

УДК 681.3.021

В.І. МАЛНОВСЬКИЙ

ТЕХНОЛОГІЇ ІНФОРМАЦІЙНОГО ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБМІНУ В ОПТИЧНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

*Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, м.Вінниця, Україна, 21021,
тел.:+38(097)7962176, E-mail: tirexlink@mail.ru*

Анотація. Приведені принципи та математичні моделі, які описують процеси передачі інформації та енергії у оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах (ГІЕМ). Приведені результати досліджень, а саме математичного моделювання процесів у волоконно-оптичних каналах ГІЕМ.

Аннотация. Приведены принципы и математические модели, которые описывают процессы передачи информации и энергии в оптических геоинформационно-энергетических сетях (ГИЭМ). Приведены результаты исследований, а именно математического моделирования процессов волоконно-оптических каналах ГИЭМ.

Abstract. The principles and mathematics models for information-power transmission in geoinformation-power networks (GIPN) were presented. Results of research have been submitted, as mathematics simulation of processes in fiber optical channel of GIPN.

Ключові слова: волоконно-оптичний, інформаційно-енергетичний, ГІЕМ.

ВСТУП

На сьогоднішній день все частіше робляться намагання поєднати дві існуючі і на перший погляд не співмірні субстанції: інформацію та енергію. Так, виникнення і стрімкий розвиток стандартів передачі даних HomePlug 1.0, 2.0 [1] (рекомендований світовою асоціацією Powerline Alliance), які передбачають використання побутової електромережі напругою ~220В для підключення до мережі Internet все більше поширюється у Європі з метою економії ресурсів на прокладення нових комунікацій. Крім того, актуальним тут представляється забезпечення автономності в енергетичному аспекті, працюючого по таким стандартам обладнання.

Ще більш цікавими і привабливими з точки зору швидкодії і автономності представляються саме геоінформаційно-енергетичні мережі (ГІЕМ) [1, 2]. В останніх актуальним є збільшення швидкодії і інформаційної пропускної спроможності шляхом застосування перспективних технологій оптичного зв'язку на основі волоконно-оптичних та відкритих оптичних каналів для передачі інформації та високошвидкісної обробки на основі паралельних обчислювальних структур, розроблених науковою школою проф. Кожем'яко В.П. та школою проф. Вінцюка Т.К.

Існуючі технології обміну інформації дозволяють здійснювати обмін інформацією із швидкістю до 10-80 Гбіт/с – у волоконно-оптичних каналах [4] та від 622 -1.5 Гбіт/с і більше – по відкритим оптичним каналам [5], що задовольняє вимогам по швидкодії.

Актуальність створення саме оптичних геоінформаційно-енергетичних середовищ [1,2] обумовлюється переходом на швидкодійні оптичні обчислювальні структури і оптичні канали інформаційно-енергетичного обміну, які дозволяють поєднати інформаційні канали з енергетичними, що дозволить як зменшити габарити і вагу комунікацій, так і підвищити автономність усіх вузлів ГІЕМ.

Систематизувавши існуючі розробки ГІЕМ, ГІЕС у [1] із врахуванням застосування вищезазначених технологій оптичної обробки і передачі інформації, можна навести запропоновану автором загальну структуру геоінформаційно-енергетичної мережі рис.1.

Основними елементами, по яким здійснюється обмін як інформації так і енергії у будь-яких системах і мережах, є канали передачі інформації та енергії живлення складових цих систем і мереж. При побудові апаратного устаткування засобів обробки і передачі інформації існують два види каналів: інформаційні та енергетичні. В даній роботі окремо існуючи технології передачі інформації і енергії будуть розглядатися у спільному, інформаційно-енергетичному (ІЕ) контексті, оскільки інформація не

існує окремо від енергії [3, 6] і в доволі великій кількості робіт розглядалась в спільному полі інформаційно-енергетичного світогляду.

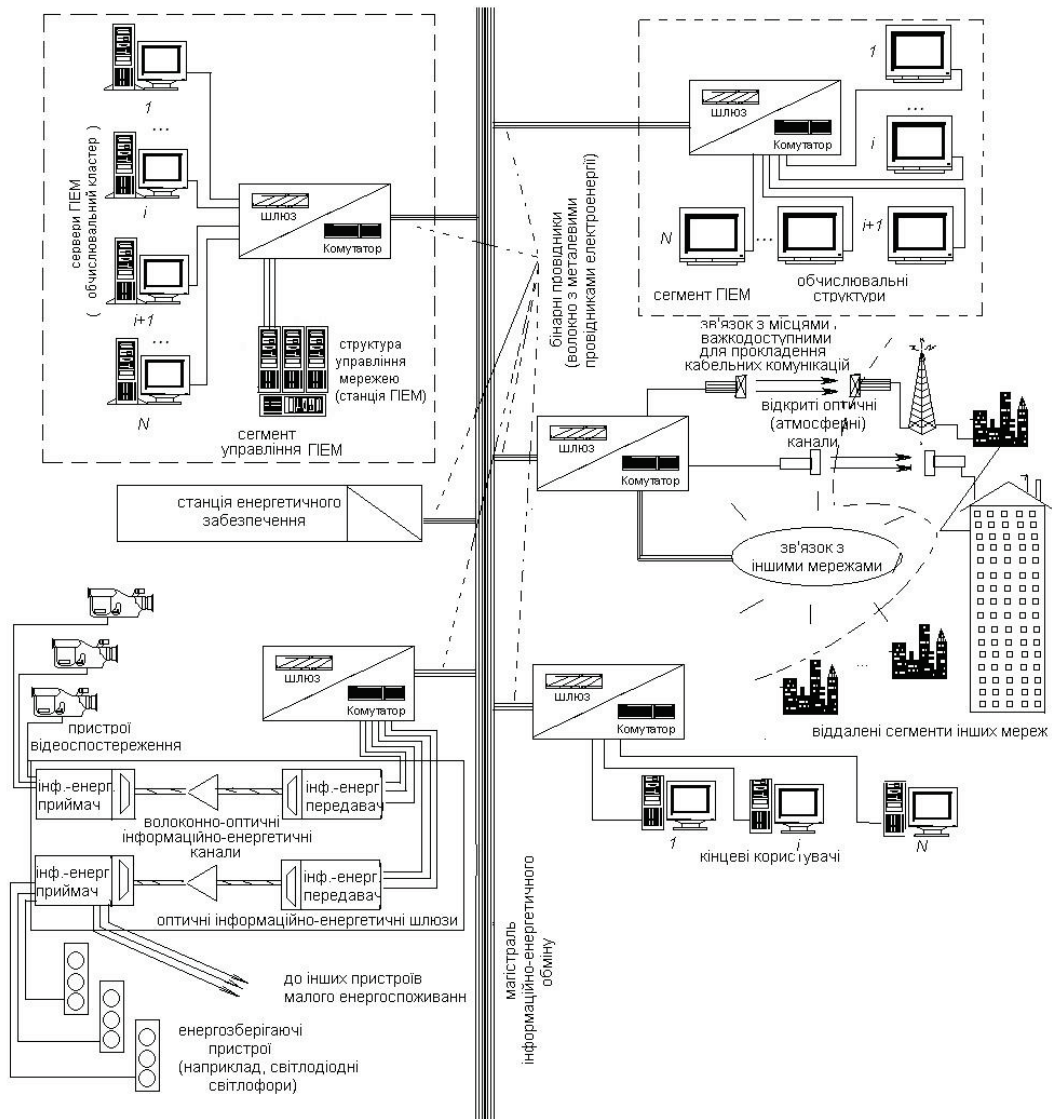


Рис. 1. Загальну структуру геоінформаційно-енергетичної мережі

Існуючі на сьогодні канали передачі і прийому інформації можна розділити (класифікувати) на три основні типи (рис.2).

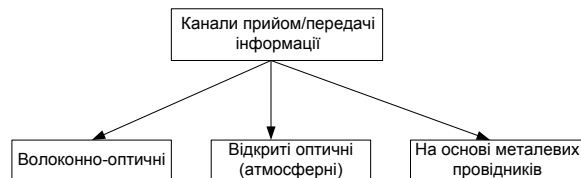


Рис.2. Класифікація існуючих каналів передачі інформації

Волоконно-оптичні і відкриті оптичні канали використовують в якості інформаційного носія оптичне випромінювання, а канали на основі металевих провідників – електричний струм. Відкриті оптичні і волоконно-оптичні канали є більш швидкодіючими, оскільки в них передбачено передачу інформації оптичним потоком, який при модуляції не має паразитних параметрів ($C_{\text{пар.}}$, $L_{\text{пар.}}$, $R_{\text{пар.}}$).

До переваг оптичних каналів також слід віднести малу вагу волокна, у випадку використання волоконно-оптичних провідників, або взагалі відсутність потреб створювати середовище передачі у відкритих

оптичних каналах.

