

УДК 681.3.021

В.П. КОЖЕМ'ЯКО, В.І. МАЛІНОВСЬКИЙ, Я.І. ЯРОСЛАВСЬКИЙ  
Вінницький національний технічний університет**МЕТОД ТА СТРУКТУРА МОДОВОЇ МАНІПУЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ КАНАЛАХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ**

В роботі модифіковано метод підвищення стабільності передачі інформаційних оптичних сигналів у волоконно-оптичних каналах, який базується на фізичному представленні оптичних сигналів різним складом мод. Для забезпечення режиму переключення моди у волоконно-оптичному середовищі, в якості джерела випромінювання використовує лазер із довжиною хвилі DFB, що перелаштовується. Модифікований метод модової модуляції дозволяє передавати цифровий оптичний сигнал із підвищеною стабільністю, за рахунок підвищення рівня сигнал-шум та зменшення коефіцієнта виникнення помилки.

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

V.P. KOZHEMJAKO, V.I. MALINOVSKYI, JA.I. JAROSLAVSKYI  
Vinnytsia National Technical University**THE METHOD AND STRUCTURE OF MODES SIGNAL MANIPULATION IN FIBER-OPTICAL CHANNELS OF INFORMATION NETWORKS**

**Abstract** - In this paper the modified method of improving the stability of data transmission by optical signals in fiber-optic channels based on a physical representation of the optical signals of different composition modes in fiber optical environment was presented. The modes switching in this method is provided by a DFB laser light sources with a turning wavelength. Modified mode modulation method allows to transfer digital optical data signals with high stability by improving the signal to noise ratio and reducing the bit error ratio.

**Key words:** optical information network; fiber-optic communication line; information network; the mode of optical radiation; optical signal; wavelength, optical power; signal spectrum; optical fiber.

**ВСТУП**

Сучасні волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ) та інформаційні мережі (ІМ) на їх основі 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, провайдерми цифрового кабельного телебачення та мережі Internet [1, 2], а також вузькоспеціалізованими компаніями і державними організаціями для створення захищеного службового зв'язку і корпоративного обміну інформацією. Тим не менш, як показано у роботі [3], 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 та підвищення стабільності процесу передавання важливих даних. 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 є особливо важливим для державного та корпоративного секторів, де ступінь важливості та конфіденційності інформаційних даних є високою.

*Мета* статті полягає у вдосконаленні методу модової маніпуляції та структури для підвищення стабільності функціонування волоконно-оптичних каналів інформаційних мереж та їх апаратних вузлів.

**СТРУКТУРИ КАНАЛІВ ВОЛЗ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ**

Інформаційна стабільність оптичних каналів та заводо захищеність у ВОЛЗ забезпечуються підтриманням належного рівня якості сервісу QoS (Quality of Service) [2] у ІМ при передаванні даних в їх каналах зв'язку. При цьому здійснюється постійний моніторинг параметрів каналів в ІМ згідно з політикою QoS. Останнє передбачає моніторинг адитивних завад  $N_{III}(t, \lambda)$ , які залежать як від часового параметру імпульсу  $S(t)$ , так і від безпосередньо хвильового  $S(\lambda)$  (рис. 1).

При цьому, згідно з дослідженнями параметрів якості передачі імпульсів, проведених у [4], було встановлено, що для одного каналу ВОЛЗ з довжиною хвилі  $\lambda_i$ , сигнал, враховуючи часові та хвильові показники має вигляд [4]:

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

де  $a_j$  – коефіцієнт, рівний 0 при передаванні логічного «0» та 1 при передаванні логічної «1»;  $A_m$  – амплітуда оптичного сигналу, що передається;  $N_{III}(t, \lambda)$  – рівень джерела адитивної завади в момент часу

передавання  $t$ , який представляє собою вузькосмугові квазігармонійні коливання шумів із випадковими параметрами.

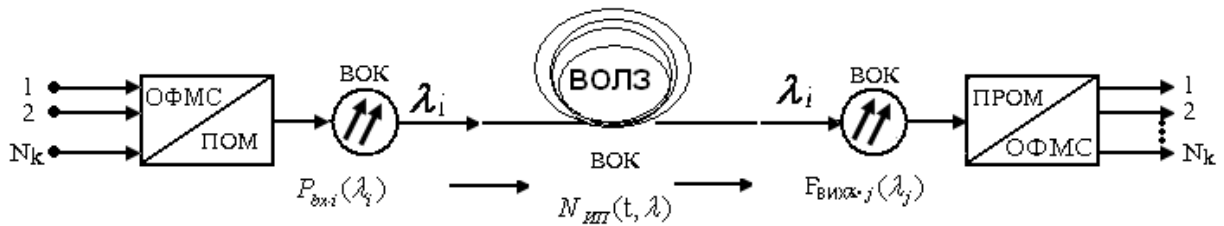


Рис. 1. Модель каналу ВОЛЗ на базі однієї довжини хвилі із впливом адитивних шумів у ВОК  $N_{шш}(t, \lambda)$ : ПОМ – передавальний оптичний модуль; ПРОМ – приймальний оптичний модуль; ВОК – волоконно-оптичний кабель [3]

Отже основний вклад вносить оптична потужність, рівня якої залежить рівень завад в каналі. Якщо якимось чином втримати оптичну потужність на сталому рівні ( $P=const$ ), то теоретично можливим є виключення адитивних і імпульсних завад та зведення їх значення до мінімуму.

### РОЗРОБКА МЕТОДУ МАНІПУЛЯЦІЇ МОДОВИМ СКЛАДОМ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ КАНАЛАХ

Мода оптичного випромінювання – спеціальний тип коливань, який виникає в оптичному середовищі (в оптоволокну) та залежать від умов середовища, співвідношення параметрів довжини хвилі та геометрії хвилеводу. Існують поздовжні та поперечні моди, які характеризуються векторами напруженості магнітного та електричного полів, що визначаються індексами  $m$  і  $n$  та позначаються як  $TEM_{mn}$  (наприклад, основна мода має тип  $TEM_{00}$ ).

