

УДК 681.3:007

В. П. КОЖЕМ'ЯКО, В. І. МАЛІНОВСЬКИЙ, Я. І. ЯРОСЛАВЬКИЙ, Г. С. КОЛЕСНИК

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ СИГНАЛІВ В ОПТИЧНИХ ВОЛОКНАХ ЗА ВДОСКОНАЛЕНИМ МЕТОДОМ ДВОХХВИЛЕВОГО ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

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

**Анотація.** В роботі проаналізовані проблеми існуючої математичної моделі методу 2-х хвильового передавання оптичних сигналів в ОВ, проведене комп'ютерне моделювання сигналів на базі розробленого програмного середовища. Отримані результати показали відносно високу ефективність методу і математичної моделі розповсюдження 2-х хвильового сигналу в оптоволокну. Також наведені і виділені ключові критерії оцінки ефективності процесів передачі інформації в ОВ за допомогою інноваційного методу.

**Ключові слова:** оптичне волокно (ОВ); волоконно-оптична лінія зв'язку (ВОЛЗ); оптична енергія, оптична потужність; довжина хвилі.

**Аннотация.** В работе проанализированы проблемы существующей математической модели метода 2-х волнового передачи оптических сигналов в ОВ, проведено компьютерное моделирование сигналов на базе разработанного программного среды. Полученные результаты показали относительно высокую эффективность метода и математической модели распространения 2-х волнового сигнала в оптоволокне. Также приведены и выделены ключевые критерии оценки эффективности процессов передачи информации в ОВ с помощью инновационного метода.

**Ключевые слова:** оптическое волокно (ОВ) волоконно-оптическая линия связи (ВОЛС) оптическая энергия, оптическая мощность; длина волны.

**Abstract:** the paper analyzed the existing problems of the mathematical model and method of two wave transmitting of optical signals in fiber. Was conduct computer simulations witch based on signals developed software environment. The results showed relatively high efficiency of the method and mathematical models of two wave signal in optical fiber. There are marked and key criteria for evaluating the effectiveness of information transfer processes in the optical fiber by using innovative methods.

**Keywords:** optical fiber (OF) of fiber-optic communication line (FOCL) optical power, optical power; wavelength.

### ВСТУП

Одним із перспективних методів підвищення стабільності передачі інформації в оптичних каналах і мережах на їх основі [1-3] є інноваційний метод 2 хвильового передавання оптичного сигналу [4, 5]. Він базується на одночасній модуляції під несучої одразу двома оптичними сигналами на довжинах хвиль 1310нм та 1550нм, що відповідають найменшим значенням ключових негативних факторів прояву на сигнал. У ВОЛЗ — дисперсії (розширенню сигналу) і оптичних втрат відповідно. Таке представлення сигналу дозволяє формувати універсальний оптичний сигнал на 2-х довжинах хвиль одразу, яких в результаті розповсюдження матиме найменший вплив на розширення по одній довжині хвилі (1310 нм — мінімальна дисперсія) та буде мінімально загасати при значній дальності (1550нм — мінімальні втрати). Але такий метод має певні обмеження і потребує спеціального фотоприймального блоку для відтворення сигналу в окремих спектральних каналах [5].

Запропонована авторами математична модель сигналу у [4, 5] має аналітичний вигляд та потребує уточнення, оскільки не враховує деталізованих основних параметрів оптичного сигналу при його розповсюдженні у ВОЛЗ.

### ОЦІНКА ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВПЛИВУ НА ОПТИЧНИЙ СИГНАЛ У ОВ У МЕТОДІ 2-Х ХВИЛЬОВОГО ПЕРЕДАВАННЯ

Оптимізація моделі формування інформаційного імпульсу у ВОЛЗ по методу 2-х хвильового кодування із врахуванням факторів впливу середовища буде базуватись на тому, що будь-який імпульс

сигналу характеризується амплітудними і часовими характеристиками і параметрами. Тому очевидно, що у ВОЛЗ на оптичний імпульс інформації сформований від двох джерел на довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  будуть впливати додаткові фактори:

- оптичні втрати  $a_{opt}$ , які зменшуватимуть інтенсивність вихідного імпульсу по відношенню до вхідного;
- дисперсія  $\tau_z$  та додаткові уширення  $\Delta t_z$ , які впливатиме на кінцеву ширину вихідного імпульсу;
- ефекти взаємодії фронтів і піків амплітуд оптичних потужностей сигналів, які представлені на двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ .

Враховуючи це на сигнал впливатиме дві складові — дисперсія та оптичні втрати. Механізми впливу дисперсії та оптичних втрат розглянуті в літературі [2, 3, та 6]. Причому, головне є те, що застосовуючи метод евристичного синтезу та дедукції із врахуванням фізичних принципів формування оптичних сигналів, дисперсія буде впливати на часові характеристики оптичного імпульсу, а втрати на амплітудні. Для цього необхідно розглянути ці складові детально.

Згідно [7], дисперсія у волоконно-оптичних лініях має три основні складові:

- міжмодова дисперсія  $\tau_{mod}$  (різниця швидкостей поширення окремих мод в ОВ);
- поляризаційна  $\tau_{pmd}$  (спрямовуючі властивості самого оптичного волокна);
- хроматична  $\tau_{chr}$  (вплив властивості матеріалу ОВ та заломлення різних довжини хвиль  $\lambda_j$  під різними кутами).

Остання складова — хроматичну дисперсію  $\tau_{chr}$  поділяється на матеріальну  $\tau_{mat}$  та хвильову  $\tau_w$  складові дисперсії в ОВ [7]. Тобто сукупний вплив хроматичної дисперсії визначається як:  $\tau_{chr} = \tau_{mat} + \tau_w$ .

