета для $R_H/R_H =$	
		1	10^3
$k_o(\text{дБ}) \equiv$	$[\rho_i(\text{дБ}) + k_p(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_H/R_H)]/2$	30 дБ	30 дБ
$q_o(\text{дБ}) =$	$\rho_i(\text{дБ}) + 2k_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ})$		
$k_{э,р}(\text{дБ}) \geq 2q_o(\text{дБ}) - \rho_i(\text{дБ}) - \rho_p(\text{дБ}) - 10\lg(R_H/R_H)$		86 дБ	56 дБ
$k_i(\text{дБ}) \geq [q_o(\text{дБ}) - \rho_i(\text{дБ}) - \rho_p(\text{дБ})]/2$		28 дБ	28 дБ

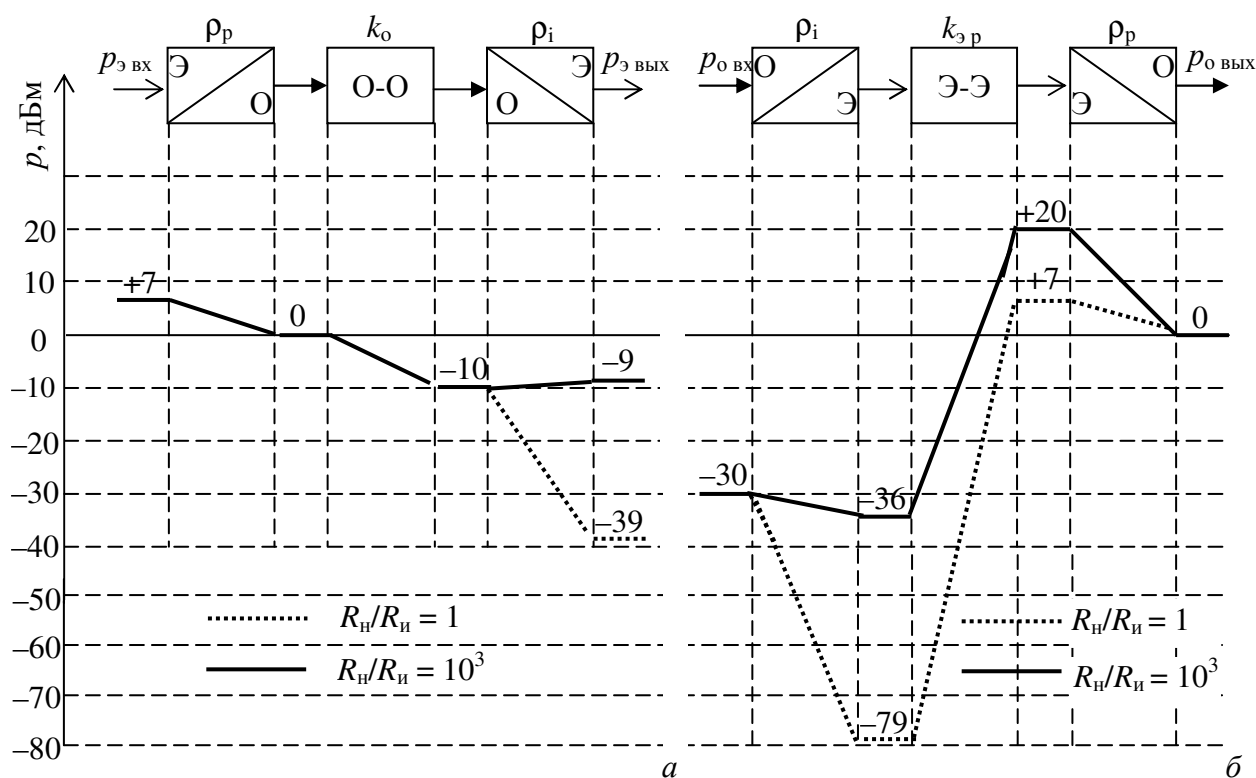


Рисунок 3.3 – Диаграммы уровней мощности линейного тракта «из точки в точку» а и оптоэлектронного ретранслятора б

3.3 Линейный тракт с ретрансляторами

Проанализируем ВОЛТ с топологией «из точки в точку», рис. 3.4. Кроме передающей (ЭОП) и приемной (ОЭП) станций, он состоит из n ретрансляционных участков ООП, разделенных $n - 1$ ретрансляторами типа ОЭП-ЭЭП-ЭОП рассмотренными выше. Здесь K_{oi} и $K_{ozo i}$ – коэффициенты

передачи мощности i -го ООП (i -го отрезка ОВ) и i -го ретранслятора соответственно. Коэффициент передачи тракта по току

$$K_i = I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} = R_p(K_{o1} \cdot K_{o2} \cdots K_{on}) (K_{o3o1} \cdot K_{o3o2} \cdots K_{o3o(n-1)}) R_i,$$

где $K_{oi} = P_{oi}/P_{oi-1}$ и $K_{o3oi} = P_{o3oi}/P_{o3oi-1}$ – коэффициенты передачи оптической мощности i -м ООП и i -м оптоэлектронным (ОЭО) ретранслятором соответственно. Коэффициент передачи трактом электрической мощности

$$K_{\text{эп}} = P_{\text{э Вых}}/P_{\text{э Вх}} = (I_{\text{Вых}}/I_{\text{Вх}})^2 (R_{\text{н}}/R_{\text{и}}) = (K_i)^2 R_{\text{н}}/R_{\text{и}},$$

а также его передаточное сопротивление

$$R_{\text{п}} = U_{\text{Вых}}/I_{\text{Вх}} = K_i \cdot R_{\text{н}}, \text{ Ом.}$$

Расчетные соотношения для ВОЛТ на рис. 3.4 сведены в табл. 3.3. В формулах табл. 3.3 первая сумма учитывает итоговые потери мощности в оптических волокнах, а вторая – общее усиление мощности всеми ретрансляторами. При условии точной компенсации (потери в предшествующем отрезке ОВ полностью компенсируются усилением в ретрансляторе) член в квадратных скобках становится равным нулю, а расчетные формулы упрощаются (оптоэлектронная цепь ЭОП-ОЭП).

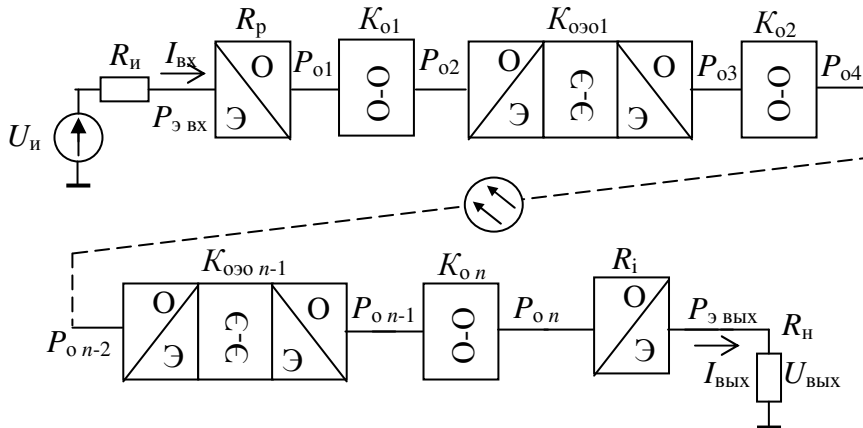


Рисунок 3.4 – Линейный тракт с $n - 1$ ретрансляторами О-Э-О типа, моделирующий протяженную ВОСП

Таблица 3.3 – Соотношения для расчета параметров ВОЛТ с $n - 1$ ретрансляторами

$k_{\text{эп}}(\text{дБ}) = 2[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{o3oi}(\text{дБ})] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{и}})$
$k_i(\text{дБ}) = 2[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{o3oi}(\text{дБ})] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ})$
$r_{\text{пер}}(\text{дБ}) = 2[\sum_{i=1}^n k_{oi}(\text{дБ}) + \sum_{i=1}^{n-1} k_{o3oi}(\text{дБ})] + \rho_i(\text{дБ}) + \rho_p(\text{дБ}) + 20\lg(R_{\text{н}}/R_{\text{и}})$

