

УДК 681.3.021

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, В.І. МАЛІНОВСЬКИЙ, Я.І. ЯРОСЛАВСЬКИЙ

## МЕТОД ТА СТРУКТУРИ ДВОХВИЛЕВОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ІМПУЛЬСІВ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ КАНАЛАХ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ

Вінницький національний технічний університет,  
21021, вул.Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна

**Анотація.** В роботі запропоновано метод та структури підвищення стабільності передачі інформаційних оптичних сигналів у волоконно-оптичних каналах, який базується на представлення на фізичному рівні оптичного сигналу на двох оптичних несучих довжинах хвиль з метою мінімізації завад в оптичних каналах та підвищення стабільності передачі даних в сучасних мережах. Запропонований метод двохвильової передачі даних, дозволяє підвищити стабільність передавання цифрових оптичних сигналів, за рахунок підвищення рівня сигнал-шум та зменшення коефіцієнта виникнення помилки.

**Аннотация.** В работе предложен метод и структуры повышения стабильности передачи информационных оптических сигналов в волоконно-оптических каналах, который основан на физическом уровне представления оптических сигналов. Предложенный метод двухволновой передачи информации позволяет повысить стабильность передачи цифровых оптических сигналов за счет повышения уровня сигнал-шум и уменьшения коэффициента возникновения ошибки.

**Abstract.** In this paper was propose the method and structures for improve the stability of optical signals in the fiber optical channels. This method is based on physical representation of the optical signal level. The proposed method two-wave data transmitting can increase the transmission stability of the digital optical signals by improving the signal to noise ratio and a decrease bit error ratio.

**Ключові слова:** інформаційна мережа(ІМ); волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ), інформаційна мережа (ІМ); оптичний сигнал, довжина хвилі, оптична потужність, спектр сигналу, оптичне волокно (ОВ).

### ВСТУП

Сучасні інформаційні мережі (ІМ) на базі волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) досить поширені в наш час., Їх застосування охоплює галузі від локальних мереж передачі даних до магістральних систем і мереж, які використовуються операторами мобільного та стаціонарного зв'язку, провайдерами цифрового кабельного телебачення та мережі Internet [1], а також вузькоспеціалізованими компаніями і державними організаціями для створення захищеного службового зв'язку і корпоративного обміну інформацією. Тим не менш, як показано у роботі [2], у волоконно-оптичних каналах сучасних ІМ виникають різного роду перебої у роботі, в першу чергу викликані завадами. Хоча рівень виникнення помилок передачі (коефіцієнт BER, bit error ratio) у сучасних ВОЛЗ є досить низьким ( $BER \approx 10^{-11}-10^{-12}$ ), для створення високонадійного службового корпоративного або державного зв'язку необхідно здійснювати пошук нових методів і засобів для зменшення завад, а й відповідно – підвищення стабільності процесу передавання. Тому, у всіх сучасних інформаційних мережах передачі даних (МПД) на базі ВОЛЗ постає надзвичайно важлива і актуальна проблема – підвищення стабільності характеристик та параметрів передавання оптичних імпульсів по волоконно-оптичним каналам. Це відіграє ключову роль при функціонуванні мереж в цілому та особливо важливо для державного та корпоративного секторів, де ступінь важливості та конфіденційності інформаційних даних є високою.

*Мета* статті полягає у розробленні методів та структур для підвищення стабільності функціонування волоконно-оптичних каналів інформаційних мереж та їх апаратних вузлів.

### РОЗРОБКА МЕТОДУ ДВОХВИЛЕВОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

В роботі [2] проаналізовано характер збоїв у інформаційних мережах. У [2] також відзначено, що вагомим фактором втрати функціональності (близько 10%) ІМ є помилки при передачі каналами зв'язку [2]. Більша частина цих помилок викликана адитивними складовими завад. На практиці рівень адитивних

завад  $N_{\dot{E}i}(t_i, \lambda_j)$  (вузькосмугові квазігармонійні коливання шумів) в момент часу передавання  $t$ , який представлений нормальним розподілом ймовірності, і на фотоприймачі в електричній формі має вигляд [1]:

$$N(\lambda, i_n, t) = \frac{1}{\sigma_n(t)\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2(t)}\right], \quad (1)$$

де  $i_n$  и  $\sigma_n(t)$  – миттєве та середньоквадратичне значення сумарного струму завади в момент часу  $t$ , на вході порогового пристрою ПРОМ.

Очевидно, що враховуючи квадратурну залежність електричних параметрів від оптичних (на фотоприймачі ВОЛЗ реєструється квадрат інтенсивності поля  $I(P) \approx P_{\lambda j}^2$ ), то в оптичній формі, переходячи до виміру оптичних потужностей сигналів в каналі ВОЛЗ ІМ, формула (1) із достатньо високою точністю може бути переписана для оптичних сигналів як:

$$N(\lambda, p_{i\lambda j}, t) = \frac{k_{\lambda j}(\eta)}{P_{i\lambda j}(t)\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{P_{i\lambda j}}{2P_{i\lambda j}(t)}\right], \quad (2)$$

де  $k(h)$  – коефіцієнт переходу із електричних величин в оптичні, який враховує ефективність перетворення оптичної потужності в електричний струм;  $p_{i\lambda j}$  та  $P_{i\lambda j}(t)$  – миттєве та середньоквадратичне значення сумарної оптичної потужності завади на довжині хвилі  $\lambda_j$ .

Відношення сигнал-шум є ефективним параметром якості передачі інформації у інформаційному каналі та визначається рівнем потужності завади на вході підсилювача фотоприймача ВОЛЗ. На практиці відношення оптичних потужностей  $P_s/P_N$  значно більше одиниці і його виражають у [дБ]. В цифрових системах передачі інформації, зокрема й у ВОЛЗ, показник сигнал-шум (BER) визначає ймовірність передачі помилки [12]:

$$BER = \frac{P_s}{P_n} = \frac{N_{i\dot{i}}}{N_{i\dot{i}\delta i}} \approx \frac{1}{OSNR} \approx P_{cp}. \quad (3)$$

Корегуючи рівень корисного сигналу, можна звести відношення  $BER$  до мінімуму. В сучасних системах, наприклад, ця величина досягає значень  $10^{-9}$ - $10^{-11}$  (критерій встановлений стандартом ITU-T G.655 для ВОЛЗ на базі WDM  $P_{cp.ou} \leq (10^{-9} \div 10^{-10}) \leq P_{cp.ou.доп.}$  [5]), що відповідає швидкості  $10^9$ - $10^{12}$  біт/с в каналі.

Пройдення цифрового оптичного сигналу по волоконно-оптичному тракті супроводжується появою помилок, як і в будь-якому каналі зв'язку. Помилки виникають, коли замість лог. «1» (наявність оптичного випромінювання) фіксується лог. «0» (відсутність випромінювання) і навпаки. Процес реєстрації символів «1» або «0» інформаційної послідовності  $p(1)$  та  $p(0)$  при наявності перешкод характеризується середньою ймовірністю бітових помилок  $P_{cp}$  та визначається сумою [1]:

$$P_{cp.ou} = 0,5[p(0)p(0/1) + p(1)p(1/0)], \quad (4)$$

де  $p(0/1)$  – ймовірність трансформації під дією перешкоди «0» в «1» (помилки першого роду);  $p(1/0)$  – ймовірність трансформації під дією перешкоди «1» в «0» (помилки другого роду).

Можна показати, що поява помилок як першого, так і другого роду а також сумарної їх ймовірності можна зменшити, відповідним чином збільшивши корисну потужність самого сигналу, що впливає із відношення (2.18).

Очевидно, що збільшуючи оптичну потужність корисного інформаційного сигналу можна звести показник BER до мінімуму, тим самим підвищити якість передачі. Але виникають обмеження по рівню оптичної потужності на одній довжині хвилі, що призводить до нелінійних явищ [3] та погіршення за рахунок спотворення форми основного сигналу (явище джитеру). З метою компенсації рівня нелінійних явищ та уникнення обмеження по рівню оптичної потужності, можна гіпотетично припустити, що оптичний один і той самий інформаційний сигнал може бути представлений одночасно на декількох оптичних несучих частотах (оптичних частотах). Для цього, необхідно розглянути варіант, коли використовуються відразу декілька довжин хвиль (наприклад, дві:  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ) для передачі одного оптичного сигналу в один момент часу  $t_i$ .

Ці 2 довжини хвилі матимуть відповідно різні оптичні потужності  $P_{\lambda_1}$  та  $P_{\lambda_2}$  для формування одного оптичного імпульсу (рис.1).

Спектральна енергія такого імпульсу (рис. 1) буде зосереджена в одному часовому вікні і визначатиметься як:

$$E(\lambda) = k \cdot f(t_i) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) d\lambda = k \cdot \int_{t_i-1}^{t_i+1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, t_i) d\lambda dt, \text{ де } k - \text{ коефіцієнт форми імпульсу;}$$

$P(\lambda, t)$  – спектральна функція оптичної потужності імпульсу у часі;  $f(t_i)$  – часова функція імпульсу.

