

## МЕТОДИ ПОБУДОВИ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ТОПОЛОГІЄЮ «ШИНА З ВІДГАЛУДЖЕННЯМ»

**Nedashkivskyy O.L., Zinenco Y. M. Methods of creating passive optical networks with the "distributing bus" topology.** The task of creating passive optical access networks, namely balancing of passive optical access network with the bus topology, is considered in this work. At the same time, the model of the so-called "distributing bus" using two-output splitters is proposed and described. The equations obtained and the calculations performed made it possible to formulate an algorithm for the precise balancing of networks of this type. It is shown that with the help of an elementary modification of the developed algorithm for precise network balancing, it is possible to pass to both the technologically achievable engineering method and the existing engineering method for calculating and constructing PON networks with the "distributing bus" topology. The results, which are presented in the article, together create an opportunity for further analysis and comparison of different methods of construction and calculation among themselves, with the purpose of rational and effective implementation of modern broadband Internet access networks.

**Keywords:** distributing bus topology, Internet, access network, passive optical network, optical splitter, balancing.

**Недашківський О.Л., Зиненко Ю.М. Методи побудови пасивних оптичних мереж за топологією «шина з відгалудженням».** В роботі розглянуті питання побудови пасивних оптичних мереж доступу, а саме балансування мережі з топологією «шина з відгалудженням». Запропонована і описана модель «шини з відгалудженням», що використовує тільки сплітери з двома виходами. На основі отриманих рівнянь запропонований алгоритм точного балансування мереж такого типу. Наведені в статті результати створюють можливість для подальшого аналізу і порівняння різних методів побудови таких мереж, з метою ефективного впровадження сучасних широкосмугових мереж доступу до Інтернет.

**Ключові слова:** топологія шина з відгалудженням, Інтернет, мережа доступу, пасивна оптична мережа, оптичний сплітер, балансування.

**Недашковский А.Л. Методы построения пассивных оптических сетей с топологией «шина с ответвлением».** В работе рассмотрены вопросы построения пассивных оптических сетей доступа, а именно балансировка сети с топологией «шина с ответвлением». Предложена и описана модель «шины с ответвлением», использующей только сплитеры с двумя выходами. На основе полученных уравнений предложен алгоритм точного балансирования сетей такого типа. Приведенные в статье результаты создают возможность для дальнейшего анализа и сравнения различных методов построения таких сетей, с целью эффективного внедрения современных широкополосных сетей доступа к Интернет.

**Ключевые слова:** топология шина с ответвлением, Интернет, сеть доступа, пассивная оптическая сеть, оптический разветвитель, балансировка.

### 1. Вступна частина

Досягнення в галузі волоконно-оптичних технологій, а саме в галузі пасивних оптичних мереж (PON – Passive Optical Network), відкривають широкі можливості для охоплення широкосмуговим доступом до послуг мережі Інтернет та інших телекомунікаційних послуг. На сьогоднішній день існує декілька поколінь PON [1, 2, 3, 4] зі швидкість до 10 Гбіт/с та більше на одне «PON»-дерево. Багато статей та матеріалів присвячено проблемам впровадження таких мереж [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]. При цьому, проблема балансування гілок

«PON»-дерев, більш-менш точно, розв'язується лише для сплітерів типу 1:2 (один вхід – два виходи), для чого побудовані відповідні двовимірні таблиці [7, 8, 9], а сам розв'язок задачі зводиться до простого пошуку з переліку можливих значень. Для сплітерів на три і більше виходів такі таблиці взагалі не будують, адже для розгалужувача на три виходи такі таблиці стають тривимірними! Для розгалужувачів на чотири виходи таблиці стають чотиривимірними і.т.д. В результаті цього спроектовані та розраховані мережі PON часто зводять нанівець потенціал пасивних оптичних мереж, адже мережі наближаються до топології «зірка» замість «дерево» чи «шина». При цьому економії волокон немає, зате підвищуються вимоги до систем автоматичного регулювання підсилення, зменшується максимальна дальність «PON»-дерев, що разом призводить до зменшення технічної та економічної ефективності мереж PON.

Отже пошук точного аналітичного рішення у задачі балансування пасивних оптичних мереж є науковою задачею. А досягнення в галузі виготовлення пасивних оптичних пристроїв, що можуть виготовити сплітери з кроком ділення вхідної потужності на рівні 1%, роблять пошук розв'язку актуальною і своєчасною.

Метою даної статті є створення моделі пасивної оптичної мережі за топологією «шина з відгалудженням», на основі якої запропонувати кілька методів побудови пасивних оптичних мереж, тобто методів пошуку параметрів оптичних сплітерів. В подальшому необхідно буде провести ще й порівняльний аналіз.