3.4 Расчет шумовых параметров ВОЛТ

Проиллюстрируем полезность полученных выше соотношений для анализа шумовых параметров ВОЛТ. Шумовые свойства ЭОП на основе

лазерного диода (ЛД) характеризуют параметром *относительная интенсивность шума* RIN (relative intensity noise) [6]

$$RIN = P_{o\text{ ш}}^2 / P_{o\text{ ср}}^2 \Delta f, 1/\text{Гц}$$

или в относительных единицах

$$\text{rin(дБ)} = 10\lg(P_{o\text{ ш}}^2 / P_{o\text{ ср}}^2 \Delta f) = p_{o\text{ ш}}(\text{дБм}) - 2p_{o\text{ ср}}(\text{дБм}) - 10\lg\Delta f(\text{Гц}), \quad (3.1)$$

где $P_{o\text{ ш}}$ – среднеквадратическое значение мощности оптических шума, $P_{o\text{ ср}}$ – среднее во времени значение мощности излучения лазера, Вт; Δf – ширина полосы частот в которой измеряются шум. Из выражений (2.6) и (3.1) получаем формулу для расчета мощности шума создаваемого лазерным диодом в нагрузке ОЭП ($R_n = 50 \text{ Ом}$)

$$p_{\text{э ш вых}}(\text{дБм}) = \text{rin(дБ)} + 2p_{o\text{ вых ср}}(\text{дБм}) + 10\lg\Delta f(\text{Гц}) + p_i(\text{дБ}) - 13,01 \text{ дБ}. \quad (3.2)$$

Процедуру расчета вклада шумов лазера покажем на примере аналогового ВОЛТ.

Пример 3.2. Пусть ВОЛТ имеет следующие параметры компонентов: $R_n = R_H = 50 \text{ Ом}$; $i_{\text{вх}} = 10^{-2} \text{ А}$, $R_p = 10^{-1} \text{ Вт/А}$ (лазерный диод), $K_o = 10^{-1}$, $R_i = 0,5 \text{ А/Вт}$ ($p-i-n$ -фотодиод). Рассчитаем уровень мощность шумов создаваемых в нагрузке ОЭП лазером, имеющим $RIN = 10^{-14}$, если $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$ (система аналогового кабельного телевидения). Подстановка данных в формулу (3.2) дает

$$p_{\text{э ш вых}}(\text{дБм}) = -140 \text{ дБ} - 2(-10 \text{ дБм}) + 10\lg 10^9 + (-6 \text{ дБ}) - 13,01 \text{ дБ} = -89,01 \text{ дБм}.$$

Если уровень мощности электрического сигнала в нагрузке ОЭП $p_{\text{э вых}} = -39 \text{ дБм}$, то отношение сигнал/шум, обусловленное шумами только ЛД

$$\text{ОСШ}_{\text{ЛД}}(\text{дБ}) = p_{\text{э вых}}(\text{дБм}) - p_{\text{э ш вых}}(\text{дБм}) = -39 \text{ дБм} - (-89,01 \text{ дБм}) = 50, 01 \text{ дБ}.$$

По аналогии с электрическим ОСШ_Σ , определим значение оптического ОСШ_o

$$\text{осш}_o(\text{дБ}) = p_{o\text{ вх, вых}}(\text{дБм}) - p_{o\text{ ш вх, вых}}(\text{дБм}) = [\text{rin(дБ)} + 10\lg\Delta f(\text{Гц})]/2. \quad (3.3)$$

Подстановка данных примера 3.2 в формулу (3.3) дает $(\text{осш}_o) = -(-140 + 10\lg 10^9)/2 = 25 \text{ дБ}$. Если оптический сигнал с таким значением ОСШ_o подается на О/Э преобразователь, то, в соответствии с правилом пересчета, электрическое ОСШ при условии идеальной (нешумящей) нагрузки ОЭП

$$\text{осш}_\Sigma(\text{дБ}) = 2 \cdot \text{осш}_o(\text{дБ}). \quad (3.4)$$

Для примера 3.2 получаем $\text{осш}_\Sigma = 2 \cdot 25 = 50 \text{ дБ}$. В реальном ВОЛТ необходимо учитывать тепловой шум резистора нагрузки R_n и шум сигнального процессора (усилителя), следующего за ОЭП. Мощность тепловых шумов, создаваемых резистором с номиналом R_n в полосе частот Δf определяется формулой Найквиста [6]

$$P_{\text{шт}} = (4kT \cdot \Delta f / R_n) R_n = 4kT \cdot \Delta f, \text{ Вт},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Вт/К}$ – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, К. Для $T = 300 \text{ К}$, $\Delta f = 1 \text{ ГГц}$ получаем $P_{\text{шт}} = 1,66 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$ ($p_{\text{шт}} = -77,8 \text{ дБм}$). Значение $\text{осш}_{\Sigma\text{ вых}}(\text{дБ}) = p_{\text{э вых}}(\text{дБм}) - p_{\text{шт}}(\text{дБм}) = -39 - (-77,8) = 38,8 \text{ дБ}$ при

$R_H = 50 \text{ Ом}$. Очевидно, что при стандартном значении сопротивления нагрузки (50 Ом) качество сигнала на выходе ВОЛТ определяют не шумы ЛД (ОСШ_{ЛД} = 50 дБ в полосе 1 ГГц), а шумы резистора нагрузки малого номинала (осш_{RH} = 38,8 дБ). Для улучшения ОСШ необходимо увеличивать номинал R_H и использовать усилитель с высоким входным импедансом [1, 2]. Если известно значение коэффициента шума электронного усилителя $K_{ш} = \text{ОСШ}_{\text{ВЫХ}} / \text{ОСШ}_{\text{ВХ}}$, где ОСШ_{ВХ}, ВЫХ – значение ОСШ на входе и выходе усилителя соответственно, раз. При этом ОСШ на выходе ВОЛТ при наличии усилителя после ОЭП

$$\text{осш}_{\text{ВОЛТ}} (\text{дБ}) = \text{осш}_{\text{ВЫХ}} (\text{дБ}) - k_{ш} (\text{дБ}), \quad (3.5)$$

где осш_{ВЫХ} – значение ОСШ без усилителя и $k_{ш} (\text{дБ}) = 10 \lg(\text{ОСШ}_{\text{ВЫХ}} / \text{ОСШ}_{\text{ВХ}})$ – коэффициент шума усилителя, дБ. Например, если применен усилитель с $k_{ш} = 5$ дБ, то ОСШ на выходе ВОЛТ осш_{ВОЛТ} = 38,8 – 5 = 33,8 дБ. Соответствующая этим расчетам диаграмма, показывающая изменение значения осш (дБ) на различных участках ВОЛТ показана на рис. 3.5,б.

