

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2019.064751

О. Л. ТУРОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент,
Державний університет телекомунікацій, Київ

УТОЧНЕНИЙ РОЗРАХУНОК ПОРОГА ЧУТЛИВОСТІ ФОТОПРИЙМАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ ЦИФРОВОЇ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОЇ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ РОЗДІЛЕННЯМ СИГНАЛУ

Проведено аналіз порядку розрахунку порога чутливості волоконно-оптичних ліній зв'язку зі спектральним розділенням сигналу. Показано доцільність урахування в обчисленнях для таких ліній взаємодії пари «фотодетектор-оптичний підсилювач» із метою встановлення порога чутливості їх композиції як окремого лінійного елемента системи. Уточнено розрахунки порога чутливості фотоприймального пристрою, запропоновано один із найбільш доцільних варіантів оптичного підсилювача та р-п-р фотодіода.

Ключові слова: волоконно-оптичні лінії зв'язку; поріг чутливості; фотоприймальний пристрій; фотодіод.

Вступ

Зі зростанням обсягів трафіку перед операторами зв'язку все більш актуальним постає питання щодо модернізації наявних міських транспортних мереж зв'язку.

Пропускна здатність волоконно-оптичних мереж можна збільшити двома основними способами: підвищивши рівень STM-сигналу або запровадивши технологію щільного хвильового мультиплексування DWDM.

DWDM (англ. *Dense Wavelength Division Multiplexing* — щільне хвильове мультиплексування) — технологія ущільнення інформаційних потоків, при якій кожний первинний інформаційний потік переноситься за допомогою світлових пучків на різних довжинах хвиль, а в оптичній лінії зв'язку міститься сумарний груповий сигнал, сформований мультиплексором із кількох інформаційних потоків.

DWDM — система ущільнення, фізично складається з пристроїв, що генерують інформаційний потік (медіаконвертери, маршрутизатори), трансиверів (приймачі-передавачі, що створюють інформаційний потік на різних довжинах хвиль невидимого для ока інфрачервоного випромінювання), мультиплексорів (пристрої, що створюють/розділяють груповий світловий сигнал) і оптичного хвилеводу (оптоволоконний кабель). Окрім того, до складу DWDM входить група компонент, призначених для посилення/відновлення групового світлового сигналу [1].

У більшості провідних виробників є DWDM-обладнання, яке дозволяє мультиплексувати в С-діапазоні (1530...1565 нм) до 40 оптичних каналів при ширині одного каналу 100 ГГц або до 80 оптичних каналів при його ширині 50 ГГц. У цьому разі максимальна ємність одного оптичного каналу становить 10 Гбіт/с (рівень STM-64). У діапазоні L (1570...1605 нм) максимальна кількість оптичних каналів може досягати 160 при ширині каналу 50 ГГц.

Одним з актуальних питань збільшення пропускної здатності волоконно-оптичної лінії зв'язку, особливо в лініях із спектральним розділенням сигналу, є врахування властивостей компонентів їх складового обладнання.

Внаслідок того, що в системах спектрального розділення каналів використовується обладнання, яке не є ідеальним з фізичного погляду та має визначені допуски, тією чи іншою мірою виникають паразитні перехресні завади між каналами, які мультиплексуються.

Це має особливе значення, коли, як один із компонентів системи, планується використання обладнання, що теоретично здатне забезпечити збільшення пропускної здатності, але водночас виникають сумніви щодо можливого негативного впливу на властивості та погіршення загальних характеристик якості передавання системи.

Зі збільшенням кількості каналів, які ущільнюються в системах волоконно-оптичного зв'язку, окрім зростання складності дотримання необхідних частотних параметрів, спостерігається багато ефектів у компонентах тракту (волокні), що не дають можливості інженерові-проектувальнику провести розрахунок енергетики волоконно-оптичної системи передавання зі спектральним розділенням каналів (ВОСП-СП).

Аналіз останніх публікацій та постановка проблеми. Багато методик, наприклад опубліковані [2], пропонують враховувати неузгодженості параметрів оптичних компонентів у системах із частотним оптичним розділенням каналів (ОЧРК) за допомогою так званих оптичних штрафів в енергетичному бюджеті оптичного тракту.

У роботі [3] підхід до розрахунків якісних характеристик системи містить елементи декомпозиції там, де це можливо зробити, і елементи рекомпозиції для проектування систем із набору оптичних компонентів зі сталими або в певних межах змінними параметрами.