Для забезпечення інформаційно-енергетичного обміну пропонується використання двох типів: бінарних провідників [7] та волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналів [3, 5-6]. При цьому, бінарні провідники являють собою кабельну структуру, і включають об'єднані під захисною оболонкою оптичні волокна, в якості інформаційно-передаючого середовища і струмонесучі жили на основі металевих провідників електроенергії – в якості енергетично-передаючого [6, 7]. Волоконно-оптичні інформаційно-енергетичні канали [7] представляють собою розміщені за допомогою хвильового мультиплексування оптичні спектри як для передачі інформації, так і енергії у єдиному оптичному волокні спеціалізованого типу (з великим діаметром серцевини 200-1000 мкм).

Саме останні представляють великий інтерес в плані розробки, дослідження і апаратної реалізації. Історично і природно склалося, що саме світлове випромінювання є найпершим і найдревнішим провідником енергії, адже всі природні процеси життєдіяльності на Землі відбуваються завдяки надходженню енергії від Сонця у вигляді світлових променів. Тому цікавим представляється напрямок застосування світлового випромінювання в якості енергетичного носія у волоконно-оптичних каналах в промисловості, при побудові оптичних ПЕМ. Цей напрямок активно вивчався рядом вчених у роботах [8 - 10], в яких передбачалась оптична передача енергії до кінцевих вузлів для забезпечення гальванічної розв'язки в електричних колах.

Новизна досліджень даної роботи полягає в тому, що принцип оптичного інформаційно-енергетичного обміну передбачає крім передачі енергії у спеціалізованому оптичному волокні, здійснювати паралельно передачу інформації на інших спектральних частотах за допомогою технології WDM (Wave Division Multiplexing). Реалізація інформаційно-енергетичної передачі по волоконно-оптичним каналам потребує детального розгляду і дослідження процесів спільного оптичного способу передачі інформації та енергії.

В табл. 1 можна привести орієнтовані інформаційні та енергетичні пропускні спроможності для кожного з типів каналів ПЕМ.

Таблиця 1.

Орієнтовні пропускні спроможності каналів ПЕМ

Тип каналу ПЕМ	Пропускна спроможність		Тип лінії ПЕМ,
	Інформаційна, Мбіт/с	Енергетична, Дж/с	
1. Бінарні провідники	$1 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$	$10-10^5$	Магістральні ІЕ канали
2. Відкриті оптичні канали	10^2-10^3	-	Віділені інформаційні канали
3. Волоконно-оптичні інформаційно-енергетичні канали	$1 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3$	$10-10^2$	Локальні віділені ІЕ канали

Якщо для перших двох типів каналів, немає необхідності розрахунку і досліджень значення пропускних спроможностей, оскільки технології реалізації їх відомі, то для волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналів, які розробляються і досліджуються в даній роботі необхідно більш детально розглянути механізми об'єднаного способу передачі інформації і енергії у них. І на основі побудованих математичних моделей і розрахунків необхідно визначити максимально можливі значення пропускних спроможностей, а й відповідно сферу застосування і класи кінцевого обладнання для цього типу каналів.

МАТЕМАТИЧНИЙ АППАРАТ РОБОТИ БІНАРНИХ ПРОВІДНИКІВ

Оскільки в бінарних провідниках середовища передачі інформації та енергії є просторово і фізично розділеними, доцільно окремо розглядати процеси у оптичному волокні (інформаційне середовище) і у струмопровідних жилах на основі металевих провідників (енергетично несуче середовище).

Швидкодія оптичних волокон бінарного провідника може бути описана як:

$$B_{\max} = B_{\max.od.} = 0.44 \cdot \tau_z = 0.44 \left(\sqrt{(\tau_{mat} + \tau_w)^2 + \tau_{pmd}^2} \right) \approx 0.5 / \delta, \quad (1)$$

де, $B_{\max.od.}$ - максимальна швидкодія одиничного волокна; δ – середньоквадратична ширина

імпульсу вхідної інформації; τ_Z – загальна дисперсія одномодового волокна бінарних провідників, яка складається із суми квадратів матеріальної τ_{mat} , хвильової τ_w та поляризаційної τ_{pmd} дисперсій.

Для енергетичного середовища, в якості якого виступає металева оболонка або струмонесучі жили (у випадку розміщення їх разом з волокном у одному пач-корді [5]), максимальна енергетична пропускна спроможність визначається параметрами робочої напруги $U_{роб}$, максимально допустимим значенням робочого струму $I_{роб}$ і омичним опором металевих струмонесучих частин енергетичного середовища довжиною $2L$ по загальновідомому закону Ома [11]:

$$P_{max} = U_R \cdot I_{Rmax} = U_R \cdot \frac{U_R}{R_{2L}} = \frac{U_R^2}{R_{2L}} \quad (2)$$

Вимірюється величина пропускної спроможності бінарних провідників у [КВА]- кіловольт-амперах відповідно.

У випадку використання каналного типу бінарних провідників, кожен з яких містить по два струмонесучі канали важливим параметром, що їх характеризує є максимально допустиме значення напруги діелектричного пробою між металевими частинами $U_{max\ проб.}$, перевищення якого призведе до внутрішнього електричного пробою. При використанні каналного типу бінарних провідників довжина струмонесучого шляху (металевих частин) збільшується у 2 рази ($L=2L_{од.мет.}$, де $L_{од.мет.}$ – довжина однієї струмонесучої частини), адже як відомо для передачі електричної енергії необхідна двополюсна схема (+/-, або фаза і нуль $F/0$).

Бінарні провідники в ГЕМ передбачено використовувати у магістральних сегментах ГЕМ, оскільки вони мають найбільші значення енергетичної загальних P_{maxZ} і інформаційної B_{maxZ} пропускних спроможностей. У магістральних каналах їх укладають у магістральні пачкорди, які являють собою магістральну ланку сегмента ГЕМ. У такій магістральній ланці можуть бути розміщені N -оптичних волокон, або спектрів, за умови мультиплексування на довжинах хвиль λ_i , $i=1..N$ та M - струмонесучих провідників. Тоді загальні інформаційна B_{max} заг та енергетична P_{max} заг пропускні спроможності будуть пропорційні кількостям оптичних і струмонесучих каналів:

$$\begin{cases} P_{maxZ} = M \cdot P_{max} \\ B_{maxZ} = N \cdot B_{max} = \sum_{i=1}^N B_{max\ \lambda_i} \end{cases} \quad (3)$$

Для оцінки якості передачі бінарних провідників, аналогічно волоконно-оптичним інформаційно-енергетичним каналам можна користуватись коефіцієнтами передачі по оптичному волокну k_{opt} , струмонесучим провідникам $k_{елект.}$, які визначаються із нескладних залежностей

$$\begin{cases} P_{OUT\ opt.} = k_{opt.} \cdot P_{IN\ opt.} \\ P_{OUT\ elect.} = k_{елект.} \cdot P_{IN\ elect.} \end{cases} \quad (4)$$

де P_{OUT} , P_{IN} - вихідні і вхідні потужності, відповідно для оптичної і електричної складових.

В процесі моделювання в середовищі MathCAD було отримано залежність, яка характеризує втрати електроенергії у металевих струмонесучих частинах бінарних провідників на відстані до 100км для магістральних каналів ГЕМ (рис.3.).

При моделюванні враховувалось, що на вході енергетичної складової каналу на основі бінарного провідника водилась вхідна активна потужність $P_{in} = 120\text{кВт}$, при робочому струмі $I_p = 100\text{А}$ і напрузі $U_p = 1.5\text{кВ}$ (що характерно для струмонесучих каналів на основі мідних провідників з площею поперечного перерізу $0.5\text{-}1\text{см}^2$). Як показує залежність на відстані 50км від передавача втрачається майже третина введеної потужності.

