

УДК 681.7.068

В.І. МАЛІНОВСЬКИЙ, В.П. КОЖЕМ'ЯКО

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ КАНАЛИ ДЛЯ ОБ'ЄДНАНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЖИВЛЕННЯ

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

Анотація. В роботі розглянуто перспективи використання, метод побудови, математичну модель та структуру волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних інтерфейс-каналів (ВОІЕК) з орієнтацією на спеціалізоване використання в задачах сумісної передачі інформації та енергії за допомогою світла.

Аннотация. В работе рассмотрены перспективы использования, метод организации, математическую модель и структуру волоконно-оптических информационно-энергетических интерфейс-каналов (ВОИЭК) с ориентацией на специализированное использование в задачах объединенной передачи информации и энергии питания с помощью света.

Abstract. In this work the perspective of use, method of organization, mathematical model and structure of fiber-optical information-power interfaces-channels (FOIPIC) with orientation to specialized use in tasks of the incorporated transfer of the information and energy by light are resulted.

Ключові слова: волоконно-оптичний, інформаційно-енергетичний, інтерфейс, спектральний канал, мультиплексування, оптичне волокно.

ВСТУП

В сучасній техніці існує ряд задач, які вимагають об'єднаної передачі по каналу зв'язку інформації та енергії живлення до кінцевого дистанційно-розміщеного обладнання. В більшості випадків це здійснюється каналами, середовищем передачі в яких є металеві провідники. Але в деяких задачах необхідним є забезпеченням високої швидкості передачі даних, нейтральності каналу по відношенню до оточуючого середовища, гальванічної розв'язки з надвисоким опором ізоляції та виключенням електростатичних наведень на зовнішнє середовище. До числа таких задач належать:

- передача інформації наряду з енергоживленням до біомедичних зондів, які вводяться внутрішньо в організм людини при операціях на внутрішніх органах (наприклад, на серці);
- передача інформації та енергії до- та від- різноманітних сенсорів у вибухо-небезпечних місцях та приміщеннях;
- дистанційне передавання інформаційно-енергетичної складової до сенсорів у ділянках з високим рівнем електричного потенціалу (кола з високою та надвисокою напругою, наприклад у ЛЕП);
- організація локальної високо-конфіденційної передачі інформації наряду з енергетичним живленням та забезпечення високої інформаційної захищеності каналу у системах захисту інформації та ін.

Для вирішення цих задач, в якості носія даних та енергії може ефективно використовуватись оптичне випромінювання у волоконно-оптичному середовищі, завдяки своїй нейтральності та „безінерційності” до зовнішніх електромагнітних полів забезпечує передачу оптичних імпульсів з високою символічною швидкістю, повну ізоляцію та нейтральність каналу як по інформаційній, так і по енергетичній складовим.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ІНТЕРФЕЙС-КАНАЛИ

У роботах [2-5] було запропоновано використання волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних інтерфейс-каналів (ВОІЕК), для об'єднаного передавання інформації та енергії до віддаленого електронного та оптоелектронного обладнання.

Створення компонентних волоконно-оптичних інтерфейсів одночасної передачі інформаційних даних та енергетичного живлення до кінцевого обладнання по оптичному волокну є актуальним з практичної і теоретичної точки зору завданням.

Останні дослідження [4, 5] показали, що оптичне волокно може використовуватись не тільки як ефективне середовище передачі інформації, але й як достатньо ефективне середовище і матеріал для передачі енергії живлення оптичним потоком високої інтенсивності. Причому, для задач передавання енергетичних потоків, оптичне волокно (ОВ) обирається на основі спеціалізованого багатомодового ОВ з

великим діаметром серцевини ($\varnothing 200-1000\text{мкм}$).

Задачі паралельного передавання інформації та енергії живлення вимагають високої гнучкості організації апаратних засобів і виникають при проектуванні обчислювальних та вимірювальних систем, в яких потрібен високий ступінь автономності у поєднанні з нейтральністю каналів. Існуючі засоби передавання мають недостатні значення цих показників. Підвищення швидкості передачі наряду з забезпеченням автономності і нейтральності каналів може бути досягнуто розпаралелюванням процесу передавання інформації та енергетичного живлення на основі волоконно-оптичних методів, які добре зарекомендували себе при рішенні завдань суто інформаційного характеру у традиційних ВОЛЗ.

Волоконно-оптичні інформаційно-енергетичні інтерфейс-канали [2, 4, 5] дозволяють передавати інформаційні та енергетичні потоки в одному оптичному волокні шляхом оптичного хвильового мультиплексування WDM (Wave Division Multiplexing) їх на різних довжинах хвиль. Застосування ВОІЕК [5] в якості засобів передачі даних в обчислювальній та інформаційно-вимірювальній техніці дозволяє організувати об'єднану паралельну передачу енергії та високошвидкісний інформаційний обмін між обладнанням, яке в силу специфіки використання, повинне бути електрично-ізольованим від джерела.

СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ІНТЕРФЕЙС-КАНАЛІВ

Спосіб оптичного хвильового мультиплексування WDM [3, 4] передбачає розміщення каналів на визначених довжинах хвиль світла λ_i в одному оптичному волокні. Застосування способу WDM у ВОІЕК відрізняється від його застосування у традиційних ВОЛЗ, зокрема у ВОІЕК набагато більшими є значення інтенсивності випромінювання I_{opt} , енергетичних спектральних каналів. На рис.1 показано розміщення у оптоволокні спектральних каналів ВОІЕК за допомогою WDM-уцільнення.

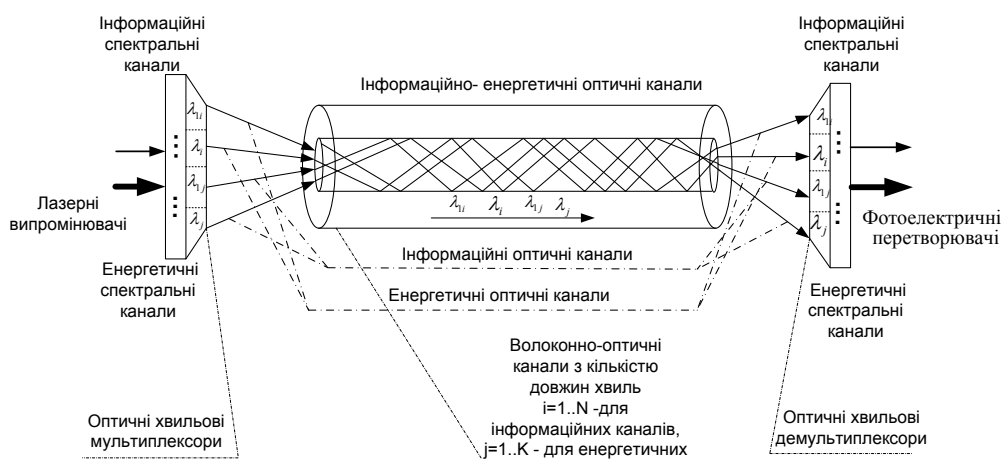


Рис. 1. Розміщення в оптичному волокні спектрів у волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналах згідно методу побудови ВОІЕК