Результуюча дисперсія в оптичних волокнах  $\tau$  має розмірність [пс/нм·км] і визначається із відомої формули:

$$\tau^2 = \tau_{mod}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{pmd}^2 = \tau_{mod}^2 + (\tau_{mat} + \tau_w)^2 + \tau_{pmd}^2$$

$$\tau = \sqrt{\tau_{mod}^2 + \tau_{pmd}^2 + \tau_{chr}^2} = \sqrt{\tau_{mod}^2 + \tau_{pmd}^2 + (\tau_{mat} + \tau_w)^2}. \quad (1)$$

Чим менше значення дисперсії, тим вужчим є інформаційний імпульс на виході каналу ВОЛЗ і більший потік інформації можна передавати по волокну. Смуга пропускання самого ОВ обмежується результуючою дисперсією  $\tau_z$  [7]:  $\Delta F = \frac{0,44}{\tau}$  і визначає гранично допустимі можливості символної швидкості передачі інформації [біт/с] самого оптичного волокна (без врахування оптоелектронних трактів передавачів та приймачів).

При двох хвильовому передаванні найбільший вплив і результуючий вклад в (1) становить міжмодова та хроматичні складові дисперсії, які виникають при різних групових швидкостях розповсюдження мод і розкиду довжин хвиль в деякому спектральному діапазоні. Якщо міжмодова складова проявляється переважно у багатомодовому волокні, то хроматична складова має місце при двоххвильовому передаванні у всіх типах волокон, завдяки значному спектральному розкиду. Слід зазначити, що для методу двох хвильового передавання і методу модуляції модового складу складові хроматичної та модової дисперсії також будуть проявлятися у одномодових волокнах. Порядок розрахунку міжмодової дисперсії в залежності від параметрів довжини хвилі  $\lambda$  та кількості мод  $N$ , а також профілю показника заломлення у різних волокнах наведений у [7].

Хроматична дисперсія, яка є сумою матеріальної  $\tau_{mat}$  та хвильову  $\tau_w$  складових згідно (1) проявляється у всіх типах ОВ. Матеріальна її складова  $\tau_{mat}$  обумовлена залежністю показника заломлення волокна  $M(\lambda)$  від довжини хвилі  $\lambda$  [6, 7]:  $\tau_{mat}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \times L \times \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} = \Delta\lambda \times L \times M(\lambda)$ .

Складова матеріальної дисперсії  $\tau_{mat}$  пояснюється оптичними властивостями матеріалу ОВ і не практично не виключним фактором впливу на оптичний сигнал.

Хвильова складова  $\tau_w$  дисперсії обумовлена залежністю коефіцієнта розповсюдження моди  $N(\lambda)$  від довжини хвилі  $\lambda$  і пропорційна відстані волоконної лінії  $L$  [6]:

$$\tau_w(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda \times L \times 2n_1^2 \Delta / c\lambda = \Delta\lambda \times L \times N(\lambda).$$

Відповідні залежності  $M(\lambda)$  та  $N(\lambda)$  у волоконній оптиці отримали назву питомих матеріальної та хвильової дисперсії (характеризують їх вплив на одиницю довжини ВОЛ), а параметр  $\Delta\lambda$  (нм)

характеризує спектральне розширення довжини хвилі джерела випромінювання внаслідок їх неідеальності та немонахроматичності. Результуюче значення коефіцієнта у літературі [7] визначено як  $D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$  — показник питомої хроматичної дисперсії. Останнє визначається для поширеного класу волокон по відомій емпіричній формулі Селмейра [7]:  $D(\lambda) = A + B\lambda^2 + C\lambda^{-2}$ , де  $A, B, C$  — коефіцієнти узгодження. Питома хроматична дисперсія розраховується за формулою [3 Цир]:

$D(\lambda) = \partial\tau / \partial\lambda = 2(B\lambda - C\lambda^{-3}) = S_0(\lambda - \lambda_0^4 / \lambda^3) / 4$ , де  $\lambda_0 = (C / B)^{1/4}$  — довжина хвилі нульової дисперсії,  $S_0 = 8B$  — нахил нульової дисперсії,  $\lambda$  — робоча довжина хвилі для якої визначається питома хроматична дисперсія.

Для перспективного типу оптичного волокна зі зміщеною дисперсією (NZDSF), яке використовується у сучасних ВОЛЗ в літературі [6] виведена емпірична формула оцінки часових затримок при питомій хроматичній дисперсії [6, 7]

$$\begin{aligned} \tau_{chr}(\lambda) &= A + B \times \lambda^2 + C \times \lambda^2 \ln \lambda; & \tau_{chr}(\lambda) &= D(\lambda) \times \Delta\lambda; \\ D(\lambda) &= \partial\tau / \partial\lambda = B + C + C \ln \lambda = \lambda_0 S_0 \ln(\lambda / \lambda_0), \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\lambda_0 = e^{-(1+B/C)}$ ,  $S_0 = C / \lambda_0$ ,  $\lambda$  — робоча довжина хвилі,  $\lambda_0$  — довжина хвилі нульової дисперсії,  $S_0$  — нахил нульової дисперсії;  $\Delta\lambda$  — ширина спектра випромінювання джерела

Для компенсації та зменшення хроматичної дисперсії в традиційних системах ВОЛЗ використовують джерел випромінювання із вищою монахроматичністю (меншим  $\Delta\lambda$ ), але в спеціалізованих каналах на основі запропонованих методів із використанням декількох довжин хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  та значним модовим складом ( $N \gg 2$ ), єдиним шляхом є використання довжин хвиль, наближених до довжини хвилі нульової дисперсії у поєднанні із волокном типу NZDSF (None Zero Dispersion Shifted Fiber, OB із ненульовою зміщеною дисперсією) (рис. 1).

