

МЕТОДИ ПОБУДОВИ ПАСИВНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА ТОПОЛОГІЄЮ «ШИНА З РОЗГАЛУДЖЕННЯМ»

Nedashkivsky O.L. Methods of creating passive optical networks with the "splitting 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 "splitting bus" using three- and 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 "splitting 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: splitting bus topology, Internet, access network, passive optical network, optical splitter, balancing.

Недашківський О.Л. Методи побудови пасивних оптичних мереж за топологією «шина з розгалуженням». В роботі розглянуті питання побудови пасивних оптичних мереж доступу, а саме балансування мережі з топологією «шина з розгалуженням». Запропонована і описана модель «шини з розгалуженням», що використовує тільки сплітери з трьома та 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 розгалуженням, Інтернет, мережа доступу, пасивна оптична мережа, оптичний сплітер, балансування.

Недашковский А.Л. Методы построения пассивных оптических сетей с топологией «шина с разветвлением». В работе рассмотрены вопросы построения пассивных оптических сетей доступа, а именно балансировка сети с топологией «шина с разветвлением». Предложена и описана модель «шины с разветвлением», использующей только сплитеры с тремя и 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 разветвлением, Интернет, сеть доступа, пассивная оптическая сеть, оптический разветвитель, балансировка.

Вступ

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 швидкістю 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 розгалудженням», 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.

1. Модель пасивної оптичної мережі типу «шина з розгалудженням»

Існує кілька загальновідомих топологій побудови пасивних оптичних мереж, які разом називають «шина», так існують назви «шина з відгалуженнями», «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]. Тепер же, розглянемо топологію побудови пасивних оптичних мереж типу «шина з розгалудженнями» на два OLT (рис. 1), яка передбачає використання сплітерів на три виходи тобто типу 1:3. Така схема розгортання мережі має очевидну перевагу, так як майже вдвічі зменшується кількість сплітерів та точок зварки на розподільчій ділянці в порівнянні з топологією «чиста шина». Звичайно є й недоліки, які полягають в збільшенні витрат оптичного кабелю на абонентській ділянці.

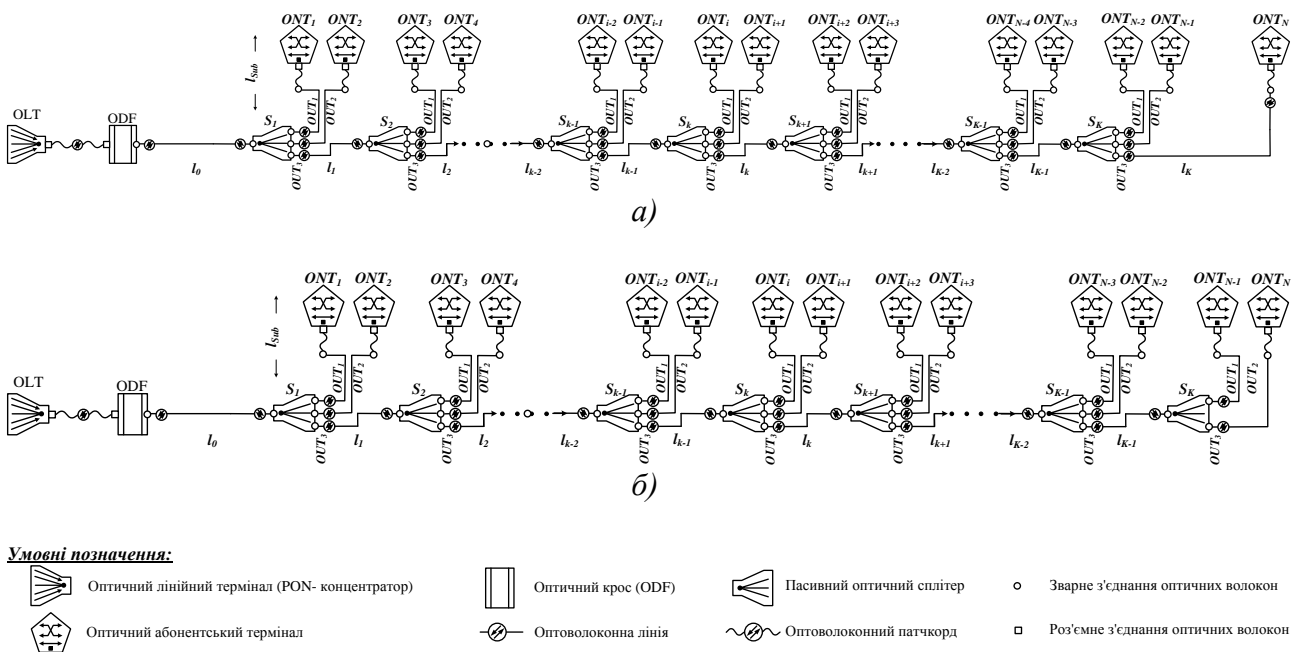


Рис. 1. Схеми пасивної оптичної мережі типу «шина з розгалудженням»