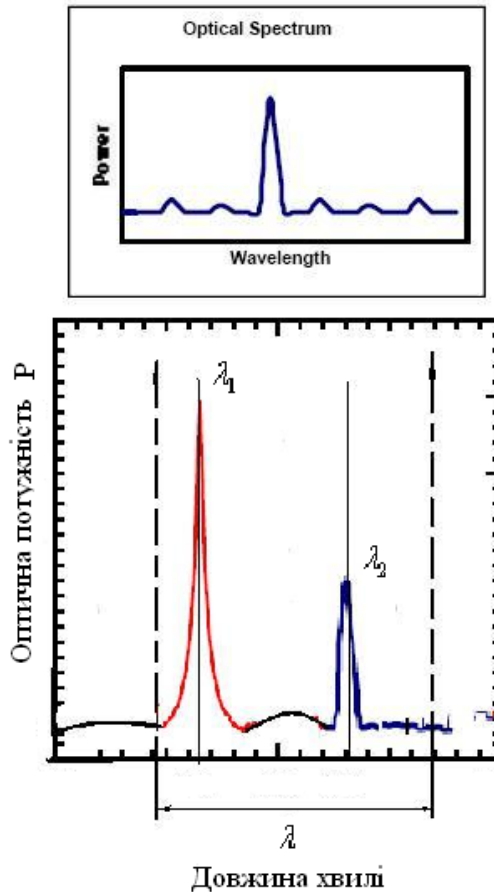


Рис. 1. Оптичний імпульс лог. «1» сформований на двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  одночасно

Очевидно, що для моделі організації ВОЛЗ із декількома спектральними каналами  $\lambda_i, i=1..N$  (наприклад, у системах оптичного хвильового ущільнення WDM), із врахуванням часових та хвильових компонент завади, оптичний сигнал матиме вигляд [6]:

$$S(t, \lambda_i) = \sum_{j=1}^n A[a_j \cdot A_m(t - j\Delta T)] + N_{III}(t, \lambda) \quad (4)$$

Якщо розглянути частковий випадок при використанні тільки двох довжин хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  ( $n=2$ ) в одному каналі ВОЛЗ, то сигнал (4) можна описати як:

$$\begin{aligned} S(t, \lambda_1, \lambda_2) &= \sum_{j=1}^{n=2} A[a_j \cdot A_m(t - j\Delta T)] + N_{III}(t, \lambda_j) = \\ &= [A[a_1 \cdot A_m(t - \Delta T)]] + [A[a_2 \cdot A_m(t - 2\Delta T)]] + N_{III}(t, \lambda_1, \lambda_2), \end{aligned} \quad (5)$$

де  $t_i$  – часовий інтервал імпульсу існування завади;  $a_1, a_2, A_m$  – діючі та максимальне значення

амплітуд хвиль на довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ;  $A[a_1 \cdot A_m(t - \Delta T)]$  – сигнал у кожному наступному часовому вікні;  $N_{III}(t_i, \lambda_1, \lambda_2)$  – амплітуда завади.

Можна також показати, що якщо створити такі умови, при яких канали на довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  матимуть приблизно однакові функції розподілу ймовірностей виникнення завад  $p(\lambda_j)$ , тобто  $p(\lambda_1) \approx p(\lambda_2)$ , а час виникнення імпульсної складової завади в обох каналах однаковий в часовому інтервалі  $t_i$ , то формула (5) може прийняти вигляд:

$$S(t, \lambda_1, \lambda_2) = N_{III}(t_i, \lambda_j) + A[a_1 \cdot A_m(t - \Delta T)] + A[a_2 \cdot A_m(t - 2\Delta T)], \quad (6)$$

де  $t_i$  – часовий інтервал імпульсу існування завади.

У випадку одночасної передавання (дублювання сигналів на двох довжинах хвиль) (рис.1), коли значення параметрів  $a_j$  в одних часових інтервалах  $t_i$  є однаковими ( $a_1 = a_2 = a_i$ ,  $t_1 = t_2 \rightarrow t_i$ ), то вираз (6) можна спростити, об'єднавши доданки в лівій частині:

$$S(t, \lambda_1, \lambda_2) = N_{\tilde{E}\tilde{I}}(t_i, \lambda_j) + A[a[A_m(t - \Delta T) + A_m(t - 2\Delta T)]], \quad (7)$$

В цьому випадку різниця між значеннями  $t - \Delta T$  та  $t - 2\Delta T$  проявляється як зсув фази  $\Delta\phi_1$   $\lambda_2$  відносно сигналів на різних довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ .

Очевидно, що компонент  $N_{III}(t, \lambda_j)$  впливає на якісні властивості корисного оптичного сигналу  $S(t, \lambda_j)$  у ВОЛЗ. Зменшення цього компонента  $N_{III}(t, \lambda_j)$ , дозволить підвищити інформаційну стабільність передавання сигналу у волоконно-оптичних системах.

На основі цих тверджень був запропонований двоххвильовий метод передавання інформації по ВОЛЗ, який базується на представленні цифрового логічного сигналу лог. «1» оптичним імпульсом на двох різних довжинах хвиль  $\lambda_1 = 1310\text{нм}$  та  $\lambda_2 = 1550\text{нм}$  у ВОЛЗ ІМ одночасно. Довжини хвиль  $\lambda_1 = 1310\text{нм}$  та  $\lambda_2 = 1550\text{нм}$  обрані в процесі дослідження, виходячи із умов мінімальної дисперсії (уширення імпульсів) 1310нм та основного вікна прозорості 1550нм кварцевого скла  $\text{SiO}_2$  – найпоширенішого матеріалу для ОВ. Крім того, більшість промислових компонент волоконної оптики призначені для роботи саме в цих діапазонах.

Запропонований метод передбачає формування одного оптичного імпульсу лог. «1» одразу двома оптичними сигналами (рис. 3) із узагальненою формою сигналу в частотній області:

$$\begin{aligned} S(l, t, \lambda) &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} I_0(k, \lambda) \exp \left[ j \left[ w_0 + \left( \frac{d\omega}{dk} \right)_0 t - l(k - k_0) \right] \right] dk d\lambda = \\ &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{-\infty}^{\infty} I_0(k, \lambda) \exp \left[ j \left[ \left( \frac{d\omega}{dk} \right)_0 t - l \right] (k - k_0) \right] dk d\lambda = \\ &= I_0(k, \lambda) \left[ l - (d\omega/dk)_0 t \right] \times \exp(j(\omega_0 t - k_0 t)), \end{aligned} \quad (8)$$

де  $I_0(k, \lambda) \left[ l - (d\omega/dk)_0 t \right] \times \exp(j(\omega_0 t - k_0 t))$ , – складова, яка описує форму оптичного імпульсу, що складається відразу із двох довжин хвиль.

Залежність (8) характеризує зміну в процесі передавання оптичного інформаційного імпульсу з груповою швидкістю  $v_g = (d\omega/dk)_0$  у ВОЛ, а при врахуванні інших доданків ряду Тейлора і показує вплив інших спектральних складових  $\omega_i + \omega_{i+1} + \dots + \omega_n$ .

Такий оптичний сигнал сформований за методом двох хвильової передачі інформації у ВОЛ показаний на рис. 2.

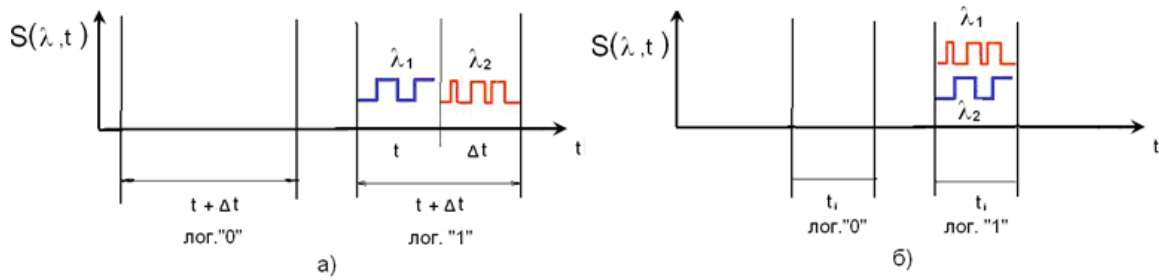


Рис. 2. Ілюстрація принципу передавання оптичних імпульсів інформації у ВОЛЗ сигналом одночасно на двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ : а) у різних часових вікнах  $t_i + \Delta t$ ; б) у одному часовому вікні  $t_i$ .

Відповідно до цього, враховуючи стандартну структуру ВОЛЗ [4], розроблено структуру волоконного каналу із одночасним передаванням сигналу на 2-х довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ , яка основана на двох спектральних каналах (рис. 3).