## 2. Модель пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженням»

Існує кілька загальновідомих топологій побудови пасивних оптичних мереж, які разом називають «шина», так існують назви «шина з відгалудженнями», «шина з розгалудженням», «комбінована шина» та інші. Найбільш економічною з точки зору витрат оптичного волокна є найскладнішою з точки зору розрахунку, так звана, топологія «чистої шини», яка розглянута в [14]. Топологія «шина з розгалудженням» розглянута в [15] та дозволяє зменшити кількість сплітерів та точок зварки на розподільчій ділянці в порівнянні з топологією «чиста шина» при незначному збільшенні витрат оптичного кабелю на абонентській ділянці. Тепер же, розглянемо топологію побудови пасивних оптичних мереж типу «шина з відгалудженням» на два OLT (рис. 1), яка передбачає використання опорних та розподільчих сплітерів сплітерів на два виходи тобто типу 1:2. Необхідно зауважити, що в якості розподільчих сплітерів можуть застосовуватись сплітери типу 1:O, де O-кількість ONT, які обслуговуються одним розподільчим сплітером (рис. 2). Так для сільської місцевості найбільш раціональним є використання розподільчих сплітерів типу 1:2 та 1:4, а для міст з багатоповерховою забудовою раціональна кількість виходів O визначатиметься кількістю потенційних клієнтів на кожному поверху конкретної будівлі. Така схема розгортання мережі при  $O > 2$  дозволяє зменшити загальну кількість сплітерів та точок зварки на розподільчій ділянці в порівнянні з топологією «чиста шина», хоча і не настільки багато, як топологія «шина з розгалудженням». Основною перевагою топології «шина з відгалудженням» над «шина з розгалудженням» полягає в тому, що в багатьох прикладних випадках всі розподільчі сплітери будуть однакові, тобто типу 1/O та з рівномірним розподілом вхідної оптичної потужності між усіма виходами, що значно спрощує розрахунок та зменшує загальну номенклатуру пасивних елементів. Звичайно є й недоліки, які полягають в збільшенні витрат оптичного кабелю на абонентській ділянці в порівнянні з «чистою шиною» та збільшенням кількості сплітерів і точок зварки в порівнянні з «шиною з розгалудженням».

Нехай: N – загальна кількість OLT, що обслуговується одним ONT; K – загальна кількість опорних  $S_k$  сплітерів типу 1:2; M – загальна кількість розподільчих  $S_{k,m}$  сплітерів (в нашому випадку типу 1:2).

Аналізуючи схему рис.1, можна побачити, що в загальному випадку при використанні сплітерів типу 1:2, всі розподільчі сплітери обслуговують по два ONT не залежно від загальної кількості N абонентських пристроїв, що обслуговуються одним PON концентратором OLT. Відмінність полягає в тому, що у випадку непарної кількості N, перші

$K-1$  опорні сплітери не підключають безпосередньо до себе абонентські лінії, а останній  $K$ -тий підключає до першого виходу останній  $M$ -тий розподільчий сплітер та до другого виходу підключається останній  $N$ -ий абонентський ONT (рис.1, а). Якщо величина  $N$  парна, то всі  $K$  опорні сплітери не підключають безпосередньо до себе абонентські лінії, абонентські лінії підключаються тільки до виходів розподільчих сплітерів ONT (рис.1, б).