Аналізуючи схему рис.1, можна побачити, що в загальному випадку при використанні сплітерів типу 1:3, перші сплітери обслуговують по два ONT, а останній, в залежності від загальної кількості ONT може обслуговувати три (рис. 1,а) або два (рис. 1,б) ONT.

Отже, якщо загальне число абонентських терміналів ONT в пасивній оптичній мережі N непарне, то всі сплітери S_k з індексами від 1 до K будуть типу 1:3, де перші $(K - 1)$ сплітери будуть обслуговувати по два ONT, а останній сплітер S_K буде обслуговувати останні три ONT. 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:

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

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 1:3 та будуть обслуговувати по два ONT, а останній сплітер S_K буде типу 1:2 та обслуговуватиме останні два ONT. Тоді з рівняння:

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

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

$$K = \frac{N}{2}, \quad \text{для } N - \text{парне}. \quad (4)$$

Нехай k -тий сплітер S обслуговує i -тий ONT через перший вихід, $(i+1)$ -перший ONT через другий вихід, а до третього виходу підключається наступний $(k+1)$ -ший сплітер для будь-якого k з діапазону від 1 до $(K - 1)$. Тоді останній K -тий сплітер S для випадку, коли N непарне, буде обслуговувати $(N - 2)$ -гий ONT через перший вихід, $(N - 1)$ -ший ONT через другий вихід, N -ний ONT через третій вихід, а для випадку, коли N парне, буде обслуговувати $(N - 1)$ -ший ONT через перший вихід, N -ний ONT через другий вихід.

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:

$$\begin{aligned} A_{OLT-ONT_i} &= A_{ONT_i} = (n_c^{Core} \cdot \alpha_c + n_w^{Core} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Core} \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ (n_c^{Sub} \cdot \alpha_c + n_w^{Sub} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Sub} \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{S_j} + A_1^{S_k} \right), \\ A_{OLT-ONT_{i+1}} &= A_{ONT_{i+1}} = (n_c^{Core} \cdot \alpha_c + n_w^{Core} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Core} \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ (n_c^{Sub} \cdot \alpha_c + n_w^{Sub} \cdot \alpha_w + n_{pc}^{Sub} \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{S_j} + A_2^{S_k} \right), \\ &k = \frac{i+1}{2}; \end{aligned} \quad (5)$$

для $i = 1 \dots (N - 1)$, 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_3^{Sj} – внесені втрати j -тим оптичним сплітером S в напрямку третього виходу, що входить до складу лінійного тракту між OLT та i -тим й $(i+1)$ -шим ONT;

A_2^{Sj} – внесені втрати j -тим оптичним сплітером S в напрямку другого виходу, до якого безпосередньо підключається абонентська ділянка $(i+1)$ -го ONT;

A_1^{Sj} – внесені втрати j -тим оптичним сплітером S в напрямку першого виходу, до якого безпосередньо підключається абонентська ділянка i -того ONT;

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

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

$$A_{ONT_i} = A^{Core} + A^{Sub} + ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{Sj} + A_1^{Sk} \right), \quad (6)$$

$$A_{ONT_{i+1}} = A^{Core} + A^{Sub} + ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{Sj} + A_2^{Sk} \right),$$

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

для $i = 1 \dots (N-1)$, 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;

$(2 \cdot k) \cdot \alpha_w$ – 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;

$\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{Sj} + A_1^{Sk}$ та $\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{Sj} + A_2^{Sk}$ – втрати потужності оптичного сигналу в оптичних сплітерах на розподільчій ділянці для ONT з непарними та парними індексами (номерами), відповідно.