У ВОІЕК (рис. 1) передбачено щонайменше два типи каналів з довжинами хвиль $\lambda_i, i=1..N$ – інформаційних та $\lambda_j, j=1..K$, – енергетичних оптичних спектральних каналів. Сумарна кількість спектрів системи каналів рівна:

$$S_{Sum} = \sum_{i=1}^i \lambda_i + \sum_{j=1}^j \lambda_j$$

Світлова потужність в оптичних енергетичних каналах λ_j , набагато більша ніж потужність в інформаційних каналах λ_i , тобто $P_{\lambda_j} \gg P_{\lambda_i}$. Структуру ВОІЕК згідно методу побудови показано на рис. 2.

Завдяки використанню оптичних мультиплексорів та демультіплексорів відбувається мультиплексування та демультіплексування довжин хвиль оптичних каналів і формування інформаційно-енергетичних світлових потоків у одному волокні (рис. 2). На вході енергетичного каналу одиначної ланки відбувається електрооптичне енергетичне перетворення, а на виході – навпаки, енергетичне фотоелектричне перетворення. Керування прийомом і передачею відбувається за допомогою відповідних блоків керування у передавачі і приймачі.

Генерація і прийом оптичних потоків високої густини забезпечується енергетичним випромінювачем та енергетичним фотоприймачем. Модуляція та демодуляція світлового потоку для інформаційних каналів забезпечується відповідно інформаційними випромінювачем і фотоприймачем. Вхідна і вихідна оптичні системи відіграють роль узгоджувачів випромінювальних і приймальних блоків з оптичним волокном. Використання оптичних підсилювачів дозволяє підвищити дальність зв'язку.

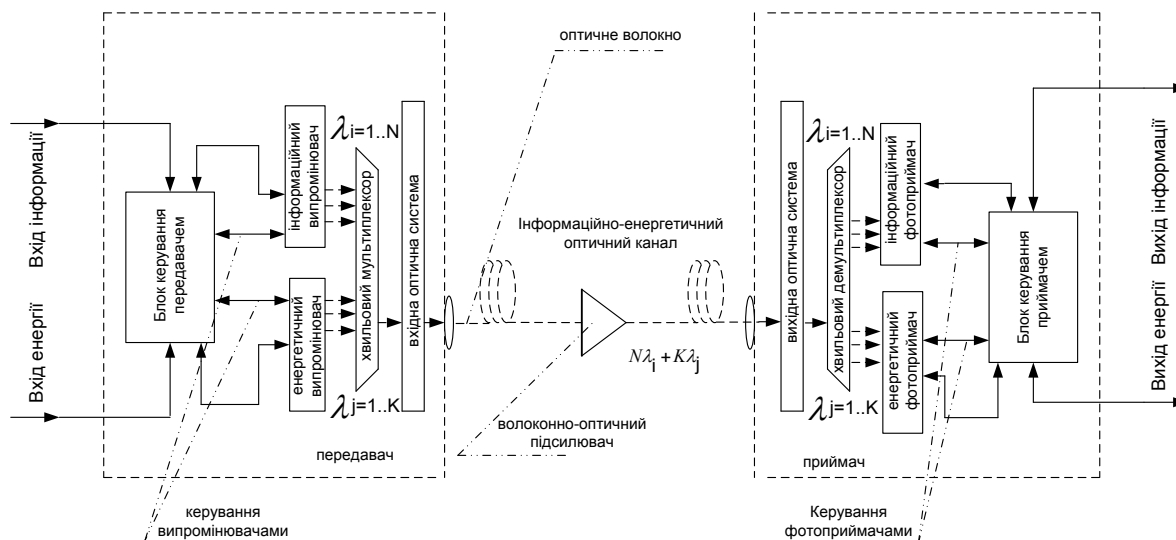


Рис. 2. Структура ВОІЕІК з використанням оптичного хвильового WDM – мультиплексування

Структура (рис. 2) є більш універсальною у порівнянні з традиційними ВОЛЗ, оскільки передбачає використання меншої кількості ОВ та спільну передачу інформаційно-енергетичних світлових потоків у одному оптоволокну. Основною проблемою при створенні ВОІЕІК є малий відсоток коефіцієнта корисної дії (ККД) електро-оптичного та оптико-електричного перетворень на вході та виході. Коефіцієнт ефективності передачі енергії живлення оптичним потоком (енергетичний ККД) складає:

$$\eta_{IE} = \prod_i k_i \cdot 100\% = (k_{laser} \cdot k_{fiber} \cdot k_{FEP}) \cdot 100\% = k_{IE} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де k_{laser} , k_{fiber} , k_{FEP} – коефіцієнти корисної дії лазерного джерела світла, оптичного волокна і енергетичного фотоелектричного перетворювача (ФЕП); k_{IE} – загальний коефіцієнт ефективності передавання енергії $k_{IE} = k_{laser} \cdot k_{fiber} \cdot k_{FEP}$, який знаходиться в межах 0.15– 0.42.

Потужність енергетичного каналу на виході ВОІЕІК визначається енергетичним ККД (1) як:

$$P_{out} = k_{IE} \cdot P_{in}; \quad P_{outM} = M \cdot k_{IE} \cdot P_{in}, \quad (2)$$

де P_{in} – вхідна потужність енергетичного каналу системи; M – кількість енергетичних каналів в системі.

Вирішення проблем підвищення ККД можливе шляхом застосування сучасних потужних лазерів, енергетичних ефективних фотоперетворювачів, оптики з малим відсотком втрат та спеціалізованих оптичних волокон [4]. В якості енергетичних лазерів доцільно використовувати волоконні лазери з високою ефективністю ($k_{laser} \geq 45-65\%$). Для енергетичних фотоприймачів може застосовуватись технологія компактних ФЕП на основі монокремнію ($k_{fiber} \geq 25-45\%$).