У даній роботі безпосередньо розглянуто вплив таких елементів, як оптичне волокно тракту передавання сигналу, оптичні випромінювачі та фотодетектори.

Для кількісного оцінювання якості передавання сигналу в [3] запропоновано параметр «шумо-завади», а саме відношення сигнал/шум, або Q-параметр, у загальному вигляді кількісно оцінюється як

$$Q = f(C/Ш) = \frac{2 \frac{P_{\text{со}}}{P_{\text{шо}}} (\Delta V_{\text{oc}})^{-0,5}}{1 + \left(1 + 4 \frac{P_{\text{со}}}{P_{\text{шо}}}\right)^{-0,5}},$$

де ΔV_{oc} — ширина смуги оптичного сигналу;

$P_{\text{со}}$ — абсолютний рівень оптичного сигналу на фотоприймачі;

$P_{\text{шо}}$ — абсолютний рівень шумів на фотоприймачі та загалом у системі оптичного тракту;

Абсолютний рівень шумів на фотоприймачі системи оптичного тракту ($P_{\text{шо}}$) у [3] пропонується розраховувати як сукупність шумів кожного частотного каналу, волокна оптичного тракту, шумів джерел випромінювання, підсилювачів та мультиплексорів.

У загальному вигляді рівень шумів системи передавання пропонується розраховувати за допомогою виразу [3]:

$$P_{\text{шо}} = N(k_1(N)K_{\text{ш.ДВ}} + 2k_2K_{\text{ш.ОМ}} + Mk_3K_{\text{ш.ОП}} + k_4(N)K_{\text{ш.ФП}}) + K_{\text{ш.ОВ}}(L_{\Sigma}P_{\text{дж}}),$$

де N — кількість частотних каналів;

$k_1 \dots k_4$ — коефіцієнти співвідношень, для задачі оцінювання візьмемо $k_1 = k_2 = k_3 = k_4 = 1$;

$K_{\text{ш.ДВ}}$ — значення коефіцієнта шумо-завад для джерел випромінювання;

$K_{\text{ш.ОМ}}$ — коефіцієнт шумо-завад оптичного мультиплексора;

$K_{\text{ш.ОП}}$ — коефіцієнт шумо-завад для оптичного підсилювача;

M — кількість підсилювачів;

$K_{\text{ш.ФП}}$ — коефіцієнт шумо-завад для фотоприймачів ВОСПІ;

$K_{\text{ш.ОВ}}$ — коефіцієнт шумо-завад для волокна оптичних трактів.

Зазначені $P_{\text{со}}$ та безпосередньо $K_{\text{ш.ФП}}$ пропонується враховувати через шуми фотодетектора у вигляді чисельних коефіцієнтів, які отримують від виробника.

Але необхідно брати до уваги, що фотоприймач, увімкнений у систему при сумісній роботі з фотопідсилювачем, приймається системою як окремий лінійний елемент зі своїми лінійними властивостями [1; 4].

Тобто їх окремі коефіцієнти шумо-завад не можуть бути враховані як сума, оскільки їх композиція як лінійного елемента не дозволяє здійснити математичне сумування коефіцієнтів та визначити їх окремі пороги чутливості.

З огляду на ці обставини, основний показник роботи фотоприймача, а саме поріг чутливості, необхідно визначати та приймати в загальних обчисленнях системи саме з урахуванням його лінійних властивостей.

Основна частина

Фотоприймальний пристрій (ФПП) у волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) має низку технічних характеристик, а саме: високий динамічний діапазон, амплітудно-частотну характеристику оптимальної форми, малий струм споживання та ін. [4].

Основною характеристикою ФПП є чутливість, оскільки саме вона безпосередньо впливає на дальність передавання інформації в системі при заданій потужності оптичного сигналу в передавачі.

Фундаментальне обмеження на чутливість ФПП накладають внутрішні шуми елементів, що входять до його складу [1; 4; 5].

Необхідно зауважити, що поняття мінімально допустимої потужності (МДП) оптичного сигналу на вході ФПП, за якої забезпечуються задані відношення сигнал/шум або ймовірність помилки, також визначається як поріг чутливості.

Для розрахунку порога чутливості, а також таких параметрів ФПП, як стійкість і еквівалентна шумова потужність (ЕШП), необхідно подати еквівалентну схему ФПП із зазначенням джерела корисного сигналу і основних джерел шумів. Далі виконуються розрахунки струму (напруги) корисного сигналу і здійснюються порівняння його зі струмом (напругою) джерел шумів, визначення МДП при дії шумів різного виду і розгляд можливості реалізації оптимального приймання сигналу для зазначеної схеми.