Для конкретної схеми (рис. 1) вираз (5) перетвориться у вигляді:

$$\begin{aligned} A_{ONT_i} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{Sj} + A_1^{Sk} \right); \\ A_{ONT_{i+1}} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\ &+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) \\ &+ ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{Sj} + A_2^{Sk} \right) \\ &k = \frac{i+1}{2}; \end{aligned} \quad (7)$$

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

Розглянемо випадок, коли загальне число абонентських терміналів ОНТ в пасивній оптичній мережі N непарне. Головною відмінністю цього випадку є те, що останній сплітер буде типу 1:3 та обслуговуватиме три останні ОЛТ, а не два. Використовуючи аналогічний підхід та міркування, запишемо відразу вираз для цього випадку, у формі аналогічній до виразу (7), до якого слід необхідно додати додаткове рівняння для останнього N -го ОНТ:

$$\begin{aligned}
 A_{ONT_i} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{S_j} + A_1^{S_k} \right); \\
 A_{ONT_{i+1}} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) \\
 &+ ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{k-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{k-1} A_3^{S_j} + A_2^{S_k} \right) \\
 k &= \frac{i+1}{2};
 \end{aligned} \tag{8}$$

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

$$\begin{aligned}
 A_{ONT_N} &= (2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) \\
 &+ ((2 \cdot k) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^k l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^k A_3^{S_j} \right) \\
 k &= \frac{N-1}{2}; \\
 &\text{для } i = N
 \end{aligned}$$

2. Точний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з розгалудженням»

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

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

Розглянемо випадок, коли загальне число абонентських терміналів ОНТ в пасивній оптичній мережі N парне. Для нашого випадку вираз для визначення величини втрат потужності оптичного сигналу, яку необхідно скомпенсувати шляхом нерівномірного розподілу потужності між виходами останнього сплітера S_K , матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
 A_{ONT_{N-1}} - A_{ONT_N} &= [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ ((2 \cdot (K)) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{K-1} A_3^{S_j} + A_1^{S_K} \right)] - \\
 &- [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
 &+ ((2 \cdot (K)) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{K-1} A_3^{S_j} + A_2^{S_K} \right)] = \\
 &= A_1^{S_K} - A_2^{S_K}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

При цьому умовою збалансованості буде рівність нулю різниці внесених втрат:

$$A_{ONT_{N-1}} - A_{ONT_N} = 0. \quad (10)$$

Враховуючи умову (10) вираз (9) перетвориться на:

$$A_1^{SK} - A_2^{SK} = 0, \quad (11)$$

де: $A_1^{SK} - A_2^{SK}$ – різниця внесених втрат між першим та другим виходами K -того оптичного сплітера S_K , яку позначатимемо далі як Δ_{12}^{SK} , і яка зможе збалансувати втрати оптичного тракту в напрямках ONT_{N-1} та ONT_N .

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

$$\left\{ \begin{array}{l} D_i = \frac{100}{\sum_{n=1}^2 10^{\frac{\Delta_{ni}^S}{11.5}}}, \\ i = 1 \dots 2 \end{array} \right. \quad (12)$$

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

Δ_{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:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1^{SK} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{0}{11.5}}}, \\ D_2^{SK} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{0}{11.5}}}, \end{array} \right. \quad (13)$$

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

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

$$A_1^{SK} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{SK}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{SK}}\right), \quad (14)$$

$$A_2^{SK} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{SK}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{SK}}\right). \quad (15)$$

Тепер можна переходити до пошуку параметрів сплітеру з індексом на одиницю менше, тобто до сплітера S_{K-1} . Для нашого випадку вирази для визначення величини втрат потужності оптичного сигналу, яку необхідно скомпенсувати шляхом нерівномірного розподілу потужності між виходами сплітера S_{K-1} , матиме вигляд: (16) для виходів 1 та 2, (17) для виходів 1 та 3; (18) для виходів 2 та 3:

$$\begin{aligned} A_{ONT_{N-3}} - A_{ONT_{N-2}} = & [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\ & + (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\ & + ((2 \cdot (K-1)) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-2} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + \left(\sum_{j=1}^{K-2} A_3^{S_j} + A_1^{S_{K-1}} \right)] - \\ & - [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
& + (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + ((2 \cdot (K-1) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-2} l_{kj} \right] \cdot \alpha_{oc}) + (\sum_{j=1}^{K-2} A_3^{S_j} + A_2^{S_{K-1}})] = \\
& = A_1^{S_{K-1}} - A_2^{S_{K-1}}. \\
A_{ONT_{N-3}} - A_{ONT_{N-1}} & = [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + ((2 \cdot (K-1)) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-2} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + (\sum_{j=1}^{K-2} A_3^{S_j} + A_1^{S_{K-1}})] - \\
& - [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + ((2 \cdot (K)) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + (\sum_{j=1}^{K-1} A_3^{S_j} + A_1^{S_K})] = \\
& = -2 \cdot \alpha_w - (l_{K-1} \cdot \alpha_{oc}) - A_3^{S_{K-1}} + A_1^{S_{K-1}} - A_1^{S_K}.
\end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
A_{ONT_{N-2}} - A_{ONT_{N-1}} & = [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + ((2 \cdot (K-1)) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-2} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + (\sum_{j=1}^{K-2} A_3^{S_j} + A_2^{S_{K-1}})] - \\
& - [(2 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_0 \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + (1 \cdot \alpha_c + 1 \cdot \alpha_w + 1 \cdot \alpha_{pc} + l_{sub} \cdot \alpha_{oc}) + \\
& + ((2 \cdot (K)) \cdot \alpha_w + \left[\sum_{j=1}^{K-1} l_j \right] \cdot \alpha_{oc}) + (\sum_{j=1}^{K-1} A_3^{S_j} + A_1^{S_K})] = \\
& = -2 \cdot \alpha_w - (l_{K-1} \cdot \alpha_{oc}) - A_3^{S_{K-1}} + A_2^{S_{K-1}} - A_1^{S_K}.
\end{aligned} \tag{18}$$

Тоді умовою збалансованості буде рівність нулю різниці внесених втрат:

$$\begin{cases} A_{ONT_{N-3}} - A_{ONT_{N-2}} = 0 \\ A_{ONT_{N-3}} - A_{ONT_{N-1}} = 0 \\ A_{ONT_{N-2}} - A_{ONT_{N-1}} = 0 \end{cases}. \tag{19}$$

Враховуючи умови (16-18) вираз (19) перетвориться на:

$$\begin{cases} A_1^{S_{K-1}} - A_2^{S_{K-1}} = 0 \\ A_1^{S_{K-1}} - A_3^{S_{K-1}} = 2 \cdot \alpha_w + (l_{K-1} \cdot \alpha_{oc}) + A_1^{S_K}, \\ A_2^{S_{K-1}} - A_3^{S_{K-1}} = 2 \cdot \alpha_w + (l_{K-1} \cdot \alpha_{oc}) + A_1^{S_K} \end{cases}, \tag{20}$$

де: $A_1^{S_{K-1}} - A_2^{S_{K-1}} = \Delta_{12}^{S_{K-1}}$ – різниця внесених втрат між першим та другим виходами $(K-1)$ -шого оптичного сплітера S_{K-1} , яка зможе збалансувати втрати оптичного тракту в напрямках як ONT_{N-3} і ONT_{N-2} , так і ONT_N та ONT_{N-1} тому, що втрати в напрямку ONT_{N-1} та ONT_N були збалансовані на попередньому етапі;

$A_1^{S_{K-1}} - A_3^{S_{K-1}} = \Delta_{13}^{S_{K-1}}$ – різниця внесених втрат між першим та третім виходами $(K-1)$ -шого оптичного сплітера S_{K-1} , яка зможе збалансувати втрати оптичного тракту в напрямках

як ONT_{N-3} і ONT_{N-1} ;

$A_2^{S_{K-1}} - A_3^{S_{K-1}} = \Delta_{23}^{S_{K-1}}$ – різниця внесених втрат між другим та третім виходами ($K-1$)-шого оптичного сплітера S_{K-1} , яка зможе збалансувати втрати оптичного тракту в напрямках як ONT_{N-2} і ONT_{N-1} ,

Скориставшись формулою (12) для випадку сплітерів з трьома виходами та значеннями $\Delta_{12}^{S_{K-1}}$, $\Delta_{13}^{S_{K-1}}$, $\Delta_{23}^{S_{K-1}}$, отриманим в (20), знаходимо параметри розподілу потужності сплітера S_{K-1} :

$$\left\{ \begin{array}{l} D_1^{S_{K-1}} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{0}{11,5}} + 10^{\frac{-2\alpha_w - l_{K-1}\alpha_{oc} - A_1^{S_{K-1}}}{11,5}}} \\ D_2^{S_{K-1}} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{0}{11,5}} + 10^{\frac{-2\alpha_w - l_{K-1}\alpha_{oc} - A_1^{S_{K-1}}}{11,5}}} \\ D_3^{S_{K-1}} = \frac{100}{1 + 10^{\frac{2\alpha_w + l_{K-1}\alpha_{oc} + A_1^{S_{K-1}}}{11,5}} + 10^{\frac{2\alpha_w + l_{K-1}\alpha_{oc} + A_1^{S_{K-1}}}{11,5}}} \end{array} \right. , \quad (21)$$