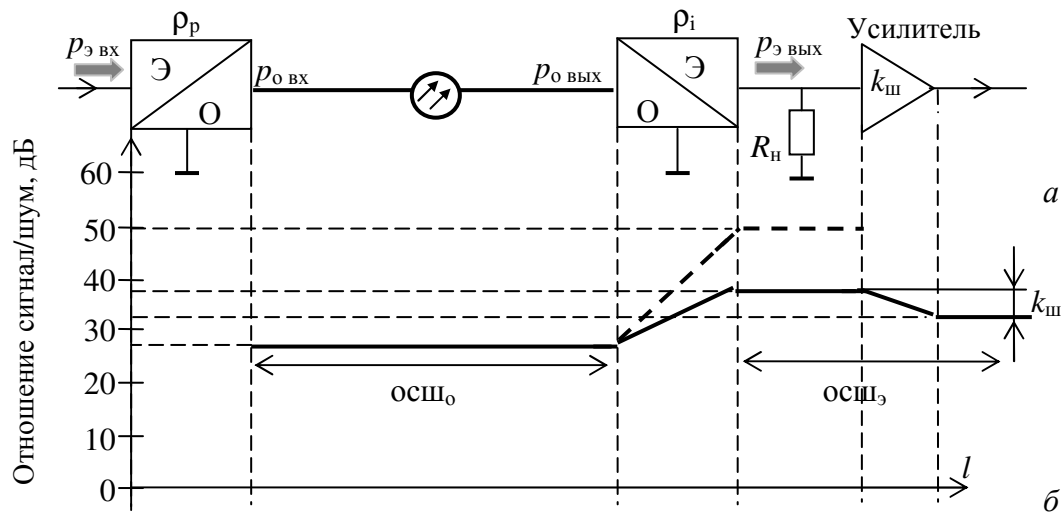


Рисунок 3.5 – Функциональная схема ОЛТ *а* и диаграмма изменения осш в тракте *б* (пунктиром показана диаграмма при нешумящей нагрузке ОЭП)

4 ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОДНОВОЛНОВЫХ ВОЛТ

4.1 Описание программы «Power FOTL» [5]

Программа «Power FOTL» (Fiber Optic Transmission Link), составленная по алгоритму [3], предназначена для расчета энергетических параметров волоконно-оптических линейных трактов. Она написана на объектно-ориентированном языке «Delphi 3.0» в среде операционной системы «Windows». Программа состоит из основного файла, содержащего расчетную и интерфейсную части, и файлов баз данных со списком компонентов и их параметров.

Структурная схема ВОЛТ, совмещенная с функциональной схемой программы «Power FOTL», приведена на рис. 4.1. Исследуемая система передачи состоит из четырех последовательно включенных подсистем: электрооптического (ЭОП), оптикооптического (ООП), оптоэлектрического (ОЭП) и электроэлектрического (ЭЭП) преобразователей. Они соответственно моделируют: *источник излучения* (ИИ) – свето- (СД), суперлюминисцентный – (СЛД) или лазерный (ЛД) диод, управляемый *усилителем накачки*; *оптическое волокно* (ОВ) одно- (ОМ) либо много- (ММ) модовое со ступенчатым (СОВ) или градиентным (ГОВ) профилем показателя преломления; *приемник излучения* (ПИ) – фотодиод (ФД) *p-i-n* либо лавинного (ЛФД) типа.

Интерфейс программы имеет вид стандартного окна ОС Windows с семью страницами-вкладками: «Тип ЭОП», «Тип ООП», «Тип ОЭП», «Тип ЭЭП», «Результаты», «График 1» и «График 2». Каждая такая страница-вкладка содержит данные, логично связанные с названием страницы-вкладки, рис. 4.1. На странице-вкладке «Тип ЭОП» задается тип ИИ и его параметры: ток сигнала накачки $I_{\text{вх}}$, ваттовый отклик R_p , сопротивление источника сигнала $R_{\text{и}}$ и относительная интенсивность шума R_{IN} (для ЛД). На странице-вкладке «Тип ООП» задается тип ОВ, его длина L и коэффициент затухания α . На странице-вкладке «Тип ОЭП» задается тип ПИ, токовый отклик R_i , темновой ток $I_{\text{т}}$, сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ и мощность, эквивалентная шуму (МЭШ) [1]. На странице-вкладке «Тип ЭЭП» задается тип усилителя – на полевом (ПТ) или биполярном (БТ) транзисторе, коэффициент передачи по мощности K_p и коэффициент шума $K_{\text{ш}}$.

Программа предоставляет пользователю простой интерфейс, который позволяет по очереди выбирать компоненты ВОЛТ, формируя линейный тракт, изменять и уточнять их параметры. Страницы размещены таким образом, что пользователь мог выбирать компоненты «слева направо» идя от ЭОП к ОЭП. Внутри каждой из страниц меню расположены в логической последовательности «сверху вниз». Программа имеет встроенный редактор, который позволяет пополнять, корректировать и изменять записи в базах данных компонентов.

В результате работы программы на странице-вкладке «Результаты» (табл. 4.1) выдаются следующие вычисленные значения параметров в абсолютных и относительных единицах: коэффициентов передачи ВОЛТ по току K_i и электрической мощности $K_{эп}$, электрического $Q_э$ и оптического Q_o потенциалов ВОЛТ, выходного тока $i_{\text{вых}}$ и выходной электрической мощности $P_{э \text{ вых}}$, мощности шума на выходе $P_{ш \text{ вых}}$. Рассчитываются следующие значения отношения сигнал/шум (ОСШ): в оптическом тракте – ОСШ_о; вследствие шумов ЛД – ОСШ_{лд}; вследствие шумов сопротивления нагрузки ПИ – ОСШ_р; вследствие суммарных шумов тракта – ОСШ_{волт}. При обращении к страницам-вкладкам «График 1» и «График 2» пользователь наблюдает на экране монитора соответственно диаграмму уровней мощности сигнала (рис. 4.2) и диаграмму изменения ОСШ (рис. 4.3) исследуемого ВОЛТ.

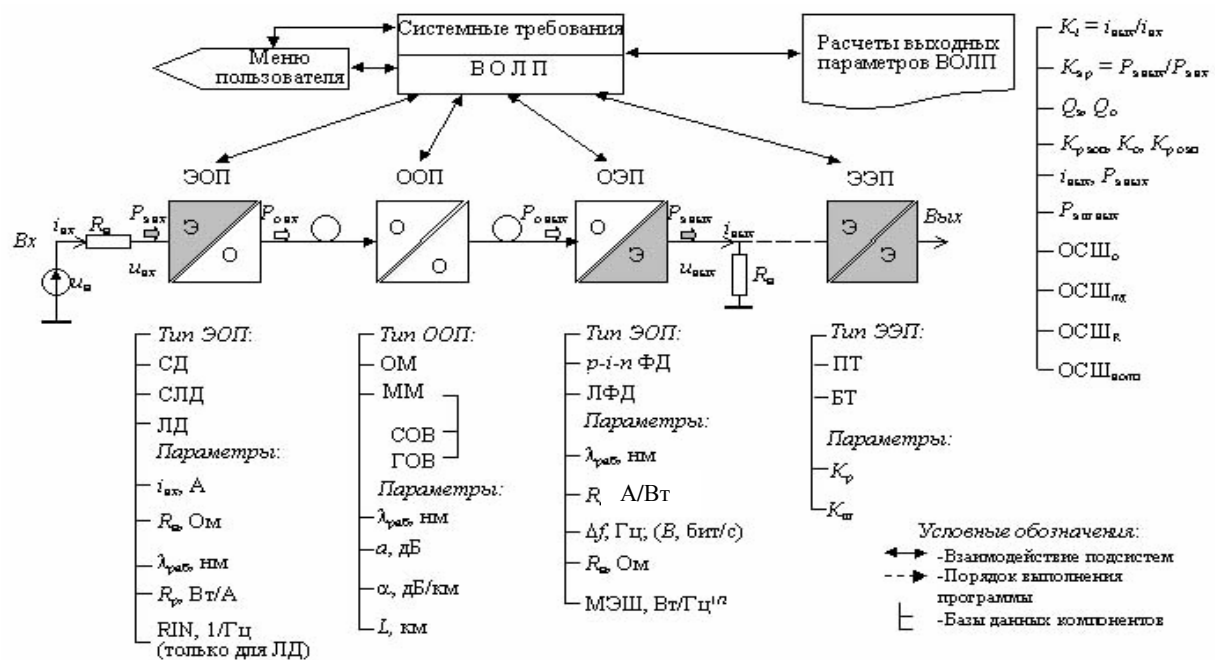


Рисунок 4.1 – Структурная схема ВОЛТ, совмещенная с функциональной схемой программы «Power FOTL»

4.2 Пример моделирования

Для запуска программы необходимо загрузить ОС Windows и запустить исполняемый файл «Project1.exe». После запуска программы появиться окно с семью страницами-вкладками. В качестве общесистемных параметров выбираем длину волны излучения $\lambda = 850$ нм и требуемую ширину полосы пропускания $\Delta f = 10^9$ Гц. На первой странице-вкладке «тип ЭОП» выбираем в качестве источника ЛД со следующими параметрами: ток сигнала $i_{\text{вх}} = 10^{-2}$ А, сопротивление источника $R_{\text{и}} = 50$ Ом, ваттовый отклик $R_p = 0,1$ Вт/А, относительная интенсивность шума $RIN = 10^{-14}$ 1/Гц.