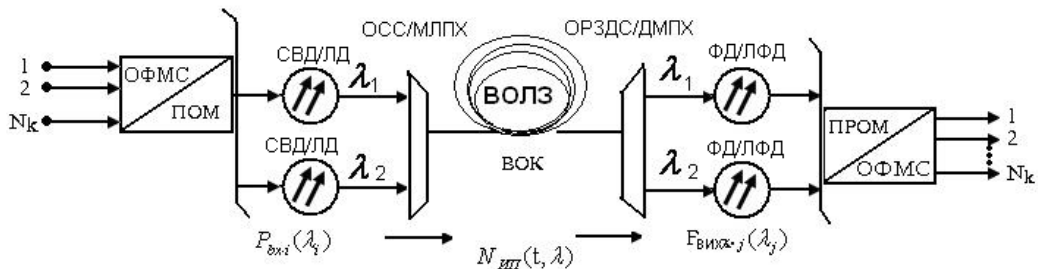


Рис. 4. Структура каналу ВОЛЗ на основі методу передавання на 2-х довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  із впливом адитивних завад у ВОК  $N_{шп}(t, \lambda)$ : ПОМ – передавальний оптичний модуль; ПРОМ – приймальний оптичний модуль; ВОК – волоконно-оптичний кабель; ОСС/МЛПХ – оптичний суматор/мультиплексор; ОРЗДС/ДМПХ – оптичний розділювач/демультиплексор; СВД/ЛД – світлодіодні/лазерні джерела світла; ФД/ЛФД – фотоприймач/лавинний фотодіод

На вході (рис. 3) за допомогою передавального модуля джерелами випромінювання електричні сигнали перетворюються в оптичні та спрямовуються в оптичне волокно. За допомогою оптичного суматора/мультиплексора (ОСС/МЛПХ) одразу 2 оптичних сигнали із довжинами хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  вводяться у волоконно-оптичний кабель (ВОК). На виході такого каналу із ВОК за допомогою оптичного розділювача/демультиплексора (ОРЗДС/ДМПХ) оптичні сигнали виводяться на відповідний фотоприймач приймального модуля ПРОМ.

Надлишковість по спектральній складовій (рис. 3) зменшує відношення амплітуди шуму  $N_{шп}(t_i, \lambda_1, \lambda_2)$  у формулі (5) при роздільному детектуванні сигналів та підвищує стабільність відношення сигнал шум  $S/N$  (OSNR) в каналі. Принцип роздільного детектування сигналів на основі диференційного приймача наведений в оригінальному дослідженні та базується на окремому виділенні двох спектральних сигналів із внесенням позитивної затримки. Підвищення показника  $S/N$  (OSNR) призводить до зменшення показника виникнення помилок BER (Bit Error Ratio) до значень менше ніж  $10^{-14}$  за рахунок зменшення потужності джерел завад  $N(\lambda, p_{i\lambda_j}, t)$ . Встановлено, що оптимальним для двоххвильової передачі даних є передавання сигналу на довжинах хвиль  $\lambda_1 = 1550$  нм,  $\lambda_2 = 1310$  нм, які відповідають основним промисловим вікнам прозорості компонентів волоконної оптики.

Однією із основних умов передавання сигналів за методом двоххвильового передавання є детектування і відтворення вихідного оптичного сигналу фотоприймальним пристроєм із подальшим перетворенням вихідного оптичного сигналу у цифрову електронну форму. Оскільки, при передаванні на двох довжинах хвиль  $\lambda_1, \lambda_2$  оптичний сигнал у ВОК кодується із застосуванням комбінованого оптичного імпульсу двома різними потужностями кожного із спектральних каналів (1-й на  $\lambda_1$ ; 2-й на  $\lambda_2$ ), то необхідним є зворотне диференційне перетворення на базі операції послідовного диференціювання [5] із порівнянням та врахуванням початкових умов.

В загальному випадку, така операція повинна базуватись на зворотному відокремленні сигналів диференційованих як по часовій, так і по спектральній складовій, тобто буде визначатись другою похідною вхідного сигналу із врахуванням втрат  $a$  у лінії ВОЛЗ:

$$S_{out\lambda_1\lambda_2}(t, \omega_{\lambda_1}, \omega_{\lambda_2}) = S''_{in\lambda_1\lambda_2}(\omega_{\lambda_1}, \omega_{\lambda_2}) dt d\lambda \quad (9)$$

Але оскільки сигнали розділюються апаратно за допомогою оптичного роздільвача (диференціатора) у дуплексній схемі на базі SFP-модулів, то враховуючи це, а також важкість і затратність отримання похідної по спектральній складовій, операція диференціювання повинна проводитись тільки по часовій складовій, тобто (9) можна спростити:

$$S_{out\lambda_1\lambda_2}(t) = S'_{in\lambda_1\lambda_2}(t) dt; \quad (10)$$

Формула (10) є функцією формування кінцевого цифрового сигналу диференційним приймачем на виході оптичних модулів ВОЛЗ для схем волоконно-оптичних ліній на базі двох хвильової передачі інформації.

Окрему частину структури ВОЛЗ двоххвильової передачі інформації – вузла диференційного приймача, що здійснює відтворення цифрового сигналу оптичної форми показано на рис.5.

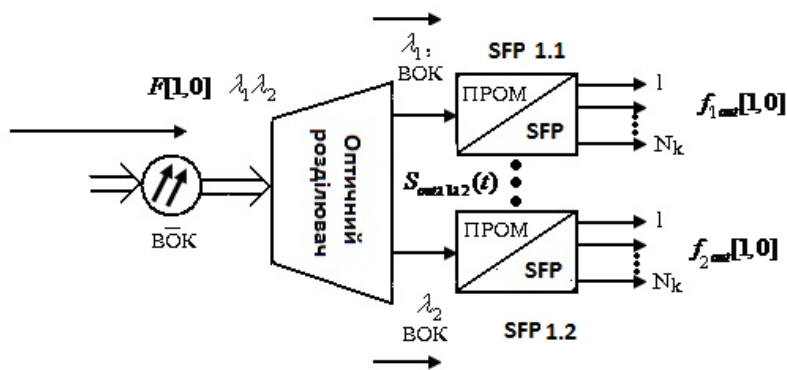


Рис.5. Структура диференційного приймача - перетворювача логіко-часових сигналів в цифрові вихідні сигнали

На схемі (рис. 5) для одного каналу використовується один SFP-волоконно-оптичний модуль із різними оптичними трактами, які призначені для приймання окремих довжин хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ .

Аналітичний спектр детектованого сигналу  $S_{out\lambda_1\lambda_2}(t)$  при довільному детермінованому сигналі з оптичними потужностями для  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  показано на рис. 6.

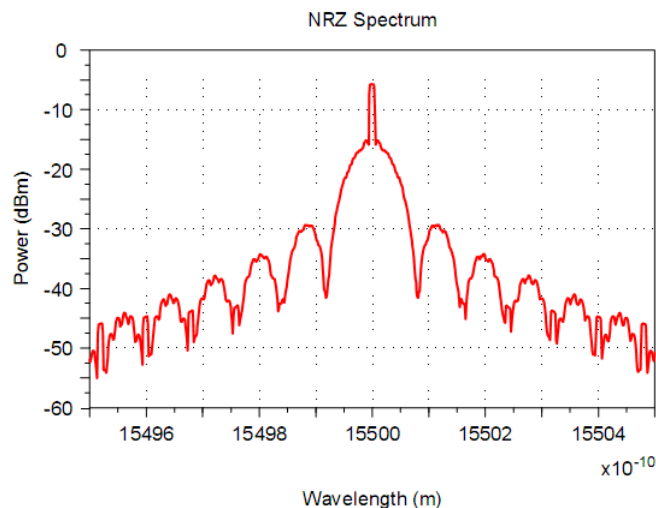


Рис.6. Аналітичний спектр поточного сигналу від оптичних потужностей  $P_{in\lambda_1}(t)$ ,  $P_{in\lambda_2}(t)$  на двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  поблизу основного вікна прозорості  $\lambda_0 = 1550\text{nm}$

Зворотне диференційне перетворення оптичного сигналу на двох довжинах хвиль призводить до формування вихідних сигналів, які перетворюються в електронну форму і порівнюються схемою

порівняння на базі сигнального процесора ВОЛЗ у приймальному пристрої. На виході цієї схеми формуються пакети інформаційних даних в цифровій формі. Це дозволяє збільшити завадозахищеність за рахунок більш чітко визначених значень.