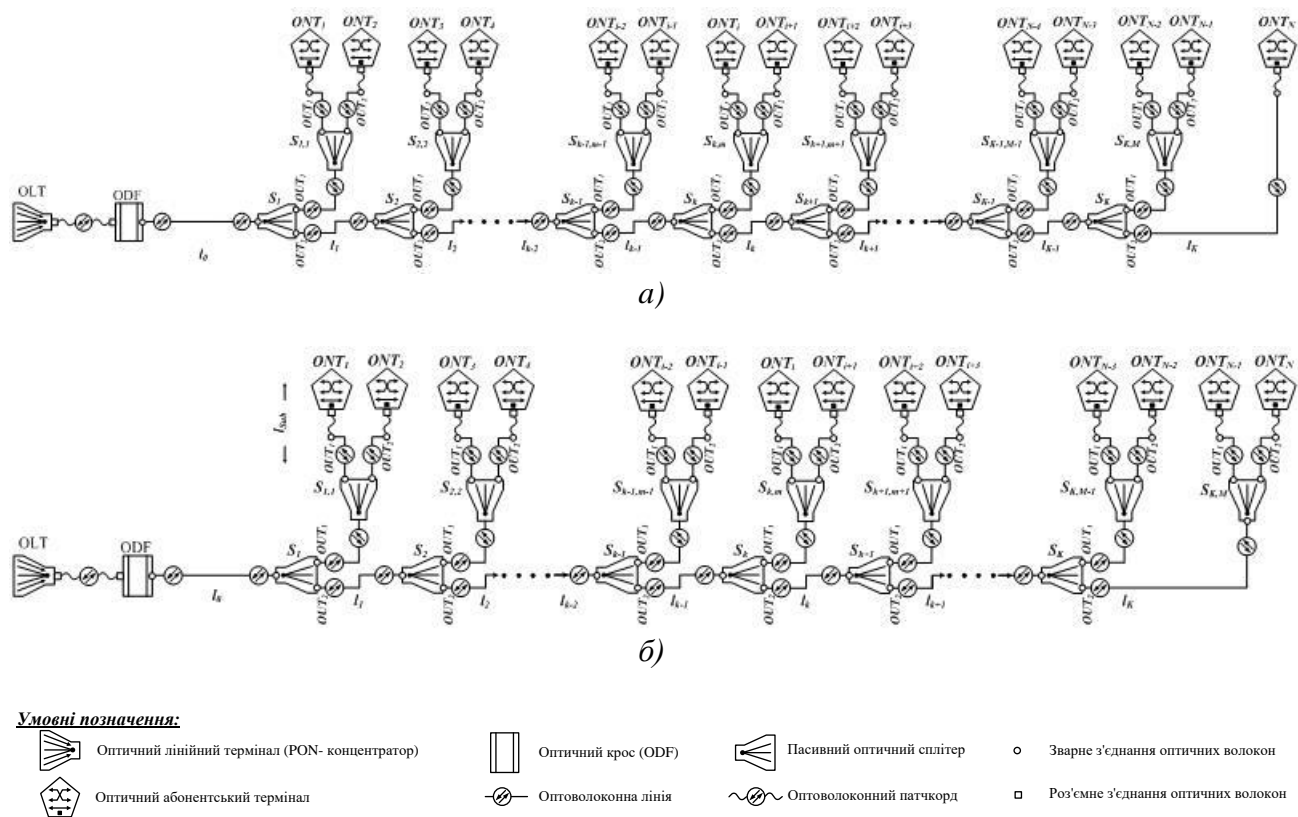


Рис.1. Схеми пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженням»

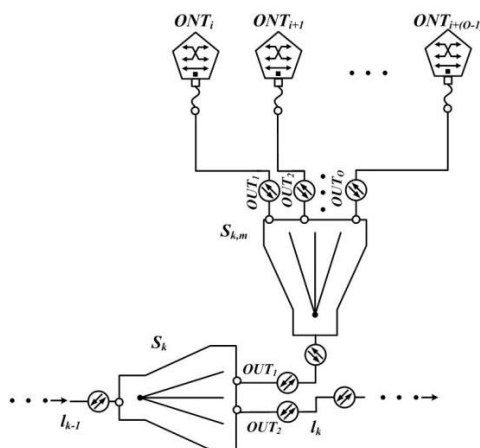


Рис.2. Фрагмент схеми з використанням розподільчих сплітерів типу 1:O, де  $O$ -кількість ONT, які обслуговуються одним розподільчим сплітером

Отже, якщо загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі  $N$  непарне, то всі опорні сплітери  $S_k$  з індексами від 1 до  $K$  будуть типу 1:2, де перші  $(K - 1)$  сплітери будуть підключати по одному розподільчому сплітеру  $S_{k,m}$  а останній сплітер  $S_K$  буде підключати останній розподільчий сплітер  $S_{K,M}$  до першого виходу  $OUT_1$ , та останній ONT<sub>N</sub> до другого виходу  $OUT_2$ . Тоді з рівняння:

$$N = (K - 1) \cdot 2 + 1 \cdot 3, \quad \text{для } N - \text{ непарне,} \quad (1)$$

отримаємо загальне число сплітерів  $K$  при непарній кількості ONT  $N$ , які обслуговуються одним OLT:

$$K = \frac{N - 1}{2}, \quad \text{для } N - \text{ непарне,} \quad (2)$$

при цьому очевидно, що:

$$M = K = \frac{N - 1}{2}, \quad \text{для } N - \text{ непарне,} \quad (3)$$

Якщо загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі  $N$  парне, то перші сплітери  $S_k$  з індексами від 1 до  $(K - 1)$  будуть типу 1:2 та будуть підключати по одному розподільчому сплітеру  $S_{k,m}$ , а останній сплітер  $S_K$  буде підключати два розподільчі сплітери:  $S_{K,M-1}$  – до першого виходу;  $S_{K,M}$  – до другого виходу, тобто на останній опорний сплітер приходиться чотири останні ONT. Тоді з рівняння:

$$N = (K - 1) \cdot 2 + 1 \cdot 4, \quad \text{для } N - \text{ парне,} \quad (4)$$

отримаємо загальне число сплітерів  $K$  при непарній кількості ONT  $N$ , які обслуговуються одним OLT:

$$K = \frac{N - 2}{2}, \quad \text{для } N - \text{ парне,} \quad (5)$$

при цьому очевидно, що:

$$M = K + 1 = \frac{N}{2}, \quad \text{для } N - \text{ парне,} \quad (6)$$

Нехай  $k$ -тий опорний сплітер  $S_k$  підключає  $m$ -тий розподільчий сплітер, який позначатимемо  $S_{k,m}$  через перший вихід, а до другого виходу підключається наступний  $(k+1)$ -ший сплітер для будь-якого  $k$  з діапазону від 1 до  $(K - 1)$ . При цьому кожен розподільчий сплітер  $S_{k,m}$  буде обслуговувати  $i$ -тий ONT через перший вихід, а  $(i+1)$ -перший ONT через другий вихід. Тоді останній  $K$ -тий сплітер  $S_K$  для випадку, коли  $N$  непарне, буде обслуговувати  $(N - 2)$ -гий та  $(N - 1)$ -ший ONT через перший вихід за допомогою розподільчого сплітера  $S_{K,M}$ , а  $N$ -ний ONT<sub>N</sub> через другий вихід. Для випадку, коли  $N$  парне, останній  $K$ -тий сплітер  $S_K$  буде обслуговувати  $(N - 3)$ -тій та  $(N - 2)$ -гий ONT через перший вихід за допомогою передостаннього розподільчого сплітера  $S_{K,M-1}$ , а  $(N - 1)$ -ший та останній ONT через другий вихід за допомогою останнього розподільчого сплітера  $S_{K,M}$ .