Повна вихідна енергія оптичного потоку, яка відтворюється на приймальному кінці фотоелектричним перетворювачем (ФЕП) визначається як:

$$E_{out}(t, \tau) = k_{IE} \cdot P_{in}^m(t) \cdot \tau, \quad [\text{Дж}] \quad (3)$$

де $P_{in}^m(t)$ – миттєве значення вхідної потужності ВОІЕІК (імпульсна потужність); τ – тривалість імпульсу.

Максимальна енергетична пропускна здатність, визначається максимальною інтенсивністю світла в ОВ:

$$E(t) = \int_0^r \int_0^t S_{core} \cdot I_{Nmax}(r, t) dr dt = \int_0^r \int_0^t 2\pi r_{core}^2 I_{lim}(r, t) dr dt, \quad [\text{Дж/с}] \quad (4)$$

де I_{Nmax} – максимально-допустима інтенсивність оптичного потоку у серцевині волокна, що визначається

матеріалом ОВ $I_{Nmax}(r, t) = I_{lim} \approx \sum_{j=1}^K I_{\lambda jmax}(r, t)$, а оптична інтенсивність (густина оптичної потужності) у

оптоволокну описується відношенням суми потужностей до площі ОВ $I_{\lambda, \max}(r, t) = \frac{\sum_{j=1}^K P_{\lambda_j}(t)}{\pi r_{\text{core}}^2}, P_{\lambda_j} \gg P_{\lambda_i}$.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ У ВОІЕІК

Для спрощення аналізу процесів, прийнемо що у ВОІЕІК розповсюджуються 2 спектральних канали: 1 інформаційний та 1 енергетичний (рис. 3).

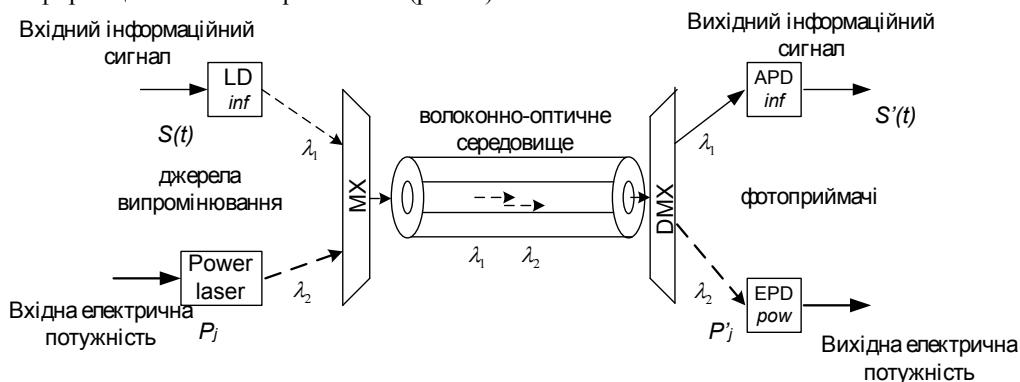


Рис. 3. Модель ВОІЕІК з 2-ма спектральними каналами

Якщо сумарна оптична потужність спектрів, що введена у оптоволокну, менша за значення порогу нелінійності $P_{\sum \lambda_{i,j}} \leq P_{\text{por.NL}}$, то – нелінійні явища відсутні, і інформаційний сигнал у моделі ВОІЕІК (рис.3) описується перетворенням Фур'є. Але при сумі потужностей енергетичних спектрів $P_{\text{pow} \sum \lambda_j}$, більшій за порогову величину $P_{\sum \lambda_{i,j}} \geq P_{\text{por.NL}}$, $P_{\text{pow} \sum \lambda_j} \geq P_{\text{por.NL}}$, виникає ряд нелінійних явищ, які впливають на інформаційний сигнал у ВОІЕІК. Детальний аналіз прояву нелінійних явищ у ВОІЕІК описується автором у [7]. Відзначимо тільки основні положення прояву нелінійних явищ при високих рівнях вхідних оптичної потужностей у ВОІЕІК:

- показник заломлення сердцевини ОВ стає функцією від інтенсивності виду:

$$n_{\text{core}}(I) = n_{0\text{core}} + dn_{0\text{core}} = n_{0\text{core}} + n_2 n_{\text{core}}(I^2) = n_{0\text{core}} + n_2 n_{\text{core}} \left(\left[\frac{P_{\text{in}}(t)}{S_{\text{ef}}} \right]^2 \right), \quad (5)$$

де n_2 – нелінійний показник заломлення (для ОВ на основі кварцу $n_2 = 2,2 - 3,6 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$);

- виникають 2 нелінійних ефекта, що впливають на фазу сигналу: 1) фазова само модуляція (ФСМ); фазова крос-модуляція (ФКМ). Для ВОІЕІК вплив ФСМ є незначним і невраховується в розрахунках [7]. Вплив на інформаційні сигнали з боку енергетичний обумовлений проявом ФКМ, що проявляється у нелінійному набігу фази оптичного поля інформаційного спектрального каналу λ_i , що наведений полем енергетичного λ_j :

$$\Delta \phi_{\text{NL}} = 2\gamma z P_j, \quad (6)$$

де P_j – потужність сусіднього енергетичного спектрального каналу; γ – нелінійний коефіцієнт, $\gamma = \chi^3 n_2$; χ^3 – коефіцієнт кубічної нелінійності [7].

Прийнемо по відношенню до (6) деякі наближення, а саме:

– рівні оптичних потужностей є сталими відносно нескінченно малого часового проміжку $[0, t]$, що значно більший за період напруженості електричного поля E_j , напруженості електричних полів в енергетичних каналах ВОІЕІК умовно рівні потужностям $E_j = P_j, E_{2j} = P_{2j}, \dots, E_{Mj} = P_{Mj}$;

– квадрат напруженості електричного поля чисельно оцінюється його інтенсивністю, тобто $E_j^2 \approx I$, а інтенсивність визначається різницею чисельної кількості оптичної потужності P'_j [Вт, мВт] і площі

оптичного волокна S_{ef} , тобто $I = \frac{P'_j}{S_{\text{ef}}}$. Тоді $E_j^2 \approx I = \frac{P'_j}{S_{\text{ef}}}$ та $E_j = \sqrt{\frac{P'_j}{S_{\text{ef}}}}$; S_{ef} – ефективна площа сердцевини ОВ.

Повний вплив ФКМ на фазу інформаційного каналу з боку енергетичного каналу буде:

$$\Delta\phi_{NL} = 2\gamma z \sqrt{\frac{P_j}{S_{ef}}}, \quad (7)$$

де z – довжина ділянки нелінійного впливу.