Узагальнену еквівалентну схему ФПП зображено на рис. 1 [5; 6], де I_c — струм корисного сигналу на вході ФПП, R — динамічний опір, C — ємність переходів ФПП.

Струм дробового та темного шумів фотодетектора ФПП визначається за виразом

$$I_{\text{ДТ}} = \sqrt{I_{\text{Д}}^2 + I_{\text{Т}}^2}.$$

У ФПП зазвичай знаходять застосування два типи попередніх підсилювачів фотострумів: інтегруючі і зі зворотним зв'язком (трансімпедансні) [4; 5].

Інтегруючі підсилювачі мають властивість насичуваності під час приймання цифрових сигналів із довгими серіями «1».

Тому в системах із спектральним розділенням сигналу доцільно застосовувати трансімпедансні підсилювачі, які через зворотний зв'язок за опором мають змогу не здійснювати коригування по високій частоті сигналу [4].

Для розрахунку порога чутливості ФПП подамо оптичний сигнал на його вході в такій формі [4]:

$$P(t) = P_0(1 + m \cos \Omega t), \quad (1)$$

де P_0 — середня потужність оптичного випромінювання;

m — коефіцієнт глибини модуляції;

Ω — частота модулюючого інформаційного сигналу.

Відношення сигнал/шум можна подати таким виразом:

$$C/\text{Ш} = \frac{i_{\text{вх}}^2}{i_{\text{Д}}^2 + i_{\text{Т}}^2 + i_{\text{СШ}}^2} = \frac{m^2 S^2 P_0^2}{4B(qSP_0 + 2kTF_{\text{ш}}R_{\text{н}})}, \quad (2)$$

де $i_{\text{вх}}$ — струм вхідного сигналу є функцією коефіцієнта модуляції, середньої потужності, смуги пропускання сигналу та чутливості оптичного модуля S .

Сумарний шум ФПП є функцією частоти вхідного сигналу, середньої потужності та коефіцієнта підсилювача.

Для більшості ФПП на основі p - n - p фотодетектора основним є внутрішній шум фотодетектора, що набагато перевищує його дробовий та темновий шум [5].

З цього випливає, що відношення сигнал/шум визначатиметься за формулою [4]

$$C/\text{Ш} = \frac{m^2 S^2 P_0^2 R_{\text{н}}}{8BkTF_{\text{ш}}}. \quad (3)$$

Звідки

$$P_0 = 2(C/\text{Ш})^{0,5} \frac{(2kTF_{\text{ш}}B/R_{\text{н}})^{0,5}}{ms}. \quad (4)$$

У разі відношення $C/\text{Ш} = 1$, а це є мінімальний поріг чутливості, дістанемо:

$$P_0 = 2(mS)^{-1} (2kTF_{\text{ш}}/R_{\text{н}})^{0,5}. \quad (5)$$

Еквівалентна схема ФПП (фотодетектор та оптичний підсилювач) окрім опорю $R_{\text{н}}$ також містить еквівалентну ємність C (паралельне з'єднання $C_{\text{Ф}}$ і $C_{\text{БХ}}$) [6].

Ширину смуги пропускання може бути подано у вигляді

$$B \approx (2\pi R_{\text{н}} C)^{-1}. \quad (6)$$

Вочевидно, що з огляду на аналіз виразів (5), (6) для підвищення порога чутливості в ФПП необхідно використовувати p - n - p фотодіоди з як можливо меншим значенням їх ємності і передпідсилювачі з активним вхідним опором [6; 7].

Природа шумів під час передавання цифрового сигналу не змінюється [1; 3].

Виходячи з цього і знехтувавши достатньо низькими дробовим та темновим шумами фотодетектора, поріг чутливості (фактично МДП) ФПП як лінійний елемент загального тракту передавання оптичного цифрового сигналу можна визначити за формулою [3]

$$P_{\text{мін}} = 2\sqrt{\varphi(P_{\text{ном}})} S^{-1} (2kTF_{\text{ш}}B/R_{\text{н}})^{0,5}. \quad (7)$$

Залежність $P_{\text{мін}}$ ФПП на основі p - n - p фотодетектора від швидкості передавання інформації B при ймовірності помилки $P_{\text{ном}} = 10^{-9}$ для різних довжин хвиль оптичного випромінювання при прохідній ємності $C = 1$ пФ подано на рис. 2 [7].

Якщо як ФПП застосувати лавинний фотодетектор (ЛФД), то $P_{\text{мін}}$ буде нижчим на величину $M/\sqrt{2} \dots 3$ порівняно з порогом чутливості ФПП на основі p - n - p фотодетектора [7].