**Розглянемо випадок, коли загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі  $N$  парне.** Для цієї топології, загальні втрати потужності оптичного сигналу між концентратором пасивної оптичної мережі OLT та  $i$ -тим й  $(i+1)$ -шим абонентськими оптичними терміналами ONT в загальному вигляді можна описати наступними виразами:

$$\begin{aligned} A_{OLT-ONT_i} = A_{ONT_i} &= (n_c^{Core} \cdot \alpha_c + n_w^{Core} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Core} \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ (n_c^{Sub} \cdot \alpha_c + n_w^{Sub} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Sub} \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ ((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_1^{S_{k,m}} \right), \\ A_{OLT-ONT_{i+1}} = A_{ONT_{i+1}} &= (n_c^{Core} \cdot \alpha_c + n_w^{Core} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Core} \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ (n_c^{Sub} \cdot \alpha_c + n_w^{Sub} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Sub} \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \end{aligned} \quad (7)$$

$$+((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_2^{S_{k,m}} \right),$$

$$k = \frac{i+1}{2};$$

для  $i = 1 \dots (N - 3)$ , де  $i$  непарне, а  $N$  парне,

та

$$A_{OLT-ONT_{N-1}} = A_{ONT_{N-1}} = (n_c^{Core} \cdot \alpha_c + n_w^{Core} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Core} \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) +$$

$$+ (n_c^{Sub} \cdot \alpha_c + n_w^{Sub} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Sub} \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) +$$

$$+ ((3 \cdot K) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^K l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^K A_2^{S_j} + A_1^{S_{K,M}} \right),$$

$$A_{OLT-ONT_N} = A_{ONT_N} = (n_c^{Core} \cdot \alpha_c + n_w^{Core} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Core} \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \quad (8)$$

$$+ (n_c^{Sub} \cdot \alpha_c + n_w^{Sub} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Sub} \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) +$$

$$+ ((3 \cdot K) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^K l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^K A_2^{S_j} + A_2^{S_{k,m}} \right),$$

$$k = \frac{i+1}{2};$$

для  $i = N - 1$ , де  $i$  непарне, а  $N$  парне,

де:  $A_{OLT-ONT_i}$  – загальні втрати потужності оптичного сигналу між OLT та  $i$ -тим ONT, яке далі скорочено позначатимемо  $A_{ONT_i}$ , дБ;

$n_c^{Core}, n_w^{Core}, n_{pc}^{Core}$  – загальне число роз'ємних з'єднань, точок зварки та оптичних патчкордів на магістральній ділянці між OLT та  $i$ -тим ONT, відповідно;

$\alpha_c, \alpha_w, \alpha_{pc}, \alpha_{oc}$  – втрати в роз'ємному з'єднанні (дБ), точці зварки (дБ), оптичному патчкорді (дБ) та оптичному волокні (дБ/км), відповідно;

$l_0, l_j, l_{sub}$  – довжина магістральної ділянки (км), довжина  $j$ -того сегменту розподільчої ділянки (км), довжина абонентської ділянки (км), відповідно, що складають лінійний тракт між OLT та  $i$ -тим ONT;

$A_2^{S_j}$  – внесені втрати  $j$ -тим опорним оптичним сплітером  $S$  в напрямку другого виходу, що входить до складу лінійного тракту між OLT та  $i$ -тим й  $(i+1)$ -шим ONT;

$A_1^{S_k}$  – внесені втрати  $k$ -тим опорним оптичним сплітером  $S$  в напрямку першого виходу, до якого безпосередньо підключається розподільчий сплітер  $S_{k,m}$ ;

$A_1^{S_{k,m}}$  – внесені втрати  $m$ -тим розподільчим оптичним сплітером  $S_{k,m}$  в напрямку першого виходу, до якого безпосередньо підключається абонентська ділянка  $i$ -того ONT;

$A_2^{S_{k,m}}$  – внесені втрати  $m$ -тим розподільчим оптичним сплітером  $S_{k,m}$  в напрямку другого виходу, до якого безпосередньо підключається абонентська ділянка  $(i+1)$ -шого ONT;

$N$  – загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі.