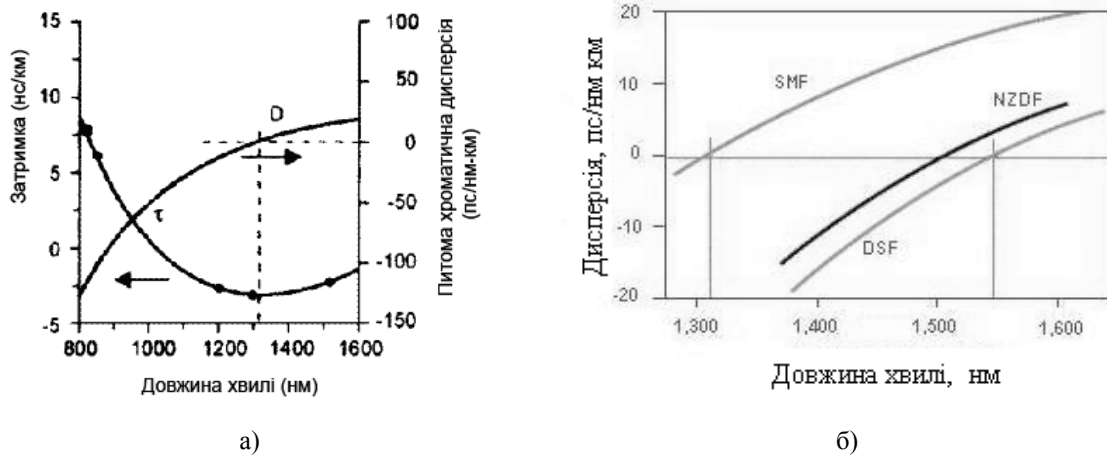


Рис. 1. Графічні залежності часових затримок при питомій хроматичній дисперсії для багатомодових волокон: а) взаємокомпенсація компенсація хроматичної та хвильової дисперсій у волокні NZDSF; б) порівняння дисперсії у волокнах типів SMF, DSF та NZDSF

Іншою важливою характеристикою і фактором впливу на оптичний сигнал оптичних волокон є оптичні втрати. Механізм впливу оптичних втрат на сигнал у ВОЛЗ проявляється у впливі на амплітуду сигналу.

Оптичні втрати [3, цир] у ВОЛ складаються із 3-х основних складових:

- втрати на поглинання  $\alpha_{abs}$ ;
- втрати на розсіювання  $\alpha_{sct}$ ;
- кабельні втрати  $\alpha_{rad}$ .

Сукупність перших двох складових (втрати на поглинання  $\alpha_{abs}$  та втрати на розсіювання  $\alpha_{sct}$ ) також називають ще власними втратами волокна  $\alpha_{int}$  ( $\alpha_{sct} = \alpha_{abs} + \alpha_{sct}$ ).

Повна величина оптичних втрат у ВОЛ визначається за формулою [7]:

$$\alpha = \alpha_{abs} + \alpha_{sct} + \alpha_{rad} = \alpha_{int} + \alpha_{rad} \quad [\text{дБ}] \quad (3)$$

Складова оптичних втрат на поглинання  $\alpha_{abs}$  обумовлена поглинанням оптичного випромінювання в кварцових ( $\text{SiO}_2$ ) та полімерних (POF) оптичних волокнах на домішках гідроксильних груп  $\text{OH}^-$ , та є невід'ємним компонентом. Як відомо [3, 6], оптичні втрати поглинання  $\alpha_{abs}$  складаються із власних втрат та втрат випромінювання на домішках. Власних втрат волокна зростають із наближенням спектру оптичного сигналу до ультрафіолетової області ( $\lambda \rightarrow 0,4\text{--}0,3\text{мкм}$ ), а також до інфрачервоної області ( $\lambda \rightarrow 1,65\text{--}1,7\text{мкм}$ ). При довжині хвилі випромінювання вище  $1,6\text{мкм}$  кварцове скло ВОЛ стає непрозорим через інфрачервоне поглинання [7] (рис. 2).

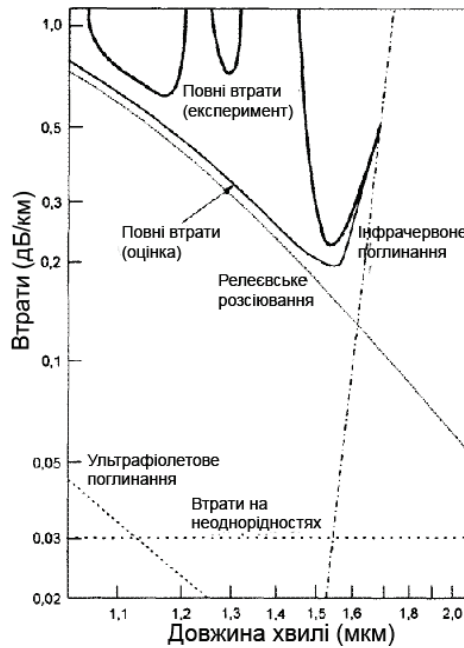


Рис. 2. Характеристики оптичних втрат у ВОЛ в області довжин хвиль  $1500\text{нм}$  та  $1310\text{нм}$  для волокон (виробництва Corning Optical Fiber та True Wave Inc. [7])

Окрім складової втрат на розсіювання  $\alpha_{sct}$  значний вплив становить складова оптичних втрат на розсіюванні Релея [6], яка виникає на мікронеоднорідностях матеріалу оптичного волокна ВОЛ, які носять мікроскопічний характер. Оптичне випромінювання при цьому розсіюється у різних напрямках від серцевини ОВ, що призводить до втрати частини корисного сигналу в оболонці волокна. Оптичні втрати при релеєвському розсіюванні залежать від довжини хвилі за законом  $\alpha_{sct} \sim \chi \lambda^{-4}$ , де  $\chi$  — коефіцієнт пропорційності та значно зростаються у коротких областях довжин хвиль (рис. 2).

Промислова довжина хвилі, на якій досягається найменші релеєвські втрати для кварцового волокна ( $\text{SiO}_2$ ), складає  $1550\text{нм}$  та становить головне вікно прозорості промислових оптичних волокон ІМ, призначених для застосування головним чином у волоконних магістралях із великими відстанями. На цій ж довжині хвилі досягається мінімальне дисперсія  $\tau$  кварцових волокон, що відповідає максимальній інформаційній пропускній здатності. У літературі [1, 7] наводиться загальний вигляд спектральної залежності власних втрат для сучасних одномодових та багатомодових волокон (рис. 2, 3).