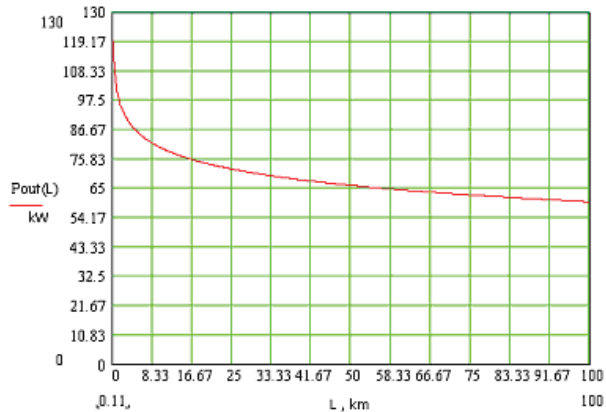


Рис.3. Характер втрат електроенергії на відстані $L=100$ км у струмонесучих частинах для магістральних каналів ПЕМ на основі бінарних провідників

На рис.4 приведені результати моделювання по формулі (2), яка характеризує залежність передачі максимальної потужності по металевим струмонесучим частинам на основі міді (Cu) і алюмінію(Al) з відповідними питомими опороми 1.673 та 2.69 Ом·м/мм²

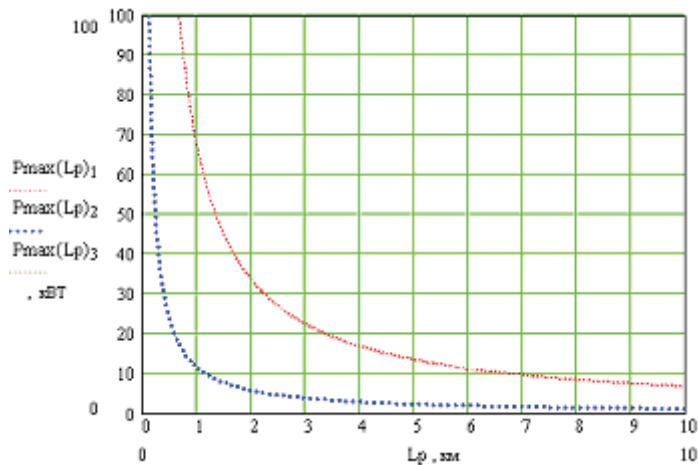


Рис.4. Залежність передачі максимальної потужності по металевим струмонесучим частинам на основі міді і алюмінію

При технологічній реалізації бінарних провідників в якості струмонесучих жил доцільно в якості матеріалу жил використовувати саме мідь, оскільки вона має найменший питомий опір, хоча разом з тим вартість її є більшою.

Перспективи від використання бінарних провідників визначаються відштовхуючись від параметрів максимальної інформаційної та енергетичної пропускних спроможностей, які у них є найбільші ($\sim 10^4$ - 10^5 Дж/с та 10^9 - 10^{12} Біт/с.) у порівнянні з іншими типами каналів ПЕМ. Використання високошвидкісного одномодового оптичного волокна у поєднанні з металевими енергонесучими частинами розрахованими на передачу до 100 КВА потужності живлення кінцевого обладнання забезпечує найкращі умови для використання бінарних провідників саме у магістральних сегментах геоінформаційно-енергетичних мереж, де необхідна максимально швидкісна передача інформації і передача максимально-можливих значень потужності живлення.

Для дослідження інформаційної пропускної спроможності необхідним є моделювання одномодового оптичного волокна типу NZDSF марки із діаметром серцевини 8-10мкм при умові забезпечення хвильового мультиплексування CWDM з кількістю каналів 5 на довжинах хвиль: 1530, 1540, 1550, 1560, 1570, розташованими поблизу основного робочого вікна прозорості 1550 нм кварцового скла. В результаті моделюванні оптичного волокна NZDSF відповідно формулам (1) та (3), які описують пропускну спроможність B_{maxZ} каналів при мультиплексуванні N –кількості ($N=5$) спектральних каналів, та величину загальної дисперсії τ_Z , від якої залежить B_{maxZ} , в результаті моделювання було отримано характеристику пропускної спроможності оптичного волокна бінарного провідника (рис.5).

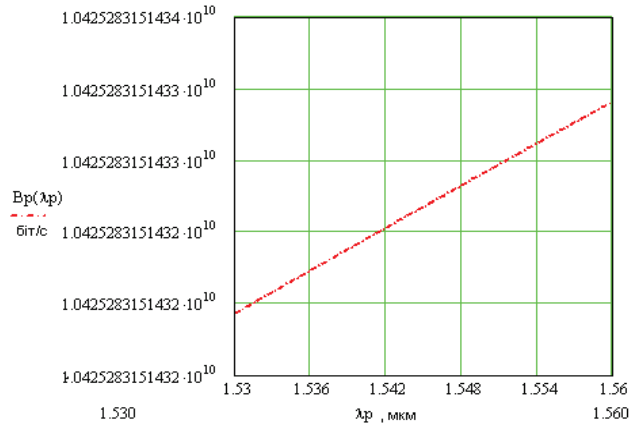


Рис.5. Характеристика пропускної спроможності оптичного волокна бінарного провідника у діапазоні 1530-1560нм

Розрахована робоча пропускна спроможність B_p визначилась на рівні 10,42Гбіт/с за умови мультиплексування 5 спектрів на робочих довжинах хвиль λ_p (1530, 1540, 1550, 1560, 1570,). Як показує залежність (рис.5), при зсуві в область робочої довжини хвилі кварцевого оптичного волокна $\lambda_p=1550$ нм, спостерігається незначне збільшення пропускної спроможності, обумовлене зменшенням поглинання і відповідного значення дисперсії. Використання робочої довжини хвилі $\lambda_p=1550$ нм і її ближнього діапазону $\Delta\lambda_p$, який відповідає мінімальним значенням загасання оптичного сигналу, дозволяє оптимально вирішити задачу підвищення інформаційної пропускної спроможності бінарного провідника при застосування технології WDM.

На рис.6 приведено залежність, яка визначає характер зміни пропускної спроможності оптичного волокна бінарного провідника в залежності від довжини передачі інформації.

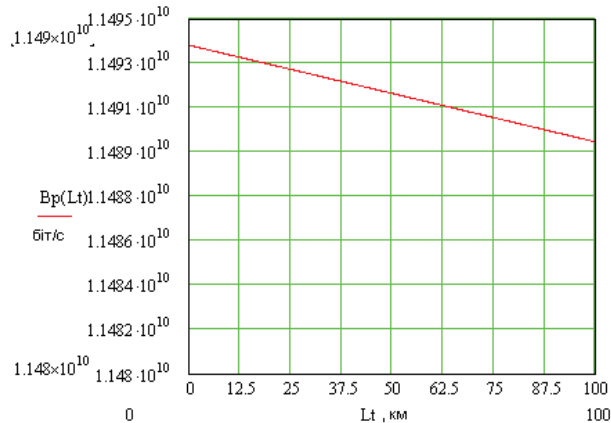


Рис.6. Характер зміни пропускної спроможності оптичного волокна бінарного провідника в залежності від довжини передачі інформації L

Як видно з рис.6 при передачі інформації на відстань до 100км, - не спостерігається суттєвих змін пропускної спроможності ОВ бінарного провідника. Спостерігається невелике і несуттєве зменшення B_{maxZ} (на рівні 4 Мбіт/с на ділянці $L=100$ км), яке обумовлено наростанням дисперсії в залежності від довжини лінії зв'язку.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ КАНАЛІВ

Використання волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналів перспективно для інформаційно-енергетичного обміну ПЕМ з кінцевими пристроями малого енергоспоживання, для забезпечення їх автономності і зменшення числа комунікацій з ними. Але, в зв'язку з малодослідженою областю волоконно-оптичних каналів, як провідників енергії, необхідним є дослідження їх принципів роботи і особливостей передачі інформації та енергії по ним.

На рис.7 можна зображено загальні структури інформаційного – а) та енергетичного – б) волоконно-оптичних каналів.

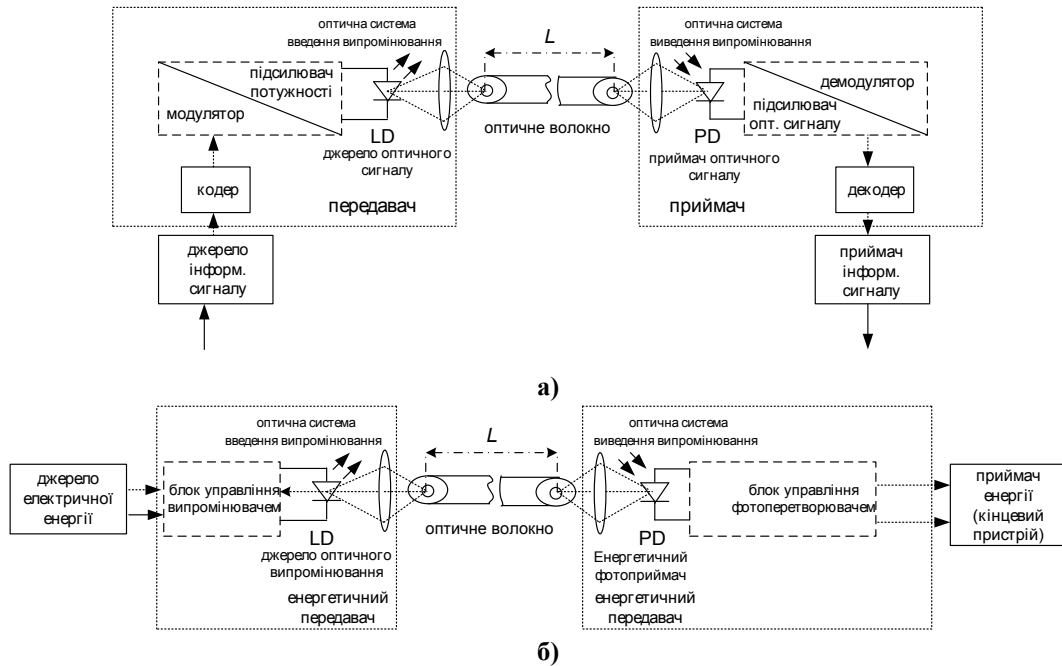


Рис.7. Загальні структури волоконно-оптичних каналів:
а) – інформаційного; б) – енергетичного