Аналізуючи рівняння (7, 8) видно, що вирази в перших та других скобках не залежать від номера ONT, тобто є константами, які описують конкретну реалізацію топології «шина з відгалуженням». Тоді можна переписати рівняння (5, 7, 8) в більш компактній формі:

$$A_{ONT_i} = A^{Core} + A^{Sub} + ((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_1^{S_{k,m}} \right),$$

(9)

$$A_{ONT_{i+1}} = A^{Core} + A^{Sub} + ((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_2^{S_{k,m}} \right),$$

$$k = \frac{i+1}{2};$$

для  $i = 1 \dots (N - 3)$ , де  $i$  непарне, а  $N$  парне,

та

$$A_{ONT_{N-1}} = A^{Core} + A^{Sub} + ((3 \cdot K) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^K l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^K A_2^{S_j} + A_1^{S_{K,M}} \right),$$

$$A_{ONT_N} = A^{Core} + A^{Sub} + ((3 \cdot K) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^K l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^K A_2^{S_j} + A_2^{S_{K,M}} \right),$$

$$k = \frac{i+1}{2};$$

для  $i = N - 1$ , де  $i$  непарне, а  $N$  парне,

де:  $A^{Core} = n_c^{Core} \cdot \alpha_c + n_w^{Core} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Core} \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}$  – втрати потужності оптичного сигналу на магістральній ділянці;

$A^{Sub} = n_c^{Sub} \cdot \alpha_c + n_w^{Sub} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Sub} \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}$  – втрати потужності оптичного сигналу на абонентській ділянці;

$(3 \cdot k) \cdot \alpha_w$  – втрати потужності оптичного сигналу в точках зварки на розподільчій ділянці;

$\left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}$  – втрати потужності оптичного сигналу в оптичному волокні на розподільчій ділянці;

$\sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_1^{S_{k,m}}$  та  $\sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_2^{S_{k,m}}$  – втрати потужності оптичного сигналу в оптичних сплітерах на розподільчій ділянці для ONT з непарними та парними індексами (номерами), відповідно, для перших  $(N-2)$  ONT;

$\sum_{j=1}^K A_2^{S_j} + A_1^{S_{K,M}}$  та  $\sum_{j=1}^K A_2^{S_j} + A_2^{S_{K,M}}$  – втрати потужності оптичного сигналу в оптичних сплітерах на розподільчій ділянці для передостаннього та останнього ONT, відповідно.

Для конкретної схеми (рис. 1, б) вирази (7, 8) перетворяться у вигляді:

$$A_{ONT_i} = (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) +$$

$$+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) +$$

$$+ ((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_1^{S_{k,m}} \right),$$

$$A_{ONT_{i+1}} = (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) +$$

$$+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc})$$

$$+ ((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{S_j} + A_1^{S_k} + A_2^{S_{k,m}} \right),$$

$$k = \frac{i+1}{2};$$

(11)

для  $i = 1 \dots (N - 3)$ , де  $i$  непарне, а  $N$  парне,

та

$$\begin{aligned}
A_{ONT_{N-1}} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
&+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
&+ ((3 \cdot K) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^K l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^K A_2^{Sj} + A_1^{SK,M} \right), \\
A_{ONT_N} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
&+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) \\
&+ ((3 \cdot K) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^K l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^K A_2^{Sj} + A_2^{SK,M} \right), \\
&k = \frac{i+1}{2};
\end{aligned} \tag{12}$$

для  $i = (N - 1)$ , де  $i$  непарне, а  $N$  парне.

**Розглянемо випадок, коли загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі  $N$  непарне.** Головною відмінністю цього випадку (рис. 1, а) є те, що останній магістральний сплітер буде обслуговувати останній розподільчий сплітер через перший вихід та останній ONT через другий. Використовуючи аналогічний підхід та міркування, запишемо відразу вираз для цього випадку, у формі аналогічній до виразам (11, 12), при цьому в основному зміниться тільки останнє рівняння для останнього  $N$ -го ONT:

$$\begin{aligned}
A_{ONT_i} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
&+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
&+ ((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{Sj} + A_1^{Sk} + A_1^{Sk,m} \right), \\
A_{ONT_{i+1}} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
&+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) \\
&+ ((3 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^{k-1} A_2^{Sj} + A_1^{Sk} + A_2^{Sk,m} \right), \\
&k = \frac{i+1}{2};
\end{aligned} \tag{13}$$

для  $i = 1 \dots (N - 2)$ , де  $i$  непарне, а  $N$  парне,

та

$$\begin{aligned}
A_{ONT_N} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
&+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) \\
&+ ((3 \cdot K) \cdot \alpha_w + \left[ \sum_{j=1}^K l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left( \sum_{j=1}^K A_2^{Sj} \right), \\
&k = \frac{i+1}{2};
\end{aligned} \tag{14}$$

для  $i = N$ ), де  $i$  непарне, а  $N$  непарне.

### 3. Точний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженням»

Точний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженням» полягає в точному аналітичному вигляді пошук всіх параметрів пасивної оптичної мережі.

Згідно загальновідомого підходу, балансування пасивних оптичних мереж починають з останнього (найдалшого від OLT) оптичного сплітера [8, 9].