Відповідно для методу двоххвильового передавання, в якому сигнал передається одразу на двох довжинах хвиль  $\lambda_1=1550\text{нм}$  та  $\lambda_2=1310\text{нм}$ , як максимальні втрати оптичної потужності, так і максимальна дальність передавання складатимуться із суми потужностей кожної із довжин хвиль  $P_{\lambda_1}$  та  $P_{\lambda_2}$ . Причому оптичні втрати будуть визначатись окремо для кожної із довжин хвиль, як середньоарифметичне від обох складових втрат, тобто:

$$a_{S\lambda_1\lambda_2}[\text{dB}] = \frac{-10[\lg \frac{P_{out\lambda_1}}{P_{in\lambda_1}} + \lg \frac{P_{out\lambda_2}}{P_{in\lambda_2}}]}{2} = -5 \lg[\lg \frac{P_{out\lambda_1}}{P_{in\lambda_1}} + \lg \frac{P_{out\lambda_2}}{P_{in\lambda_2}}],$$

де  $P_{in\lambda_1}, P_{in\lambda_2}$  – вхідні та  $P_{out\lambda_1}, P_{out\lambda_2}$  – оптичні потужності на довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ;

Враховуючи загальновідому умову  $dE = dPdt$  ( $P=const$ ) для відношення величин енергії та потужності, енергія оптичного імпульсу, що складається із суми потужностей  $P_{in\lambda_1}, P_{in\lambda_2}$  на вході ВОЛ для передавання одразу двох довжин хвиль складе:

$$E(P_{\lambda_1}, P_{\lambda_2}, t) = \frac{k_F \cdot k_S}{T} \int_0^t (P_{\lambda_1}(t) + P_{\lambda_2}(t)) dt, \quad (11)$$

де  $P_{\lambda_1}(t), P_{\lambda_2}(t)$  – функції оптичної потужності сигналу на довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  потужності оптичного сигналу;  $T$  – період імпульсів;  $k_F, k_S$  – коефіцієнти форми та шпаруватості.

Формула (11) справедлива, за умов, що коефіцієнти форми  $k_F$  та шпаруватості  $k_S$  імпульсів для обох оптичних імпульсів є однаковими. В іншому випадку вони перемножаться на відповідне значення потужностей, які стоять під знаком інтегрування. На рис. 7 зображено структуру ВОЛ на базі двох довжин хвиль із сумуванням потужностей оптичним суматором SUM (на передавачі) та оптичним подільником на приймачі. Селекція довжин хвиль здійснюється оптичними фільтрами, які відфільтровують іншу, окрім робочої, довжину хвилі  $\lambda$ .

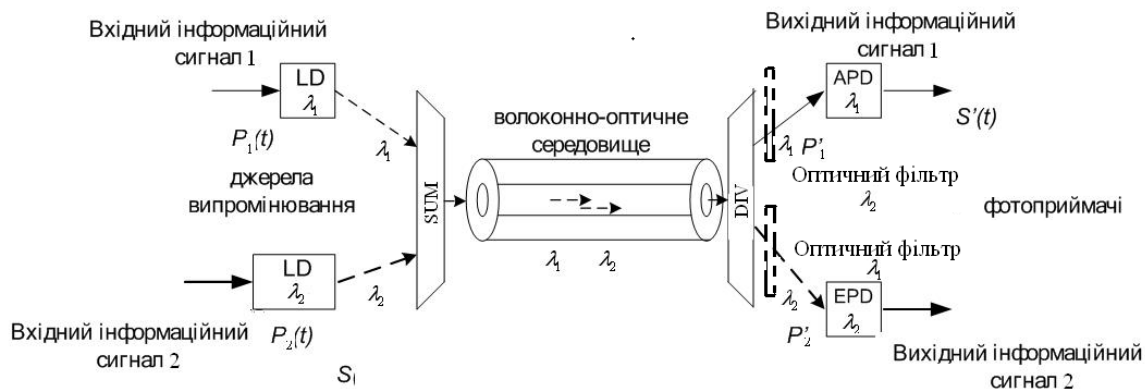


Рис.7. Структура волоконно-оптичної лінії із на базі 2-х довжин хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  із сумуванням оптичних потужностей

Сумарна величина оптичних потужностей  $P_{\lambda_1}(t) + P_{\lambda_2}(t)$  в структурі (рис. 7) визначає повну оптичну інтенсивність для волокна із радіусом серцевини  $r_{core}^2$ . Оскільки. Інтенсивність є відношенням

потужності до ефективної площі  $\frac{P_{op}}{S}$ , то для двох хвильової передачі, вона складе:

$$I_{\lambda_1\lambda_2} = \frac{1}{S_{\text{core}}} \sum_{i=1}^2 P_{\lambda_i}(t) = \frac{P_{\lambda_1}(t) + P_{\lambda_2}(t)}{\pi r_{\text{core}}^2}, \quad (12)$$

де  $P_{op,\lambda_i}$  – оптична потужність для однієї довжини хвилі  $\lambda_i$ ;  $r_{\text{core}}$  – радіус серцевини оптичного волокна;  $S_{\text{core}}$  – площа серцевини ОВ.

Параметр оптичної інтенсивності  $I_{\lambda_1\lambda_2}$  важливий при аналізі нелінійних явищ, які мають місце при передачі інформаційних імпульсів по волоконно-оптичним каналам інформаційних мереж. Величина нелінійних ефектів NL визначається сумарною оптичною інтенсивністю потоку, яка пропорційна відношенню оптичної потужності у для кожної із довжин хвиль.

### ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ДВОХХВИЛЕВОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЛОГІКО-ЧАСОВИХ ФУНКЦІЙ

Очевидно, що враховуючи 2-х хвильове передавання інформаційного імпульсу на довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  для формування функції вихідного сигналу необхідний пошук оптимальної комбінації форми тривалості імпульсу із відповідним значенням оптичної потужності сигналу, яка буде також визначена довжиною хвилі  $\lambda_i$ , тобто  $S[P(t-t_i), \lambda_i]$ . Тобто в загальному випадку такий імпульс можна описати функцією потужності  $P(\Delta\tau, p(\lambda_1), p(\lambda_2))$  на протязі тривалості часового інтервалу цього імпульсу  $\Delta\tau$ . Причому ця тривалість буде визначатись самим часовим інтервалом, на якому функція  $F[1,0]$  дійсна, тобто  $\Delta\tau = t-t_i$ . Враховуючи часові оптичні потужності на кожній довжині хвилі  $p(\lambda_1), p(\lambda_2)$  в діапазоні довжин хвиль  $\Delta\lambda_i = \lambda_1 - \lambda_2$ , такий інформаційний імпульс може бути описаний функцією виду:

$$\begin{aligned} S[P(t-t_i, \Delta\lambda_i)] &= S[P(\Delta\tau, p(\lambda_1), p(\lambda_2))] = k_a \cdot k_t \int_{t-t_i}^t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(t_i) dt d\lambda = \\ &= k_a \cdot k_t \int_{t-t_i}^t \int_{\lambda_i}^{\lambda_i + \Delta\lambda_i} [P_{m\lambda_i} \text{Sin}(w_{\lambda_i} t_{\lambda_i} + \varphi_{\lambda_i})] dt d\lambda. \end{aligned} \quad (13)$$

де  $\lambda_i + \Delta\lambda_i$  – спектральне уширення імпульсу на довжині хвилі  $\lambda_i$ .

Врахувавши параметри індивідуально для кожної з довжин хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  в (39), отримуємо:

$$S[P(t-t_i, \Delta\lambda_i)] = k_a \cdot k_t \left[ \int_{t-t_i}^t \int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda_1} P_{m\lambda_1} \text{Sin}(w_{\lambda_1} t_{\lambda_1} + \varphi_{\lambda_1}) dt d\lambda + \int_{t-t_i}^t \int_{\lambda_2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda_2} P_{m\lambda_2} \text{Sin}(w_{\lambda_2} t_{\lambda_2} + \varphi_{\lambda_2}) dt d\lambda \right] \quad (14)$$

де  $k_a, k_t$  – коефіцієнт амплітуди та коефіцієнт форми імпульсу;  $P_{m\lambda_1}, P_{m\lambda_2}$  – максимальні значення імпульсів на кожній довжині хвилі  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ;  $w_{\lambda_1}, w_{\lambda_2}, t_{\lambda_1}, t_{\lambda_2}, \varphi_{\lambda_1}, \varphi_{\lambda_2}$  – циклічні частоти, часові змінні та фазовий зсув для кожного з імпульсів на цих довжинах хвиль для кожної з довжин хвиль  $\text{Sin}(t_i + \varphi_i)$ .

Спектральне уширення  $\lambda_i + \Delta\lambda_i$  для ( $\lambda_1 + \Delta\lambda_1$  та  $\lambda_2 + \Delta\lambda_2$ ) кожної з довжин хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  пояснюються неідеальністю спектральних смуг джерел випромінювання оптичних сигналів, які випромінюють в певному спектральному діапазоні замість конкретної довжини хвилі.