На странице-вкладке «Тип ООП» выбираем ММ ГОВ с коэффициентом затухания $\alpha = 3,333$ дБ/км длиной $L_{\text{ок}} = 3$ км. На странице-вкладке «Тип ОЭП» выбираем ФД р-и-н-типа с токовым откликом $R_i = 0,5$ А/Вт, темновым током

$I_T = 10^{-9}$ А, сопротивление нагрузки $R_H = 50$ Ом. На странице-вкладке «Тип ЭЭП» выбираем предусилитель с входным каскадом на БТ с коэффициентом передачи мощности $k_p = 10$ дБ и коэффициентом шума $K_{ш} = 5$ дБ.

Переходим на страничку-вкладку «Результаты». После нажатия кнопки «Показать расчеты» появляются результаты расчетов, табл. 4.1. При обращении к страницам-вкладкам «График 1» и «График 2» программа выполняет построение диаграммы уровней мощности сигнала (рис. 4.2) и значения ОСШ на различных участках ВОЛТ (рис. 4.3).

Таблица 4.1– Результаты расчета параметров ВОЛТ программой «Power FOTL»

Расчетный параметр	Обозначение	Значение	Ед. измерения
Коэффициент передачи по току	K_i	0,0050001	–
Коэффициент передачи по мощности	K_p	$2,5 \cdot 10^{-5}$	–
Коэффициент передачи ЭОП	$K_{p \text{ эоп}}$	0,2	Вт
Коэффициент передачи ООП	$K_{p \text{ ооп}}$	0,1	–
Коэффициент передачи ОЭП	$K_{p \text{ оэп}}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	1/Вт
Ток на выходе тракта	$I_{\text{вых}}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	А
Оптический потенциал ВОЛТ	q_o	9,999	дБ
Электрический потенциал ВОЛТ	$q_{\text{э}}$	46,0205	дБ
Уровень мощности шума на выходе	$p_{\text{ш э вых}}$	-89,030	дБм
Отношение сигнал/шум (оптич.)	осш_o	25	дБ
Отношение сигнал/шум (из-за ЛД)	$\text{осш}_{\text{лд}}$	49,999	дБ
Отношение сигнал/шум (из- за R_H)	осш_{R_H}	38,881	дБ
Отношение сигнал/шум ВОЛТ	$\text{осш}_{\text{волт}}$	38,620	дБ

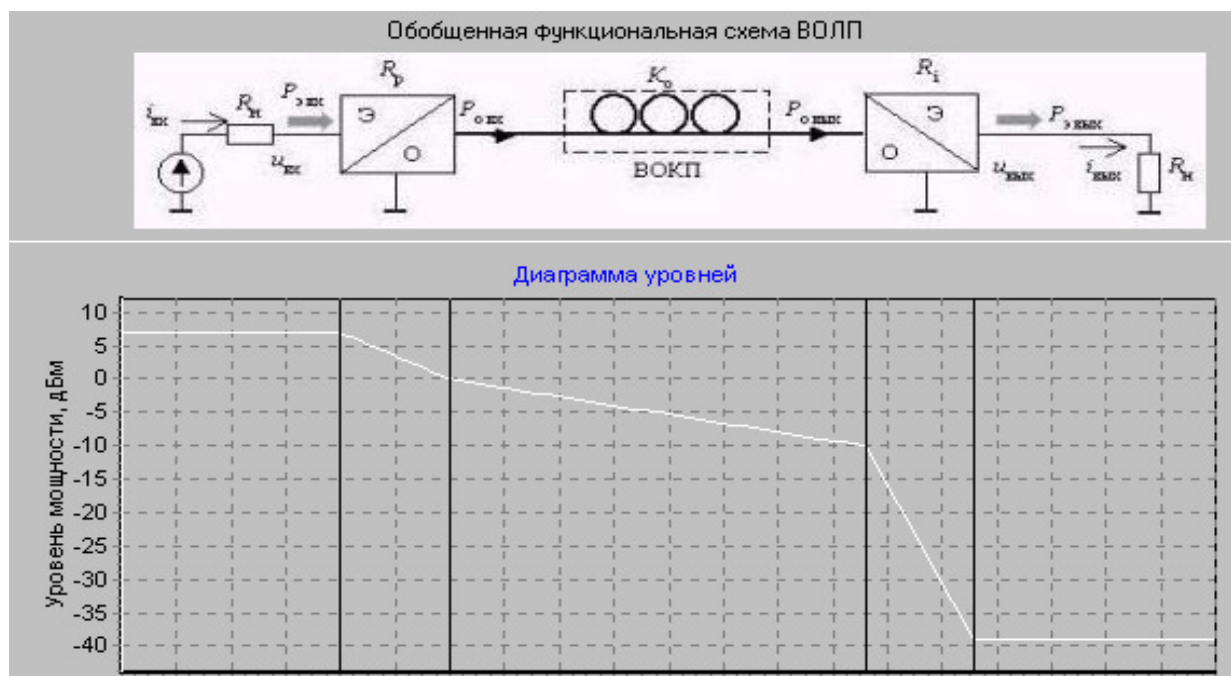


Рисунок 4.2 – Диаграмма уровня мощности сигнала в линейном тракте

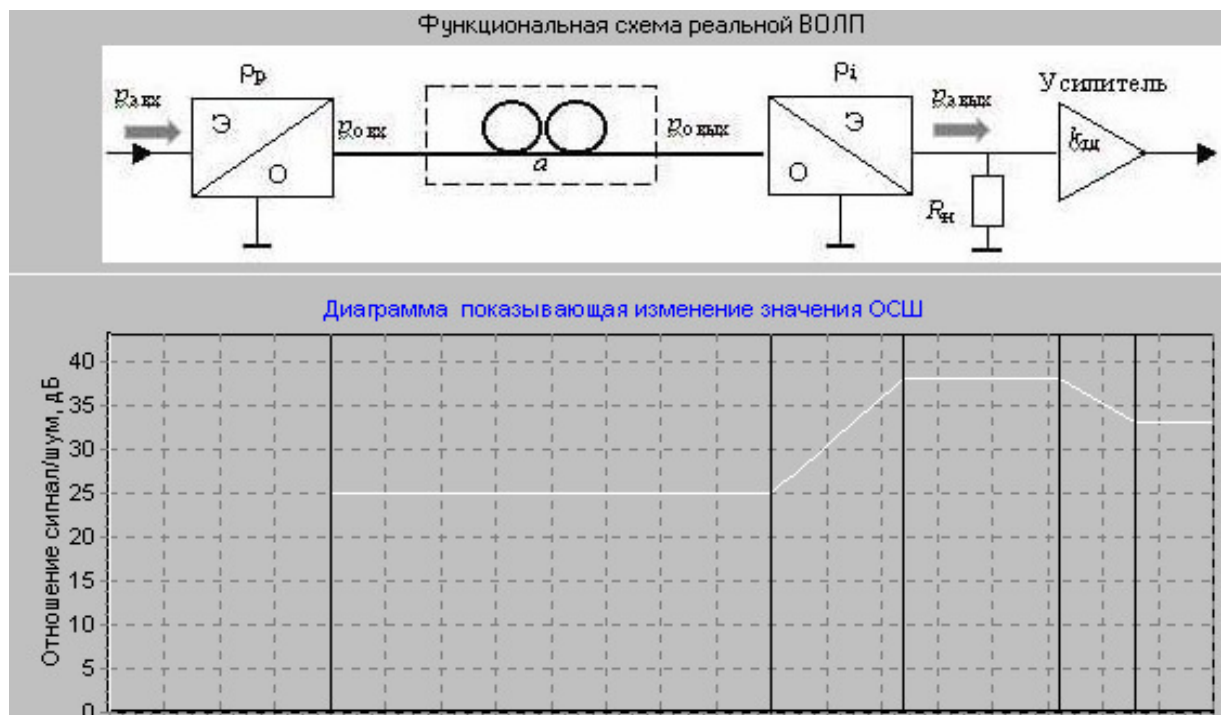


Рисунок 4.3 – Диаграмма изменения отношения сигнал/шум (дБ) в линейном тракте

Model

Разработанная программа расчета параметров цифровых ВОЛТ «Power FOTL» может быть полезной при дипломном проектировании и выполнении магистерских работ.