**Розглянемо випадок, коли загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі  $N$  парне.** В запропонованій схемі, очевидно, що розраховувати параметри всіх розподільчих сплітерів  $S_{k,m}$  не потрібно, адже всі вони одного типу, тобто 1:2, та мають рівномірний розподіл потужності, якщо параметри абонентського сегменту однакові, що майже завжди забезпечується. Отже параметри розподільчих сплітерів наступні: тип – 1:2; розподіл потужності - 50% / 50%. Таким чином необхідно знайти вирази для пошуку параметрів опорних сплітерів. Для нашого випадку, враховуючи (11, 12), вираз для визначення величини втрат потужності оптичного сигналу, яку необхідно скомпенсувати шляхом нерівномірного розподілу потужності між виходами останнього сплітера  $S_K$ , матиме вигляд:

$$A_{ONT_{N-2}} - A_{ONT_N} = A_1^{S_K} + A_1^{S_{K,M-1}} - A_2^{S_K} - (l_K \cdot \alpha_{oc}) - A_1^{S_{K,M}}. \quad (15)$$

При цьому умовою збалансованості буде рівність нулю різниці внесених втрат:

$$A_{ONT_{N-2}} - A_{ONT_N} = 0. \quad (16)$$

Враховуючи умову (16) вираз (15) перетвориться на:

$$A_1^{S_K} - A_2^{S_K} = (l_K \cdot \alpha_{oc}) - A_1^{S_{K,M-1}} + A_1^{S_{K,M}} = (l_K \cdot \alpha_{oc}), \quad (17)$$

де:  $A_1^{S_K} - A_2^{S_K}$  – різниця внесених втрат між першим та другим виходами  $K$ -того опорного оптичного сплітера  $S_K$ , яку позначатимемо далі як  $\Delta_{12}^{S_K}$ , і яка зможе збалансувати втрати оптичного тракту в напрямках  $ONT_{N-2}$  та  $ONT_N$ ;

$-A_1^{S_{K,M-1}} + A_1^{S_{K,M}}$  – різниця внесених втрат в напрямку першого виходу  $(M-1)$ -шого та  $M$ -того розподільчих сплітерів, яка в нашому випадку перетворюється на нуль, адже параметри всіх розподільчих сплітерів однакові.

Для знаходження параметрів розподілу потужності сплітера  $S_K$  скористаємося наступним виразом, отриманим в [12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_i = \frac{100}{\sum_{n=1}^2 10^{\frac{\Delta_{ni}^S}{11.5}}}, \\ i = 1 \dots 2 \end{array} \right. \quad (18)$$

де:  $D_i$  – відсоток потужності, який відводиться на  $i$ -тий вихід сплітера  $S$ ;

$\Delta_{ni}^S$  – різниця внесених втрат між  $n$ -ним та  $i$ -тим виходом  $S$ , яку необхідно компенсувати;

$i = 1 \dots 2$  – номери виходів оптичного сплітера  $S$ .

В нашому випадку отримаємо:



$$\begin{cases} D_1^{S_K} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{-l_K \cdot \alpha_{oc}}{11,5}}}, \\ D_2^{S_K} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{l_K \cdot \alpha_{oc}}{11,5}}} \end{cases} \quad (19)$$

де:  $D_1^{S_K}, D_2^{S_K}$  – відсоток потужності, який відводиться на перший та другий виходи опорного оптичного сплітера  $S_K$ , відповідно.

Знаючи величини  $D_1^{S_K}$  та  $D_2^{S_K}$ , можемо визначити значення внесених втрат в кожний з виходів сплітера  $S_K$ , використовуючи одну з відомих формул апроксимації [9]:

$$A_1^{S_K} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{S_K}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{S_K}}\right), \quad (20)$$

$$A_2^{S_K} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{S_K}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{S_K}}\right). \quad (21)$$

Тепер можна переходити до пошуку параметрів опорного сплітера з індексом на одиницю менше, тобто до сплітера  $S_{K-1}$ . Для нашого випадку, використовуючи вираз для визначення величини втрат потужності оптичного сигналу, яку необхідно скомпенсувати шляхом нерівномірного розподілу потужності між виходами сплітера  $S_{K-1}$ , матиме вигляд:

$$\begin{aligned} A_{ONT_{N-5}} - A_{ONT_{N-3}} &= A_{ONT_i} - A_{ONT_{i+2}} \text{ при } i = (2(K-1) - 1) = \\ &= A_1^{S_{K-1}} + A_1^{S_{K-1, M-2}} - A_2^{S_{K-1}} - (l_{K-1} \cdot \alpha_{oc}) - A_1^{S_K} - A_1^{S_{K, M-1}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Тоді умовою збалансованості буде рівність нулю різниці внесених втрат:

$$A_{ONT_{N-5}} - A_{ONT_{N-3}} = 0. \quad (23)$$

Враховуючи умову (23) вираз (22) перетвориться на:

$$A_1^{S_{K-1}} - A_2^{S_{K-1}} = (l_{K-1} \cdot \alpha_{oc}) - A_1^{S_{K-1, M-2}} + A_1^{S_K} + A_1^{S_{K, M-1}} = (l_{K-1} \cdot \alpha_{oc}) + A_1^{S_K}, \quad (24)$$