Як видно з рис.7. структури дуже подібні, відмінність полягає тільки у величині оптичної потужності ($P_{енерг.} \gg P_{інформ.}$), яка вводиться у лінію передачі і способі відтворення на приймальному кінці: у енергетичній ВОЛЗ використовується енергетичний ФЕП (фото-електричний перетворювач), який перетворює вхідний оптичний потік енергії у електричну форму. Як у інформаційному волоконно-оптичному каналі, так і у енергетичному на передавальному кінці каналу ВОЛЗ відбувається електрооптичне перетворення інформації, а на приймальному навпаки - оптико-електронне.

Слід також відмітити, що енергія живлення може передаватись як неперервним режимом роботи оптичного випромінювача, так і імпульсним. В першому випадку, одинична величина енергії чисельно рівна одиничній величині потужності $dE=dP$, оскільки потужність введення є сталою величиною $P=const$. У другому випадку, при імпульсній передачі, оптична енергія може бути визначена інтегралом:

$$E = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (5)$$

де, $P(t)$ - функція потужності оптичного сигналу, T - період імпульсів передачі.

У випадку імпульсної передачі потужності, для забезпечення сталої величини енергії ($E=const$) на приймальному кінці необхідне встановлення інтегратора імпульсів у вигляді електричної ємності, як це показано на рис.8.

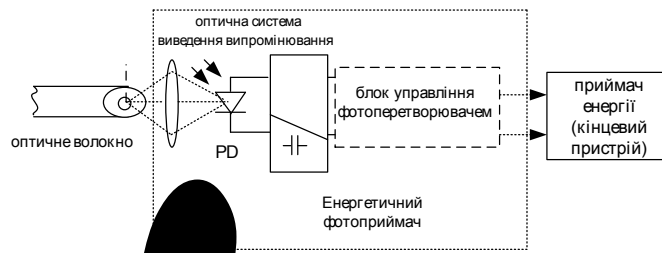


Рис.8 . Енергетичний фотоприймач з інтегратором прийнятої потужності

На приймальному кінці для прийнятої енергії можна записати:

$$E_{out} = \frac{Z}{T} \int_0^{\infty} P_{in}(t) dt, \quad (6)$$

де, E_{out} – енергія на виході енергетичного каналу, Z -коефіцієнт передачі потужності з врахуванням ККД всіх трактів (випромінювач, фотоприймач, оптичне волокно), $P_{in}(t)$ -потужність введена на вхідному кінці енергетичного оптичного каналу.

У випадку передачі потужності (модуляції світлового потоку) періодичним сигналом, наприклад, $P_{in}(t) = A_s \sin(\omega t)$ з циклічною частотою $\omega = 2\pi/f$ та амплітудою A_s , залежність, яка описує характер зміни потужності буде мати вигляд рис.9.

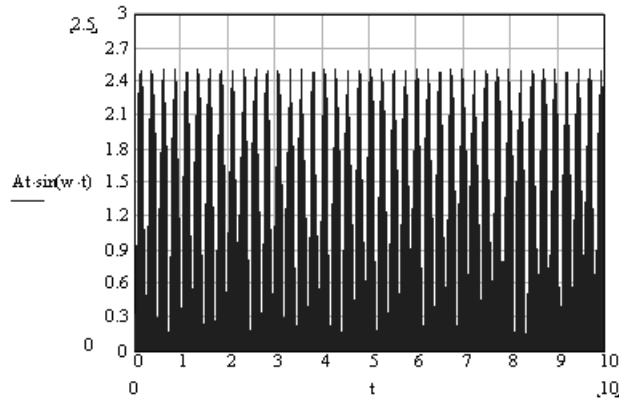


Рис.9. Характер зміни потужності в процесі передачі модуляції світлового потоку періодичним сигналом

На відміну від відомого оптичного способу передачі інформації у ВОЛЗ, оптичний спосіб передачі енергії у них базується на передачі енергії світловими потоками високої густини потужності в оптичному волокні, ($P_{енерг} / S_{эф.серц} \gg P_{інформ} / S_{эф.серц}$, де $S_{эф.серц}$ – ефективна площа поперечного перерізу сердцевини оптичного волокна).

Якщо розглядати поширення інформації (інформаційних сигналів) в оптичних волокнах, за умови що вони є лінійною системою по відношенню до інтенсивності(тобто якщо знехтувати впливом мультиплексованих енергетичних каналів) то їх властивості як середовища передачі сигналів описуються імпульсною $g(t)$, амплітудно-частотною $k(\omega)$ і фазочастотною $\varphi(\omega)$ перехідними характеристиками, які виражаються залежностями (7)-(9) [12]:

$$k(\omega) = |k(\omega)| e^{j\varphi(\omega)}. \quad (7)$$

Спектр вхідного сигналу можна описати [12]:

$$S_{вх}(\omega) = \int_0^{\infty} P_{in}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt. \quad (8)$$

Для вихідного сигналу спектр визначається [12]:

$$S_{out}(\omega) = S_{in}(\omega) \cdot k(\omega) \quad (9)$$

Вихідну потужність для одного інформаційного каналу, можна визначити, як:

$$P_{out}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{out}(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (10)$$

Для N –кількості каналів $P_{Nout}(t) = N \cdot P_{i.out}(t)$.

Імпульсна характеристика дозволяє досить чітко визначити потужність інформаційного каналу на виході оптичного волокна $P_{out}(t)$, по відомій потужності на вході $P_{in}(t)$:

$$P_{out}(t) = g(t) * P_{in}(t), \quad (11)$$

де * - згортка. За умови лінійності оптичного світловода і за умови лінійності імпульсної характеристики для кожного із N –кількості інформаційних каналів, можна стверджувати, що:

$$P_{Nout}(t) = g(t) * (N \cdot P_{i.in}(t)). \quad (12)$$

Середньоквадратична ширина – параметр, за яким можна характеризувати уширення інформаційних імпульсів у волокні чисельно визначає допустиму швидкість передачі, як $B_{dop} \approx 0.25/\delta$ [12], що є необхідним для зменшення міжсимвольної інтерференції імпульсів у інформаційному каналі.

Виходячи із чисельного значення параметру середньоквадратичної ширини δ , і врахувавши теорему Котельникова [13], згідно якої швидкість передачі повинна перевищувати частоту модуляції T_f принаймні вдвічі, можливо визначити максимально допустиму швидкість передачі одного інформаційного каналу: $B = 2T_f \approx 2 \cdot 0.25/\delta \approx 0.5/\delta$. Для всієї N -кількості мультимплексованих інформаційних каналів.

$$B_{Nmax} = \sum_{i=1}^N 2T_{fi} \approx 0.5 \cdot N/\delta. \quad (13)$$

Максимально допустима швидкість передачі дозволяє визначити довжини L_{max} регенераційної ділянки інформаційних каналів ВОЛЗ (максимальну дальність передачі), тобто максимальну дальність передачі без регенерації:

$$L_{max} \leq \frac{0.25}{\delta(z) \cdot B} \quad (14)$$

Довжина регенераційної ділянки дає можливість визначити дальність інформаційного каналу зв'язку, що є важливим параметром при розрахунку і проектуванні топологій мереж ПЕМ. Залежність довжин регенераційних ділянок L_{max} від швидкості передачі інформації B , згідно (14) у системах зв'язку на основі коаксіальних каналів і на основі волоконно-оптичних систем можна представити у вигляді графіку на рис.10.