### МЕТОД МОДУЛЯЦІЇ МОДОВИМ СКЛАДОМ ОБ ДЛЯ ПЕРЕДАВАННЯ ОПТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ІМПУЛЬСІВ ПО ВОЛЗ

Інший шлях підвищення стабільності передавання інформації – метод модової модуляції (маніпуляції), який передбачає кодування цифрового сигналу (лог.«0 або лог.«1») шляхом зміни модового режиму (кількості мод оптичного випромінювання в ОБ) із одномодового (коли передається тільки одна мода) на багатомодовий (передаються відразу декілька мод,  $N \geq 2$ ).

Умовами, що здійснюють ці режими є параметр нормованої частоти [5, 6]

$V = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ , який визначається робочою довжиною хвилі  $\lambda$  джерела випромінювання (лазерний діод ЛД, світлодіод СВД), показниками заломлення серцевини та оболонки  $n_1, n_2$  ОБ та діаметром серцевини волокна  $d$ , в якій розповсюджується основне випромінювання.

Так, граничні умови для встановлення модового режиму та відповідно цифрового сигналу такі [1, 2]: якщо нормована частота лежить у межах  $0 < V < 2,405$ , то режим одномодовий (поширюються моди  $HE_{11}$  або  $TEM_{00}$  не залежно від типу ОБ), якщо  $V > 2,405$  – режим багатомодовий [5, 6]. Середню кількість мод в оптоволокну за нормованою частотою визначається як [2]:  $N_{TEM_{mn}} = V/2$ . Всі параметри, за якими визначається нормована частота  $V$ , окрім довжини хвилі  $\lambda$  є статичними та не піддаються зміні. Тому модуляцію модового складу ОБ можна проводити змінюючи довжину хвилі  $\lambda$  в межах і поблизу границі критичної частоти  $V$ , щоб виконувалась умова логічної функції:

$$F_{\log}[1,0] = \begin{cases} 1, & \text{при } V > 2.405; \\ 0, & \text{при } V < 2.405, \end{cases} \quad F_{\log}[1,0] = \begin{cases} 1, & \text{при } \lambda > \frac{2\pi d}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi d NA}{2.405}; \\ 0, & \text{при } \lambda < \frac{2\pi d}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi d NA}{2.405}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $NA$  – числова апертура оптичного волокна,  $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ .

Ілюстрація методу модової модуляції оптичного сигналу наведена на рис. 2. В багатомодовому режимі  $V > 2.405$  передається лог. «1», а в одномодовому – лог. «0».

Згідно рис. 3, в одному часовому вікні  $\Delta t_i$  оптична потужність перерозподіляється між модами без зміни амплітудних значень  $P_{max}(t)$  та знаходиться на визначеному постійному рівні  $P_{const}$ .

Сигнали лог. «1» і лог. «0» формується в одному часовому вікні  $\Delta t_i$ . Обмеженням при реєстрації виступає не рівень оптичної потужності на фотоприймачі, а кількість мод (модовий склад) із ustalеним рівнем потужності  $P_{const}$ . При детектуванні сигналу на виході, ця кількість мод  $N$  повинна чітко розділятися в просторі апаратними засобами та фіксуватись окремими фотоприймачами для сигналів лог. «1» та лог. «0».

Згідно теорії волоконної оптики, обмеженням на встановлення багатомодового режиму виступає параметр критичної частоти та відповідно критичної довжини хвилі із врахуванням коефіцієнту одномодової передачі (для одномодової передачі коефіцієнт  $P_{nm}=2,405$ ). Так критична частота із врахуванням швидкості світла в матеріалі серцевини ОБ складає [5]:

$$f_{kr} = \frac{P_{mn}c}{\pi 2d\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} [\Gamma\mu], \quad (3)$$

та для оптичного діапазону має порядок  $10^{14}$  Гц. Відповідна критична довжина хвилі, тобто така при якій не можлива передача сигналів через ОВ із визначеними параметрами [6]:

$$\lambda_{kr} = \frac{\pi 2d}{P_{mn}n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad (4)$$

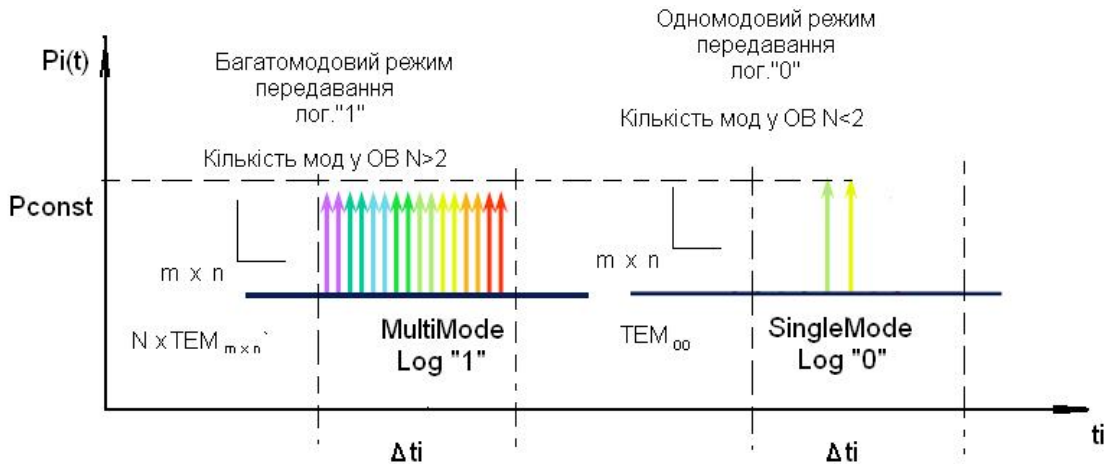


Рис. 2. Залежність оптичної потужності інформаційного сигналу в часі при реалізації методу модової модуляції

Формула (4) встановлює обмеження на модуляцію довжини хвилі у вигляді  $\lambda > \lambda_{kr}$  для можливості передачі більшої частини випромінювання в ОВ. При умові що робоча довжина хвилі  $\lambda$  більша або дорівнює критичній  $\lambda_{kr}$  ( $\lambda \geq \lambda_{kr}$ ) – передавання оптичних імпульсів інформації не можливо у ВОЛЗ, так як більша частина оптичної потужності  $P_{mn}$  моди із індексами  $m, n$  переходить в оболонку ОВ. По результатам аналізу теоретичних робіт в області волоконної оптики [3, 5–7], по мірі наближення довжини хвилі до критичної ( $\lambda \rightarrow \lambda_{kr}$ ), більша частина корисної енергії оптичного сигналу переходить в оболонку і стає модами оболонки, які не можуть ефективно передавати інформації на далекі відстані.