де:  $A_1^{S_{K-1}} - A_2^{S_{K-1}}$  – різниця внесених втрат між першим та другим виходами  $(K-1)$ -шого опорного оптичного сплітера  $S_{K-1}$ , яку позначатимемо далі як  $\Delta_{12}^{S_{K-1}}$ , і яка зможе збалансувати втрати оптичного тракту в напрямках  $ONT_{N-5}$  та  $ONT_{N-3}$

$-A_1^{S_{K-1, M-2}} + A_1^{S_{K, M-1}}$  – різниця внесених втрат в напрямку першого виходу  $(M-2)$ -гого та  $(M-1)$ -шого розподільчих сплітерів, яка в нашому випадку перетворюється на нуль, адже параметри всіх розподільчих сплітерів однакові.

Скориставшись формулою (18) знаходимо параметри розподілу потужності опорного сплітера  $S_{K-1}$ :

$$\begin{cases} D_1^{S_{K-1}} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{-l_{K-1} \cdot \alpha_{oc} - A_1^{S_K}}{11,5}}}, \\ D_2^{S_{K-1}} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{l_{K-1} \cdot \alpha_{oc} + A_1^{S_K}}{11,5}}} \end{cases} \quad (25)$$

де:  $D_1^{S_{K-1}}$ ,  $D_2^{S_{K-1}}$  – відсоток потужності, який відводиться на перший та другий виходи опорного оптичного сплітера  $S_{K-1}$ , відповідно.

Знаючи величини  $D_1^{S_{K-1}}$ , та  $D_2^{S_{K-1}}$ , можемо визначити значення внесених втрат в кожний з виходів сплітера  $S_{K-1}$ , використовуючи одну з відомих формул апроксимації [9]:

$$A_1^{S_{K-1}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{S_{K-1}}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{S_{K-1}}}\right), \quad (26)$$

$$A_2^{S_{K-1}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{S_{K-1}}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{S_{K-1}}}\right). \quad (27)$$

Пошук параметрів всіх інших сплітерів починаючи з  $S_{K-2}$  і завершуючи  $S_1$  здійснюється аналогічно тим, як вівся пошук для сплітера  $S_{K-1}$ .

**Випадок, коли загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі  $N$  непарне.** Для цього випадку зміниться форма запису виразів лише для останнього опорного сплітера. Тобто вирази типу (15), (17), (19)-(21) необхідно відповідним чином видозмінити.

Отже алгоритм пошуку параметрів і характеристик пасивних оптичних мереж побудованих за топологією типу «шина з розгалудженнями» (рис. 1) виглядатиме наступним чином:

1. Складається схема мережі (рис. 1);
2. Складаються рівняння типу (11, 12) при парній кількості ONT та (13, 14) при непарній кількості ONT для проміжних та останнього абонентського терміналу;
3. Параметри розподільчих сплітерів становитимуть 50% / 50%;
4. Знаходяться параметри останнього опорного сплітера  $S_K$  з умови повного балансування за формулами (15), (17), (19)-(21);
5. Зменшуємо на одиницю індекс опорного сплітера, і якщо він дорівнює нулю переходимо до пункту 7, в іншому випадку переходимо до пункту 6;
6. Знаходяться параметри поточного сплітера  $S_k$  з умови повного балансування за формулами (22), (24)-(27), та переходимо до пункту 5;
7. Розраховуємо за формулами (11, 12) при парній кількості ONT та (13, 14) при непарній кількості ONT загальні втрати потужності оптичного сигналу між OLT і всіма ONT та перевіряємо їх на рівність, тобто:

$$A_{OLT-ONT_i} = const, \text{ для } i = 1 \dots N;$$

8. Розраховуємо, за потреби інші агреговані характеристики такі, як загальна кількість точок зварки, роз'ємних з'єднань, оптичних патчкордів, кількості оптичних волокон всього та по ділянках окремо, тощо.

#### **4. Технологічно досяжний інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженням»**

Як було зазначено вище, сьогодні можна виготовити оптичні сплітери з точністю поділу вихідної потужності до 1%. Тобто на замовлення можуть виготовити сплітери типу 1:2 з параметрами  $X\% / (100-X)\%$ , де  $X$  – натуральне число від 1 до 99. Не виключено, що з часом зможуть виробляти сплітери з точністю до десятих, сотих і тисячних долей відсотка, що наблизитиме технологічно досяжний інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженням» до точного методу.

Технологічно досяжний інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженням» можна отримати з точного методу, якщо на кожному кроці знаходження коефіцієнтів ділення  $D_1^{S_i}$ ,  $D_2^{S_i}$  округлювати їх значення до цілого числа

відсотків.

## 5. Існуючий інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі

Існуючий широковідомий інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі широко описаний в різних джерелах [7, 8, 9] і зводиться до простого пошуку з переліку можливих значень по таблицях стандартних серійно випускаємих сплітерів, для чого побудовані відповідні двовимірні таблиці.