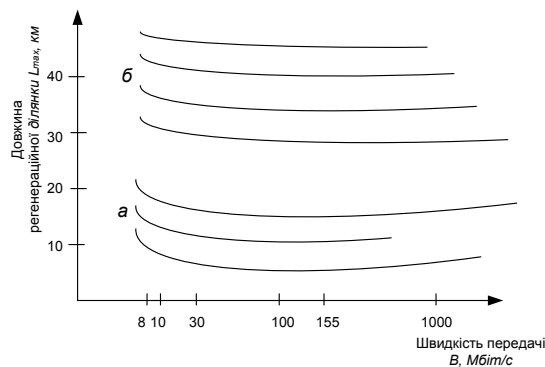


Рис.10. Залежність довжин регенераційних ділянок від швидкості передачі інформації:
а-у коаксіальних системах зв'язку; б-у волоконно-оптичних системах зв'язку

Фактично гранична інформаційна пропускна спроможність може бути визначена за формулою (13), а максимальна смуга пропускання каналу ПЕМ на основі ОВ, як і у інших оптичних системах передачі на основі ОВ визначається в основному результируючим значенням дисперсії $\tau_{заг}$ [12, 13]: $W_{max} = \frac{1}{\tau_{заг}} \approx \frac{0.44}{\tau_{mod}}$. Аналогічно (2.ХХ1), для N -кількості мультимплексованих інформаційних каналів:

$$W_{Nmax} = N \cdot W_{max} = \frac{N}{\tau_{заг}} \approx \frac{0.44N}{\tau_{mod}}. \quad (15)$$

Для джерел оптичного випромінювання і фотоприймачів гранична інформаційна пропускна

спроможність визначається частотою модуляції та демодуляції, відповідно $f_{\text{mod}} = \frac{1}{2\pi\omega_{\text{max}0}}$, де $\omega_{\text{max}0}$ - максимальна циклічна частота джерела, або фотоприймача.

Для визначення густини оптичної потужності, яка є критичною характеристикою для оптичного волокна, при передачі потужності (енергії) оптичним потоком можна використовувати формули (16) та (17), яка визначає поверхневу густину, тобто густини у поперечному перерізі оптичного волокна з ефективною площею $S_{\text{ef}} = \pi r_{\text{серц}}^2$ і радіусом $r_{\text{серц}}$, при одиничній потужності одного спектру $P_{\text{opt.}\lambda_i}$.

$$d\rho_s = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{opt.}\lambda_i}}{ds_{\text{ef.}\text{clad}}} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{opt.}\lambda_i}}{\pi r \cdot dr} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{opt.}\lambda_i}}{\pi r^2}. \quad (16)$$

Для об'ємної густини ρ_{VL} в ІЕ каналах ГІЕМ довжиною L , можна записати співвідношення:

$$\rho_{VL} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{opt.}\lambda_i}}{L \cdot S_{\text{ef.}\text{corn.}}} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{opt.}\lambda_i}}{L \pi r_{\text{corn.}}^2}. \quad (17)$$

Проінтегрувавши (17) можна досить чітко визначити об'ємний розподіл поверхневої густини ρ_{VL} :

$$\rho_V = \iint_{S \cdot l} \frac{1}{\sum_{i=1}^N P_{\text{opt.}\lambda_i}(s, l)} ds dl = \iint_{S \cdot l} P_{\text{opt.}\lambda_i}(s, l) ds dl, \quad (18)$$

де $P_{\text{opt.}\lambda_i}(s, l)$ – функція розподілу оптичної потужності у профілі оптичного волокна, яка є сумою потужностей спектрів каналів $\lambda_i, i=1..N$, і може бути записана, як $P_{\text{opt.}\lambda_i}(s, l) = \sum_{i=1}^N P_{\text{opt.}\lambda_i}(s, l)$.

Якщо розглядати граничні умови, при яких не відбувається вплив на саме оптичне волокно і його руйнація, то необхідним є введення параметру граничної густини оптичної потужності $\rho_{\text{Somn.}\text{gr}}$. Якщо позначити параметри матеріалу волокна (наприклад, для кварцу SiO_2) через χ , ξ , ζ (χ -параметр пропускання, ξ -поглинання, ζ - твердість матеріалу), то необхідним є виконання умови:

$$\rho_{S \text{ lim pt.}} = \lim_{l \rightarrow \infty} \rho_{S \text{ in. opt.}} | \chi, \xi, \zeta = \text{const}. \quad (19)$$

Основним фактором, який обмежує швидкодію традиційних ВОЛЗ і інформаційну пропускну спроможність інформаційно-енергетичних оптичних каналів ГІЕМ є нелінійні ефекти, які, як зазначено в [14, 15] особливо істотно проявляються у волоконно-оптичних системах з спектральним ущільненням каналів. Врахування повного опису механізму впливу нелінійних ефектів є комплексною і складною задачею, вирішити яку вкрай важко. Тому для спрощення використовують наближення, які дозволяють не враховувати більшість нелінійних ефектів, що становлять найменший вплив.

Взаємодія оптичних хвиль у волокні в більшій мірі залежить від ефекта чотирьоххвильового змішування (4X3), ефектом Керра та вимушеного розсіювання Мандельштама і Бріллюена, вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР), [6, 15], що становить найбільший вплив при оптичному хвильовому мультиплексуванні. Сумарний вплив нелінійних ефектів при введенні групи оптичних частот у оптичне волокно можна оцінити за допомогою відомої залежності [16]:

$$N.L. \approx \frac{n_2 \cdot P \cdot L}{S_{\text{ef}}}, \quad (20)$$

де згідно [16] $N.L.$ -величина, яка характеризує сумарний вплив нелінійних ефектів у системах з хвильовим мультиплексуванням; n_2 – коефіцієнт нелінійності; P - вхідна оптична потужність; L - довжина волоконно-оптичної лінії; $S_{\text{ef}} = S_{\text{Corn.}} = \pi r_{\text{corn.}}^2$ - ефективна площа оптичного волокно, яка чисельно рівна площі його серцевини $\pi r_{\text{corn.}}^2$. Аналізуючи залежність (20) можна помітити, що вплив більшості нелінійних ефектів прямопропорційний величині вхідної оптичної потужності P і довжині волоконно-оптичної лінії L , та обернено пропорційний ефективній площі волокна S_{ef} .

Оскільки, величина впливу пропорційна вхідної потужності P , що вводиться у ОВ для одного каналу (20), то ця величина буде пропорційною і до кількості N -кількості мультиплексованих каналів.

Для N -кількості оптичних спектрів цих каналів можна записати (21):

$$N.L. \cong \frac{A_{N.L.} \cdot n_2 \cdot N \cdot P \cdot L}{S_{ef}} = \frac{A_r \cdot n_2 \cdot N \cdot P \cdot L}{\pi r_{corn}^2} = \frac{A_r \cdot n_2 \cdot N \cdot P(I, t, z) \cdot L}{\pi r_{серц.}^2}, \quad (21)$$

де $A_{N.L.}$ – коефіцієнт, який враховує характер прояву нелінійності при введення N -кількості оптичних спектрів у оптичне волокно і визначається експериментально.

Оскільки при збільшенні ефективної площі оптичного волокна S_{ef} , як в традиційних ВОЛЗ так і в волоконно-оптичних каналах ПЕМ спостерігається зменшення величини взаємодії нелінійних ефектів, то для максимального її зменшення необхідно використовувати оптичне волокно з якомога більшою ефективною площею серцевини $S_{серц.}$, наприклад, волокно типу NZDSF MMF 200/1000, MMF 400/1000.

В результаті моделювання в пакеті прикладних програм MathCAD згідно з (16), було отримано залежність (рис.11), яка ілюструє розподіл густини згідно спектрів інформаційних і енергетичних каналів. При цьому, за умови оптичного хвильового мультиплексування було задано відповідні оптичні потужності: 2-2.5 мВт для спектрів інформаційних каналів, та $2 \times 10^2 - 6 \times 10^2$ Вт для спектрів енергетичних каналів.

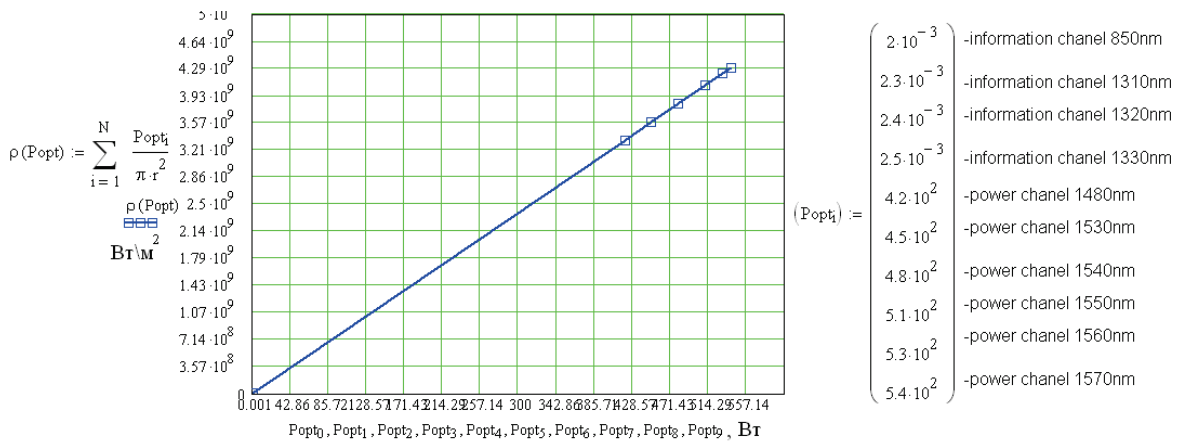


Рис. 11. Розподіл густини оптичної потужності для інформаційних та енергетичних спектрів

На даній залежності чітко спостерігаються точки густини оптичної потужності енергетичних спектрів на 6-ти робочих довжинах хвиль $\lambda_1 = 1480, \lambda_2 = 1530, \lambda_3 = 1540, \lambda_4 = 1550, \lambda_5 = 1560, \lambda_6 = 1570$ на яких відбувається передача енергії по спеціалізованому оптичному волокну. Розподіл густини на графіку (рис.11) для спектрів інформаційних каналів не видно(точки які відповідають цим величинам максимально наближені до нуля на даній шкалі), оскільки різниця між потужностями енергетичних та інформаційних каналів складає п'ять порядків. Для ілюстрації густини оптичної потужності інформаційних трактів необхідним є зміна шкали залежності (рис. 12).