Таким чином, модулюючи (змінюючи) довжину хвилі в часі  $\lambda(t)$ , теоретично можливо здійснювати передавання інформації шляхом зміни модового складу випромінювання і реєстрації його на виході ОВ ВОЛЗ. Таким чином, в одному модовому режимі можна передавати один логічний сигнал, а в другому – інший без модуляції оптичної потужності. Остання умова дає теоретичну можливість усунути імпульсні та адитивні завади. Як є невід'ємною складовою модуляції по амплітуді оптичного сигналу.

Енергія і оптична потужність  $P_i(t)$  при цьому не змінюється в часі  $t_i$ , а лише розподіляється між модами випромінювання ОВ. Таким чином, дискретно змінюючи довжину хвилі в часі  $\lambda(t)$ , теоретично можливо здійснювати передавання інформації шляхом зміни модового складу випромінювання і реєстрації його на виході ОВ ВОЛЗ. За рахунок незалежності сигналу від зміни значень оптичної потужності сигналу  $P_{out}$  на виході ВОЛЗ, можна в значній мірі усунути вплив потужності завади  $P_N$  та підвищити показники відношення сигнал-шум (OSNR).

Потужність втрат в оптичних каналах визначається тоді як [7]:

$$P_{dBonm.} = -10 \lg \frac{P_{вихОПТ}}{P_{вхОПТ}} = -10 \lg \frac{P_{ОВзвз.мод}}{P_{вхОПТ}}, \quad (5)$$

де  $P_{вих}$  – вихідна,  $P_{вх}$  – вхідна та  $P_{ОВзвз.мод}$  – модова оптична потужності каналу ВОЛЗ.

Аналізуючи формули (3)–(5), для передачі оптичному сигналу в багатомодовому режимі по ОВ краще придатні існуючі багатомодові оптичні волокна MMF 50/125, MMF 62,5/125 і MMF 85/125, на відміну від одномодових SF 8/125, SF 10/125, в яких встановлення багатомодового режиму є більш проблематичним через малий радіус серцевини.

Існує технологія лазерних джерел із перелаштовуванням довжини хвилі – DFB-лазери (Distributed Feedback Laser) [4, 7, 8] – лазери із розподіленим зворотнім зв'язком, які дозволяють змінювати довжину хвилі  $\lambda$  в процесі роботи. Принцип оптичного розподіленого зворотного зв'язку (РЗЗ) у конструкції DFB-лазерних випромінювачів (рис. 3.) реалізується шляхом використання оптичного резонатора на просторових періодичних неоднорідностях в активному середовищі, на відміну від плоских дзеркал резонатора Фабрі-Перо. В DFB-лазерних джерелах використовується періодична модуляція показника заломлення, коефіцієнта підсилення та періодична просторова зміна площі оптичного каналу.

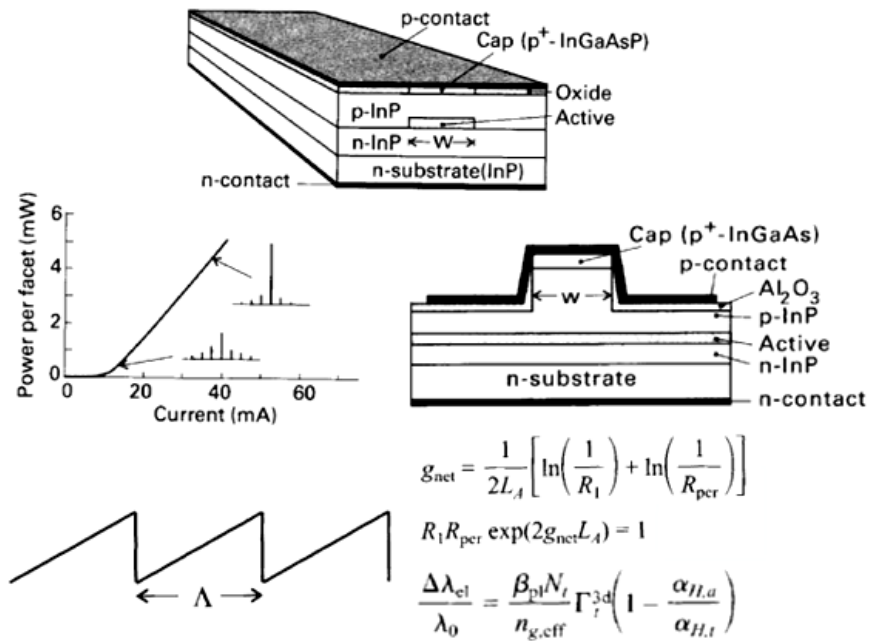


Рис.3. Структура DFB-лазерного джерела на базі періодичної ґратки із функціями розподілу поля на вихідному торці [8]

В якості дзеркал резонатора із розподіленим зворотнім зв'язком (рис. 4) також можуть використовуватись брегівські дифракційні ґратки. Тоді такий різновид лазерних джерел із розподіленим зворотнім зв'язком має назву DBF (Distributed Breg Feedback). Структуру на базі такого типу розподіленого резонатора показано на рис.3. На рис.5. показано структуру DBF-лазера із більш вдосконаленим, вертикальним резонатором VCSEL (Vertical Cavity Self Emission Laser). Такий тип лазерів має кращі показники швидкості модуляції, менші зони завалів фронтів сигналів, за рахунок меншої бар'єрної ємності та вищу квантову ефективність перетворення енергії у світловий сигнал (квантова ефективність  $\eta > 0.8$ ), а також стабільні теплові характеристики. Тому для вищих характеристик модуляції при передаванні інформації мововою модуляцією доцільно застосовувати вертикально-випромінюючі DBF VCSEL лазерні діоди.