Слід зазначити, що для розгалужувачів на три і більше виходів такі таблиці взагалі не будують, адже для розгалужувача на три виходи такі таблиці стають тривимірними! Для сплітерів на чотири виходи таблиці стають чотиривимірними і.т.д, що робить цей метод вкрай обмеженим.

Існуючий інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з відгалудженнями» можна отримати з точного методу, якщо на кожному кроці знаходження коефіцієнтів ділення  $D_1^{S_i}$ ,  $D_2^{S_i}$  округлювати їх значення до найближчого з заданого переліку. Цей перелік часто виглядає наступним чином: 5%, 10%; 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50, тобто з точністю до 5%.

## 6. Висновки

1. Розроблена математична модель мережі PON з топологією «шина з відгалудженнями» може бути використана як при впровадженні пасивних оптичних мереж доступу до Інтернет, так і в мережах кабельного телебачення, де фізичні процеси у відгалужувачах та розгалужувачах дуже схожі.

2. За рахунок використання точного аналітичного розв'язку задачі балансування для топології типу «шина з відгалудженнями» на практиці стає можливим максимально наблизитись до теоретичних переваг, що закладені в технології PON.

3. Перехід від точного аналітичного методу до технологічно досяжного методу та існуючого інженерного методу можна виконати елементарно просто.

4. Тип розподільчих сплітерів однаковий, при цьому розподіл потужності рівномірний, що дозволяє не виконувати для них операції балансування, що значно спрощує вирішення задачі, її аналізу, та технічну експлуатацію таких мереж на практиці. Балансування потребують лише опорні сплітери.

5. Така схема розгортання мережі має таку ж кількість сплітерів, як і в «чистій шині» [14], проте розрахунок значно простіший, за невеликого збільшення витрат оптичного кабелю, яке збігається з «шиною з розгалудженнями» [15].

6. Отримані результати, можна легко поширити на випадки побудови мереж з топологією типу «шина з відгалудженнями» коли застосовуються розподільчі сплітери на три, чотири і більше OLT.

7. Подальшого дослідження потребує аналіз та порівняння запропонованих методів, я також побудова моделей для інших топологій побудови пасивних оптичних мереж.

## Література

1. Broadband Optical Access Systems based on Passive Optical Networks (PON) // ITU-T Rec. G.983.1. – 10/1998.

2. A broadband optical access system with increased service capability by wavelength allocation // ITU-T Rec. G.983.3. – 03/2001.

3. Gigabit Capable Passive Optical Networks (G-PON):Transmission Convergence Layer Specification // ITU-T Rec. G.984.3. – 10/2003.

4. 10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms // ITU-T Rec. G.987. – 06/2012.

5. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Скляров. – СПб., 2010. – 272с.

6. Русакова Е.А. Проектирование сети доступа на базе технологии PON / Е.А. Русакова. –

Екатеринбург, 2015. – 40с.

7. Глущенко Д.В. Расчет оптического бюджета PON с равномерными разветвителями / Д.В. Глущенко, В.Н. Урядов // Современные средства связи: материалы XV Международной научно-технической конференции. – Минск: 28–30 сент. 2010 г. – С. 28.

8. Глущенко Д.В. Расчет оптического бюджета PON с неравномерными разветвителями / Д.В. Глущенко, В.Н. Урядов // Современные средства связи: материалы XV Международной научно-технической конференции. – Минск: 28–30 сент. 2010 г. – С. 29.

9. Глущенко Д.В. Методики оценки бюджета на основе применения технических решений с использованием компонент пассивных оптических сетей / Д.В. Глущенко, В.Н. Урядов // Сети связи. – 2011. – № 2 (106). – С. 43-45.

10. Петренко И.И. Пассивные оптические сети PON, Часть 1. Архитектура и стандарты / И.И. Петренко, Р.Р. Убайдуллаев // Lightwave russian edition. – 2004. – №1. – С. 22-28.

11. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. – Москва: Эко-Трендз, 2001. – 267с.

12. Nedashkivskiy O. Precise method of balancing passive optical networks with irregular splitter with two or more outputs / O.Nedashkivskiy // IEEE Conference Publications: 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT). – 201. – P. 228-231.

13. ДСТУ Б А.2.4-40:2009 Телекомунікації. Проводові засоби зв'язку. Умовні графічні зображення на схемах та планах.

14. Недашківський О.Л. Методи побудови пасивних оптичних мереж з топологією «шина» / О.Л. Недашківський // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2017. – № 3 (47). – С. 42-49.

15. Недашківський О.Л. Методи побудови пасивних оптичних мереж з топологією «шина з розгалуженням» / О.Л. Недашківський // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2017. – № 4 (48). – С. 49-58.

#### *Автори статті*

**Недашківський Олексій Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна. Тел. +380 67 506 20 00. E-mail: al\_1@ua.fm.

#### *Authors of the article*

**Nedashkivskiy Oleksiy Leonidovych** - candidate of science (technic), assistant professor, assistant professor of Mobile video and information technology chair, State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine. Tel. +380 67 506 20 00. E-mail: al\_1@ua.fm.