Характерною рисою нелінійного ефекту ФКМ є те, що він викликає асиметричне спектральне розширення оптичних імпульсів, що поширюються. Це зумовлює появу додаткової нелінійної τ_{dNE} дисперсії (уширення оптичних імпульсів [7]), яка сумується із іншими складовими дисперсії: $(\tau_{mat} + \tau_{chr} + \tau_{mod}) + \tau_{dNE}$.

На рис. 4 зображено модель впливу середовища на сигнал у каналів передачі ВОІЕІК.



Рис.4. Модель впливу середовища на сигнал у ВОІЕІК

Інформаційний сигнал на виході волоконно-оптичного інформаційно-енергетичного каналу, враховуючи вплив оптичного середовища і сусідніх енергетичних каналів, визначається як:

$$S_{i\ out}(\omega) = S_{i\ in}(\omega) \cdot K(\omega) + |\xi^2(\omega)|, \quad (8)$$

де $S_{i\ in}(\omega)$ – вхідний інформаційний сигнал; $K(\omega)$ – АЧХ ВОІЕІК; $\xi^2(\omega)$ – квадрат амплітуди завади.

Амплітудо-частотна характеристика $K(\omega)$ визначає вплив як лінійного загасання, так і нелінійних факторів на вхідний сигнал та є нелінійною функцією від потужності енергетичних каналів:

$$K(\omega) = |k(\omega)| e^{j(\varphi(\omega) + \Delta\varphi_i)} = |k(\omega)| e^{j(\varphi(\omega) + 2\gamma z P_j)} = (|k(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}) \cdot \left(|k(\omega)| e^{j2\gamma z \sqrt{\frac{P_j}{S_{ef}}}} \right) = \quad (9)$$

$$= K(\omega) \cdot K_A(\omega),$$

де $K(\omega) = |k(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}$ – стала складова АЧХ ВОІЕІК; $K_A(\omega) = \left(|k(\omega)| e^{j2\gamma z \sqrt{\frac{P_j}{S_{ef}}}} \right)$ –

мультиплекативна складова, яка зумовлена нелінійним впливом сусідніх спектральних каналів з сумарною потужністю P_j [Вт]; $\varphi(\omega)$ – фазово-частотна характеристика ВОІЕІК.

Для опису сигналів у ВОІЕІК в часі необхідно здійснити перехід з частотної області в часову, тобто до перехідної характеристики ВОІЕІК.

Застосувавши перетворення Фур'є для АЧХ ВОІЕІК, отримуємо перехідну характеристику:

$$K(t) = |K(\omega)| \cdot e^{jt\varphi(\omega)}, \quad (10)$$

де j – комплексна змінна; t – часова координата інформаційного сигналу.

Інформаційний сигнал на виході ВОІЕІК, із врахуванням квадрату амплітуди завади $\xi^2(t)$ має вигляд функції часу:

$$S_{i\ out}(t) = S_{i\ in}(t) \cdot K(t) + |\xi^2(t)|. \quad (11)$$

Потужність корисного інформаційного каналу ВОІЕІК визначається враховуючи зв'язок частотної області з часовою (10):

$$P_{out}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{out}(\omega) \cdot K(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{out}(t) \cdot K(t) \cdot e^{j\omega t} dt, \quad (12)$$

де $P_{out}(t)$ – функція амплітуди потужності; $S_{out}(\omega)$, $S_{out}(t)$ – частотний та часовий спектри сигналу.

СИМВОЛЬНА ШВИДКІСТЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У ВОІЕІК

Швидкодія бідь-якого каналу зв'язку є основним його якісним показником. У роботі [7] було встановлено, що швидкість передачі інформації у ВОІЕІК (символьна швидкість [кільк.симв./сек.] не є фізичною швидкістю розповсюдження сигналу в просторі, яка рівна швидкості світла) залежить від параметру середньоквадратичної ширини імпульсу інформації δ . В роботі [7] також встановлено зв'язок між параметром δ і шириною смуги пропускання F_{max} ВОІЕІК у вигляді $F_{max} = 0.5/\delta$.

Також відомо [1], що у волоконно-оптичних системах часто користуються величиною загальної дисперсії τ_z для оцінки швидкодії і смуги пропускання у вигляді $F_{max} = 0.44/\tau_z$. Повна дисперсія (уширення імпульсів в процесі їх передачі) при цьому буде визначатися сумою усіх складових дисперсій в оптичних волокнах, а також нелінійною дисперсією, яка виникає внаслідок впливу енергетичних каналів:

$$\tau_z = \sqrt{\tau_{mat}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{mod}^2 + \tau_{dNE}^2}, \quad (13)$$

де τ_{mat} , τ_{chr} , τ_{mod} , τ_{dNE} – складові матеріальної, хроматичної, модової та нелінійної дисперсії.

Слід відзначити, що складові τ_{mat} , τ_{chr} , τ_{mod} мають місце у всіх багатомодових волокнах традиційних волоконно-оптичних систем передачі інформації. А складова нелінійної дисперсії τ_{dNE} проявляється тільки у ВОІЕІК, за рахунок високих значень інтенсивностей оптичного випромінювання сусідніх енергетичних каналів.

Сумарна дисперсія – це сумарне уширення складових інформаційного імпульсу. Цим її значення більше, тим менша смуга пропускання волоконно-оптичного каналу і менша символьна швидкість передачі даних.

Дисперсія сигналу ОВ, або залежний пропорційний до неї параметр середньоквадратичної ширини імпульсу δ ($\delta \sim \tau_z$) визначає фактичну символьну швидкість передачі інформації [Біт/с]. Із врахуванням формули Шеннона для швидкості, для одного каналу ВОІЕІК отримуємо:

$$\max \text{Bit rate} = F_{max} \log_2[V + S/N] = \frac{0.44}{\tau_z} \log_2[V + S/N] = \frac{0.5}{\delta} \log_2[V + S/N], \quad [\text{Біт/с}] \quad (14)$$

де V – кількість рівнів сигналу ($V=2$ при цифровій передачі); S/N – відношення сигнал-шум в каналі.