де: $D_1^{S_{K-1}}$, $D_2^{S_{K-1}}$, $D_3^{S_{K-1}}$ – відсоток потужності, який відводиться на перший, другий та третій виходи оптичного сплітера S_{K-1} , відповідно.

Знаючи величини $D_1^{S_{K-1}}$, $D_2^{S_{K-1}}$ та $D_3^{S_{K-1}}$ можемо визначити значення внесених втрат в кожний з виходів сплітера S_{K-1} , використовуючи одну з відомих формул апроксимації [9]:

$$A_1^{S_{K-1}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{S_{K-1}}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_1^{S_{K-1}}}\right), \quad (22)$$

$$A_2^{S_{K-1}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{S_{K-1}}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_2^{S_{K-1}}}\right), \quad (23)$$

$$A_3^{S_{K-1}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_3^{S_{K-1}}}\right) + \log_2(2-1) \cdot 0,4 + 0,2 + 1,5 \cdot \lg\left(\frac{100\%}{D_3^{S_{K-1}}}\right). \quad (24)$$

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 сплітера, який буде типу 1:3, а не 1:2. Тобто вирази типу (9), (11), (13)-(15) необхідно відповідним чином видозмінити.

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

1. Складається схема мережі (рис. 1);
2. Складаються рівняння типу (7) при парній кількості ONT та (8) при непарній кількості ONT для проміжних та останнього абонентського терміналу;
3. Знаходяться параметри останнього сплітера S_K з умови повного балансування за формулами (9), (11), (13)-(15);
4. Зменшуємо на одиницю індекс сплітера, і якщо він дорівнює нулю переходимо до пункту 6, в іншому випадку переходимо до пункту 5;
5. Знаходяться параметри поточного сплітера S_k з умови повного балансування за формулами (16)-(18), (20)-(24), та переходимо до пункту 4;
6. Розраховуємо за формулами (7) при парній кількості ONT та (8) при непарній кількості ONT загальні втрати потужності оптичного сигналу між OLT і всіма ONT та перевіряємо їх на рівність, тобто:

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

7. 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.

3. Технологічно досяжний інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з розгалудженнями»

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, та типу 1:3 з параметрами $X\% / Y\% / Z\%$, де X, Y, Z – натуральне число від 1 до 99 таке, що $X+Y+Z=100\%$. 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 розгалудженнями» до точного методу.

Технологічно досяжний інженерний метод побудови пасивної оптичної мережі типу «шина з розгалудженнями» можна отримати з точного методу, якщо на кожному кроці знаходження коефіцієнтів ділення $D_1^{S_i}, D_2^{S_i}, D_3^{S_i}$ округлювати їх значення до цілого числа відсотків.

4. 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 розгалужувачів 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 розгалудженнями» можна отримати з точного методу, якщо на кожному кроці знаходження коефіцієнтів ділення $D_1^{S_i}, D_2^{S_i}, D_3^{S_i}$ 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%.

Висновки

1. Розроблена математична модель мережі PON з топологією «шина з розгалудженнями» 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 розгалудженнями» 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. Така схема розгортання мережі має очевидну перевагу, так як майже вдвічі зменшується кількість сплітерів та точок зварки на розподільчій ділянці в порівнянні з топологією «чиста шина». Звичайно є й недоліки, які полягають в збільшенні витрат оптичного кабелю на абонентській ділянці.

5. Отримані результати, можна легко поширити на випадки побудови мереж з топологією типу «шина з розгалудженнями» на три, чотири і більше OLT.

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

Список використаної літератури

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. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи / О.К. Скляр. – 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. Методики оценки бюджета на основе применения технических решений с использованием компонент пассивных оптических сетей / О.Л. Недашківський // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2017. – № 3 (47). – С. 42-49.

Автори статті

Недашківський Олексій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Мобільних та відеоінформаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

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.

Дата надходження в редакцію 19.10.2017

Рецензент: д.т.н., проф. Заїка В.Ф.