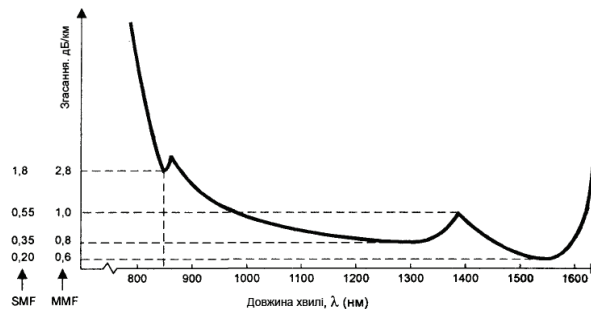


Рис. 3. Власні втрати в оптичному волокні [3]

Складова кабельних втрат  $\alpha_{rad}$  у формулі (3) обумовлена механічними та геометричними деформаціями оптичного волокна, а також різного роду вигинами, в результаті інсталяції волоконно-оптичних ліній та утворених додаткових механічних навантажень у волокнах. Ця ж складова оптичних втрат виникає також і при виготовленні ВОЛ і також є нівідемною постійною частиною всіх волоконно-оптичних ліній. В середньомовеличина кабельних втрат лежить у межах 0,15—0,35 дБ/км для кварцових одномодових волокон. В системах ВОЛ величина кабельних втрат враховується не більше 20 % ( $0,2 \alpha$ ) від повних оптичних втрат.

Оптичні втрати (загасання)  $a$  [дБ] у ВОЛ ІМ для вибраних вікон прозорості  $\lambda_1 = 1550$  нм та  $\lambda_2 = 1310$  нм повинні бути мінімальними ( $a \rightarrow a_{min}$ )  $a$  [дБ] для конкретно визначеного типу волокна визначається виходячи із вимірних вхідної  $P_{in}$  та вихідної  $P_{out}$  оптичних потужностей і описується логарифмічним законом [4, 6]:

$$a[dB] = -10 \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} = -10 \lg D, \quad (4)$$

де  $D$  — коефіцієнт загасання  $D = \frac{P_{out}}{P_{in}}$ . Очевидно, що  $D = 10^{-a/10}$ .

Тоді формула для вихідної потужності ВОЛЗ, виражена через коефіцієнт втрат запишеться у вигляді:

$$P_{out} = D \cdot P_{in} = P_{in} \cdot 10^{-a/10}, \quad (5)$$

Для визначення максимальної довжини передавання загасання у ВОЛ враховується максимально-допустима величина втрат на цій ділянці, тобто  $a_{max} = \frac{a}{L_{max}}$  [дБ/км]. У сучасних одномодових оптичних волокнах величина загасання становить 0,1 — 0,15 дБ/км — для кварцових ( $\text{SiO}_2$ ) [6] та 0,3—2,5 дБ/км — для полімерних (POF) [1, 6] волокон та 0,05—0,1 дБ/км для волокон на основі кварцу [7]. Для багатомодових ОВ показник оптичних втрат  $a$  більший і складає від одиниць до десятків і навіть сотень дБ/км [8]. Враховуючи відстань передавання із допустимим відсотком втрат формула для потужності (4) із врахуванням  $L_{max}$  переписується у вигляді:  $P_{out} = D \cdot P_{in} = P_{in} \cdot 10^{-a/10 \cdot L_{max}}$ .

Виходячи із максимального показника оптичних втрат  $a_{max}$  визначається гранична дальність  $L_{max}$  виходячи із умов втрат визначеного відсотка оптичної потужності на одиницю довжини  $dL$ ,

$$\frac{dP}{dL} = -10 \int a_{max} P(L) dl, \quad (6)$$

де  $S$  — ділянка передачі. Враховуючи, що повна потужність  $P = \int dA$  спадає логарифмічно у напрямку  $L$ , згідно закону Бугера-Ламберта-Бера [6] як:  $P_{out} = P_{in} 10^{-a_{max} L}$ , граничну дальність передачі по ВОЛЗ із допустимими оптичними втратами  $a_{max}$ , які припадають на відстань  $L_{max}$ , визначається у вигляді:

$$L_{max} = -\frac{10}{a_{max}} \lg \frac{P_{out}}{P_{in}} = -\frac{10}{a_{max}} D, \text{ [км]} \quad (7)$$

Відповідно для методу двохвильового кодування, в якому сигнал передається одразу на двох довжинах хвиль  $\lambda_1 = 1550$  нм та  $\lambda_2 = 1310$  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:

$$a_{S\lambda_1\lambda_2}[dB] = \frac{-10 \left[ \lg \frac{P_{out\lambda_1}}{P_{in\lambda_1}} + \lg \frac{P_{out\lambda_2}}{P_{in\lambda_2}} \right]}{2} = -5 \lg \left[ \lg \frac{P_{out\lambda_1}}{P_{in\lambda_1}} + \lg \frac{P_{out\lambda_2}}{P_{in\lambda_2}} \right], \quad (8)$$

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  $\lambda_2$ ;

## ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ У ВОЛЗ ІЗ ВРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ДИСПЕРСІЇ ТА ОПТИЧНИХ ВТРАТ

Для одного спектрального каналу ВОЛЗ із довжиною хвилі  $\lambda_i$ , загальний умовний вигляд сигналу, враховуючи часові та хвильові показники [4, 5] та вказані фактори складає :

$$S(t, \lambda_i) = A[a_j \cdot A_m(t - j\Delta T)] + N_{IP}(t, \lambda_i), \quad (9)$$

Першу проміжну формулу математичної моделі сигналу можна отримати, враховуючи формулу одиничного сигналу (9) із викладками про фактори впливу і їх механізми, застосувавши метод евристичного синтезу і логічні твердження про фізичний зміст процесів у ВОЛЗ (враховуючи теорію ВОЛЗ):

$$S_{in}(t, \lambda_i) = A[a_j \cdot A_m \sin(\omega t_i - j\Delta T)] = A[a_j \cdot A_m \sin(2\pi \nu t_i - j\Delta T)]; \quad (10)$$

$$S_{out}(t, \lambda_i) = D(\lambda_i) \cdot S_{in}(t, \lambda_i) = A[a_j \cdot a_{kT} \cdot D(\lambda_i) \cdot a_d \cdot A_m \sin(\omega t_i - j\{\Delta T + \tau + \Delta t_{zi}\})] + N_{IMP}(t, \lambda_i),$$