Для ВОІЕІК з N_i – кількістю спектральних каналів передачі даних максимальна символьна швидкість буде:

$$\max \text{Bit rate} = \frac{0.44 \cdot N_i \cdot \log_2[2 + S/N]}{\sqrt{\tau_{mat}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{mod}^2 + \tau_{dNE}^2}}. \quad [\text{Біт/с}] \quad (15)$$

ПЕРЕХРЕСНІ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ СПЕКТРАЛЬНИМИ КАНАЛАМИ ВОІЕІК

Окрім ФСМ та ФКМ у волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних інтерфейс-каналах виникає нелінійний ефект чотирьоххвильовим змішуванням (ЧХЗ), що призводить до утворення перекриттів спектрів окремих каналів сітки WDM та впливу на співвідношення сигнал-шум S/N . Поява нових паразитних оптичних гармонік для 3-х спектральних каналів відбувається на оптичних частотах $w_{ijk}=w_i+w_j-w_k$, при $i \neq k$ та $j \neq k$. Загальна кількість N цих гармонік оцінюється, як: $N = n(n-1)^2$ [7]. При збільшенні кількості спектральних каналів число гармонік N різко зростає, але не всі з них впливають на інформаційні канали(рис. 5).

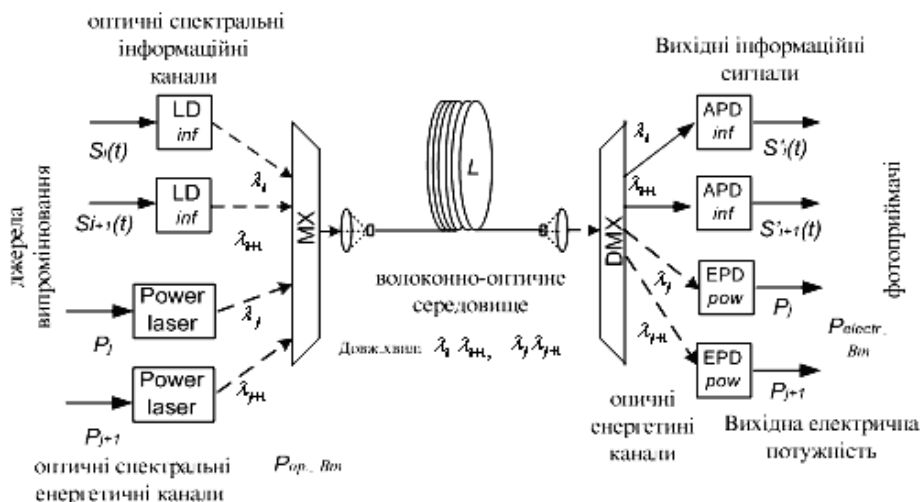


Рис. 5. Спектральна модель ВОІЕІК з 4-ма мультиплексованими каналами

Потужність завади в одному інформаційному спектральному каналі для системи з 2-ма сусідніми інформаційними каналами λ_i, λ_{i+1} , та 2-ма енергетичними λ_j, λ_{j+1} може бути оцінена за формулою [7]:

$$P_{i,i+1,j,j+1} = n_{i,i+1,j,j+1} \left(\frac{2\pi n_{core} n_2 d_{i,i+1,j,j+1} L}{3P_{\lambda_{j+1},j,j+1} S_{ef}} \right)^2 P_i P_{i+1} P_j P_{j+1} e^{-\alpha L}, \quad (16)$$

де n_{ijk} – коефіцієнт ефективності ефекту ЧХЗ; α – загасання у волокні; d_{ijk} – коефіцієнт виродження ЧХЗ; n_2 – коефіцієнт нелінійності показника заломлення; L – довжина каналу.

Загальна потужність завади P_n для системи з n – кількістю каналів оцінюється $P_i = \sqrt{\sum_n P_{ijk}^2}$, а

відношення сигнал-шум в i -му каналі складає $S/N = P_i/P_n$. Захищеність інформаційних каналів від завад можна оцінити за допомогою коефіцієнтів завадозахищеності для i -го та $i+1$ -го спектральних каналів: $k_{zi} = 10 \lg \frac{P_i}{P_n}$; $k_{zi+1} = 10 \lg \frac{P_{i+1}}{P_n}$.

Для мінімізації перехресних взаємодій інформаційних каналів у ВОІЕІК довжини хвиль інформаційних сигналів повинні бути меншими за довжини хвиль енергетичних: $\lambda_i < \lambda_j, \lambda_{i+1} < \lambda_{j+1}$ й $\lambda_i < \lambda_{j+1}, \lambda_{i+1} < \lambda_j$. При малих інтенсивностях інформаційних каналів ($P_{inf \lambda_i} \leq 10$ мВт, відповідно до рекомендацій ITU G.692 [1] щодо стандарту WDM) вплив енергетичних каналів за механізмом ефекту ЧХЗ буде практично відсутній, тому що коефіцієнт ефективності ЧХЗ для цих чотирьох каналів $n_{i,i+1,j,j+1}$ і коефіцієнт виродження ефекту ЧХЗ $d_{i,i+1,j,j+1}$ будуть наближатись до нуля: $n_{i,i+1,j,j+1} \rightarrow 0$; $d_{i,i+1,j,j+1} \rightarrow 0$. В такому випадку потужність завади буде мінімальною $P_i \rightarrow P_{i \min}$, співвідношення сигнал-шум максимальним $S/N \rightarrow S/N_{\max} \rightarrow 1$ а швидкість передавання більшою. Тому обов'язковою умовою при побудові волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналів з WDM – мультиплексуванням є використання енергетичних каналів із більшими довжинами хвиль, ніж у інформаційних $\lambda \ll \lambda_j, i = 1..N; j = 1..M..$

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ІНТЕРФЕЙС-КАНАЛІВ

Для проведення експериментів та підтвердження теоретичних результатів було розроблено і виготовлено експериментальну модель ВОІЕІК (рис. 6) для сумісної роботи з осцилографом С1-96 у смузі частот 0–350 МГц. У табл. 1 наведено основні технічні характеристики пристрою. Розробка експериментальної моделі ВОІЕІК базувалась на запропонованому методі і теоретичних основах побудови волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних інтерфейс-каналів.

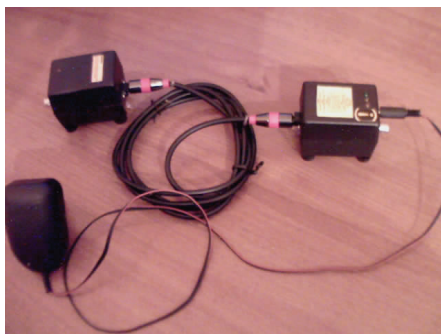


Рис.6. Експериментальна одель волоконно-оптичного інтерфейс-каналу з 1-м енергетичним каналом та 1-м інформаційним спектральними каналами

У розробленому пристрої здійснюється повністю оптичне живлення прийомного блоку від оптичного енергетичного каналу. Передача інформаційно-енергетичної складової реалізується на двох довжинах хвиль: $\lambda_{inform} = 658\text{nm}$ ($0.658\mu\text{m}$ – червоний) для інформаційного спектрального каналу та $\lambda_{power} = 785\text{nm}$ ($0.785\mu\text{m}$ – ближній інфрачервоний). У пристрої використовується спеціалізоване багатомодове полімерне (POF) оптичне волокно (ОВ) з діаметром серцевини $\varnothing 500\mu\text{m}$.

