

УДК 683.3

В. П. Кожем'яко, д. т. н., проф.;**В. І. Маліновський**, асп.

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА СТРУКТУРНА ОРГАНІЗАЦІЯ КАНАЛІВ ДЛЯ ПОВНІСТЮ ОПТИЧНИХ ГЕОІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ

Запропоновано використання волоконно-оптичних каналів для передавання інформації і енергії, за допомогою світлового потоку у одному волокні, для повністю оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж (ГІЕМ). Подано принципи функціонування оптичних каналів для ГІЕМ з використанням технології оптичного мультиплексування WDM, обґрунтовано переваги таких оптичних каналів, розроблено структурні схеми оптичних інформаційно-енергетичних каналів.

Вступ

Актуальність створення і використання геоінформаційно-енергетичних мереж і систем полягає в тому, що вони дозволяють об'єднувати просторово розміщені інформаційні апаратні і програмні ресурси, такі як потужні сервери, обчислювальні станції, кінцевих користувачів та інше апаратне мережеве обладнання у єдині інформаційно-енергетичні ресурси, а також вирішують основну їх задачу — поєднання двох типів мереж: інформаційної і енергетичної у єдине інформаційно-енергетичне середовище [1]. Крім того, у геоінформаційно-енергетичній технології передбачене підвищення ефективності роботи, енергозбереження та ресурсозбереження усіх складових підсистем, що до неї входять [1, 2].

За принципами фізичної організації каналів ГІЕМ для передачі інформації можуть використовувати як електричні, так і волоконно-оптичні канали зв'язку [2]. Технології застосування як перших, так і других є добре дослідженими і вже тривалий час ефективно застосовуються. Так використання оптичного волокна, швидкісних систем передачі і сучасних комунікаційних технологій в цих системах дозволяє збільшити швидкість передачі інформації від 155 МБіт/с до 60...80 Гбіт/с [3, 4], з дальністю передачі без регенерації і проміжного підсилення у 100 км і більше, що є цілком достатнім для організації магістральних каналів передачі між віддаленими великими регіональними центрами.

Вирішення задачі поєднання інформаційної мережі з енергетичною, забезпечується шляхом використання інформаційно-енергетичного кабелю, який також може бути визначений, як бінарний інформаційно-енергетичний провідник [2]. Він включає в себе інформаційне та енергетичне передавальні середовища. У якості першого можуть бути як електричні провідники, так і оптичні. Як енергетичні передавальні середовища, використовуються, зокрема, електричні металеві провідники, виконані в як оболонка, що оточує інформаційні канали.

Промисловість виготовляє бінарні інформаційно-енергетичні провідники шляхом розміщення електрично-ізольованих електричних або волоконно-оптичних жил у витках жил металевих струмопровідних ліній [6]. Оптичне волокно може бути вплетеним у фазовий електричний провід та розміщене на лініях електропередачі (ЛЕП).

Постановка задачі

Використання металеві оболонки чи металевих провідників в якості енергетичних каналів для геоінформаційно-енергетичних мереж обмежується двома вагомими недоліками:

1) металеві провідники у бінарних інформаційно-енергетичних мережах значно збільшують вагу кабелів і їх габаритні розміри, що ускладнює монтаж таких мереж;

2) для ефективного передавання електричної енергії металевими провідниками на великі відстані, необхідне підсилення напруги до високих і надвисоких величин (від 10 кВ до 750 кВ) [7], що призводить до значного нагромадження апаратних засобів.

Для побудови геоінформаційно-енергетичних мереж з високою ефективністю передачі енергії

необхідним є дослідження компактного і ефективного способу енергетичної передачі із максимально ефективним енергозбереженням та максимальним зменшенням апаратного нагромадження, а також поєднання цього способу з добре відомими та швидкісними способами передачі інформації, такими як волоконно-оптичні лінії зв'язку (ВОЛЗ).

Як варіант розв'язання цих задач може бути запропонована повністю оптична реалізація інформаційно-енергетичних каналів у ГІЕМ, яка полягає у використанні оптичного волокна, як інформаційно-передавального, так і енергетично-передавального середовища.