де  $\lambda_i$ , — довжина хвилі;  $a_j$  — коефіцієнт логічного сигналу, рівний 0 при передаванні логічного «0» та 1 при передаванні логічної «1»;  $A_m$  — амплітуда оптичного сигналу, що передається;  $\omega$  — циклічна частота;  $\nu$  — частота сигналу;  $t_i$  — часова змінна;  $j$  — комплексна змінна;  $\Delta T$  — часовий параметр періоду імпульсу;  $D(\lambda)$  — спектральний коефіцієнт загасання, який враховує залежність загасання для кожної із довжин хвиль;  $a_d$  — коефіцієнт загасання, який враховує повні оптичні втрати, (для чисельних розрахунків  $a_d = D$ );  $a_{kT}$  — коефіцієнт. Що враховує вплив температури і визначається таблично для різних ОВ(також може бути врахований, як поправка компенсації до коефіцієнта оптичних втрат  $a_d$ , тоді  $a_{kT}$  приймається рівним 1);  $\tau$  — повна дисперсія оптоволока;  $\Delta t_{zi}$  — додатковий часовий зсув інформаційного імпульсу. Обумовлений розбіжностями між спектральними складовими та можливими нелінійними впливами в певних умовах;  $N_{IMP}(t, \lambda)$  рівень джерела адитивної завади в момент часу передавання  $t$ , який представляє собою вузькосмугові квазігармонійні коливання шумів із випадковими параметрами.

Аналогічно залежності сигналу (10), залежність завад  $N_{IMP}(t, \lambda_j)$  (2) у [5] також перепишеться із впливом дисперсійних характеристик і оптичних втрат:

$$N(\lambda, i_n, t) = \frac{D(\lambda_i) \cdot a_d}{\sigma_n(t) \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2(t)}\right], \quad (11)$$

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

Тоді із врахуванням формули сигналу (10) та шуму (11) повна залежність для сигналу матиме вигляд :

$$S_{out}(t, \lambda_i) = D(\lambda_i) \cdot S_{in}(t, \lambda_i) = A[a_j \cdot D(\lambda_i) \cdot a_d \cdot a_{kT} \cdot A_m \sin(\omega t_i - j\{\Delta T + \tau + \Delta t_{zi}\})] + \frac{D(\lambda_i) \cdot a_d}{\sigma_n(t) \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2(t)}\right]. \quad (12)$$

Очевидно, що при реалізації 2-х хвильової передачі інформації узагальнений сигнал  $S(t, \lambda_1, \lambda_2)$  (3), представлений на двох довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  у [4] представлятиметься логічною суперпозицією амплітуд різних довжин хвиль  $A_{m\lambda_1}$  та  $A_{m\lambda_2}$ , так, щоб забезпечувались умови стабільності передачі імпульсів та уникнення ситуацій пропаданню сигналу «лог 1». Логічна суперпозиція сигналів амплітуд може бути подана однією із основних логічних операцій — функцій (булевих функцій) — таблиця 1.

При аналізі таблиці 1, спостерігаємо, що найвищу стабільність при втраті одного (будь-якого сигналу або біта) на довжинах хвиль  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  має операція логічне «АБО» — OR. При усіх комбінаціях крми першої, коли всі логічні біти рівні 0 на виході присутній сигнал «лог 1». Тому саме логічне «АБО» найбільш придатне у використанні у математичній моделі сигналу двох хвильової передачі інформації, завдяки найбільшій гарантованій стабільності передаванні цифрової інформації.

Таблиця 1.

**Базові логічні операції із двома операндами та їх таблиці істинності і відповідно вих. функції для формування двох хвильового сигналу**

Логічне «І» (AND: &)

$\lambda_1$ (біт 1)	$\lambda_2$ (біт 2)	Сумарний сигнал $\lambda_1$ (біт 1) & $\lambda_2$ (біт 2)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Логічне «АБО» (OR: V |)

$\lambda_1$ (біт 1)	$\lambda_2$ (біт 2)	Сумарний сигнал $\lambda_1$ (біт 1)   $\lambda_2$ (біт 2)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Логічне «виключаючи АБО» (XOR: ^~)

$\lambda_1$ (біт 1)	$\lambda_2$ (біт 2)	Сумарний сигнал $\lambda_1$ (біт 1) ^ $\lambda_2$ (біт 2)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Результуючий вихідний сигнал амплітуди при здійсненні двох хвильової цифрової передачі даних складається із суперпозиції амплітуд кожного із сигналів на довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  та матиме вигляд:

$$A_m = [D(\lambda_1) \cdot A_{m\lambda_1}] \cup [D(\lambda_2) \cdot A_{m\lambda_2}] \quad (13)$$

Таблиця істинності такої логічної суперпозиції амплітуд визначається результатом операції лог. АБО (табл. 1, 2-га колонка). При будь-яких комбінаціях, окрім обох нульових сигналів на виході буде завжди «лог. 1», що підвищує загальну стійкість до втрат такого сигналу. В такому випадку. Враховуючи останній, 3-й фактор впливу — фактор амплітуди, кінцева математична модель двох хвильової передачі сигналів у ВОЛЗ може бути записана із врахуванням (12) та (13):

$$S_{out}(t, \lambda_i) = A \left( a_j \cdot a_d \cdot a_{kT} \cdot [D(\lambda_1) \cdot A_{m\lambda_1}] \cup [D(\lambda_2) \cdot A_{m\lambda_2}] \cdot \sin(\omega t_i - j \{ \Delta T + \tau + \Delta t_{zi} \}) \right) + \frac{D(\lambda_i) \cdot a_d}{\sigma_n(t) \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2(t)} \right] \quad (14)$$

Формула (14) дозволяє формувати і параметрично описувати універсальний оптичний сигнал на двох довжинах хвиль, який враховує всі фактори впливу у процесі розповсюдження у волоконно-

оптичному середовищі з метою підвищення стабільності та тривалості траєкторії розповсюдження оптичного імпульсу через ОВ. На практиці реалізація методу дозволяє отримати імпульс, результуюча тривалість, якого є дещо більшою за тривалість кожного із одиничних імпульсів на одній довжині хвилі. Але враховуючи переваги по стабільності, збільшення траєкторії та зменшення рівня завад, наряду із збільшенням нагромадження апаратних засобів цей недолік нівелюється перевагами. В деяких окремих умовах, зокрема при перевищенні сумарної потужності універсального імпульсу для кожної із сигналів на довжинах хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  порогу нелінійних явищ у ВОЛ (тобто  $P_{sum \lambda_1 \lambda_2} \gg P_{N.L.}$ ) наряду із іншими нелінійними явищами у ВОЛЗ виникатиме нелінійна дисперсія, що призводитиме до розширення імпульсів за рахунок збільшення параметра  $\Delta t_{zi}$ . Тому вкрай важливо утримувати оптичну потужність (сумарну для  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ ) у допустимих межах лінійності оптичного волокна:  $P_{N.L.} > P_{sum \lambda_1 \lambda_2} > 0$ . А це є завжди компромісом між допустимою максимальною дальністю передачі інформації та її якістю. Для прикладу для одномодових волокон NZDSF типу EIA значення оптичної потужностей знаходяться на рівні 1—10 мВт для лінійного діапазону при дальності до 70 км.