Оптична потужність джерела світла інформаційного каналу $P_{inform} = 5\text{mВт}$, джерела світла енергетичного – $P_{power} = 300\text{mВт}$. В качестве оптоволокна в устройстве использовано полимерное (POF) многомодовое оптическое волокно с диаметром сердцевины $500\mu\text{m}$.

В якості джерела енергетичного каналу використовувався напівпровідниковий лазерний діод ML520G21 виробництва Mitsubishi Electric потужністю 300mВт , в якості енергетичного фотоприймача - портативного фотоелектричного перетворювача (ФЕП) КР-221А виробництва компанії Phillips, з енергетичним ККД $\approx 25\%$ та робочим діапазоном довжин хвиль $\Delta\lambda = 0.4\text{-}2.5\mu\text{m}$.

Таблиця 1

Технічні характеристики розробленого пристрою волоконно-оптичного інтерфейс-каналу

Параметр	Величина
Напруга живлення оптико-електронного тракту	$\sim 220\text{ В}, 50\text{ Гц} (-12\text{ В})$
Споживана потужність	3.7 Вт
Оптична потужність енергетичного спектру	$300\text{ мВт} \pm 15\%$
Оптична потужність інформаційного спектру	$5\text{ мВт} \pm 5\%$
Робочі довжини хвиль	$785\text{ нм} / 658\text{ нм}$
Швидкість передачі інформації	170 Мбіт/с
Ефективність передачі енергії живлення (ККД)	$17\text{-}25\%$

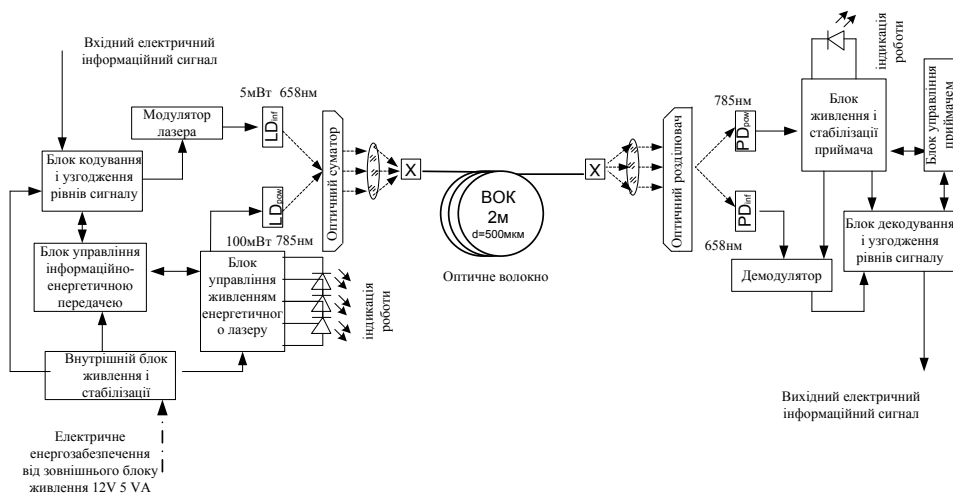


Рис. 7. Структурна схема експериментальної моделі ВОІЕІК

Пристрій працює аналогічно звичайний ВОЛЗ, за винятком того, що енергетичне живлення приймального блоку відбувається дистанційно від спектрального енергетичного оптичного каналу з довжиною хвилі 0.785 мкм потужністю 300 мВт, що дозволяє його використання для експериментальних досліджень процесів передачі інформації та енергії живлення в оптоволоконні.

Проведені дослідження процесу передачі інформаційно-енергетичного оптичного потоку на експериментальній моделі ВОІЕК показали, що досягнута ефективність передачі енергії живлення склала 17% при номінальній корисній оптичній потужності 90 мВт у енергетичному каналі. Електрична споживана потужність лазера склала 0.228 ВА при $U_{pn} = 1,9$ V, $I_{pn} = 120$ mA при середній енергетичній ефективності 65%. На приймальному кінці відтворювалась електрична потужність 0.03876 ВА при напрузі на ФЕП $U_{ФЕП} = 2,4$ V та струму $I_{pn} = 16,15$ mA. Середній досягнутий ККД експериментальної моделі волоконно-оптичного інформаційно-енергетичного каналу склав: $KKD = P_{out}/P_{in} \cdot 100\% = 0.03876/0.228 \cdot 100\% \approx 17\%$.

У випадку використання кварцевого оптоволоконна більшого діаметру сердцевини – $\varnothing 1000$ мкм та повного енергії лазерного діода ($P_{max}=300$ мВт), коефіцієнт корисної дії енергетичної передачі склав 24.51%. Це свідчить про те, що існують можливості підвищення енергетичного ККД ВОІЕК шляхом покращення характеристик матеріалів і їх компонентів.

Такий тип каналів хоч і не є енергоефективним, але цілком може застосовуватись для енергозабезпечення кінцевих локальних вузлів інформаційних систем, для забезпечення їх роботи в спеціалізованих умовах, що зазначені на початку статті.

При технологічній реалізації волоконно-оптичних інтерфейс-каналів можливим є досягнення ККД до 60-65%, оскільки в промислових умовах досягається значно менший відсоток оптичних втрат та вища якість електронних і оптичних компонентів. Тому величина ККД 17-25% не є межею для ВОІЕК, а лише визначає енергетичні можливості експериментальної моделі. Крім того, величину відсотку ККД=17-25% можна пояснити використанням у моделі ВОІЕК полімерного оптичного волокна з високими оптичними втратами $a=200$ дБ/км (0.2 Дб/м) та використанням оптики введення-виведення середньої точності.

Дослідження процесу передачі інформаційних сигналів по макету ВОІЕК проводились за складеною схемою (рис. 8).