Оптична реалізація каналів у геоінформаційно-енергетичних мережах і системах

Оптичний спосіб передачі енергії у ГІЕМ базується на передачі енергії світловими потоками високої густини потужності в оптичному волокні. Запропонований спосіб передбачає використання волоконно-оптичних енергетичних каналів для передачі енергії для живлення будь-якого кінцевого устаткування. Сам спосіб передачі енергії по волокну є не новим, він ефективно використовується в медичних приладах, таких як хірургічні оптичні скальпелі, терапевтичні апарати [8]. Але даний оптичний спосіб передачі енергії ще не розглядався у поєднанні з способом передачі інформації по ВОЛЗ. У якості середовища передачі, як інформації так і енергії для повністю оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж використовуються волоконно-оптичні канали.

На вході енергетичного каналу одиначної ланки геоінформаційно-енергетичної мережі відбувається електрооптичне енергетичне перетворення, а на виході — навпаки, енергетичне оптоелектричне (фотоелектричне) перетворення. Тобто, на вході електрична енергія, що призначена для передачі, перетворюється в оптичну форму і вводиться у волокно, а на виході — оптичний потік високої густини потужності знову перетворюється в електричну форму. Так, за допомогою використання високотужних лазерних джерел світла теоретично можливою є генерація пучків високої густини потужності і подальше їх введення у оптичне волокно для передачі на великі відстані. На другому кінці оптичного волокна за допомогою ефективних енергетичних фотоперетворювачів світлові пучки перетворюються у електроенергію живлення. Але тут виникають труднощі, в першу чергу пов'язані із коефіцієнтом корисної дії (ККД) електрооптичного перетворення — на вході каналів передачі і оптоелектричного перетворення на виході каналів передачі. Сучасні лазерні джерела світлового випромінювання і фотоелектричні перетворювачі працюють з обмеженою ефективністю, ККД $\approx 50 \dots 60 \%$ для потужних лазерів [9], та ККД $\approx 30 \dots 40 \%$ для енергетичних фотоелектричних перетворювачів [10]. Також, у разі високої густини оптичної потужності у волоконно-оптичних каналах виникає ряд нелінійних ефектів, що призводять до додаткових втрат енергетичного оптичного пучка. Крім того, оптичні втрати енергії відбуваються у проміжних оптичних трактах та з'єднаннях волоконно-оптичних каналів.

Вирішення цих проблем можливе шляхом застосування сучасних потужних лазерів, енергетичних ефективних фотоперетворювачів, оптики з малим відсотком втрат та спеціалізованих оптичних волокон [10, 11, 4]. В якості енергетичних лазерів можна запропонувати застосування газових чи ексімерних потужних лазерних установок з високим коефіцієнтом корисної дії перетворення (ККД $\geq 90 \dots 95 \%$) [9, 11]. В якості енергетичних фотоприймачів можна запропонувати застосування або компактної технології сонячних батарей, що вже добре досліджена, або малогабаритних багатопшарових енергетичних напівпровідникових фотоелементів, які необхідно краще дослідити і розробити ефективніші ніж наявні [10].

Структурну схему оптичного інформаційно-енергетичного каналу, реалізованого за принципом фізичного розділення каналів показано на рис.1. Тут інформаційні і енергетичні волоконно-оптичні канали реалізовані на різних оптичних волокнах. Функціонування інформаційно-енергетичних оптичних каналів, побудованих за таким принципом, передбачає відсутність впливу енергетичних оптичних каналів на інформаційні, так як і відсутні нелінійні оптичні ефекти між довжинами хвиль цих волоконно-оптичних каналів.

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.

Генерація і прийом світлового потоку для інформаційних каналів забезпечується відповідно інформаційними випромінювачем і фотоприймачем.

Вхідна та вихідна оптичні системи відіграють роль узгоджувачів випромінювальних і приймальних блоків з оптичним волокном. Використання оптичних підсилювачів дозволяє підвищити дальність інформаційно-енергетичної передачі.