Тоді, з врахуванням (11) та (12) функція вихідного сигналу може бути визначена інформаційним сигналом  $S[P(t-t_i, \Delta\lambda_i)]$  із комбінацією залежностей його тривалості та оптичної потужності в конкретному часовому відрізку дійсних її значень  $t_i \leq t \leq t_i + \tau_{ai}$  або  $t_i > t > t_i + \tau_{ai}$  для двох довжин хвиль та  $\lambda_2$  як:

$$F[1,0] = \begin{cases} 1, & S[P(t-t_i, \Delta\lambda_i)] \text{ і } \partial \partial [P(t, t_i, \lambda_i) > P_{\min}(t, t_i, \lambda_i)], t_i \leq t \leq t_i + \tau_{ai}; \\ 0, & S[P(t-t_i, \Delta\lambda_i)] \text{ і } \partial \partial [P(t, t_i, \lambda_i) \leq P_{\min}(t, t_i, \lambda_i)], t_i > t > t_i + \tau_{ai} \end{cases}, \quad (15)$$



де  $S [P(t-t_i, \Delta\lambda_i)]$  – інформаційний сигнал, що визначається умовами комбінаторики форм тривалості  $t$  та оптичної потужності,  $P(t, t_i, \lambda_i)$ .

Таким чином, функція  $F[1,0]$  приймає значення 1 (лог. «1») тільки тоді, коли на часовому відрізку значення потужності  $P(t, t_i, \lambda_i)$  більше за мінімально допустиме  $P_{\min}(t, t_i, \lambda_i)$ , і навпаки – 0 при меншому значенні потужності за мінімально допустимий рівень  $P_{\min}(t, t_i, \lambda_i)$ . Таким чином кодування інформації і формування оптичних імпульсів здійснюється не лише за рівнем оптичної потужності  $P(t, t_i, \lambda_i)$ , а й за тривалістю існування на певних часових відрізках  $t-t_i$ . Вигляд такого сигналу та перетворення за допомогою функції (15) наведені на рис.8.



Рис.8. Вигляд інформаційного оптичного сигналу (знизу) та кодування його функцією (15) (зверху)

При цьому інформаційні імпульси лог. «1», що представляються тривалістю функції  $F[1,0]$  формуються одразу на двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  за один період часу (в одному часовому вікні)  $t-t_i$  (рис. 9).

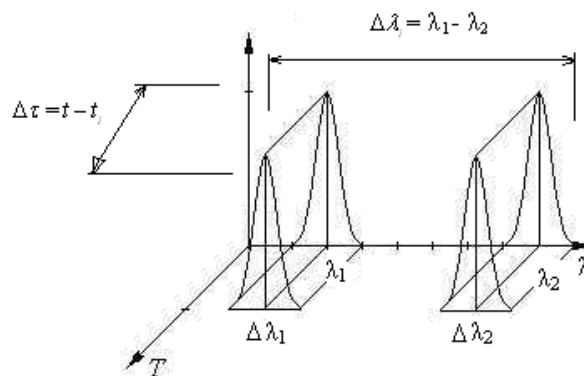


Рис.9. Процес формування інформаційних імпульсів в координатах довжини хвилі  $\Delta\lambda_i$  та часу  $\Delta\tau$

Такий підхід (рис. 8, рис.9.) дозволяє відмовитись від залежності значення інформаційної функції  $F[1,0]$  сигналу суто від його амплітудних значень потужності  $P_{\lambda_1\lambda_2}(t_i)$ , в яку значний вклад вносить інформаційний шумовий сигнал  $P_N(t_i)$ . Інформація в такому сигналі  $S[P(t-t_i, \Delta\lambda_i)]$  визначається дискретною функцією  $F[1,0]$ , яка дійсна на протязі тільки певних часових проміжків  $\Delta\tau = t-t_i$  (рис. 10). Функція  $F[1,0]$  є своєрідним аналогом відомих ЛЧФ [12], але визначається окрім тривалості на певних ділянках часових інтервалів  $t_i \leq t \leq t_i + \tau_{ai}$ , ще й умовою для значенням оптичної потужності  $P(t, t_i, \lambda_i) > P_{\min}(t, t_i, \lambda_i)$  імпульсів на них.

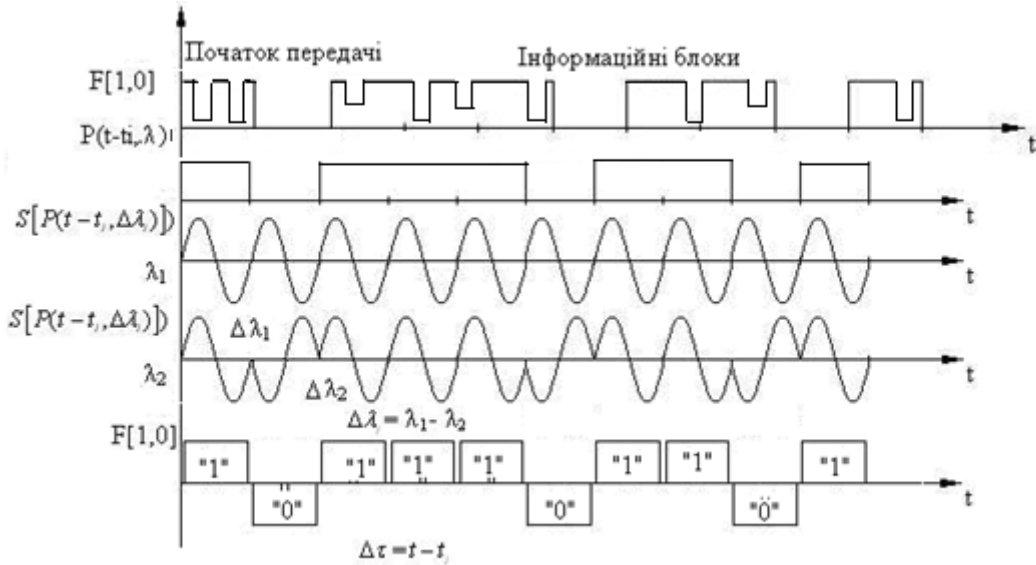


Рис.10. Передавання оптичних інформаційних імпульсів на двох довжинах хвиль у поєднанні із ЛЧ-кодуванням тривалістю часових інтервалів

Тобто функція  $F[1,0]$  (15) – є дискретною функцією двох інформаційних параметрів: часового інтервалу  $\Delta\tau(t_i)$  та значення оптичної потужності  $P(t, t_i, \lambda_i)$  інформаційного сигналу  $S[P(t - t_i, \Delta\lambda_i)]$  (рис.10).

Тому двохвильове передавання інформаційних імпульсів визначається значенням цієї функції в певних часових вікнах у певних межах значень оптичної потужності (рис.11), що зменшує значення потужності шумів в оптичному каналі передачі даних.

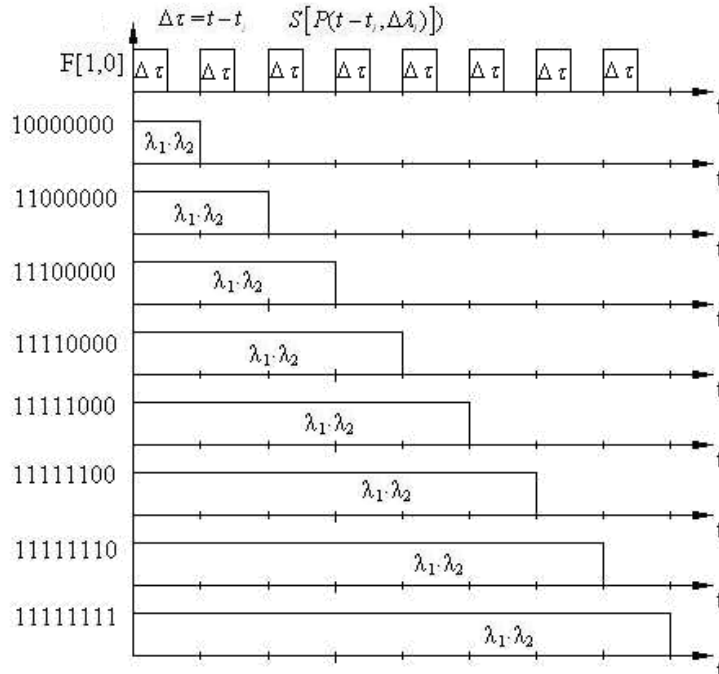


Рис.11. Формування кінцевих оптичних імпульсів в модуляційному тракті передачі волоконно-оптичного каналу за допомогою функції тривалості  $F[1,0]$

Таким чином представлення функції  $F[1,0]$  у часових вікнах  $t_i \leq t \leq t_i + \tau_{ai}$ , де вона приймає дійсні значення, що відповідають лог. «1» (рис.5) дозволяє зменшити залежність від потужності завади  $P_N(t_i)$  на величину сигналу  $S[P_{\lambda_1\lambda_2}(t_i) - P_N(t_i)]$ , яка є аналітично меншою при квантуванні сигналу в

часовому вікні  $\Delta\tau = t - t_i$  в проміжку  $t_i \leq t \leq t_i + \tau_{ai}$ .