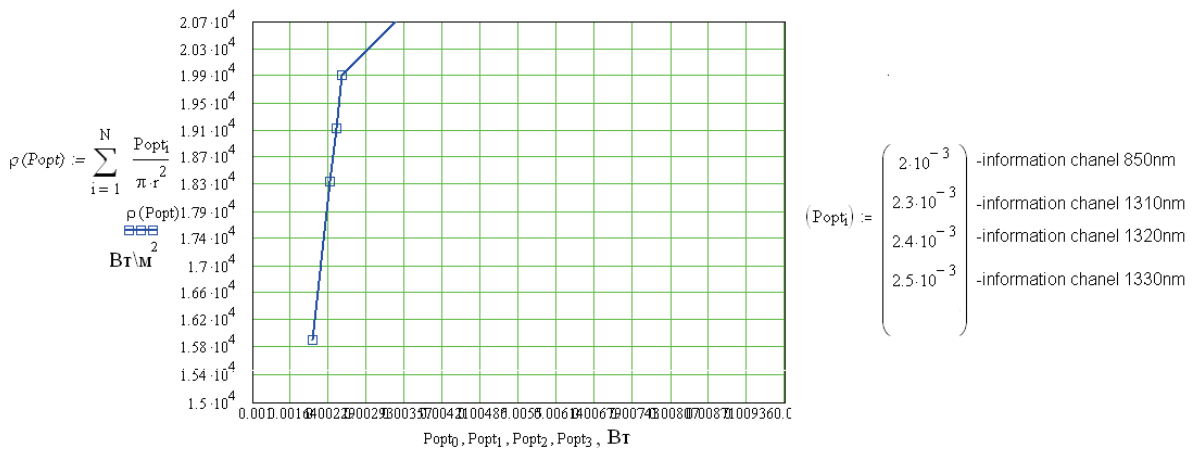


Рис. 12. Розподіл густини оптичної потужності для інформаційних спектрів

Інформаційні спектри вводились в оптичне волокно в результаті мультиплексування (CWDM) на 4-х довжинах хвиль $\lambda_1 = 850, \lambda_2 = 1310, \lambda_3 = 1320, \lambda_4 = 1330$ нм, що є характерним для волоконно-оптичних систем з невеликою дальністю передачі ($L \leq 10$ км), де власне затухання сигналу у оптичному

волокні не є настільки критичним.

Для дослідження інформаційної пропускної спроможності розраховувалась значення середньоквадратичної ширини імпульсу δ для спеціалізованого багатомодового оптичного волокна MMF 400/1000мкм та у відповідності із (13) розрахована смуга пропускання даного оптичного волокна (рис.13).

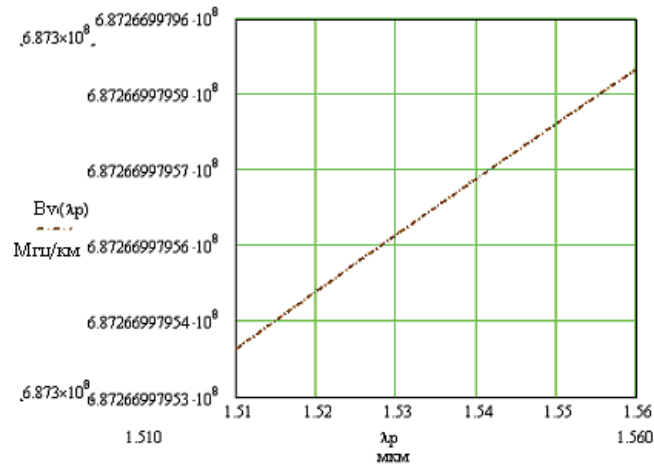


Рис.13.Смуга пропускання оптичного волокна MMF 400/1000мкм

Результати моделювання і розрахунків показали, що дане оптичне волокно має смугу пропускання на центральній спектральній лінії (1550нм) на рівні 687МГц/км.

Гранична оптична енергія введеного випромінювання у ОВ в одиничному каналі ПІЕМ буде визначатися сумою потужностей спектрів енергетичних каналів у часі і може бути визначена по сумі потужностей одиничних спектрів $P_{\lambda_{i\text{од}}}$, як: $E_g = \sum_{i=1}^N P_{\lambda_{i\text{од}}} \cdot t$ Згідно цьому співвідношенню, при

математичному моделювання у пакеті MathCAD отримана діаграма граничної енергії при передачі світловим потоком через оптичне волокно на 8-ми довжинах хвиль інформаційних та енергетичних каналів ($\lambda_1 = 850, \lambda_2 = 1310, \lambda_3 = 1480, \lambda_4 = 1530, \lambda_5 = 1540, \lambda_6 = 1550, \lambda_7 = 1560, \lambda_8 = 1570$) буде мати наступний вигляд (рис.14):

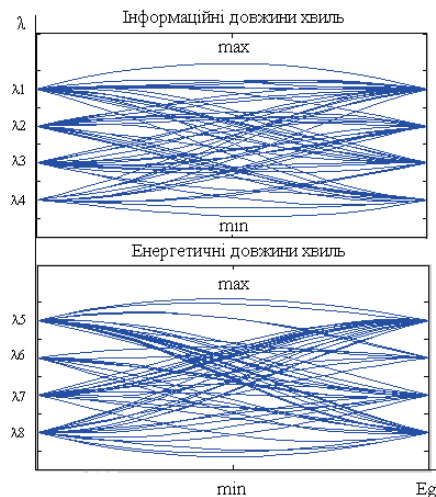


Рис. 14. Отримана діаграма граничної енергії при передачі світловим потоком на 8-ми довжинах хвиль ($\lambda_1 = 850, \lambda_2 = 1310, \lambda_3 = 1480, \lambda_4 = 1530, \lambda_5 = 1540, \lambda_6 = 1550, \lambda_7 = 1560, \lambda_8 = 1570$)

На даній діаграмі видно, що розподіл граничної енергії для спектрів інформаційних та енергетичних каналів має розбіжну структуру, яка обумовлена тим, що оптичні канали на кожній визначеній довжині хвилі мають не чітко визначені спектральні смуги, а деякий розмитий спектр, що генерується джерелом випромінювання. При цьому максимуми граничної величини енергії (піки) зосереджені як раз в центрі спектральної ліній, що обумовлено тим, що центральні спектральні смуги мають найбільшу інтенсивність.

Також в результаті дослідження, за умови взаємного розповсюдженні інформаційних та енергетичних оптичних каналів у одному оптичному волокні було отримано залежність коефіцієнту виникнення бітових помилок (рис.15).

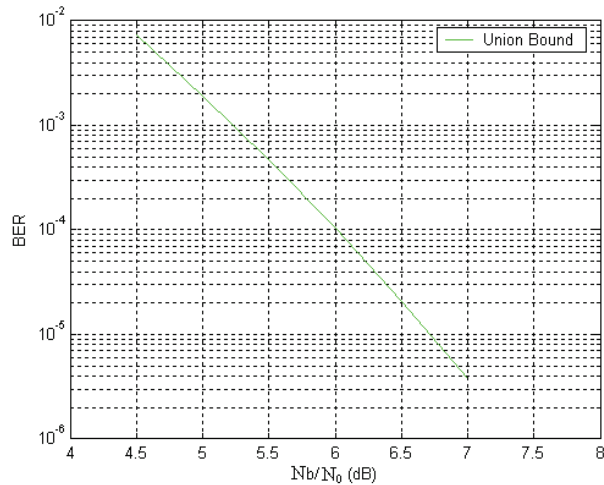


Рис.15. Залежність коефіцієнту виникнення бітових помилок від значення середньоквадратичного шуму

Із графіку видно, що значення бітової помилки у волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналах є порівняно більшим (гірші умови передачі) ніж у бінарних провідниках. Це обумовлено тим, що у цих каналах відбувається вплив на інформаційну оптичну складову з боку енергетичної, а також більше значення діаметру оптичного волокна (багатомодове спеціалізоване ОВ із значенням діаметру серцевини 200-400мкм), що спричиняє більші оптичні втрати. Але такого значення коефіцієнту помилок BER цілком достатньо для здійснення оптичної передачі інформації на відстань до 10км.