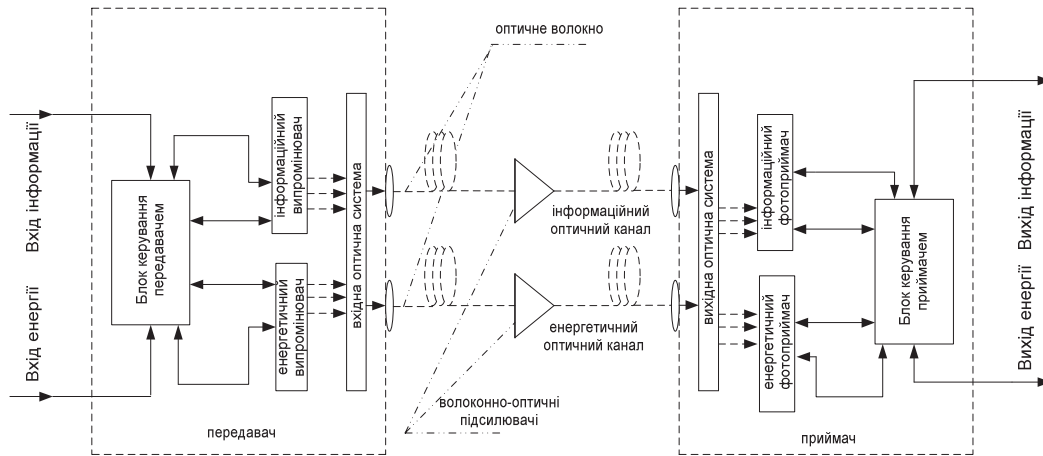


Рис. 1. Структурна схема оптичного інформаційно-енергетичного каналу

Використання технології WDM-ущільнення оптичних каналів

Оптична реалізація каналів у геоінформаційно-енергетичних мережах дозволяють зменшити кількість ліній ВОЛЗ, шляхом поєднаного використання фізичного середовища для реалізації інформаційних та енергетичних каналів. Це забезпечується шляхом введення у одне волокно відразу групи оптичних каналів за допомогою хвильового мультиплексування WDM (Wave Division Multiplexing) [12, 13] на різних оптичних частотах. Частина з цих каналів може бути інформаційною, а інша частина енергетичною.

У оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах може використовуватись два види технології WDM.

Перша — це технологія щільного хвильового мультиплексування DWDM (Densely Wave Division Multiplexing) [12], що обумовлює розміщення світлових спектрів у волокні з відстанню між спектральними смугами меншою 2 нм. Використання даної технології може значно підвищити кількість інформаційно-енергетичних каналів, таким чином збільшити масштабованість системи.

Другим видом технології WDM є технологія грубого хвильового мультиплексування CWDM (Coarse Wave Division Multiplexing) [12], що обумовлена мінімально допустимою відстанню між

світловими спектрами у волокні не менше 2 нм. Дана технологія є дешевшою у аспекті апаратної реалізації, але кількість інформаційно-енергетичних каналів буде значно меншою ніж у першому випадку.

Використання способу хвильового мультиплексування WDM для побудови оптичних інформаційно-енергетичних каналів показано на рис. 2.

Розглянемо передавальні пристрої оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж, які організовують оптичні канали у вигляді набору довжин хвиль λ_i , $i = 1 - N$ з близько розташованими оптичними спектрами $\Delta\lambda_i$ та з досить великою величиною густини оптичної потужності ρ

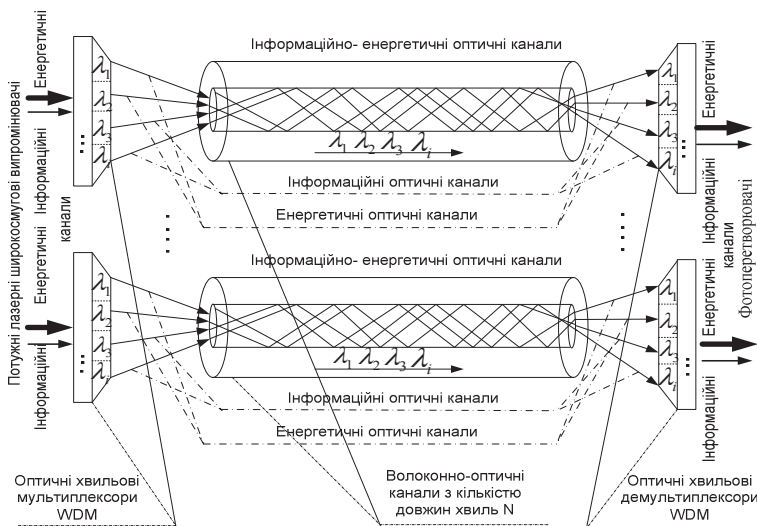


Рис. 2. Спосіб хвильового мультиплексування WDM для побудови оптичних інформаційно-енергетичних каналів