Загальна форма універсального імпульсу, сформованого за залежністю сигналу (5) представлена на рис. 4.

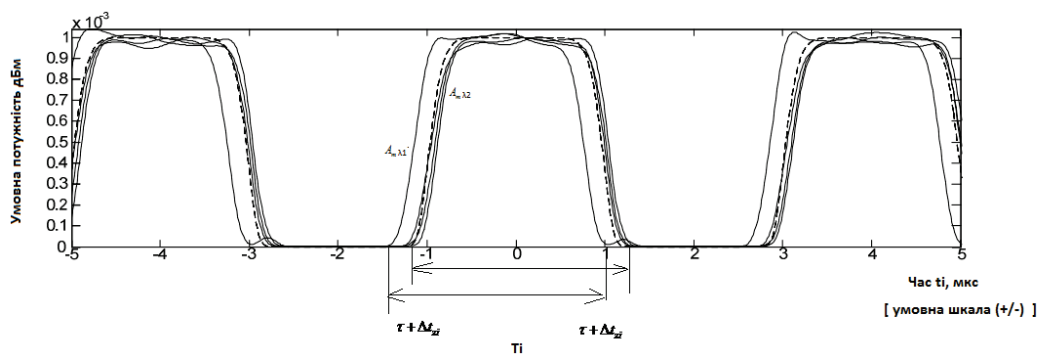


Рис. 4. Форма імпульсів і зсув обумовлений дисперсією і іншими факторами при двоххвильовій передачі інформації

Враховуючи специфіку передачі імпульсів на двох довжинах хвиль. Найбільший вплив на часові характеристики зсуву складе саме модова поляризаційна  $\tau_{pmd}$  і хроматична складові дисперсії  $\tau_{chr}$  — якщо у ВОЛЗ використовується одномодове волокно NZDSF. Якщо використовується багатомодове оптоволокно то до цих компонент додається і вплив модового компонента  $\tau_{mod}$ . Це показано на рисунку 5.

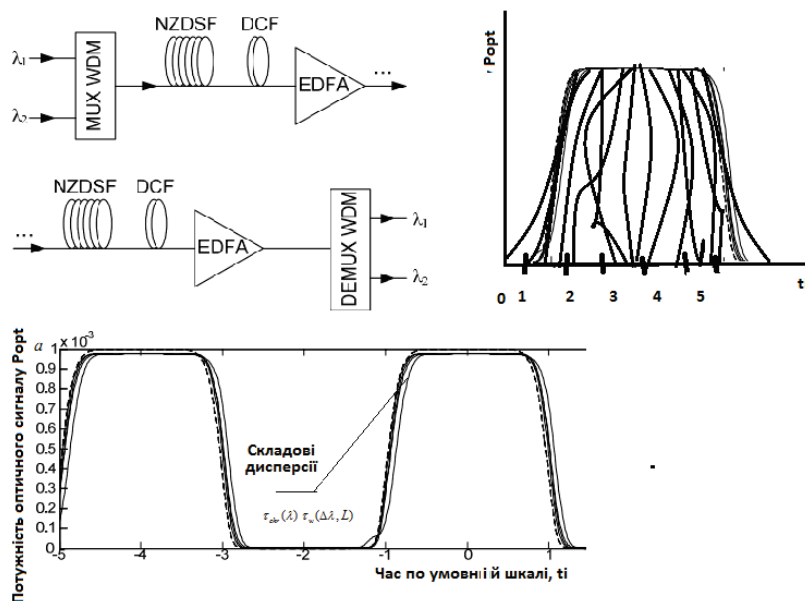


Рис. 5. Прояв складових модової поляризаційної  $\tau_{pmd}$  і хроматичної  $\tau_{chr}$  дисперсії у ВОЛЗ на базі одномодового оптоволокна NZDSF



Також на практиці рівень цих складових впливає і на значення адитивної завади  $N(\lambda, p_{n\lambda j}, t)$  (вузькосмугові квазігармонійні коливання шумів) в той самий момент часу передавання  $t_i$  оптичного імпульсу, який представлений нормальним розподілом ймовірності.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОХОДЖЕННЯ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ У ВОЛЗ ПО МЕТОДУ ДВОХ ХВИЛЬОВОГО КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ

Для вирішення задачі моделювання оптичного сигналу за методом 2-х хвильового кодування по формулі (14) в середовищі Python був розроблений програмний модуль формування і дослідження 2-х хвильового сигналу. даний модуль включає формування одного сигналу у ВОЛЗ на базі одномодового оптоволокна типу SMF 9/125 NZDSF. Даний програмний модуль формує математичну модель сигналу у ВОЛЗ.

Для процесу моделювання були обрані такі параметри оптичного імпульсу:

Волокно одномодове – SMF 8/125 NZDSF  $\tau_z = 0.15 \text{ пс} \cdot \text{км/км}$

Довжини хвиль:  $\lambda_1 = 1350$ ;  $\lambda_2 = 1550$  [нм]

$L = 1$  км

Параменти сигналу: коеф. ампл. = 0,2

коеф. форми = 0,4

Тип форми сигналу: трапецеїдальна

Втрати : 0,25 Дб/ км (для 1550 нм); 0,4 Дб/ км (для 1350 нм);

Оптична потужність сигналів: однакова, 10мВт

З урахуванням того, що оптичне волокно буде оптимізоване для роботи під довжини хвиль 1550 нм та 1350 нм, були вибрані відповідні значення хроматичної дисперсії 0,5 пс та 0,11 пс для волокна типу SMF 9/125 NZDSF. Також, для спрощення візуального сприйняття основної ідеї двох хвильової передачі інформації, значення потужності для різних довжин хвиль були вибрані однаковими  $P_{\lambda_1} = P_{\lambda_2} = 10$  мВт з метою роботи оптичного волокна в лінійному режимі.