Тому двохвильове передавання інформаційних імпульсів визначається значенням цієї функції тільки в певних часових вікнах та у межах значень оптичної потужності (рис.2.23). Це зменшує значення потужності шумів в оптичному каналі. Представлення функції  $F[1,0]$  (15) у часових вікнах  $t_i \leq t \leq t_i + \tau_{ai}$ , де вона приймає дійсні значення, що відповідають лог. «1» (рис. 2.24) дозволяє зменшити залежність від потужності завади  $P_N(t_i)$  на величину сигналу  $S[ P_{\lambda_1\lambda_2}(t_i) - P_N(t_i) ]$ , яка є аналітично меншою при квантуванні сигналу в часовому вікні  $\Delta\tau = t - t_i$  в проміжку  $t_i \leq t \leq t_i + \tau_{ai}$ .

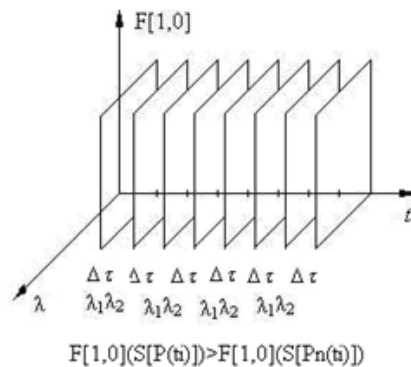


Рис.12. Представлення процесу формування функції тривалості  $F[1,0]$  в часових вікнах  $\Delta\tau$  з метою зменшення впливу потужності завади  $P_N(t_i)$

Застосування функції тривалості  $F[1,0]$  для двохвильового передавання інформації із цифровим кодуванням сигналу у волоконно-оптичних лініях, дозволяє формувати інформаційний сигнал в часових проміжках, який при передаванні та ідентифікації на фотоприймачі не значно залежатиме від впливу потужності завади  $P_N(t_i)$ . Це пояснюється тим, що остання не визначається на початку функції і не впливає на тривалість сигналу  $\Delta\tau$ , яка формується по потужності корисного сигналу тільки на приймачі, що виключає вплив оптичного середовища передачі сигналу.

Оскільки, як відомо [4] лінійне підвищення оптичної потужності на в каналах ВОЛЗ одній довжині хвилі  $\lambda_i$  обмежується верхньою межею виникнення нелінійних явищ (NE)  $P_{opt} < P_{optNE}$ , то використання підвищення потужності на двох окремих довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  дозволить оминати це обмеження по більшості нелінійних явищ, тим самим підвищити відношення сигнал/шум, яке залежить від оптичної потужності корисного сигналу і в загальному випадку для одного оптичного каналу ВОЛЗ визначається за формулою:

$$S / N = OSNR = \frac{P_{opt} s(\lambda_i)}{P_{opt} n(\lambda_i)};$$

$$OSNR_{вих}(\lambda_i) = 0,5(p_{ex.i}(\lambda_i) \cdot G_{yc}(\lambda_i) \cdot \Delta f \cdot \eta_y \cdot p_{nep.i/j}(\lambda_{i/j}))^{-1} / G_{yc}(\lambda_{i/j}) \cdot p_{ex.i}(\lambda_i) \cdot p_{cp.n}(\lambda_i), \quad (16)$$

де  $p_{ex.i}(\lambda_i)$  – потужність оптичного сигналу з довжиною хвилі  $\lambda_i$   $i$ -го оптичного каналу WDM-мультиплексора;  $p_{cp.n}(\lambda_i)$  – потужність завади;  $G_{yc}(\lambda_i)$  – коефіцієнт підсилення оптичного сигналу в системах мультиплексування по довжині хвилі (WDM/DWDM);  $\Delta f$  – зміна потужності в результаті втрат, до трактів підсилення;  $\eta_y$  – коефіцієнт узгодження.  $p_{nep.i/j}(\lambda_{i/j})$  – оптична потужність перехідної завади, яка виникає із оптичного каналу із довжиною хвилі  $\lambda_i$  в канал із довжиною хвилі  $\lambda_j$ . Остання визначається як [6]:

$$p_{nep.i/j}(\lambda_{i/j}) = \min 10 \lg \frac{P_{ex.i}(\lambda_i)}{P_{вих.j}(\lambda_j)}, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad i \neq j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (17)$$

де  $p_{ex,i}(\lambda_i)$  – оптична потужність сигналу із довжиною хвилі  $\lambda_i$  на вході оптичного мультиплексора (ОДМ);  $p_{ex,j}(\lambda_j)$  – потужність сигналу із довжиною хвилі  $\lambda_j$  на виході оптичного каналу.

Як показано в [6], для системи ВОЛЗ на базі схеми із оптичним підсилювачем та WDM/DWDM – мультиплексуванням групи спектральних оптичних каналів, більш точна оцінка показника *OSNR* може бути проведена за допомогою співвідношення [1]:

Як відзначається в [1], вираз (16) є якісною характеристикою ланки оптичних каналів в інформаційних мережах, які використовуються WDM та DWDM технології ущільнення. Це справедливо також і для ВОЛЗ, в яких передається дві довжини хвилі.

Якщо для моделі двоххвильового передавання припустити, що в системі є тільки дві довжини хвилі  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  в момент інформаційного імпульсу лог. «1», які передаються умовно одночасно ( $t_i(\lambda_1) \sim t_i(\lambda_2)$ ), перехідні завади незначні (при виборі достатньо рознесених довжин хвиль ( $\lambda_i \dots \lambda_{i+1}$  в частотній сітці WDM), а оптичні потужності їх є однаковими ( $p_i(\lambda_1) \sim p_i(\lambda_2) \sim p_{\text{дв.}\lambda_{1,2}}$ ) та однаково підсилюються, то вираз (2.17) можна перетворити із врахуванням (17), отримуємо:

$$OSNR_{\lambda_1\lambda_2}(\lambda_1\lambda_2) = \frac{0,5([p_{ex,\lambda_1} + p_{ex,\lambda_2}] \cdot G_{yc}(\lambda_i) \cdot \Delta f \cdot \eta \cdot 10 \lg \frac{p_{ex,i}(\lambda_i)}{p_{ex,j}(\lambda_j)})^{-1}}{G_{yc}(\lambda_i) \cdot [p_{ex,\lambda_1} + p_{ex,\lambda_2}] \cdot p_{cp,n}(\lambda_i)} \quad (18)$$

$$= \frac{p_{ex,\lambda_{1,2}} \cdot [10 \lg \frac{p_{ex,\lambda_1}}{p_{ex,\lambda_2}}]^{-1}}{2 \cdot p_{ex,\lambda_{1,2}} \cdot p_{cp,n\lambda_{1,2}}} = \frac{2 \cdot p_{cp,n\lambda_{1,2}}}{10 \lg \frac{p_{ex,\lambda_1}}{p_{ex,\lambda_2}}};$$

при  $G_{yc}(\lambda_i) \rightarrow G_{yc}(\lambda_{i/j}); \Delta f \times \eta \rightarrow 1; p_{ex,\lambda_1} \approx p_{ex,\lambda_2}$ ,

Як показує отримана аналітична формула для відношення сигнал-шум волоконно-оптичної системи на базі двох хвильового кодування, параметр *OSNR* залежить вдвічі більше (коефіцієнт 2 в чисельнику (18) ) від потужностей перехресних завад  $p_{cp,n\lambda_{1,2}}$  випромінювання на різних довжинах хвиль, і не стільки від самих вхідних потужностей  $p_i(\lambda_1)$  і  $p_i(\lambda_2)$  сигналів, безпосередньо від потужності завади на виході.

Слід зазначити, що при використанні тільки однієї довжини хвилі, коефіцієнт 2 зникає у чисельнику (18).

Графічні аналітичні залежності в результаті комп'ютерного моделювання передачі в різних режимах, згідно (18), показані на рис. 13. Умовна одинична потужність задавалась в діапазоні 0-20·10<sup>-3</sup> Вт (20мВт).

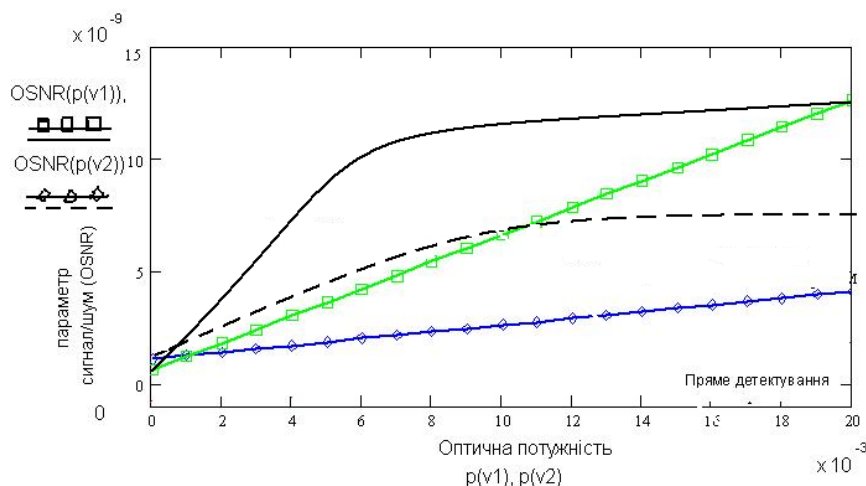


Рис.13. Графічні залежності параметру *OSNR* (сигнал/шум) : верхня – при передачі двох довжин хвиль одночасно  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  ; нижня – при передачі тільки однієї довжини хвилі  $\lambda_1$

Як видно з рис. 13, верхня крива, що відповідає режиму двоххвильового кодування ( $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ ) має вищі значення *OSNR* по мірі збільшення потужності, у порівнянні із режимом передавання на одній

довжині хвилі ( $\lambda_1$ ). Це означає, що стабільність передачі інформації у двоххвильовому режимі є вищою у порівнянні із передачею на одній довжині хвилі.