у поперечному перерізі волокна, для визначення якої можна запропонувати вираз

$$\rho = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{опт.}} \lambda_i}{S_{\text{серц.волокна}}} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{опт.}} \lambda_i}{\pi d^2}, \quad (1)$$

де $P_{\text{опт.}\lambda_i}$ — оптична потужність довжини хвилі λ_i , що відповідає кожному i -му каналу зв'язку; d — діаметр сердцевини оптичного волокна; $S_{\text{серц. волокна}}$ — площа сердцевини оптичного волокна; N — кількість каналів у оптичному волокні, розташованих на оптичних частотах λ_i , $i = 1 - N$.

Кількість каналів у одному волокні визначається величинами втрат і перехресних взаємодій спектрів оптичних каналів з урахуванням нелінійних ефектів та робочим вікном прозорості $\Delta\lambda_{\text{роб}}$ оптичного волокна, у якому втрати для цих спектрів оптичних каналів є мінімальними.

Якщо використовувати два типи каналів, тобто інформаційні та енергетичні з довжинами хвиль λ_i , $i = 1 \dots N$ — для інформаційних та λ_j , $j = 1 \dots K$ — для енергетичних, то сумарна кількість спектрів каналів системи S_{sum} визначиться як

$$S_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i + \sum_{j=1}^K \lambda_j. \quad (2)$$

Світлова потужність в енергетичних каналах, що розміщені на дискретних оптичних спектрах λ_j , набагато більша ніж потужність в інформаційних каналах, які розміщені на оптичних спектрах λ_i , тобто $P_{\lambda_j} \gg P_{\lambda_i}$.

Також слід зазначити, що теоретично можливим є оптичне накачування активного легованого волокна волоконно-оптичного підсилювача (наприклад ербієвого підсилювача EDFA — Erbium Doped Fiber Amplifier [12]) від одного дискретного спектра λ_j , взятого із загального набору оптичних енергетичних каналів $j = 1 \dots K$. Причому довжина хвилі цього енергетичного каналу повинна співпадати з довжиною хвилі корисного поглинання легованого волокна волоконно-оптичного підсилювача.

За умови використання промислових компонентів волоконної оптики, оптичні довжини хвиль енергетичних компонентів системи повинні бути адаптовані під визначені стандартні довжини хвиль ($\Delta\lambda_1 \approx 1550$ нм, $\Delta\lambda_2 \approx 850$ нм, $\Delta\lambda_3 \approx 1310$ нм) за умови мінімальних значень дисперсії, оптичного поглинання та розсіювання випромінювання в цих компонентах.

На рис. 3 показано іншу можливу структурну схему каналу оптичної геоінформаційно-енергетичної мережі з використанням WDM-ущільнення каналів в одному волокні.

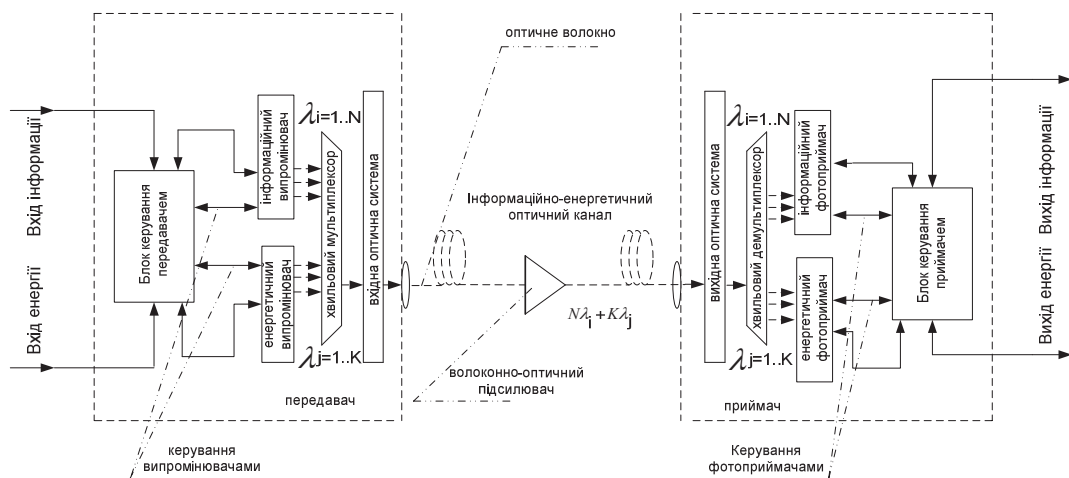


Рис. 3. Структурна схема каналу оптичної геоінформаційно-енергетичної мережі з використанням WDM-оптичного ущільнення оптичних каналів