5 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МНГОВОЛНОВЫХ ВОЛТ

5.1 Анализ параметров передачи многговолновых ВОЛТ

Внедрение на телекоммуникационных сетях спектрального мультиплексирования каналов (wave-division multiplexing – WDM) потребовало разработки метода анализа параметров передачи (ПП) и переходных межканальных помех (ПМП) в таких системах.

Метод анализа параметров одноканальных волоконно-оптических линейных трактов (ВОЛТ) и оптоэлектронных ретрансляторов, изложенный выше, обобщен на случай многговолновых (М-ВОЛТ) со спектральным мультиплексированием каналов. Предложенный в [7] матричный метод анализа позволяет рассчитывать, как параметры передачи (от электрического входа до электрического выхода тракта), так и параметры переходных (межканальных) помех на ближнем (near end crosstalk – NEXT) и дальнем (far end crosstalk – FEXT) концах линии передачи.

Обобщенная структурная схема М-ВОЛТ с конфигурацией «точка-точка» приведена на рис. 5.1. Здесь на передающей стороне (станция А) находится: 1) n источников электрического сигнала (например, цифровых потоков STM-N, где $N = 4, 16, 64$) с внутренним сопротивлением $R_{и1}, R_{и2}, \dots, R_{ин}$, создающих входные (модулирующие интенсивность света) токи $I_{вх1}, I_{вх2}, \dots, I_{вхn}$; 2) n электрооптических преобразователей (ЭОП_{1, 2, \dots, n}), создающих на своих оптических полюсах излучение на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$; 3) устройство спектрального объединения (УСО – мультиплексор) n парциальных сигналов, на выходе которого образуется групповой WDM сигнал.

Этот сигнал передается по одномодовому оптическому волокну (ОВ), являющемуся оптооптическим преобразователем (ООП). Для компенсации затухания в УСО, УСП, ОВ и других элементах тракта, длина которого ограничена затуханием, используются оптические усилители (ОУ) – еще один вид ООП.

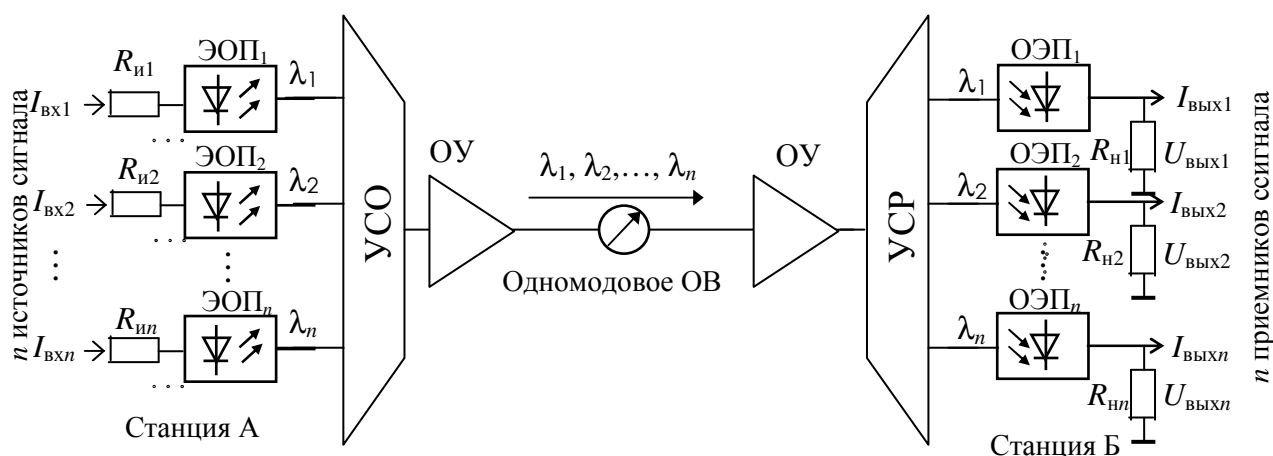


Рисунок 5.1 – Обобщенная структурная схема линейного тракта со спектральным мультиплексированием каналов

На приемной стороне (станция Б) находятся: 1) устройство спектрального разделения (УСП – демультимплексор) группового оптического сигнала на n

парциальных сигналов; 2) n оптоэлектрических преобразователей (ОЭП_{1,2,..., n}) создающих на своих электрических полюсах принятый сигнал – фототок $I_{\text{вх}1}, I_{\text{вх}2}, \dots, I_{\text{вх}n}$ или фотонапряжение $U_{\text{вх}1}, U_{\text{вх}2}, \dots, U_{\text{вх}n}$, создаваемое этим током на сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}1, 2, \dots, n}$.

Система передачи с WDM является совокупностью n одноканальных ВОСП [2, 3], использующих общую среду передачи. Топология n -канального М-ВОЛТ требует привлечения матричного аппарата анализа. Такой сети соответствует математическая модель в виде произведения матриц, описывающих процессы преобразования энергии в соответствующих компонентах – ЭОП, ООП и ОЭП [7]. Если на входе сети заданы токи $I_{\text{вх}1}, I_{\text{вх}2}, \dots, I_{\text{вх}n}$, соответствующие передаваемым электрическим сигналам, а на ее выходе требуется рассчитать значение выходных токов $I_{\text{вых}1}, I_{\text{вых}2}, \dots, I_{\text{вых}n}$, то справедлива следующая матричная запись

$$\begin{pmatrix} K_{\text{эп}1} \\ K_{\text{эп}2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ K_{\text{эп}n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{\text{п}1}^2 \\ R_{\text{п}2}^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{\text{п}n}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} K_{\text{о}11}^2 & K_{\text{о}12}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & K_{\text{о}1n}^2 \\ K_{\text{о}21}^2 & K_{\text{о}22}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & K_{\text{о}2n}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{\text{он}1}^2 & K_{\text{он}2}^2 & \cdot & \cdot & \cdot & K_{\text{он}n}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{\text{и}1}^2 \\ R_{\text{и}2}^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_{\text{и}n}^2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} (R_{\text{н}} / R_{\text{и}})_1 \\ (R_{\text{н}} / R_{\text{и}})_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ (R_{\text{н}} / R_{\text{и}})_n \end{pmatrix}, \quad (5.1)$$

где матрицы-столбцы содержат: $|K_{\text{эп}j}|$ – искомые коэффициенты передачи электрической (индекс э) мощности сигнала по j -му каналу $K_{\text{эп}j} = P_{\text{вых}j} / P_{\text{вх}j}$, где $j = 1, 2, \dots, n$; $|R_{\text{п}j}^2|$ – известные коэффициенты Э/О преобразования (ваттового отклика) ЭОП, Вт/А; $|R_{\text{и}j}^2|$ – известные коэффициенты О/Э преобразования (токового отклика) ОЭП, А/Вт; $|(R_{\text{н}} / R_{\text{и}})_j|$ – отношения сопротивления нагрузки ОЭП и сопротивления источника сигнала ЭОП в j -м канале. В формуле (5.1) квадратная матрица размера $n \times n$ содержит: а) диагональные элементы вида $K_{\text{о}jj} = P_{\text{о} \text{ вых}}(\lambda_j) / P_{\text{о} \text{ вх}}(\lambda_j)$ учитывающие оптические потери в j -ом канале на длине волны λ_j (с учетом усиления мощности в оптических усилителях); б) недиагональные элементы вида $K_{\text{о}jk} = P_{\text{о} \text{ к}}(\lambda_j) / P_{\text{о} \text{ j}}(\lambda_j)$, где $j, k = 1, 2, \dots, n$, учитывающие межканальные переходы (переход оптической (индекс о) мощности из канала j в канал k). Например, коэффициент $K_{12} = P_2(\lambda_1) / P_1(\lambda_1)$ учитывает переход оптической мощности из канала 1 с длиной волны λ_1 в канал 2, работающий на длине волны λ_2 .