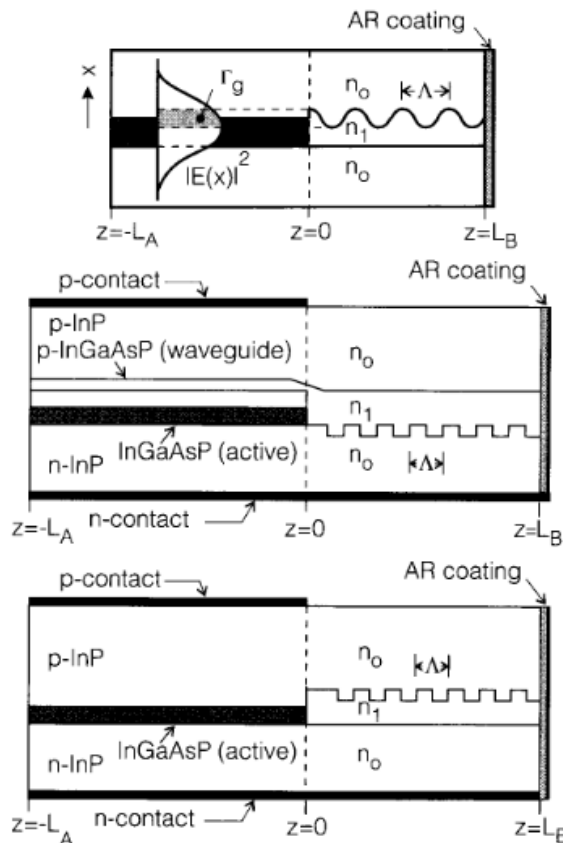


Рис.4. Хвильоводні періодичні структури напівпровідникових InGaAsP DBF – лазерів на базі брегівських неоднорідностей із модуляцією показника заломлення [8]

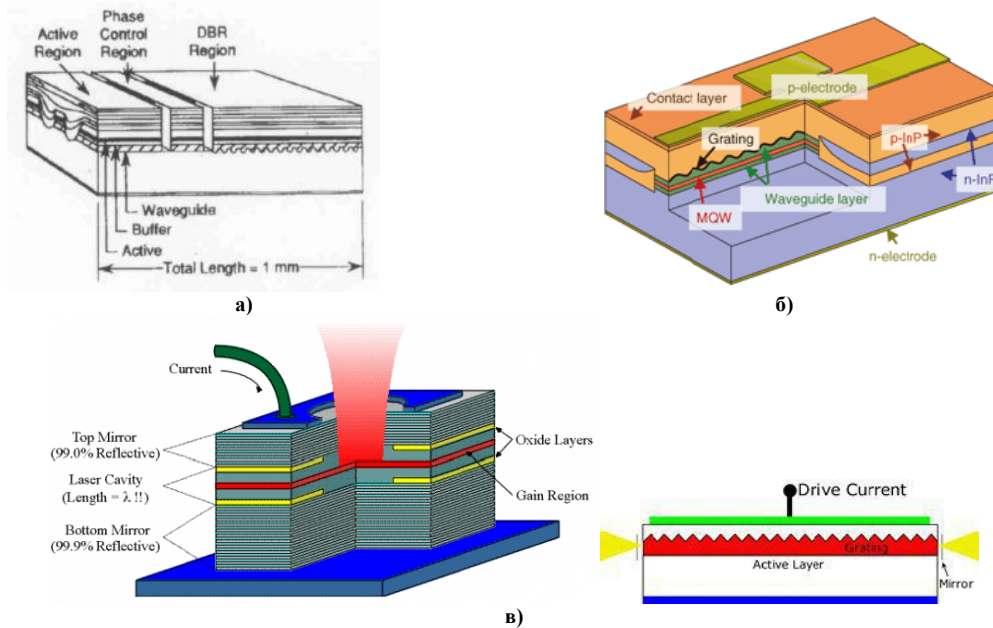


Рис.5. Структури DBF VCSEL-лазерних діодів для застосування в тракті передачі даних при модовій модуляції: а) зображення поперечного перерізу; б) структура об'ємного напівпровідникового матеріалу; в) зображення шарів, вихід оптичного випромінювання та підключення контактних провідників

Хвильоводні періодичні структури напівпровідникових DBF VCSEL-лазерних діодів на базі InGaAsP (рис.5) дозволяють отримати достатньо рівномірний оптичний вихід випромінювання за профілем Гауса.

В останніх структурах період створюваних просторових неоднорідностей  $d$  порівняно із довжиною

хвилі випромінювання  $l_G$  і задовольняє умові Брега – Вульфа [8]:  $\bar{k}B = \frac{\lambda_B^2}{2}$ , де  $\bar{k}$  – оптичний хвильовий

вектор,  $\bar{B}$  – вектор оберненої ґратки, в якій розсіяне оптичне випромінювання збігається по фазі із падаючим. Для Бреґівської дифракційної ґратки із періодом  $d$ , ця умова має вигляд [7]:  $2d \sin \gamma = n\lambda$ , де  $\gamma$  – кут падіння прямого випромінювання,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $n$  – порядком дифракції (ціле число). Зміна довжини хвилі відносно основної бреґівської довжини хвилі  $\lambda_B$  описується у [8] як:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_B^2}{2(L_A n_{g,A} + L_{eff} n_{g,B})};$$

$$2\beta L_A + \phi = 2N\pi, \tag{6}$$

де  $\lambda_B, n_{g,A}, n_{g,B}$  – центральна (бреґівська) довжини хвилі та ефективні показники заломлення в активному шарі (активне середовище) та в зоні решітки резонатора;  $\phi$  – фаза відбивання решітки;  $\beta = d$  – період бреґівської решітки.