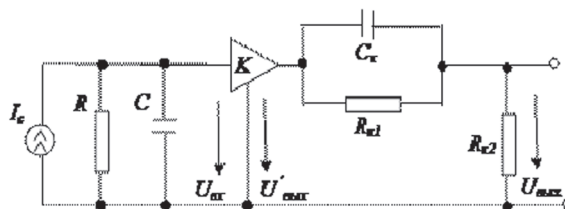


Рис. 1. Еквівалентна схема ФПП

Графіки залежності P_{\min} від B , біт/с, при $P_{\text{пом}} = 10^{-9}$ подано на рис. 2 [7].
 Аналіз цих залежностей дозволяє дійти висновку, що P_{\min} ЛФД буде вищим при $B \geq 0,5$ Гбіт/сек.

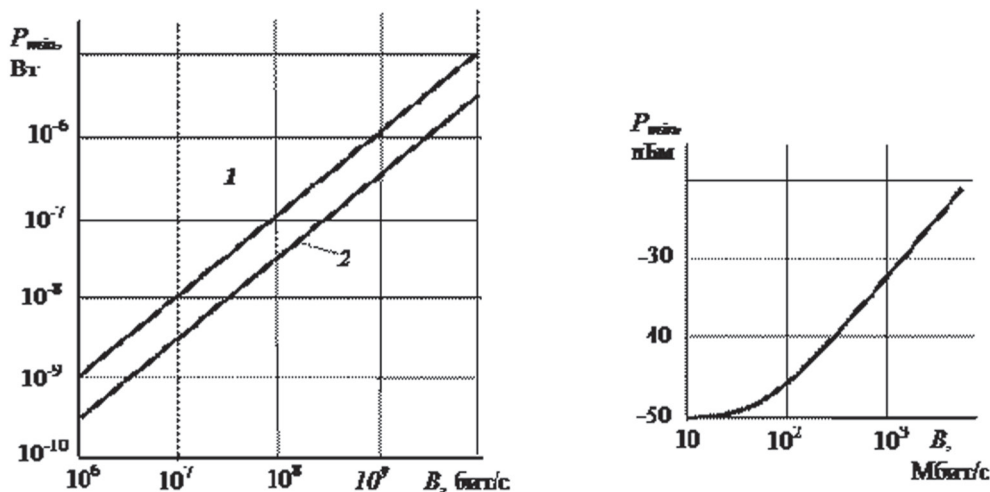


Рис. 2. Залежності P_{\min} від швидкості передавання інформації B , біт/с:
 а — ФПП на основі p - n - p фотодетектора при $\lambda = 0,85$ мкм (1); $\lambda = 1,3$ мкм (2); б — ФПП з германієвим ЛФД

Висновки

1. У процесі проектування волоконно-оптичної системи передавання зі спектральним розділенням каналів розрахунки порога чутливості доцільно виконувати з урахування композиції « p - n - p фотодетектор-оптичний підсилювач» як окремого лінійного елемента системи зі своїм композиційним порогом чутливості.
2. Як оптичний підсилювач для волоконно-оптичних систем передавання зі спектральним розділенням каналів доцільно брати трансімпедансні підсилювачі з низьким входним опором.
3. Для забезпечення ефективної роботи волоконно-оптичних систем передавання зі спектральним розділенням каналів на високих швидкостях передавання сигналу доцільно як оптичний приймач вибирати p - n - p лавинні фотодетектори (ЛФД).

Список використаної літератури

1. Григорчук В. І., Коротков П. А., Фелінський Г. С. Нелінійні та лазерні процеси в оптичних системах: підручник. Київ: КНУ ім. Т. Шевченка. 2008. 576 с.
2. Климаш М. М., Романчук В. І. Методи розрахунку перехресних міжканальних завад в транспортних телекомунікаційних системах: зб. наук. праць ІПМЕ НАН України // Моделювання та інформаційні технології. Київ, 2005. Вип. 31. С. 25–28.
3. Климаш М. М., Демидов І. В., Чайковський І. Б. Аналіз конфігурації та параметрів DWDM систем оптичних магістральних трактів // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». 2006. № 557. С. 85–94. : *Радиоелектроніка та телекомунікації*.
4. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Москва: Техносфера, 2008. 520 с.
5. Купцов В. Д., Валухов В. П. Чувствительность фотоприемных устройств волоконно-оптических линий связи // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер: ИТУ. 2010. Т. 6. № 113. С. 31–36.
6. Осадчук В. С., Осадчук О. В. Волоконно-оптичні системи передачі інформації. Лабораторний практикум: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2005. 132 с.
7. Способ изготовления и параметры Ge p - i - n -фотодиодов / Т. Д. Большаков, А. К. Самохвалов, С. Д. Уварова [и др.] // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 115–119.