5.2 Пример расчета параметров ВОЛТ с двумя длинами волн [8]

В качестве примера рассчитаем ПП и ПМП двухканальной (работа на λ_1 и λ_2) симплексной и дуплексной ВОСП без ОУ длиной l , км. Для этого случая выражение (5.1) упрощается

$$\begin{vmatrix} K_{\text{эп1}} \\ K_{\text{эп2}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{\text{p1}}^2 \\ R_{\text{p2}}^2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} K_{\text{o11}}^2 & K_{\text{o12}}^2 \\ K_{\text{o21}}^2 & K_{\text{o22}}^2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} R_{\text{i1}}^2 \\ R_{\text{i2}}^2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} R_{\text{н1}} / R_{\text{и1}} \\ R_{\text{н2}} / R_{\text{и2}} \end{vmatrix}. \quad (5.2)$$

Здесь $K_{\text{o11}} = P_{\text{o1 вых}} / P_{\text{o1 вх}}$, $A_{11} = 10 \lg K_{\text{o11}} = A_{\text{вн усо}} + \alpha(\lambda_1)l + A_{\text{вн уср}}$ – потери в оптическом канале передачи 1 на длине волны λ_1 , дБ; $K_{\text{o22}} = P_{\text{o2 вых}} / P_{\text{o2 вх}}$, $A_{22} = 10 \lg K_{\text{o22}} = A_{\text{вн усо}} + \alpha(\lambda_2)l + A_{\text{вн уср}}$ – потери в оптическом канале передачи 2 на длине волны λ_2 вносимые УСО, ОВ и УСР соответственно, дБ; $K_{\text{o12}} = P_{\text{o2 вых}} / P_{\text{o1 вх}}$, $A_{12} = 10 \lg K_{12} = A_{\text{пс усо}} + \alpha_{12 \text{ ов}} + A_{\text{пс уср}}$ – переходная помеха из оптического канала 1 в канал 2, дБ; $K_{\text{o21}} = P_{\text{o1 вых}} / P_{\text{o2 вх}}$, $A_{21} = 10 \lg K_{21} = A_{\text{пс усо}} + \alpha_{21 \text{ ов}} + A_{\text{пс уср}}$ – переходная помеха из оптического канала 2 в канал 1, дБ; $A_{\text{вн усо}}$ и $A_{\text{вн уср}}$ – потери, вносимые УСО и УСР на λ_1 или λ_2 , дБ; $A_{\text{пс усо}}$ и $A_{\text{пс уср}}$ – коэффициенты перекрестной связи УСО и УСР между портами с λ_1 и λ_2 или λ_2 и λ_1 ; $\alpha(\lambda_{1,2}) = P_{\text{o вых}}(\lambda_{1,2}) / P_{\text{o вх}}(\lambda_{1,2})$ – коэффициент затухания (1/км) ОВ на длине волны λ_1 и λ_2 соответственно, причем $\alpha(\lambda_{1,2}) < 0$.

Из выражения (5.2) находим соотношения для расчета параметров передачи в каналах 1 и 2 соответственно

$$\text{на } \lambda_1 \quad K_{\text{эп11}} = P_{\text{э1 вых}}(\lambda_1) / P_{\text{э1 вх}}(\lambda_1) = (R_{\text{p1}} \cdot A_{11} \cdot R_{\text{i1}})^2 \cdot (R_{\text{н1}} / R_{\text{и1}}), \quad (5.3)$$

$$\text{на } \lambda_2 \quad K_{\text{эп22}} = P_{\text{э2 вых}}(\lambda_2) / P_{\text{э2 вх}}(\lambda_2) = (R_{\text{p2}} \cdot A_{22} \cdot R_{\text{i2}})^2 \cdot (R_{\text{н2}} / R_{\text{и2}})$$

и переходных (межканальных) помех

$$\text{из канала 1 в канал 2} \quad K_{\text{эп12}} = P_{\text{э2 вых}}(\lambda_1) / P_{\text{э1 вх}}(\lambda_1) = (R_{\text{p1}} \cdot A_{12} \cdot R_{\text{i2}})^2 \cdot (R_{\text{н2}} / R_{\text{и1}}), \quad (5.4)$$

$$\text{из канала 2 в канал 1} \quad K_{\text{эп21}} = P_{\text{э1 вых}}(\lambda_2) / P_{\text{э2 вх}}(\lambda_2) = (R_{\text{p2}} \cdot A_{21} \cdot R_{\text{i1}})^2 \cdot (R_{\text{н1}} / R_{\text{и2}}).$$

Для удобств расчета по формулам (5.2)...(5.4) удобно перейти от мультипликативных операций к аддитивным с величинами, выраженными в логарифмических единицах. С учетом сказанного из соотношений (5.3) получаем формулы для расчета коэффициентов передачи по мощности в спектральных каналах 1 и 2 соответственно

$$k_{\text{эп11}}(\text{дБ}) = 10 \lg(K_{\text{эп1}}) = [\rho_{\text{p1}}(\text{дБ}) + 2a_{11}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i1}}(\text{дБ}) + 10 \lg(R_{\text{н1}} / R_{\text{и1}})], \quad (5.5)$$

$$k_{\text{эп22}}(\text{дБ}) = 10 \lg(K_{\text{эп2}}) = [\rho_{\text{p2}}(\text{дБ}) + 2a_{22}(\text{дБ}) + \rho_{\text{i2}}(\text{дБ}) + 10 \lg(R_{\text{н2}} / R_{\text{и2}})].$$

Из соотношений (5.2) получаем формулы расчета уровней переходных помех на дальнем конце ВОЛТ для случая, когда оба передающих устройства находятся на станции А, а оба приемных устройства – на станции Б (рис. 5.2,а)

$$\text{FEXT}_{12}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{эп}12 \text{ дк}}) = -[\rho_{p1}(\text{дБ}) + 2a_{12 \text{ дк}}(\text{дБ}) + \rho_{i2}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}2}/R_{\text{и}1})], \quad (5.6)$$

$$\text{FEXT}_{21}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{эп}21 \text{ дк}}) = -[\rho_{p2}(\text{дБ}) + 2a_{21 \text{ дк}}(\text{дБ}) + \rho_{i1}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{и}1}/R_{\text{н}2})],$$

где индекс «дк» обозначает дальний коней линии передачи (станция Б на рис. 5.2,а), $\rho_{p1,2}(\text{дБ}) = 20\lg[R_{p1,2}(\text{Вт/А})/1 \text{ Вт/А}]$, и $\rho_{i1,2}(\text{дБ}) = 20\lg[R_{i1,2}(\text{А/Вт})/1 \text{ А/Вт}]$ согласно [5], $a_{12 \text{ дк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн ус}0}(\text{дБ}) + \alpha_2(\text{дБ/км})l(\text{км}) + a_{\text{вн уср}}(\text{дБ})$, $a_{21 \text{ дк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн ус}0}(\text{дБ}) + \alpha_1(\text{дБ/км})l(\text{км}) + a_{\text{вн уср}}(\text{дБ})$, причем $\alpha_{1,2} < 0 \text{ дБ/км}$.