За рахунок збільшення спектральної енергії  $E(\lambda)$  частка корисного сигналу буде більшою, а отже більшим показник  $OSNR$  (в формулі (18)) та меншим ймовірність виникнення помилки.

Для більш детального формулювання методу двох хвильової передачі інформації та його показників необхідно розглянути основні фактори впливу на оптичний сигнал та його фізичні обмеження при розповсюдженні в оптичному волокні. До числа останніх належать дисперсія та оптичне втрати (загасання).

### ОРІЄНТАЦІЯ МЕТОДУ ДВОХХВИЛЕВОЇ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ НА ОПТОЕЛЕКТРОННУ ЕЛЕМЕНТНУ БАЗУ

Враховуючи необхідність практичної орієнтованості запропонованих підходів двоххвильової передачі оптичних сигналів у волоконно-оптичних лініях ІМ, а також промислові стандарти компонентів ВОЛЗ, можна навести узагальнену схему побудови каналу передавання даних з підвищеною стабільністю (рис. 14) на основі SFP-модулів (від англ. Small Form-factor Pluggable). SFP – модуль являє собою модульну конструкцію, в яку входить: волоконно-оптичний приймач-передавач на основі лазерного випромінювача (суперлюмінісцентного діода) та фотоприймача (р-і-п чи APD); оптика введення–виведення випромінювання; оптичний порт; електронні схеми модуляції та стабілізації струмів; модулятор випромінювача; підсилювач та демодулятор фотоприймача; програмовані електронні схеми кодування сигналу в один із кодів (1b2b, ADI, AMI, B3Z9, B6ZS, CMI, HDB2, HDB3, mBnD, NRZ, RZ, Miller code) та цифровий інтерфейс введення-виведення.

Зображення SFP – модуля наведено на рисунку 14.

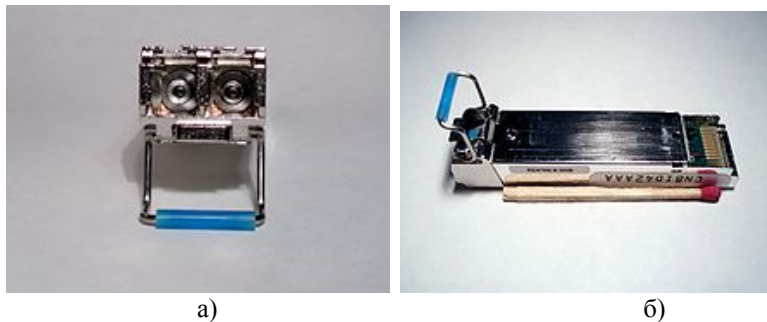


Рис.14. Зображення волоконного SFP-модуля: а) торцевий вигляд; б) вигляд збоку

Слід відзначити, що більшість модулів SFP розраховані на передачу і приймання одного із вищезазначених цифрових волоконних кодів. Тому для реалізації способу двох хвильового передавання інформації необхідно внести зміни у програмне забезпечення внутрішнього електронного блоку SFP-модулів схеми у відповідності до запропонованого методу передачі на двох довжинах хвиль із формування цифрового сигналу на базі логіко-часової функції тривалості  $F[1,0]$ . Типова структурна схема волоконно-оптичної лінії на основі SFP-модулів та компонент ВОЛ представлена на рис.15.

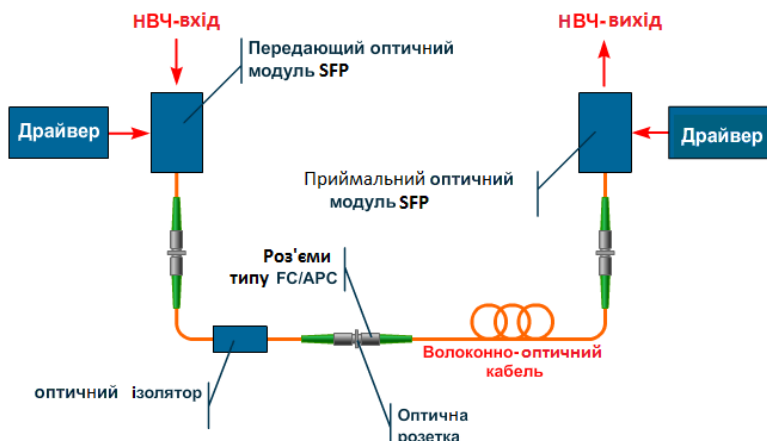


Рис.15. Структурна схема ВОЛЗ на основі промислових SFP-модулів

На основі структури (рис. 15) базуються більшість традиційних ВОЛЗ, які функціонують на базі принципу передавання цифрових оптичних сигналів на одній довжині хвилі від передавального SFP-модуля до приймального по волоконно-оптичному тракту. Враховуючи це, а також запропонований метод двох хвильового передавання імпульсів, можна розглянути варіант побудови волоконно-оптичного каналу (рис.16) на базі промислових SFP-модулів ВОЛЗ, орієнтованих на базові вікна прозорості оптичного волокна  $\lambda_1=1310\text{nm}$   $\lambda_2=1550\text{nm}$ .

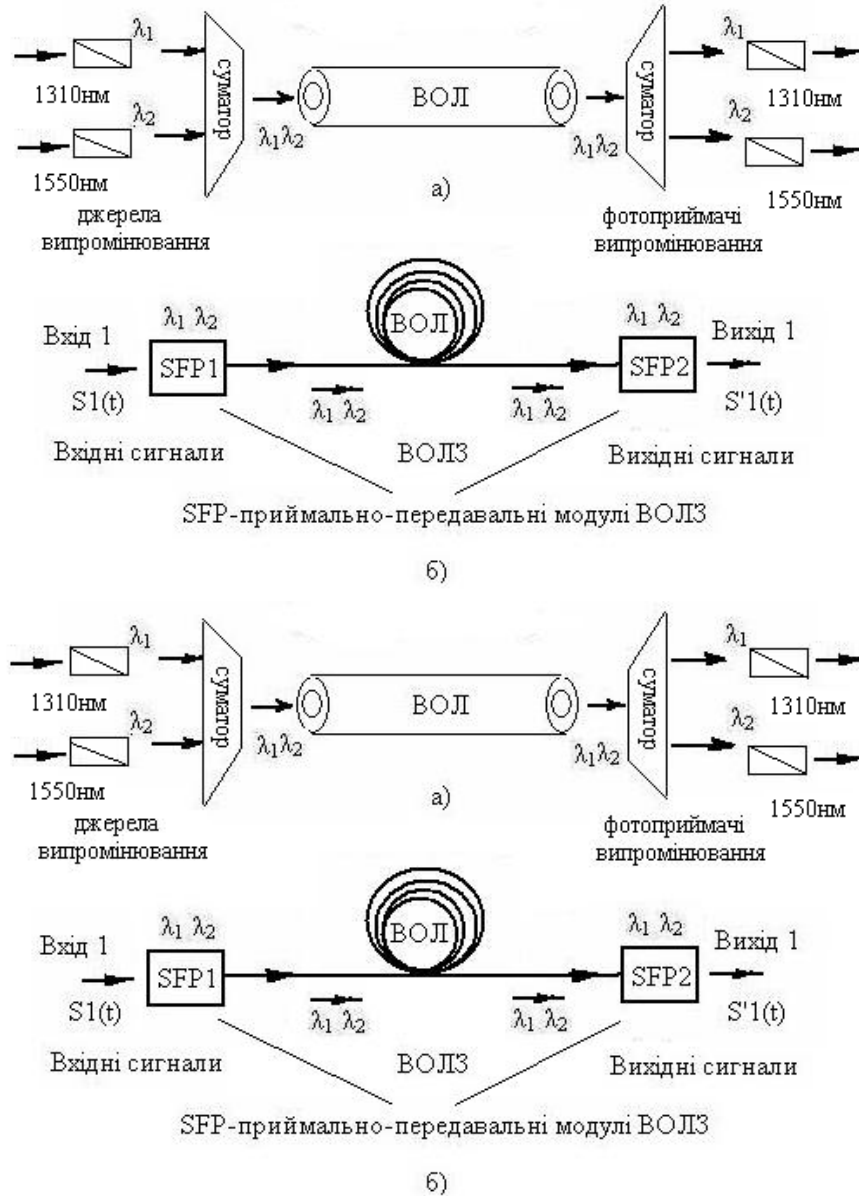


Рис.16. Структура ВОЛ на основі методу двох хвильового кодування на базі SFP-модулів для односторонньої високостабільної передачі інформації: а) узагальнена схема побудови односторонньої ВОЛ; б) структура ВОЛ із використанням 2-х модулів SFP та двох довжин хвиль  $\lambda_1=1310\text{nm}$ ;  $\lambda_2=1550\text{nm}$

Структура (рис. 16) передбачає передачу цифрового сигналу лог. «1»  $S_1(t)$  на двох довжинах хвиль  $\lambda_1=1310\text{nm}$ ;  $\lambda_2=1550\text{nm}$  із передавального модуля SFP1. На приймальному модулі SFP2 відбувається прийом оптичних сигналів перетворення їх у електричну форму фотоприймачами р-і-п, чи APD та підсилення електронними трактами підсилювача та декодування. Передавання даних по каналу (рис.16) може здійснюватись лише в одному напрямку, що є обмеженням на його застосування у ВОЛЗ.