А. Л. Туровский

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТА ПОРОГА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ФОТОПРИЕМНОГО УСТРОЙСТВА ЦИФРОВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ СИГНАЛА

По мере роста объемов трафика перед операторами связи все более актуальным становится вопрос о модернизации существующих городских транспортных сетей связи. Одним из путей решения такого вопроса является путь увеличения пропускной способности сети.

Пропускную способность волоконно-оптических сетей можно увеличить двумя основными способами: повысив уровень STM-сигнала или введя технологию плотного волнового мультиплексирования. Одним из актуальных путей решения вопросов увеличения пропускной способности волоконно-оптической линии связи, особенно в линиях с спектральным разделением сигнала является учет свойств компонентов их составляющих оборудования. Вследствие того, что в системах спектрального разделения каналов используется оборудование, которое не является идеальным с физической точки зрения и имеет определенные допуски, в той или иной степени возникают паразитные перекрестные помехи между каналами, которые мультиплексируются. Это имеет особое значение, когда, как один из компонентов системы, планируется использование оборудования, теоретически способно обеспечить увеличение пропускной способности, но одновременно возникают сомнения относительно возможного негативного влияния на свойства и ухудшение общих характеристик качества передачи системы. Существующие методы и методики предлагают учитывать несогласованности оптических компонентов в системах с частотным оптическим разделением каналов с помощью так называемых оптических штрафов в энергетическом бюджете оптического тракта а также предлагают подход к расчетам качественных характеристик системы, который содержит элементы декомпозиции там, где это возможно сделать, и элементы рекомпозиции для проектирования систем из набора оптических компонентов с постоянными или в определенных пределах переменными параметрами.

В данной статье проведен анализ порядка расчета порога чувствительности волоконно-оптических линиях связи с спектральным разделением сигнала. Показана целесообразность учета в расчетах для таких линий взаимодействия пары «фотодетектор-оптический усилитель» с целью установления порога чувствительности их композиции, как отдельного линейного элемента системы. Уточненные расчеты порога чувствительности фото приемного устройства, предложен один из наиболее целесообразный вариант оптического усилителя и p-n-p фотодиода.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи; порог чувствительности; фотоприемное устройство; фотодиод.

A. L. Turovsky

REFINING THE CALCULATION OF THE SENSITIVITY THRESHOLD OF THE PHOTO-SIMPLE DEVICE OF A DIGITAL FIBER-OPTICAL LINK OF THE SIGNAL WITH SPECTRAL SEPARATION OF THE SIGNAL

As traffic increases for telecommunications operators, the issue of upgrading existing urban transport networks becomes more pressing. One way to address this is to increase network bandwidth. Fiber optic bandwidth can be increased in two main ways: by increasing the STM signal or by introducing dense wave multiplexing technology. One of the most urgent solutions to increasing the bandwidth of a fiber optic link, especially in lines with spectral signal separation, is to take into account the properties of the components of their component equipment. Due to the fact that spectral channel separation systems use equipment that is not physically perfect and has certain tolerances, spurious cross-talk between multiplexed channels occurs. This is especially important when, as one component of the system, it is planned to use equipment that is theoretically capable of increasing bandwidth, but at the same time there are doubts as to the possible negative impact on the properties and deterioration of the overall transmission quality characteristics of the system. Existing methods and techniques propose to take into account the discrepancies in the parameters of optical components in systems with frequency optical separation of channels by means of so-called optical fines in the energy budget of the optical path, and also propose an approach to calculating the quality characteristics of a system containing decomposition elements where possible, and recombination elements for designing systems from a set of optical components with constant or variable parameters.

This article analyzes the order of calculation of the sensitivity threshold of fiber-optic lines due to spectral signal separation. The expediency of taking into account in the calculations for such lines of interaction of a pair of «photodetector-optical amplifier» is shown in order to establish the threshold of sensitivity of their composition as a separate linear element of the system. Refined calculations of the photo sensitivity threshold of the receiving device, one of the most appropriate variant of the optical amplifier and p-n-p photodiode is proposed.

Keywords: fiber-optic communication lines; sensitivity threshold; photoreceiving device; photodiode.