Для оцінки величини оптичних втрат у волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналах були отримані залежності величин вихідної оптичної потужності при заздалегідь заданому коефіцієнту втрат $a=20$ дБ/км для спеціалізованого багатомодового оптичного волокна типу MMF400/1000. Для інформаційної складової вхідна потужність P_0 задавалась у міліват (мВт) у діапазоні 5-20мВт, для енергетичної P_0 було задано у ватах (Вт) у діапазоні 40-400 Вт.

Графік залежностей для вихідної потужності інформаційних оптичних каналів за умови, що вону передаються сумісно з оптичними енергетичними представлений на рис.16.

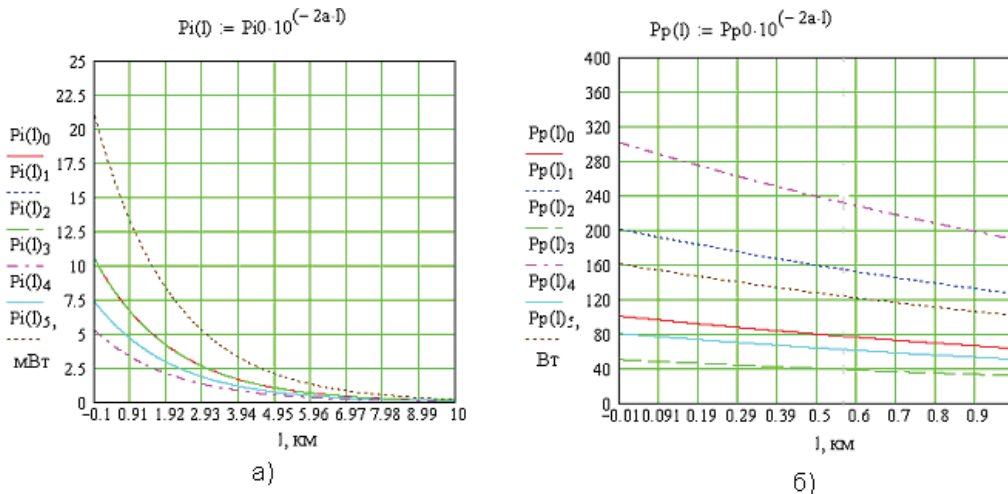


Рис.16. Графік залежностей для вихідних потужностей:
а)- інформаційних; б) - енергетичних спектрів оптичних каналів

Отримані залежності ілюструють і відтворюють процеси передачі, які можуть відбуватися у реальних системах, але для отримання необхідної точності математична модель процесу втрат потребує перевірки адекватності, зокрема при дослідженнях на діючому зразку волоконно-оптичної інформаційно-енергетичної лінії (імітаційна модель).

Згідно (21) були отримані дані результатів моделювання у пакеті прикладних програм MathCAD комплексного впливу нелінійних явищ у волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналах. Отримані залежності величин нелінійних явищ (умовн.од.) від потужності спектрів енергетичних каналів та від відстані передачі, яка задавалась на рівні $L=10\text{км}$. У другому випадку враховувалось, що кількість енергетичних каналів $N=4$ з одиничними потужностями $P_{od.}=10^2\text{Вт}$. Залежності величини комплексного впливу нелінійних явищ $N.L.$ від рівня потужності представлена на рис.17, від довжини передачі на рис.18.

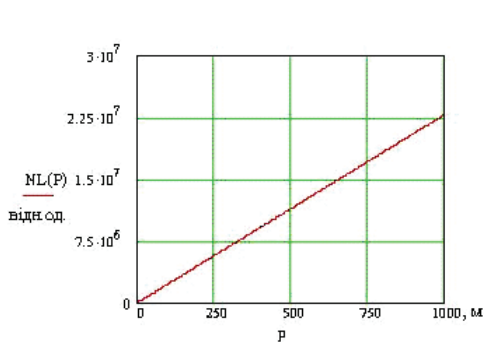


Рис. 17. Залежність величини комплексного впливу нелінійних явищ $N.L.$ від рівня потужності P

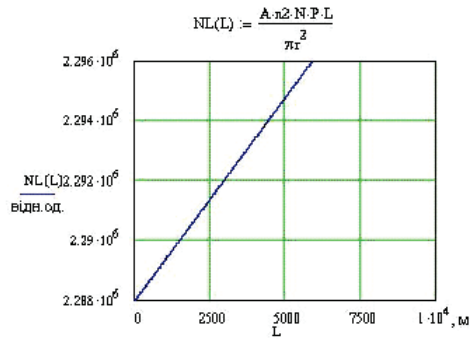


Рис. 18. Залежність величини нелінійних явищ від довжини передачі L

Ці залежності несуть лінійний характер і показують, що величина нелінійних явищ $N.L.$ є прямо пропорційною як до величини вхідної оптичної потужності P так і до довжини каналу передачі L (і зростаючою). Не лінійність виражається тільки по відношенню до самого світлового потоку (або для оптичного сигналу, якщо розглядається інформаційний канал), через зміну характеристик передачі середовища, тобто матеріалу оптичного волокна.

ПРИНЦИПИ РОЗПОДІЛУ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОТОКІВ

Основні принципи обробки інформації у геоінформаційно-енергетичних системах були розроблені і визначені у [17]. Запропонована автором у [17] модель способу обробки інформації базується на паралельно-ієрархічному Q -перетворенні [7, 17] при обробці і передачі потоків інформації у ГІЕС, ГІЕМ. Згідно з цією моделлю передбачається виконувати паралельну обробку інформації і передачу її по волоконно-оптичному кабелю від центру обробки (центру керування ГІЕМ) до кінцевого вузла геоінформаційно-енергетичної мережі, і навпаки згідно потоків запитів у мережі. Паралельно-ієрархічна модель обробки [17] і передачі передбачає стійке кодування і високошвидкісну обробку даних, що робить її придатною для застосування у геоінформаційно-енергетичних середовищах.

Дані принципи відповідають концепціям створення більшості відомих геоінформаційно-енергетичних мереж і можуть використовуватись як базова модель розподілу.

Спираючись на викладені твердження і формули у [17] для інформаційно-енергетичних потоків у оптичних ГІЕМ можна відмітити наступні твердження:

1. Інформаційні зв'язки в ГІЕМ є двосторонніми (двонаправленими), а енергетичні – однонаправленими (від енергостанції до кінцевих і проміжних вузлів);
2. Кількість інформаційних зв'язків наближено рівна кількості енергетичних, (забезпечення умови автономності, згідно концепції геоінформаційно-енергетичних технологій [6]) за виключенням відкритих оптичних каналів, що носять суто інформаційний характер;
3. Інформаційний обмін відбувається згідно процесу оброблення черги запитів двосторонньої направленості, енергетичний у відповідності напрямків надходження команд керування на органи управління енергетичним розподілом.

На основі цього можна записати модель утворення і розподілу інформаційно-енергетичних потоків у оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах.

Якщо позначити через $F_{inf}(\lambda_i, t)$ - функцію розподілу інформаційних потоків мережі ГІЕМ, а через $F_{pow}(\lambda_j, t)$ - функцію розподілу енергетичних потоків, відповідно через $P_{inf}(\lambda_i)$, $P_{pow}(\lambda_j)$ - імовірності їх виникнення, враховуючи пріоритети потоків λ_i $i=1..N$, λ_j $i=1..M$, (або як зазначено у [17] - коефіцієнт необхідності зв'язку), N , M – кількості рівнів пріоритету для інформаційних та енергетичних потоків, тоді для інформаційної та енергетичної складової можна записати модель утворення і розподілу потоків:

$$\begin{cases} F_{inf}(\lambda_i, t) = (N_{infCENT} \cdot P(\lambda_i) + N_{infKINCEV} \cdot P(\lambda_i)) \cdot P_{inf}(t) \\ F_{pow}(\lambda_j, t) = (M_{powCENT} \cdot P(\lambda_j) + M_{powKINCEV} \cdot P(\lambda_j)) \cdot P_{pow}(t) \end{cases} \quad (22)$$

де $P_{inf}(t)$, $P_{pow}(t)$ - імовірності виникнення потоків (запитів) в часі t ; $N_{infCENT}$, $M_{powCENT}$ – допустима кількість інформаційних та енергетичних потоків від центру керування ПІЕМ(ПІЕС); $N_{infKINCEV}$, $M_{powKINCEV}$ – допустима кількість інформаційних та енергетичних потоків (запитів) від кінцевих та проміжних вузлів (пристроїв) ПІЕМ.