Зміна довжини хвилі  $\Delta\lambda$  для бреґівських DBF – лазерних випромінювачів відбувається в порівняно невеликому діапазоні  $\Delta\lambda=20-200$  нм [8, 9]. Тому для забезпечення умов переключення модового режиму (згідно із умовами (2) та (3)), важливо, щоб робоча довжина хвилі (6) знаходилась максимально близько до граничної довжини хвилі  $\lambda_{kr}$  (4), тобто  $\lambda_{kr} \rightarrow \Delta\lambda$ . Оптимально, щоб остання знаходилась максимально близько до центру діапазону переключення DBF – лазерного випромінювача, тобто  $\lambda_{kr} \rightarrow \Delta\lambda/2$ . Наприклад, для одномодового оптичного волокна типу SMF 8.5/125 із відповідним діаметром серцевини 8.5 мкм та ступінчастим профілем показника заломлення та відповідно – самими показниками заломлення  $n_1=1.509$ ;  $n_2=1.507$  для серцевини і оболонки, критична довжина хвилі, яка визначається граничною умовою модового режиму складе:

$$\lambda_{kr} = \frac{2\pi d}{2.405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi d NA}{2.405} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 8.5 \cdot 10^{-6} \sqrt{1.509^2 - 1.507^2}}{2.405} = 1.6647 \text{ мкм}$$

Тому, виходячи із теоретичної оцінки, для реалізації режиму модової модуляції для цього волокна необхідний DBF – лазер, діапазон перелаштовування якого  $\Delta\lambda$  припаде на  $\lambda_{kr} = 1.6647$  мкм. Таким може бути волоконно-оптичний DBF – лазер [8], що працює в складі SFP-модуля в основному вікні прозорості 1.55 мкм (1550 нм) (рис. 6) оптоволокна із можливістю перелаштовування до 1,75 мкм.

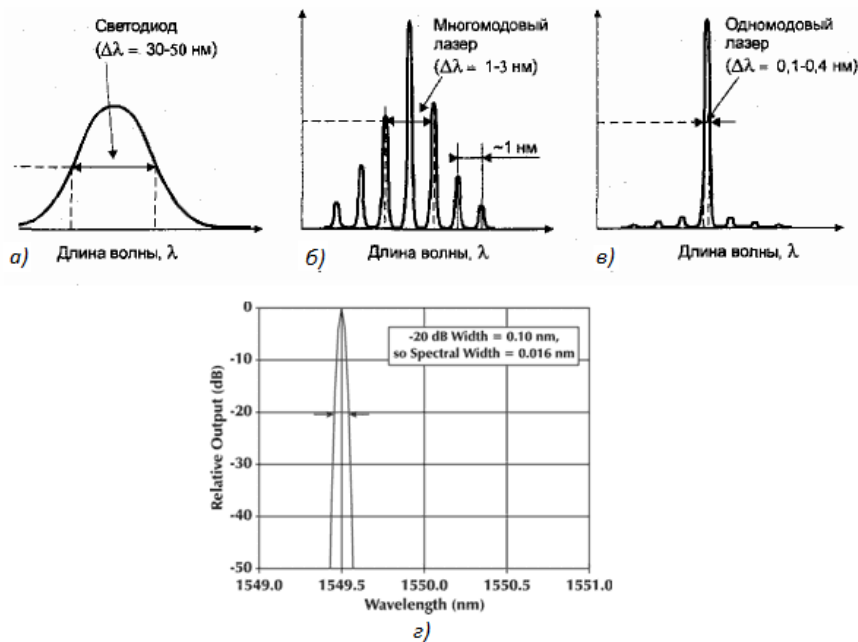


Рис.6. Порівняння ширини спектру модуляції різних джерел: а) світлодіоду; б) багатомодового лазера; в) одномодового лазера; г) DBF – лазерного джерела

Деталізація розкладу спектру DBF – лазера показана на рис. 7.

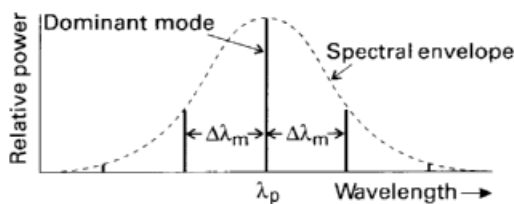


Рис.7. Зміна спектру і зміщення довжини хвилі DBF VCSEL – лазерних діодів при збільшенні струму в прямому напрямку

Кодування цифрового сигналу («лог.1» та «лог.0») буде забезпечуватись як раз при модуляції довжиною хвилі при переході порогу  $\lambda_{kr} = 1.665 \mu\text{м}$ . При цьому буде змінюватись модовий режим передачі інформації. Керування перелаштовуванням довжини хвилі досягається керуванням (модуляцією) струмом лазерного джерела (згідно рис.2) в діапазоні  $\Delta I_{\text{DBF}}=20\text{-}60\text{mA}$ . На рис.8 наведено схему модуляції лазерних джерел із зміною струму і контролем температури.

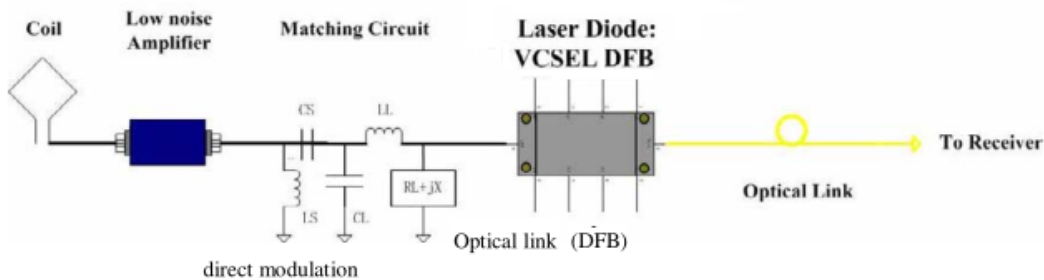


Рис. 8. Схема прямої модуляції струму в структурах DBF VCSEL-лазерних діодів

Таким чином, для передавання цифрової послідовності сигналу по волоконно-оптичному каналу, необхідно здійснювати модуляцію струму лазера, подібно до традиційних способів модуляції інтенсивності лазерного випромінювання. Логічна функція  $F_{\log}[1,0]$ , буде приймати значення 1 або 0 при досягненні порогу струму накачування DBF – лазера, при якому встановиться режим критичної довжини хвилі  $\lambda_{kr} = 1.6647 \mu\text{м}$ . Так, при умові, що  $\lambda_{kr} \geq 1.6647 \mu\text{м}$  (режим передавання багатомодовий) – передаватиметься «лог.1»,  $F_{\log}[1,0]=1$ , а при  $\lambda_{kr} \leq 1.6647 \mu\text{м}$  (режим передавання одномодовий) – передаватиметься «лог.0»,  $F_{\log}[1,0]=0$ .