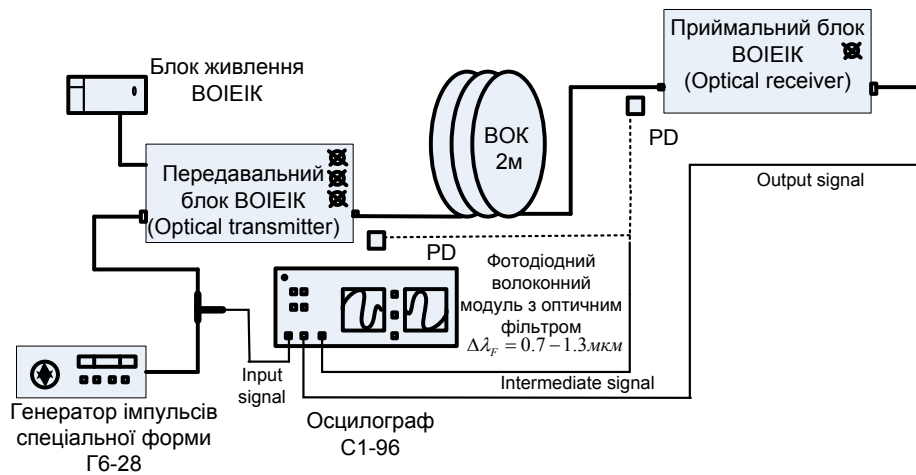


Рис. 8. Схема досліджень макету процесу передачі інформаційних сигналів:

Input signal – вхідний інформаційний сигнал; Output signal – вихідний сигнал; Intermediate signal – проміжний сигнал

Вхідний та вихідний інформаційні сигнали подаються на двоканальний осцилограф в електричній формі. Проміжний сигнал знімається з оптичного з'єднувача моделі ВОІЕК з виходу волоконного кабелю (ВОК) довжиною 2 м, який підключений до передавального блоку. Таким чином, можна спостерігати вплив енергетичної складової на форму інформаційного сигналу, в результаті його проходження у ВОК.

Вихідний оптичний сигнал, який перетворюється в електричну форму за допомогою ФЕП, проходить оптичну фільтрацію у діапазоні довжин хвиль фільтра $\Delta\lambda_F = 0.7 - 1.3$ мкм. Фільтрація необхідна для виключення впливу на інформаційний фотодетектор з боку енергетичного спектрального каналу $\lambda_{пов} = 0.785$ мкм. Осцилограми сигналів представлено на рис.9 - рис.11. Дослідження проводились для форми 2-ї несучої частоти інформаційного сигналу (1-а є оптичною). Попередні результати досліджень на експериментальній моделі ВОІЕК опубліковані у роботі [7].

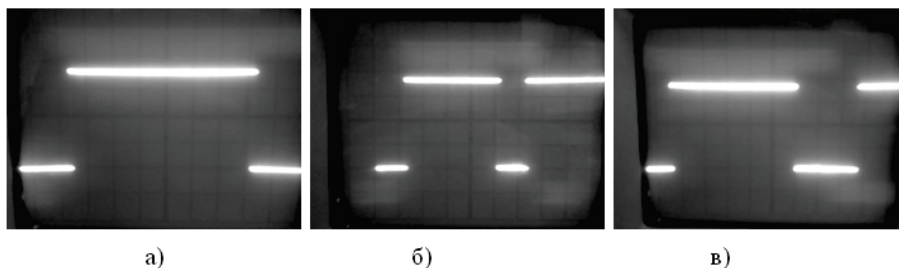


Рис. 9. Осцилограми сигналів типу меандр при амплітуді вхідного сигналу $U_m = 3.61$ В і частоті $F = 100.05$ МГц : а) вхідного; б) проміжного; в) вихідного

З рис. 9 видно, що схема моделі ВОІЕІК проявляє лінійність перехідної характеристики (9) на частоті 100 МГц. В процесі передачі сигналу прямокутної форми (рис. 9, а) змінюється лише його амплітуда (рис. 9 б, в) у проміжній та вихідній точках знімання після проходження сигналу через волоконно-оптичний канал $L=2$ м, $\varnothing=500$ мкм.

На рис. 10 показано форми сигналів при збільшеній частоті $F=302.01$ МГц. При потрійному збільшенні частоти до $F = 302.01$ МГц спостерігається погіршення форм проміжного та вихідного сигналів.

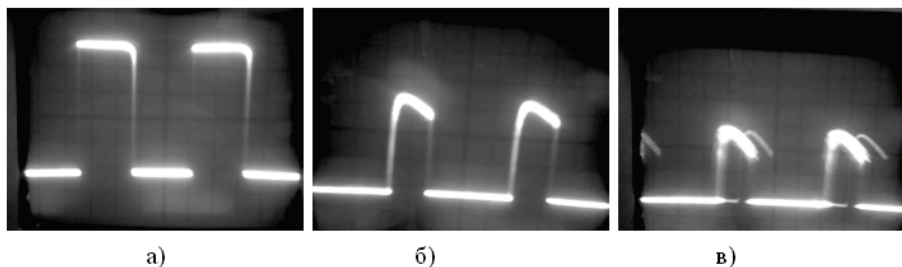


Рис. 10. Форми сигналів типу меандр при частоті $F=302.01$ МГц та амплітуді вхідного сигналу $U_m = 5.01$ В: а) вхідного; б) проміжного; в) вихідного

Поряд із закономірним зменшенням амплітуди спостерігається незначне спотворення форми, що можна пояснити сумарним нелінійним впливом на перехідну характеристику (адитивний компонент КА (ω)) з боку енергетичного спектрального каналу $\lambda_j = 785$ нм та перехресними спектральними взаємодіями на приймальному тракті. Більше проявлятиметься другий випадок, оскільки нелінійний вплив з боку енергетичних спектрів виникатиме на частотах, які є співмірними з оптичними, тобто коли 2-га несуча частота наблизитиметься до 1-ї (оптична частота до $2 \cdot 10^{14}$ Гц). Оскільки таке надзвичайно високе значення частоти інформаційного сигналу у макеті ВОІЕІК не досягається, то можна стверджувати, що спотворення форми імпульсів у більшій мірі викликане завдяки перехресному впливу з боку енергетичного спектру. Останнє проявляється як вплив на спектральну характеристику інформаційного фотоелемента $k_{APD}(\omega)$, що погіршує його динамічні характеристики. Для зменшення перехресних впливів у ВОІЕІК, необхідним є досягнення більшого розподілу частот спектральних складових.