Враховуючи, що виникнення інформаційно-енергетичних потоків ініціюється в i -й момент часу певною кількістю кінцевих пристроїв $N_{kinc\ init}(t_i)$ із всієї їх сукупності $N_{kinc\ init}$, а також з іншої сторони - центральними пристроями керування $N_{CENT\ init}(t_i)$ із всієї їх сукупності N_{CENT} із функціями розподілу імовірностей у часі $F_{CENT\ init}(P_{inf-pow}(\lambda_i), t_i)$ – для центральних пристроїв та $F_{kinc\ init}(P_{inf-pow}(\lambda_i), t_i)$ – для кінцевих, можна записати імовірнісну модель, яка описує виникнення інформаційно-енергетичних потоків у часі і дає можливість визначити їх кількість:

$$N_{inf-pow}P(\lambda) = \lim_{t_i \rightarrow 0} \frac{(N_{kinc\ init}(t_i) \cdot F_{kinc\ init}(P(\lambda_i), t_i)) + (N_{CENT\ init}(t_i) \cdot F_{CENT\ init}(P(\lambda_i), t_i))}{N_{CENT} + N_{kinc}} \quad (23)$$

Якщо розглядати геоінформаційно-енергетичну мережу в спільному інформаційно-енергетичному полі, у якому інформація не розділено пов'язана з енергією, то модель утворення і розподілу інформаційно-енергетичних потоків матиме вигляд:

$$\begin{aligned} F_{inf-pow}(\lambda_i, \lambda_j, t) &= F_{inf}(\lambda_i, t) \cup F_{pow}(\lambda_j, t) = \\ &= (N_{infCENT} \cdot P(\lambda_i) + N_{infKINCEV} \cdot P(\lambda_i)) \cdot P_{inf}(t) \cup (M_{powCENT} \cdot P(\lambda_j) + \\ &+ M_{powKINCEV} \cdot P(\lambda_j)) \cdot P_{pow}(t) \end{aligned} \quad (24)$$

де $F_{inf-pow}(\lambda_i, \lambda_j, t)$ - функція розподілу інформаційно-енергетичних потоків мережі ПІЕМ.

Якісним показником для оцінки динаміки завантаженості мережі ПІЕМ може бути усереднена функція розподілу інформаційно-енергетичних потоків $F'_{inf-pow}(\lambda_i, \lambda_j, t)$, яка характеризує динаміку росту завантаженості мережі ПІЕМ в часі і визначається інтегралом функції розподілу інформаційно-енергетичних потоків:

$$F'_{inf-pow}(\lambda_i, \lambda_j, t) = \int_{0-\infty}^{\infty} F_{inf-pow}(\lambda_i, \lambda_j, f(P_{inf-pow}(t))) dt, \quad (25)$$

де $P_{inf-pow}(t)$ - імовірність виникнення інформаційно-енергетичних потоків в часі t ; $f(P_{inf-pow}(t))$ - функція розподілу ймовірностей.

В силу того, що узагальнена структура оптичних ПІЕМ (рис.1) має ієрархічний характер, тобто всі інформаційно-енергетичні потоки мережі зводяться до центру керування (який є центральним вузлом мережі), то аналізуючи залежність (22) можна стверджувати, що найбільша завантаженість буде саме у сегменті центра керування, оскільки як кількість рівнів пріоритету N , M , так і імовірності (по пріоритету) $P_{inf}(\lambda_i)$, $P_{pow}(\lambda_j)$ в цьому сегменті будуть найбільшими. Функція розподілу інформаційно-енергетичних потоків $F_{inf-pow}(\lambda_i, \lambda_j, t)$ тут також матиме найбільші значення. Максимуми $F_{inf-pow}(\lambda_i, \lambda_j, t)$ характеризуватимуть стан завантаження як критичний для мережі ПІЕМ.

Зважаючи на це, необхідним є використання в цих сегментах швидкісних магістральних ліній на основі бінарного провідника, який забезпечить як найбільші енергетичну і інформаційну пропускі спроможності, так і високу швидкість інформаційної передачі, що значно зменшить час затримки відповідно зменшить завантаженість мережі.

ВИСНОВКИ

В статті були приведені результати досліджень процесів інформаційно-енергетичного обміну в оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах. В процесі вивчення оптичних ПІЕМ було розроблено математичний апарат опису процесів передачі інформації та енергії та проведено математичне моделювання в пакеті прикладних програм MathCAD. Було встановлено, що найбільші інформаційну та енергетичну пропускі спроможності мають бінарні провідники, що обумовлює використання їх в магістральних сегментах. Волоконно-оптичні інформаційно-енергетичні канали забезпечують повну гальванічну розв'язку окремих вузлів і сегментів мережі і можуть використовуватись в локальних

сегментах для передачі на невелику відстань ~10км для забезпечення максимальної автономності кінцевих вузлів в енергетичному плані. Останній тип каналів представляє велику цікавість і актуальність з наукової точки зору, оскільки у них паралельна передача як інформації, так і енергії здійснюється повністю оптичним способом на різних довжинах хвиль оптичного випромінювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Коноплянський Д.К. PLC - передача даних по електричним сетям. Последняя миля // Вестник связи.- 2004- № 5, С. 5-7.
2. Кожем'яко В. П., Малиновський В.І., Кобзаренко Р.Л. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні системи із застосуванням альтернативних джерел світлового випромінювання // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2006. - №1(11) – С.228-233.
3. Кожем'яко В.П., Малиновський В.І. Принципи побудови та структурна організація каналів для повністю оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж // Вісник ВПІ.-2008.-№1-С.95-101.
4. Кулик Т.К., Прохоров Д. В. Методика сравнительной оценки работоспособности лазерных линий связи.// Технология и средства связи.- 2000.- №6, с.8-10.
5. Клоков А.В. Беспроводная оптическая связь – Мифы и реальность. Технология и средства связи,2000, №6, с. 12-16.
6. Кожем'яко В.П., Малиновський В.І. Структурна організація каналів для повністю оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – №2. – С. 42-44.
7. В.П.Кожем'яко, О.Г. Домбровський, І.Д. Івасюк, О.В. Шевченко, С.В. Дусанюк, С.С. Білан, А.В. Кожем'яко. Оптико-електронна геоінформаційно-енергетична система тотального тестування і оптимального управління науково-освітніми і бібліотечними ресурсами для створення і розвитку централізованої бази знань // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.- 2006.-№1(9),С. 5-11.
8. О.Н. Крохин. Передача электрической энергии посредством лазерного излучения // Успехи физических наук .-2006.-№4,Т.176, С441-444.
9. Matthew Heino, Robert Saethre. Photonic power delivery through optical fiber using very high power laser diode arrays // SPIE Optics, Electro-optics & Laser Conference, Los Angeles CA, Jan.24-28, 2007; Laser Power Beaming , SPIE Proceedings Vol.2121, 252-255.
10. А.Н.Качемцев, В.К.Киселев, Г.Н.Семьин, А.Н.Труфанов. Гибридная оптическая система питания электронных устройств / Труды второго совещания по проекту НАТО SfP-973799 Semiconductors.Нижний Новгород, 2002, С.165-170.
11. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Наука, Гл. ред. физ. мат. лит.,1989. 504 с.
12. Л.М.Андрушко, И.И.Гроднев, И.П.Панфилов.Волоконно-оптические линии связи.-М.:Радио и связь, 1984.-135с.
13. Дж.Гауер Оптические системы связи: Пер. с англ.-М.: Радио и связь, 1989.-504с.
14. Е.М.Дианов. На пороге Тера-эры // Квантовая электроника.-2000.- №8(30), С.659-663.
15. М.П.Петров. Световолокна для оптических линий связи. Часть 2 // Соросовский образовательный журнал.-1997.-№12,С.100-105.
16. Dashkov M.V. The application of different fiber types -in optical multiplexing systems / Optoelectronic Information-Energy Technologies, 24-26April,2001VSTU,p.185.
17. Шевченко О.В. Паралельно-ієрархічні методи передачі та обробки інформації у автоматизованій геоінформаційно-енергетичній системі:дис.канд.техн.наук:спец.0513.06 / Шевченко Ольга Вікторівна.-К., 2006.171 с.

Надійшла до редакції 05.10.2008р.

МАЛІНОВСЬКИЙ ВАДИМ ІГОРЕВИЧ – аспірант, інженер кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна , тел.: 8 (0432)58-63-25, E-mail: tirexlink@mail.ru