Опускаючи деталі реалізації програми відзначимо три основних пункти побудови математичної моделі. Першим пунктом програмного модуля є оголошення змінних та їх розрахунок (рис. 6):

```
n=1000

T1=655*10**-4 #0.1ps
T2=775*10**-4

Pin=10**-2
P1out=Pin*np.exp(-0.4)
P2out=Pin*np.exp(-0.25)

t=np.linspace(0, 1, n)#0.1ps
t1=np.linspace(0, 5, n)#0.5ps

T1=np.linspace(T1,0.11,n)
T2=np.linspace(T2,0.5,n)

P1=np.linspace(Pin,P1out,n)
P2=np.linspace(Pin,P2out,n)
```

Рис. 6. Блок оголошення змінних

Наступним пунктом математичної моделі є створення моделі цифрового сигналу, а саме трапецеїдальних імпульсів на основі оголошених даних у першому пункті (рис. 7):

```
sign = lambda i: (((i-1) % 4)//2 - 0.5) * -2

function1 = lambda i,t: np.sin((2*i-1)*t*np.pi/(T1))/((2*i-1)**2) * sign(i)
f1=8*np.sqrt(2)/np.pi**2*sum(function1(i,t) for i in range(1,100)) +1

function2 = lambda i,t1: np.sin((2*i-1)*t1*np.pi/(T2))/((2*i-1)**2) * sign(i)
f2=8*np.sqrt(2)/np.pi**2*sum(function2(i,t1) for i in range(1,100)) +1
```

Рис. 7. Блок створення трапецеїдальних імпульсів

Останнім пунктом є виведення результатів (рис. 8):

```
fig,(ax1, ax2) = plt.subplots(2, sharex=True, sharey=True)

ax1.plot(t, A1*f1, color='r')
ax1.set_title('wavelength 1350 [nm]')
ax1.set_xlabel('t, 0.1 [ps]')
ax1.set_ylabel('P, [mW]')
ax1.grid(True)

ax2.plot(t1, A2*f2,color='b')
ax2.set_title('wavelength 1550 [nm]')
ax2.set_xlabel('t, 0.5 [ps]')
ax2.set_ylabel('P, [mW]')
ax2.grid(True)

fig.tight_layout()
plt.ylim(-0.02,0.025)
plt.xlim(0,1)
plt.show()
```

Рис. 8. Блок виведення результатів

Отримані результати представляють собою апроксимацію поширення сигналу на проміжку 1 км з часовим вікном 0,1 пс та 0,5 пс (рис. 9):

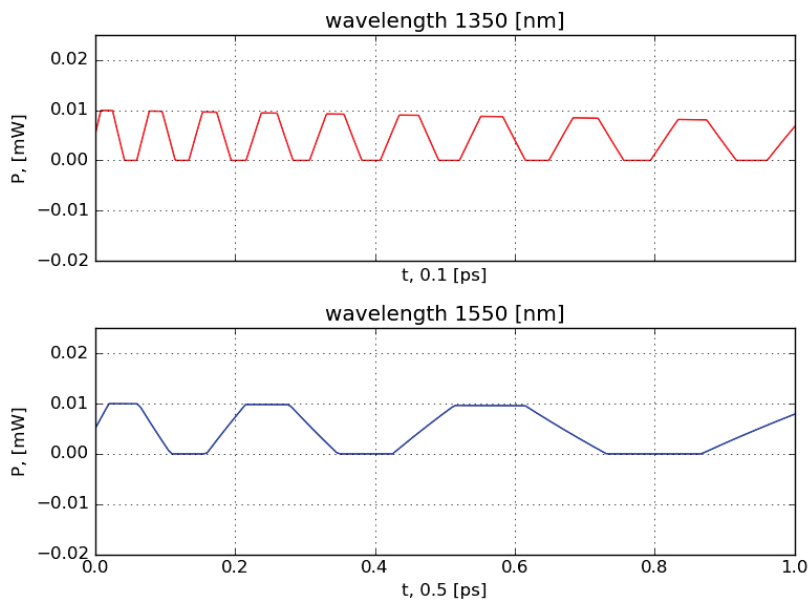


Рис. 9. Результат побудови математичної моделі двох хвильової передачі інформації апроксимованої на 1 км у часовому вікні 1 пс

Як видно із графіку (рис. 9, знизу), поширення сигналу на довжині хвилі 1550 нм має більшу хроматичну дисперсію та менше загасання, що підтримує сигнал. І навпаки (рис. 9, зверху), на довжині хвилі 1350 нм має меншу хроматичну дисперсію, що відповідає збереженню часових параметрів сигналу і його тривалості, але разом з тим — має більше загасання.

Для того, щоб побудувати результуючий сигнал у волокні, спростимо модель до звичайних прямокутних імпульсів, для цього розглянемо вихідний сигнал, який пройшов 1 км шляху:

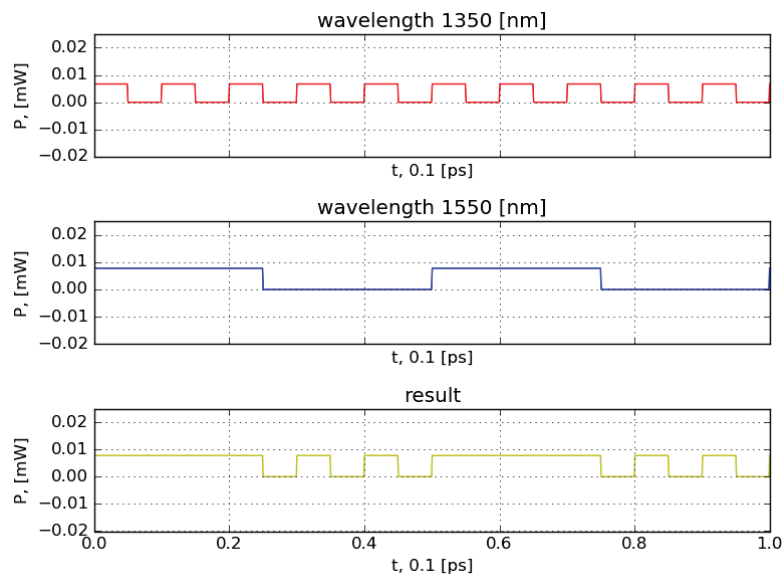


Рис. 10. Результируючий сигнал

З графіків добре видно, як сигнали на різних довжинах хвиль взаємокомпенсують дисперсійні втрати часових параметрів та амплітудних значень один одного. Це робить двох хвильову передачу інформації менш чутливою до сторонніх шумів та більш стійкою до можливих інформаційних втрат у цілому.