Таким чином метод модової модуляції може використовуватись при правильному підборі і узгодження елементної бази та розрахунку параметрів волоконно-оптичного тракту.

Розроблено структуру волоконного каналу інформаційної мережі на основі методу модуляції модового складу в ВОЛ (рис. 9).

В структурі (рис. 9) волоконні тракти побудовані на основі промислових волоконних модулів SFP (Small Form-factor Pluggable), які зараз масово серійно виготовляються для застосування у ВОЛЗ та волоконно-оптичних інформаційних мережах. Модулі SFP використовуються для безпосереднього узгодження оптичних та електронних трактів мережевих пристроїв (волоконно-оптичних комутаторів, маршрутизаторів та мережених шлюзів). Найпоширеніші області застосування SFP-модулів – передавання інформації у ВОЛЗ в телекомунікаційних та локальних мережах на швидкостях вище 100 Мбіт/с з використанням технологій: Ethernet (100 Мбіт/с, 1 Гбіт/с, 1,25, 10GE); SDH (STM-1-64 від 155 Мбіт/с до 120Гбіт/с); Fibre Channel (1-10 Гбіт/с

В структурі (рис. 9) передбачено, що передача випромінювання від DFB-лазерів (вмонтовані безпосередньо в деякі волоконні SFP-модулі ) відбувається таким чином, що при передачі логічної одиниці (лог.«1») DFB-лазерний випромінювач перелаштовується в багатомодовий режим та випромінює постійну величину оптичної потужності. Команди керування на перелаштовування довжини хвилі надходять від контролера вхідного інтерфейсу до внутрішнього блоку модуляції кодування SFP-модуля.

Основні довжини хвиль, які використовуються в промислових SFP – модулях це 1310 нм та 1550 нм, що відповідають основним вікнам прозорості та робочим вікнам із мінімальною дисперсією ( $\lambda = 1550$  нм) та дифракцією ( $\lambda = 1310$  нм). Перелаштовування відбувається в діапазоні  $\Delta\lambda = 20-60$  нм, тобто для вікна  $\lambda = 1550$  нм зміна довжини хвилі відбуватиметься в діапазоні  $\Delta\lambda = 1510..1560$  нм , а для вікна  $\lambda = 1310$  нм – в  $\Delta\lambda = 1280..1340$  нм.

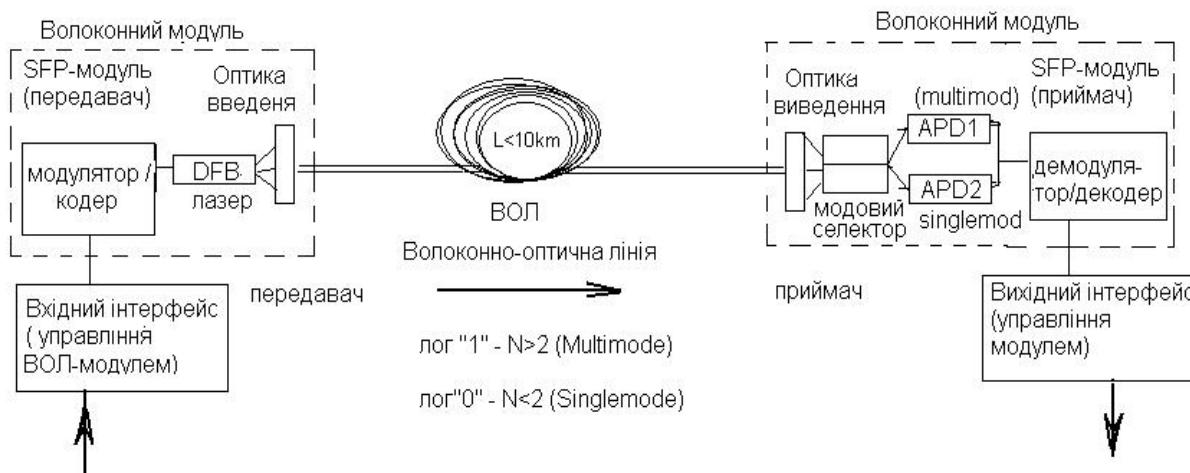


Рис.9. Структура ВОЛ-каналу який може бути розміщений в складі вхідного інформаційної мережі на основі методу модуляції модового складу

Оскільки модуль SFP-випромінює постійну величину оптичної потужності. Мультиплікативні та імпульсні завади відсутні, є тільки адитивна складова  $N_{AD}(\lambda, p_{i\lambda j})$ , яка менша за величину сумарних завад  $N(\lambda, p_{i\lambda j}, t)$  та не залежить від часового параметру  $t$ , тобто:

$$N_{AD}(\lambda, p_{i\lambda j}) < N(\lambda, p_{i\lambda j}, t) = N_{AD}(\lambda, p_{i\lambda j}) + N_{MLT}(\lambda, p_{i\lambda j} f(t)) + N_{IMP}(p_{i\lambda j}, dt_i), \quad (5)$$

де  $N(\lambda, p_{i\lambda j}, t)$  – величина сумарних завад в каналі ВОЛ;  $N_{AD}(\lambda, p_{i\lambda j})$  – величина адитивних завад;  $N_{MLT}(\lambda, p_{i\lambda j} f(t))$  – мультиплікативні завади;  $N_{IMP}(p_{i\lambda j}, dt_i)$  – імпульсні завади в каналі ВОЛ;  $p_{i\lambda j}$  – оптична потужність на робочій довжині хвилі  $\lambda_i$ .