При полнодуплексной передаче по одному волокну на каждой из станций устанавливается по паре приемопередатчиков (трансиверов). В этом случае требуется знание переходной помехи на ближнем конце ВОЛТ (влияние передающего устройства, работающего на длине волны λ_1 , на приемное устройство, принимающего сигнал с длиной волны λ_2 на станции А, и наоборот – для станции Б), рис. 5.2, б. В такой ситуации

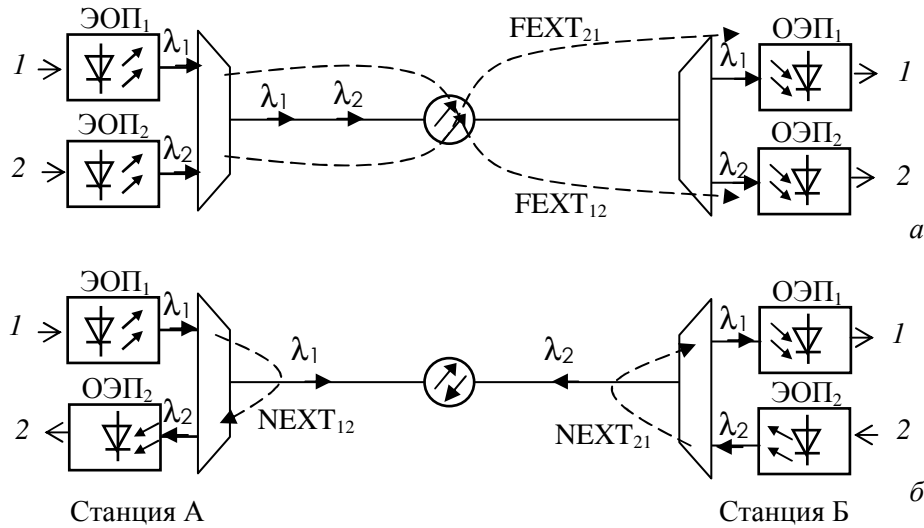


Рисунок 5.2 – К определению переходного влияния на дальний а (FEXT) и ближний (NEXT) б концы ВОЛТ

$$\text{NEXT}_{12}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{эп}12 \text{ бк}}) = -[\rho_{p1}(\text{дБ}) + 2a_{12 \text{ бк}}(\text{дБ}) + \rho_{i2}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{н}2}/R_{\text{и}1})], \quad (5.7)$$

$$\text{NEXT}_{21}(\text{дБ}) = 10\lg(1/K_{\text{эп}21 \text{ бк}}) = -[\rho_{p2}(\text{дБ}) + 2a_{21 \text{ бк}}(\text{дБ}) + \rho_{i1}(\text{дБ}) + 10\lg(R_{\text{и}1}/R_{\text{н}2})],$$

где индекс «бк» обозначает ближний конец линии передачи, и

$$a_{12 \text{ бк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн ус}0}(\text{дБ}) + a_{\text{вн уср}}(\text{дБ}), \quad a_{21 \text{ бк}}(\text{дБ}) = a_{\text{вн ус}0}(\text{дБ}) + a_{\text{вн уср}}(\text{дБ}).$$

Используемые в формулах (5.5)...(5.7) значения относительных параметров мультимедиев (мутити- и демультимуплексоров) приводят изготовители компонентов WDM сетей [10], а для основных типов ЭОП и ОЭП даны в [3], что позволяют выполнять инженерные расчеты значений ПП и ПМП. При большом числе спектральных каналов для расчетов целесообразно использовать специализированную математическую вычислительную среду, например, MATLAB.

Пример 5.1. Рассчитать ПП та ПМП двухканальной ($\lambda_1 = 1,31$ мкм, $\alpha_1(\lambda_1) = 0,5$ дБ/км; $\lambda_2 = 1,55$ мкм, $\alpha_2(\lambda_2) = 0,25$ дБ/км) тракта длиной 10 км. Пусть в ЭОП применены лазерные диоды ФП с $\rho_{p1} = \rho_{p2} = -20$ дБ, а в ОЭП – *p-i-n*-фотодиоды с $\rho_{i1} = \rho_{i2} = -6$ дБ, $R_{n1,2}/R_{i1,2} = 10^3$; УСО и УСР – направленные ответвители с потерями передачи 1,5 дБ и направленностью 40 дБ на ближнем и дальнем концах на двух длинах волн. Подстановка этих данных в формулы (5.5)...(5.7) дает следующие значения

$$K_{эp1} = -10,4 \text{ дБ}, k_{эp2} = -5,8 \text{ дБ}, \text{FEXT}_{12} = 89 \text{ дБ}, \text{FEXT}_{21} = 84 \text{ дБ}, \text{NEXT}_{12} = \text{NEXT}_{21} = 73 \text{ дБ}.$$

Изложенный матричный метод позволяет рассчитывать параметры передачи и переходных межканальных помех в оптических WDM сетях (без учета нелинейных искажений в волокне). Показано применение метода к расчету параметров передачи и межканальных переходов энергии для двухканального одноволоконного ВОЛТ «из точки в точку». Получены аналитические выражения для расчета параметров передачи и переходных помех на ближнем и дальнем концах WDM линии передачи. Метод позволяет осуществить экспериментальную проверку расчетных значений ПП и ПМП измерениями только в электрической области спектра.

5.3 Моделирование многоволновых ВОЛТ в вычислительной среде Simulink

При моделировании в среде Simulink [9] используется следующий подход. При помощи стандартных «строительных» блоков (имеющихся в пакете Simulink) и нестандартных (специально разработанных) блоков, например, ЭОП, УСО, ОУ, УСР, ОЭП и др., строится линейный тракт системы передачи (сети). Пользователь задает исходные параметры блоков и функциональные зависимости, существующие между блоками, а программа рассчитывает соответствующие числовые матрицы параметров блоков и сети в целом, строит графические зависимости выходных параметров, осуществляет оптимизацию.

Разработанная программа «SimuFOCS» позволяет моделировать сигнально-энергетические и шумовые параметры, а также параметры взаимного (межканального) влияния обусловленного неидеальностью спектральных характеристик фильтров, используемых в устройствах спектрального мультиплексирования (MUX и DEMUX на рис. 5.3).

В качестве демонстрации возможностей разработанной программы SimuFOCS ниже приведен пример расчета четырехволнового ВОЛТ с топологией «точка-точка» работающей на длинах волн $\lambda_1 = 1530$ нм, $\lambda_2 = 1540$ нм, $\lambda_3 = 1550$ нм и $\lambda_4 = 1560$ нм. На рис. 5.3 слева в квадратных рамках помещены исходные, а справа – в прямоугольных – рассчитанные программой данные, табл. 5.1.

Для расчета выбраны следующие исходные данные: источники сообщения с внутренним сопротивлением $R_{и1} = R_{и2} = R_{и3} = R_{и4} = 50$ Ом создают токи $I_{вх1} = I_{вх2} = I_{вх3} = I_{вх4} = 15$ мА; у всех ЭОП на основе лазерных диодов $R_{р1} = R_{р2} = R_{р3} = R_{р4} = 0,1$ Вт/А и относительная интенсивность шума $rin = -140$ дБ/Гц; ОУ₁ и ОУ₂ имеют идентичные коэффициенты усиления по

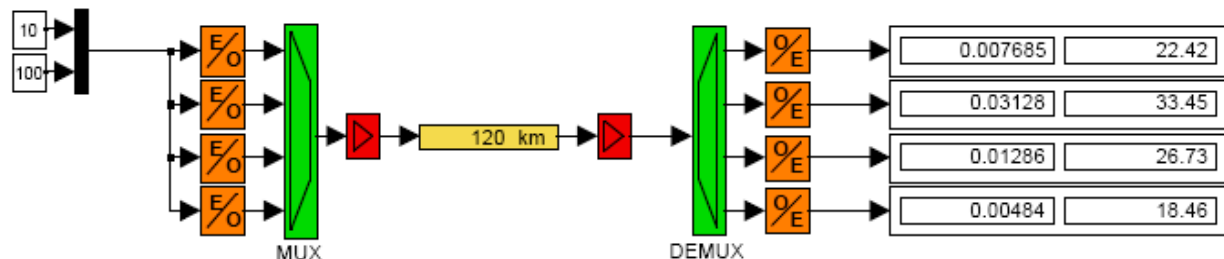


Рисунок 5.3 – Представление модели четырехволнового ВОЛТ в программе SimuFOCS

мощности K_p и коэффициент шума $K_{ш}$ согласно табл. 5.1; длина линейного тракта равна 120 км, а коэффициенты затухания ОМ ОВ на различных длинах волн соответствует данным табл. 5.1; потери мощности в УСО и УСП приняты равными 6 дБ; ОЭП на основе $p-i-n$ -фотодиодов имеют $R_{i1} = R_{i2} = R_{i3} = R_{i4} = 0,5$ А/Вт и нагружены на резисторы $R_{н1} = R_{н2} = R_{н3} = R_{н4} = 50$ Ом; температура окружающей среды 300 К. Рассчитанные программой SimuFOCS данные сведены в табл. 5.1. Здесь в последнем столбце даны значения отношения сигнал/шум (осш) по мощности на выходе системы.