Сигнал (рис. 10, в) із спотвореною формою може використовуватись для передавання інформації по волоконному інформаційно-енергетичному інтерфейсу, оскільки протягом тривалого часу дослідження схеми ($t > 10$ год), зокрема дослідження температурного і дрейфового впливів на апаратну частину пристрою, спостерігалась стабільність форми, фази і амплітуди вихідного сигналу (рис. 9). Це свідчить про можливість цілком стабільної роботи розробленої моделі ВОІЕІК на частоті $F = 302.01$ МГц та рівні потужності $P_{pow} = 298$ мВт. В результаті досліджень було встановлено умови максимальної лінійності макету ВОІЕІК (рис. 11) при частоті сигналу $F = 275$ МГц

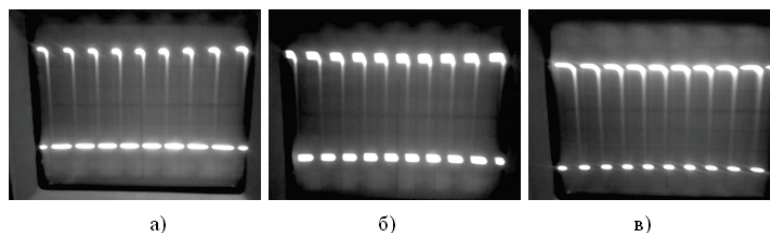


Рис. 11. Осцилограми вхідного а), проміжного б) та вихідного в) сигналів при частоті $F=275$ МГц

Частота стабільної роботи $F=275$ МГц характерна тільки для моделі ВОІЕІК та аж ніяк не є

теоретичним обмеженням. Ця величина пояснюється максимальною швидкістю елементної бази даної моделі. Перехідна характеристика $K(t)$ (10) наближається до ідеальної та визначається сталою її складовою $K(\omega)=k(\omega)$, що свідчить про максимальну відповідність вихідного сигналу до вхідного.

Повну серію експериментальних досліджень на моделі ВОІЕК наведено у [7].

Визначена експериментально гранична частота $F_{кр} = F_{max} \approx 340$ МГц дає змогу визначити максимальну пропускну здатність експериментального моделі ВОІЕК як: $B_{max} = \frac{1}{2} F_{max} \approx 170$ Мбіт/с.

Співставлення даних експериментальних та теоретичних досліджень волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних інтерфейс-каналів наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Співставлення даних результатів експериментальних та теоретичних досліджень ВОІЕК

Характеристика, що досліджувалась	Теоретичні результати	Експеримент на макеті ВОІЕК
Перехідна характеристика ВОІЕК $K(\omega)$	$K_i(\omega) = K(\omega) \cdot K_A(\omega)$ Вплив адитивного компонента $K_A(\omega)$	Спостерігається вплив додаткової складової $K_A(\omega)$ на форму сигналу
Спектр вихідного сигналу $S(\omega)$	$S_i(\omega) = S(\omega) \cdot S_A(\omega)$ розширення спектру за рахунок $S_A(\omega)$	Спостерігається розширення спектру сигналу за рахунок $S_A(\omega)$
Енергетична ефективність	60%	17%
Швидкість передачі даних	1680 Мбіт/с	170 Мбіт/с
Вплив спектральних перехресних взаємодій	Перехресне накладення спектрів $P_i = f(P_j)$ (2.48)	Спостерігаються спектральні перекриття
Нелінійний вплив на фазу інформаційного сигналу	Нелінійний ефект ФКМ $\Delta\phi_i = 2\gamma P_j$	Не можливо встановити за допомогою макету

На основі співставлення результатів досліджень волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних інтерфейс-каналів можна зробити висновок, що в більшій мірі результати теоретичних досліджень підтвердились експериментом, який показав ефективність і можливість використання ВОІЕК для спеціалізованих задач.

ВИСНОВКИ

Авторами запропоновано новий тип оптоволоконних ліній (волоконно-оптичні інформаційно-енергетичні канали) та метод їх побудови, що дозволяють передачу інформації та енергії живлення оптичним потоком в волоконно-оптичному середовищі при забезпеченні повної ізоляваності та нейтральності каналу, одночасно забезпечуючи високу пропускну здатність при передачі інформації. Це може ефективно бути використано в таких спеціалізованих задачах як: 1) передача інформації наряду з енергоживленням до біомедичних зондів, які вводяться внутрішньо в організм людини при операціях на внутрішніх органах; 2) передача інформації і енергії до сенсорів у вибухо-небезпечних місцях і приміщеннях та передача даних і енергії до кінцевих вузлів волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ); 3) дистанційне передавання інформаційно-енергетичної складової до сенсорів і контрольно-вимірювальної апаратури у ділянках з високим рівнем електричного потенціалу у ЛЕП; 4) організація високо-конфіденційної передачі інформації наряду з енергетичним живленням і забезпечення високої інформаційної захищеності каналу в системах захисту інформації та ін.

Розроблено математичну модель ВОІЕК, яка дозволяє враховувати внутрішні процеси в оптичному середовищі: визначати перехідні характеристики та параметри ВОІЕК; визначати характер і величину впливу енергетичних спектральних каналів на інформаційні; визначати вплив одних спектральних оптичних каналів на інші; здійснювати оптимальний вибір довжин хвиль для спектральних каналів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Убайдулаев Р. Р. Волоконно-оптические сети [Текст] / Р. Р. Убайдуллаев. – М.: Эко-Тренз, 1998. – 268 с. – ISBN 5-88405-023-2.

2. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи / А. Б. Семенов. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 302 с.
3. 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.
4. Маліновський В. І. Організація каналів в оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах / В. П. Кожем'яко, В. І. Маліновський // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2008. – №2 (12). – С. 19-25.
5. Маліновський В. І. Технології інформаційного та енергетичного обміну в оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах / В. І. Маліновський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 2(16). – С. 207-222.
6. Маліновський В. І. Моделі волоконно-оптичних інтерфейс-каналів геоінформаційно-енергетичних мереж / В. П. Кожем'яко, В. І. Маліновський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – № 1(17). – С. 179-193.
7. Маліновський В. І. Інформаційна мережа з об'єднаними оптичними інтерфейс-каналами: дис. канд. техн. наук: 05.13.05 / Маліновський Вадим Ігоревич. – Вінниця, 2010. – 193с.

Надійшла до редакції 20.09.2010р.

МАЛІНОВСЬКИЙ ВАДИМ ІГОРЕВИЧ – к.т.н., м.н.с., асистент кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

КОЖЕМ'ЯКО ВОЛОДИМИР ПРОКОПОВИЧ – засл. діяч науки і техніки України, д.т.н., проф., зав. кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.