Для реалізації багатофункціональності ІМ та їх роботи в режимі двонаправленої передачі даних необхідне застосування структур двосторонньої передачі інформації (рис. 17.)

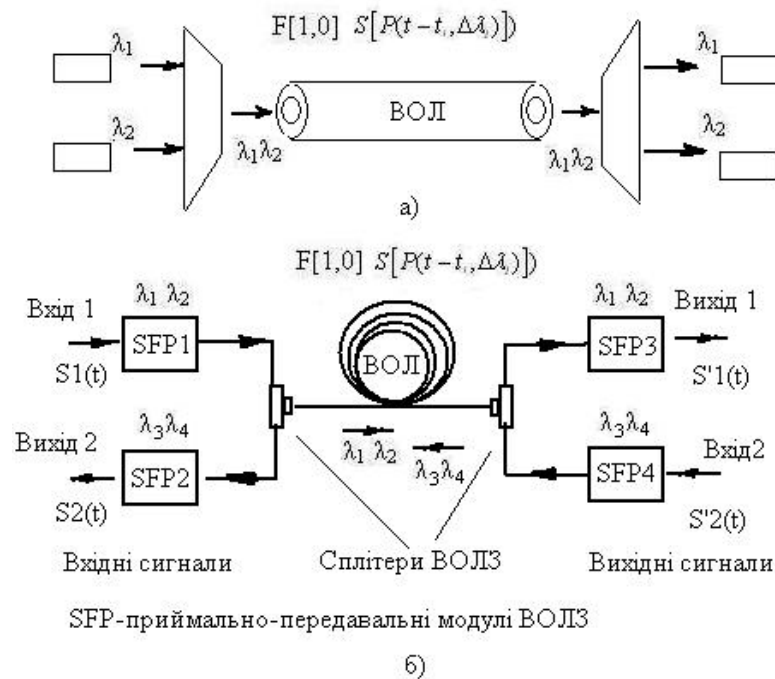


Рис.17. Структура волоконно-оптичної лінії двосторонньої високостабільної передачі інформації на основі промислових приймально-передавальних SFP-модулів: а) узагальнена схема побудови односторонньої ВОЛЗ на базі двох хвильової передачі даних  $\lambda_1$ - $\lambda_2$ ; б) структура ВОЛЗ двохсторонньої передачі даних із використанням 4-х SFP-модулів та 4-х довжин хвиль

Структура волоконно-оптичної лінії (рис. 17) призначена для передачі інформації у двохсторонньому напрямку через одне оптичне волокно, що дозволяє її використання в інформаційних мережах для більшості задач передавання інформаційного трафіку. Це реалізується за рахунок використання двох каналів на 4-х довжинах хвиль  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  по 2 на кожний SFP-модуль. Оптичні сплітери (суматори) організують сумарне введення оптичних сигналів у волокно з обох боків: на першому вході сигнал  $S_1(t)$  подається на передавальний SFP-модуль, який здійснює перетворення його у відповідності до методу двоххвильової передачі із формуванням логіко-часової функції тривалості  $F[1,0]$  (15) на довжинах хвиль  $\lambda_1, \lambda_2$ , які вводяться в оптичне волокно. На приймальному кінці модулем SFP3 здійснюється приймання сигналу  $S'_1(t)$  на 2-х довжин хвиль  $\lambda_1, \lambda_2$  та демодуляція і декодування за схемою диференційного фотоприймача, яка буде описана далі. Зі зворотного боку здійснюється кодування та аналогічна передача сигналу модулем SFP4 на довжинах хвиль  $\lambda_3, \lambda_4$  із аналогічним відтворенням його модулем SFP2 за схемою диференційного фотоприймача.

Таким чином модулі SFP1-SFP4 працюють на незалежних довжинах хвиль  $\lambda_1, \lambda_2$  та  $\lambda_3, \lambda_4$ , які рознесені в спектральній області та не впливають один на одного. Більшість волоконних модулів SFP розраховані на діапазоні 1310-1340нм та 1530-1570нм, тому з практичної точки зору не існує труднощів з вибором довжин хвиль в основних вікнах прозорості 1310нм та 1550нм. Наприклад, для схеми (рис. 8) для основного волоконного тракту SFP1-SFP3 можна обрати довжини хвиль  $\lambda_1=1310$ нм,  $\lambda_2=1550$ нм, а для зворотного на SFP2-SFP4 – відповідно  $\lambda_3=1320$ нм,  $\lambda_4=1560$ нм. Сильний вплив дисперсії  $\tau_z$  та оптичних втрат  $a_z$  для другого тракту, при цьому не буде проявлятися, оскільки віддалення від основних робочих вікон ВОЛЗ (1310нм та 1550нм) є незначним. Схема двоххвильової передачі інформації по волоконно-оптичній лінії (рис. 17) є відносно економічно-дешевою із можливістю реалізації на промислових компонентах.

Якщо порівняти структуру односторонньої передачі даних (рис. 17) та двосторонньої (рис. 18)

Основною складністю при реалізації методу двоххвильової передачі інформації на основі логіко-часового кодування є необхідність внесення змін в електронні процесорні тракти, зокрема необхідна перепрошивка пам'яті EPROM [2] та сигнального процесора в складі модулів SFP.

## ВИСНОВКИ

В роботі проведено аналіз складової завад в каналах ВОЛЗ сучасних інформаційних мереж. Визначено, що для компенсації завад та уникнення нелінійних явищ, необхідно проводити розмежування потужності оптичного імпульсу по спектральній складовій. Запропоновано і досліджено метод

двохвильової передачі інформації, який базується на одночасному представленні одного оптичного інформаційного імпульсу на двох довжинах хвиль в одному часовому вікні.

Показано можливість реалізації та теоретично обґрунтовано його придатність для сучасних каналів волоконно-оптичних каналів ІМ із перспективами реалізації на логіко-часовому представленні. Показано, що запропонований метод двохвильової передачі інформації у волоконно-оптичних каналах ІМ, який використовує одразу 2 довжини хвилі  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  в одному оптичному інформаційному імпульсі в один період часу  $t_i$  дозволяє зменшити потужність завади, підвищити показник сигнал-шум та відповідно підвищити стабільність передавання інформації у ВОЛЗ ІМ.

Отримані результати дозволяють сформулювати підходи до підвищення стабільності передавання даних по оптичним каналам ІМ. В перспективі, це дозволить підвищити якість передачі інформації у ІМ, та є економічно ефективним підходом для вдосконалення якісних показників сучасних інформаційних мереж.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб: Издательство “Питер”, 1999. – 672с.
2. Скуратов А.К. Администрирование телекоммуникационной сети на основе статистического анализа трафика / А.К.Скуратов, Д.С.Безрукавный // Вестник Таганрогского Государственного Университета . – 2004. – Том 10. – С. 919-923.
3. Убайдулаев Р. Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р. Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Тренз, 1998. – 268 с.
4. Photovoltaic energy, electricity from the sun / Daniel Fraile, Marie Latour, Adel El Gammal, Michael Annett // EPIA Publications. – vol.50.– april 2010. – pp.567-572 .
5. В.П. Кожем'яко. Спосіб побудови та методика створення уніфікованої системи трансформації довжин хвиль / В.П. Кожем'яко, О.В. Шевченко, Я.І. Ярославський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №2(12). –2007р. – С.78-86.
6. Мамедов И.М. Исследование эффективности оптических транспортных сетей с использованием передающего и приемного оптоэлектронного модуля / Б.Г. Ибрагимов, И.М. Мамедов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – №1(23). –2012р. – С.131-136.
7. Убайдулаев Р. Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р. Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Тренз, 1998. – 268 с.

Надійшла до редакції 14.06.2014р.

**КОЖЕМ'ЯКО В.П.** – д.т.н., професор, академік АІНУ, завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**МАЛІНОВСЬКИЙ В.І.** – к.т.н., науковий співробітник, ст. викладач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**ЯРОСЛАВСЬКИЙ Я.І.** – здобувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.