Якщо величина потужності  $p_{i\lambda j}$  не змінюється в процесі передавання імпульсів, на відміну від модового режиму, то складові мультиплікативні та імпульсних завад є дуже не значними, що дозволяє ними знехтувати:  $N_{MLT}(\lambda, p_{i\lambda j} f(t)) \rightarrow 0$  та  $N_{IMP}(p_{i\lambda j}, dt_i) \rightarrow 0$ . При цьому повна величина завад буде описуватись тільки адитивною складовою:  $N(\lambda, p_{i\lambda j}, t) \approx N_{AD}(\lambda, p_{i\lambda j})$  а вноситиме менший вклад у відношення параметру OSNR.

На вході приймача структури (рис. 9) відбувається розділення мод за допомогою модового селектора, який відокремлює центральну моду TEM<sub>00</sub> (HE<sub>11</sub>) (присутня в одномодовому режимі) на один фотоприймач (APD2-Singlemode), а інші моди відокремлюються селектором мод на другий фотоприймач (APD1-Multimode). Таким чином, логічні оптичні імпульси сигналів лог. «1» та лог. «0» надходять на різні фотоприймачі. Кількість мод на першому фотоприймачі (APD2-Singlemode) рівна N=1 (центральна мода

HE<sub>11</sub> або TEM<sub>00</sub>). А на другому фотоприймачі (APD1-Multimode) кількість мод рівна  $N = N_{\max} - 1$ , оскільки відсутня основна мода TEM<sub>00</sub> (HE<sub>11</sub>), яка відокремилась на фотоприймач 1 (APD2-Singlemode). Таким чином фотоприймач 1 (APD2-Singlemode) реєструє тільки сигнали логічного нуля (лог. «0»), а фотоприймач APD1-Multimode – сигнали логічної одиниці (лог. «1»). Нагадаємо, що оптична потужність  $P_{i\lambda j}$  основної довжини хвилі в каналі при цьому не змінюється, а лише перерозподіляється між модами ОВ, кількість яких  $N$  формує логічні сигнали інформаційних імпульсів.

Демодулятор та декодер (рис. 9) виконують демодуляцію оптичного сигналу та декодування із наявних основних лінійних кодів SFP ВОЛЗ в двійковий цифровий код. Після цього по високошвидкісному електронному тракту сигнал подається на вихідний інтерфейс, розташований на приймальному кінці.

Технологія створення DFB-лазерів є апробованою та промислово придатною, такі джерела виготовляється під стандарти волоконної оптики. Зокрема створюються волоконні модулі SFP під більшість промислових стандартів волоконно-оптичних з'єднувачів: SC, FC, ST, SC, Duplex SC, FC, LC, MIC і ESCON.

DFB-лазерні джерела можуть бути використані для реалізації методу модуляції модовим складом у ВОЛЗ. Основним обмеженням в цьому виступає обмеження часу перелаштовування довжини хвилі DFB-лазерів  $t_{\text{DFB}}$ , який складає для сучасних моделей 0.1-0.5 нс [8, 9]. Виходячи з цього, смуга пропускання буде визначена приблизно на рівні:  $F \sim 1/t_{\text{DFB}} = 1/0.1 \cdot 10^{-9} = 10$  ГГц, що при лінійній модуляції (коди NRZ, 1B2B) [6] обмежить швидкодію порядку до 10 Гбіт/с на один волоконний канал. Це, враховуючи сучасний рівень розвитку волоконно-оптичних мереж є недостатнім для організації багатоканальним високошвидкісних з'єднань. Тому, метод модуляції модовим складом має обмеження у використанні і придатний для створення локальних волоконно-оптичних з'єднань із невисокою швидкістю але із вищою стабільністю, за рахунок не залежності рівня логічного сигналу від рівнів оптичної потужності на виході ВОЛЗ в ІМ.

Застосування методу модової модуляції для передачі сигналу у ВОЛЗ, з метою підвищення стабільності, для кожного конкретного випадку обмежується вибором конкретної елементної бази і розрахунку параметрів і характеристик схеми модової модуляції (маніпуляції). Конкретно, вибір DBF – лазерного випромінювача повинен відбуватися в залежності від геометрії оптичного волокна: його діаметру сердцевини, профілю показника заломлення і т.п. Тому, це накладає певні обмеження на застосування цього методу – як шляху підвищення стабільності волоконно-оптичних каналів інформаційних мереж.

Вразливим місцем оптичних систем передачі інформації є ділянки є оптико-електронним перетворенням, де світлові сигнали конвертуються в електронні з втратою швидкодії.

Також проблемами при реалізації методу модуляції модового складу є забезпечення високої температурної стабільності DBF лазерних випромінювачів та швидкості модуляції DBF структур. Температурні флуктуації  $\Delta T = R_{\text{therm}} U_i(I_i) I_i$  [8] також значно впливають на стабільність основних параметрів, в основному – на робочу довжину хвилі  $\lambda$ . Температурна нестабільність призводить до втрат і накладання цифрового сигналу, та як наслідок до збільшення коефіцієнта виникнення помилки BER. Тому, параметр зміни температури  $\Delta T$  потрібно втримувати на високому рівні.

Стосовно другого показника – швидкості модуляції DBF лазерних випромінювачів, то розрахунки дозволяють стверджувати, що перелаштовування довжини хвилі для сучасної елементної бази знаходиться в межах 2.3–5.1 нм/нс. Це дозволяє здійснювати перемикання DBF лазер у діапазоні 40–60 нм в часовому інтервалі 7.8–11.7 нс, що відповідає частоті 80–120 МГц. Теоретичні оцінки показують, що при умові лінійної модуляції це відповідатиме швидкості 80–120 Мбіт/с, що є порівняно невеликим значенням для сучасних ВОЛЗ.