### ВИСНОВКИ

В роботі проаналізовані проблеми існуючої математичної моделі і методу 2-х хвильового передавання оптичних сигналів в ОВ, на основі чого було отримано вдосконалений метод і модель передавання оптичного сигналу на двох довжинах хвиль. Модифікована модель і метод відрізняється від відомої тим, що враховує ключові параметри волоконно-оптичного середовища — оптичні втрати і дисперсію сигналу, що дозволяє максимально компенсувати їх сформувати такий сигнал, що може пройти максимальну відстань при мінімальних часових спотвореннях втратах в залежності від кожного конкретного волокна, підбираючи довжину хвилі. На основі вдосконаленого методу і математичної моделі були отримані дані моделювання в розробленому програмному модулі на мові програмування Python і отримані ключові параметри оптичного сигналу в швидкісному (магістральному) одномодовому оптоволокну типу SMF 9/125 NZDSF. Проведене комп'ютерне моделювання сигналів на базі розробленого програмного середовища дозволило отримати графіки сигналу на відстані 1 км. Отримані результати показали відносно високу ефективність вдосконаленого методу 2-х хвильової передачі інформації при передачі сигналу через оптичні волокна та відносно високу стійкість сигналу. Наведені ключові показники оцінки ефективності процесу передачі інформації в ОВ за допомогою інноваційного методу.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Убайдулаев Р. Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р. Р. Убайдуллаев. — М. : Эко-Тренз, 1998. — 268 с.
2. Антонов В. М. Сучасні комп'ютерні мережі / В. М. Антонов. — Київ, «МК-Прес», 2005. — 478 с.
3. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. — СПб : Издательство «Питер», 1999. — 672 с.
4. Кожем'яко В. П. Метод та структури двоххвильової передачі інформаційних імпульсів у волоконно-оптичних каналах сучасних інформаційних мереж / В. П. Кожем'яко, В. І. Маліновський, Я. І. Ярославський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — № 1(27). — 2014. — С. 210—225.
5. Кожем'яко В. П. Метод та структура модової маніпуляції сигналів у волоконно-оптичних каналах інформаційних мереж / В. П. Кожем'яко, В. І. Маліновський, Я. І. Ярославський // Вісник Хмельницького національного університету. — № 6. — 2014. — с. 118—126.

6. А. Снайдер, Дж. Лав. Теорія оптичних волоконних систем ; [пер. с англ. под ред. Е. М. Дианова, В. В. Шевченко]. — М. : Радио и связь, 1987. — 655 с.
7. Лисенко Г. Л. Волоконна та інтегральна оптика. Ч. 1. ; [навч. посіб.] / Г. Л. Лисенко. — Вінниця : ВДТУ, 1998. — 127 с.
8. Маліновський В. І. Принципи побудови та структурна організація каналів для повністю оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж / В. П. Кожем'яко, В. І. Маліновський // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2008. — № 1. — С. 95—101.

#### SPUSOK LITERATURU

1. Ubajdylaev R. R. Volokonno-opticheskie seti [Text] / R. R. Ubajdylaev. — M. : Eko-Trenz, 1998. — 268 s.
2. Antonov V. M. Suchasni komputerni merezhi / V. M. Antonov. — Kuiv, «MK-Press», 2005. — 478 s.
3. Olifer V. G. Kom'juterni merezhi. Principu, tehnologii, protokolu / V. G. Olifer, N. A. Olifer. — SPb : Izdatelstvo «Piter», 1999. — 672 s.
4. Kozhem'jako V. P. Method ta struckyru dvochhvulevoi peredachi optuchnykh informacijnykh impulsiv y volokonnooptuchnykh canalah ychasnykh informacijnykh merezh / V. P. Kozhem'jako, V. I. Malinovskiy, Ja. I. Jaroslavskiy // Optuko-electronni informacijno-energetichni tehnologii. — № 1(27). — 2014. — С. 210—225.
5. Kozhem'jako V. P. Method ta struckyru modovoi manipuljacii signaliv y volokonno-optuchnykh canalah ychasnykh informacijnykh merezh / V. P. Kozhem'jako, V. I. Malinovskiy, Ja. I. Jaroslavskiy // Visnik Hmelnutckogo natsionalnogo universitetu . — № 6. — 2014. — S. 118—126.
6. A. Snaider, Dj. Lav. Teorija opticheskikh volnovodov; [per. s angl. pod red. E. M. Dianova, V. V. Shevchenka]. — M. : Radio i sv'jaz', 1987. — 655 s.
7. Lusenka G. L. Volokonna ta integral'na optuka. Ch. 1. ; [navc. Posibn.] / G. L. Lusenka. — Vinnitsa: VDTU, 1998. — 127 s.
8. Malinovskiy V. I. Pruncup pobudovu ta strukturna organizacija canaliv dlja povnistu optuchnykh geoinformatciino-energetichnykh marezh / V. P. Kozhem'jako, V. I. Malinovskiy // Visnik Vinnitskogo natsionalnogo universitetu. — 2008. — № 1. — S. 95—101.

Надійшла до редакції 10.12.2015 р.

**КОЖЕМ'ЯКО ВОЛОДИМИР ПРОКОПОВИЧ** — засл. діяч науки і техніки України, академік АІНУ, доктор технічних наук, проф., завідувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**МАЛІНОВСЬКИЙ ВАДИМ ІГОРЕВИЧ** — кандидат технічних наук, доцент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**ЯРОСЛАВЬКИЙ ЯРОСЛАВ ІВАНОВИЧ** — здобувач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

**КОЛЕСНИК ГЕННАДІЙ СЕРГІЙОВИЧ** — студент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.