Таблица 5.1 – Результаты расчета параметров четырехканального ВОЛТ с WDM

Канал		ЭОП		ОУ ₁ и ОУ ₂		ОВ	ОЭП		осш _{вых} дБ
n	λ , нм	$I_{вх}$, мА	R_p , Вт/А	K_p , дБ	$K_{ш}$, дБ	α , дБ/км	R_i , А/Вт	$I_{вых}$, мкА	
1	1530	15	0,1	14	5	0,223	0,5	7,7	22,42
2	1540			17		0,222		31,3	33,45
3	1550			15		0,221		12,9	26,73
4	1560			13		0,223		4,8	18,46

Результаты расчета (табл. 5.1) свидетельствуют о различии значений ОСШ_{вых} в разных спектральных каналах. Это вызвано неравномерностью спектральных характеристик усиления волоконно-оптических усилителей [2] и требует установки в реальном линейном тракте спектральных эквалайзеров для выравнивания спектральной характеристики сквозного тракта ЭОП-ОУ₁-ОВ-ОУ₂-ОЭП.

Разработанная программа SimuFOCS анализа волоконно-оптических линейных трактов со спектральным мультиплексированием каналов позволяет в диалоговом режиме визуального моделирования рассчитывать и строить графики зависимостей сигнальных и шумовых параметров, оптимизировать сеть (систему) по критерию максимума ОСШ на выходе. Программу, в силу ее простоты и наглядности, целесообразно использовать в учебном процессе, например, при выполнении магистерских работ.

ВЫВОДЫ

Разработан метод расчета энергетических (сигнальных и шумовых) параметров ВОЛТ. Условием применимости метода является безынерционность Э/О и О/Э преобразователей и отсутствие дисперсионных искажений в ООП (последнее справедливо для одномодовых среднескоростных ВОСП. Показано применение метода для расчета параметров передачи и шумов ВОЛТ «из точки в точку» и оптоэлектронных ретрансляторов. Расчетные формулы могут быть использованы и для анализа локальных оптических сетей различной топологии.

Разработаны программы расчета и моделирования цифровых одноволновых «Model FOTL» и многоволновых «SimuFOCS» ВОЛТ. Программы позволяют в диалоговом режиме визуального моделирования рассчитывать и строить графики зависимостей сигнальных и шумовых параметров, оптимизировать линейный тракт по критерию максимума ОСШ на выходе. Предлагаемые программы предназначены для выполнения расчетов в ходе курсового и дипломного проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнейчук В.И., Лесовой И.П. Волоконно-оптические измерения. – К.: Наукова думка, 1999.– 323 с.
2. Корнійчук В.І., Мосорін П.Д. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі.– Одеса, Друк, 2001,– 367 с.
3. Корнейчук В.И. Метод анализа оптоэлектронных цепей. Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, №3, 2001. с. 42-48.
4. Корнейчук В.И., Мосорин П.Д. Расчет энергетических параметров волоконно-оптической линии передачи. Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2001, № 2. с. 68-73.
5. Корнейчук В.И., Васильев В.А., Швайко И.Г. Моделирование энергетических процессов в волоконно-оптической линии передачи. Праці УНДІРТ, № 1 (37), Одесса, 2004. с. 51-55.
6. Kornichuk V.I., Al-Dwairi M.O. Modeling of Optoelectronic Circuits. In: 6th Jordanian International Electrical & Electronics Engineering Conference JIEEEEC-2005, V.2, November 15-17, 2005, Amman–Jordan, p. 399-403.
7. Корнейчук В.И. Метод расчета параметров передачи и переходных помех в оптических WDM сетях. Труды УНИИРТ, №2(34), Одесса, 2003, с. 74-76.
8. Климаш М., Корнійчук В. Розрахунок параметрів передачі та перехідних завод у WDM-мережах. Збірник наукових праць. Інституту проблем моделювання в енергетиці НАН України, вип. 22, Київ, 2003, с. 111-115.
9. Kornichuk V.I., M.O. Al-Dwairi M.O. Modeling WDM optical networks in Simulink. In: 8-th International Conf. CADSM'2005 «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics», Lviv–Polyana, Ukraine, 23-26 February 2005, p. 198-201.
10. Стерлинг Д. Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. М: Изд. “ЛОРИ”, 1998.– 288 с.
11. Черных И.В. SIMULINK: среда для создания инженерных приложений/ Под общ. ред. к.т.н. В.Г Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БТ	биполярный транзистор
ВОЛТ	– волоконно-оптический линейный тракт
ВОСП	– волоконно-оптическая система передачи
ВР	– вертикальный резонатор (лазера)
ИИ	– источник излучения
М-ВОЛТ	– многоволновый ВОЛТ
ММ	– многомодовый
МЭШ	мощность, эквивалентная шуму
О	– оптический
О/Э	– опто/электрическое (преобразование)
ОВ	– оптическое волокно
ОМ	– одномодовый
О-О	– опто-оптический
ООП	– оптооптический преобразователь
осш	– отношение сигнал/шум, дБ
ОСШ	– отношение сигнал/шум, раз
ОУ	– оптический усилитель
О-Э-О	– опто-электро-оптический (ретранслятор)
ОЭП	– оптоэлектрический преобразователь
ПИ	– приемник излучения
ПМП	– переходная межканальная помеха
ПП	– параметры передачи
ПрУ	– приемное устройство
ПТ	– полевой транзистор
ПУ	– передающее устройство
РБО	– распределенное Брэгговское отражение (тип лазерного резонатора)
РОС	– распределенная обратная связь (тип лазерного резонатора)
СЛД	– суперлюминисцентный диод
УСО	– устройство спектрального объединения (каналов)
УСР	– устройство спектрального разделения (каналов)
ФД	– фотодиод
ФП	– Фабри-Перо (тип лазерного резонатора)
Э	– электрический
Э/О	– электро/оптическое (преобразование)
ЭОП	– электрооптический преобразователь
ЭП	– энергетический потенциал
Э-Э	– электро-электрический
ЭЭП	– электро-электрический преобразователь
«Model FOTL»	– программа расчета одноволновых ВОЛТ
«SimuFOCS»	– программа анализа многоволновых ВОЛТ в среде Simulink
DEMUX	– демультиплексор
FEXT	– far end crosstalk – переходное затухание на дальнем конце
MUX	– мультиплексор
NEXT	– near end crosstalk – переходное затухание на ближнем конце
<i>RIN</i>	– относительная интенсивность шума (лазера), 1/Гц
<i>rin</i>	– относительная интенсивность шума (лазера), дБ/Гц
WDM	– wave-division multiplexing – мультиплексирование длин волн

**Учебное пособие
по дипломному проектированию и
выполнению магистерских работ**

Владимир Иванович КОРНЕЙЧУК

**РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЛИНЕЙНЫХ ТРАКТОВ ВОСП**

Компьютерная верстка

Е.С. Корнейчук