Тому застосування методу модуляції модового складу у волоконно-оптичних лініях зв'язку та інформаційних мережах на їх основі обмежується каналами із порівняно невисокою швидкодією до 150 Мбіт/с і може розглядатись як окремий частковий випадок підвищення стабільності передачі даних у кінцевих волоконно-оптичних каналах локальних інформаційних мереж.

## ВИСНОВКИ

В статті вдосконалено метод модуляції модового складу оптичного волокна, який базується на передачі цифрових оптичних сигналів різними модовими режимами, що створюється зміною довжини хвилі джерела поблизу нормованої частоти оптоволоконна. Так, оптичний сигнал «лог.1» передається при створенні і усталенні в оптоволоконній лінії багатомодовому режиму, а сигнал «лог.0» – в одномодовому режимі. Це дозволяє підвищити стабільність процесу передачі оптичних імпульсів, за рахунок зменшення адитивних та імпульсних завад, які залежать від рівня оптичної потужності, що є сталим та не змінюється в процесі реалізації даного методу. Метод відрізняється від відомих тим, що використовує DBF-джерела випромінювання, які змінюють довжину хвилі поблизу критичної частоти, починаючи із меншого її боку, що дозволяє виключити можливість збоїв генерації за рахунок перекриття із критичною частотою оптоволоконна (при співпадінні робочої довжини хвилі із критичною для ОВ).

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 волоконно-оптичних каналів інформаційних мереж.



## Література

1. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – СПб : Издательство “Питер”, 1999. – 672 с.
2. Убайдулаев Р. Р. Волоконно-оптические сети / Р. Р. Убайдулаев. – М. : Эко-Тренз, 1998. – 268 с.
3. 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.
4. Ибрагимов Б.Г. Исследование эффективности оптических транспортных сетей с использованием передающего и приемного оптоэлектронного модуля / Б.Г. Ибрагимов, И.М. Мамедов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 11(23). – С. 131–136.
5. Снайдер А. Теория оптических волноводов / А. Снайдер, Дж. Лав. ; [пер. с англ. ; под ред. Е.М. Дианова, В.В. Шевченко]. – М. : Радио и связь, 1987. – 655 с.
6. Лисенко Г. Л. Волоконна та інтегральна оптика : навчальний посібник : Ч. 1 / Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВДТУ, 1998. – 127 с.
7. Дмитриев С. А. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – М. : Изд. Connect, 2005. – 360 с.
8. Daniel Fraile, Marie Latour, Adel El Gammal, Michael Annett. Tunable laser diodes EPIA Publications. Vol.50. april 2010. pp.567-572.
9. Frank Briamonte. Lucent Technologies unveils worlds fastest single-laser optical transmission system. Photonics Online. March 11. 1999. URL: [www.photonicsonline.com/article.mvc/LUCENT-Lucent-Technologies-unveils-worlds-fas-0001](http://www.photonicsonline.com/article.mvc/LUCENT-Lucent-Technologies-unveils-worlds-fas-0001).
10. Антонов В.М. Сучасні комп'ютерні мережі / В. М. Антонов. – К. : «МК-Прес», 2005. – 478 с.
11. Кожем'яко В. П. Локальні геоінформаційно-енергетичні мережі на новітніх волоконно-оптичних лініях із спектротрансформаторним живленням / В. П. Кожем'яко, В. І. Маліновський, Я. І. Ярославський, В. В. Мороз // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2012. – № 2(24). – С. 137–146.

## References

1. Olyfer V. H., Olyfer N. A. Kompiuternye sety. Pryntsyppu, tekhnolohyy, protokoly. SPb: Yzdatelstvo “Pyter”, 1999. 672 s.
2. Ubaidulaev R. R. Volokonno-optycheskiye sety. M.: Eko-Trenz, 1998. 268 s.
3. Skuratov A.K., Bezrukavnyi D.S. Admyunystryrovanye telekommunykatyionnoi sety na osnove statystycheskoho analiza trafyka. Vestnyk Tahanrohskoho Hosudarstvennoho Unyversyteta. 2004. Tom 10. S. 919-923.
4. Ybrahymov B.H., Mamedov Y.M. Yssledovanye effektivnosti optycheskykh transportnykh setei s yspolzovanyem peredaiushchego y pryemnoho optoelektronnoho modulia. Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. № 11(23). 2012. S.131-136.
5. Snaider A., Lav Dzh. Teoryia optycheskykh volnovodov ; Per. s anhl. pod red. E.M. Dyanova, V.V. Shevchenko. M.: Radyo y sviaz, 1987. 655s.
6. Lysenko H. L. Volokonna ta intehralna optyka. Ch.1. Navchalnyi posibnyk. Vinnytsia: VDTU, 1998. 127 s.
7. Dmytryev S. A., Slepov N. N. Volokonno-optycheskaia tekhnika: sovremennoe sostoianye y perspektivy / S. A. Dmytryev. M.: Yzd. Connect, 2005. 360 s.
8. Daniel Fraile, Marie Latour, Adel El Gammal, Michael Annett. Tunable laser diodes EPIA Publications. Vol.50. april 2010. pp.567-572.
9. Frank Briamonte. Lucent Technologies unveils worlds fastest single-laser optical transmission system. Photonics Online. March 11. 1999. URL: [www.photonicsonline.com/article.mvc/LUCENT-Lucent-Technologies-unveils-worlds-fas-0001](http://www.photonicsonline.com/article.mvc/LUCENT-Lucent-Technologies-unveils-worlds-fas-0001).
10. Antonov V.M. Suchasni komp'yuterni merezhi. Kyiv, «MK-Pres», 2005. 478 s.
11. Kozhemiako V. P., Malinovskiy V. I., Yaroslavskiy Ya. I., Moroz V. V. Lokalni heoinformatsiino-enerhetychni merezhi na novitnikh volokonno-optychnykh liniyakh iz spektrottransformatornym zhyvleniam. Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. № 2(24). 2012. S. 137-146.

Рецензія/Peer review : 14.10.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.

Рецензент: д.т.н., професор В.П. Кожем'яко