На відміну від структурної схеми, яка показана на рис. 1, структура каналу оптичної геоінформаційно-енергетичної мережі (рис. 3) є більш уніфікованою, так як передбачає використання меншої кількості оптичних волокон. Крім того, завдяки поєднанню довжин хвиль інформаційних каналів з довжинами хвиль енергетичних у єдиному фізичному середовищі та забезпечення оптичного накачування легованого волокна оптичних підсилювачів від одної з довжин хвиль λ_i , з загального набору $j = 1 \dots K$ енергетичних каналів забезпечується автономність роботи даних підсилювачів, і підвищення надійності функціонування всієї волоконно-оптичної лінії геоінформаційно-енергетичної мережі.

Завдяки використанню оптичних мультиплексорів та демультиплексорів відбувається мультиплексування та демультиплексування довжин хвиль оптичних каналів і формування інформаційно-

енергетичних світлових потоків у одному волокні. На основі таких волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналів стає можливим побудова глобальних та локальних геоінформаційно-енергетичних мереж, які описані у літературі [1, 2, 5, 14]. Але з використанням волоконно-оптичних інформаційно-енергетичних каналів у таких мережах, вони вже будуть визначатись, як «повністю оптичні геоінформаційно-енергетичні мережі».

Вплив нелінійних ефектів та критерії функціонування оптичних інформаційно-енергетичних каналів

Для волоконно-оптичних систем передачі оптичне волокно здебільшого відіграє пасивну роль, забезпечуючи лише фізичне середовище для проходження оптичного сигналу, аналогічно електричному провіднику, який забезпечує канал для проходження електричного сигналу. Але уявлення про оптичні волокна, як про пасивні елементи справедливе тоді, коли світлова інтенсивність у них є низькою. Якщо розглядати енергетичні системи передачі, у яких в якості носія використовується світловий потік, то з підвищенням інтенсивності останнього, виникають нелінійні ефекти, які призводять до змін характеристик оптичного волокна. Нелінійні ефекти (ефект чотирьоххвильового змішування (4ХЗ), ефект Керра, вимушеного розсіювання Манделштама і Бріллюена, вимушеного комбінаційного розсіювання) вносять суттєвий вплив, починаючи з величини оптичної потужності більшої 10 Вт [8]. Для виникнення нелінійних ефектів у звичайних оптичних компонентах (не волоконно-оптичних) необхідні високі значення оптичної потужності порядку $10^4 \dots 10^7$ Вт. Суттєвий вплив нелінійних ефектів починається з величини оптичної потужності 10...100 Вт [15, 16], через малу площу оптичних волокон (порядку $S \approx 50$ мкм²) та розповсюдження оптичного сигналу без розфокусування у серцевині волокна. Чим більша інтенсивність світлового потоку у волокнах, тим вагоміший вплив становлять нелінійні ефекти у волоконно-оптичних каналах. Корисний інформаційний сигнал в таких каналах цілком втрачає форму та величину і стає абсолютно не відновлюваним. Повний опис механізму впливу нелінійних ефектів є комплексною задачею. Для спрощення розрахунків, більшістю з відомих нелінійних оптичних ефектів, які спричиняють найменший вплив, нехтують. Для мінімального впливу нелінійних ефектів ширина смуги частот оптично ущільнених каналів повинна бути максимально збільшена, та забезпечене рівномірне розташування оптичних спектрів довжин хвиль каналів.

Основним критерієм стабільної передачі по волоконно-оптичним лініям з хвилевим мультиплексуванням є умова виконання рівності [17]

$$S_{qk} \Delta f = \sum_{q=1}^k m \Delta f \quad (1 \leq qk \leq P), \quad (3)$$

де Δf — мінімальний розкид оптичних частот між тими каналами q , під час взаємодії яких спостерігається ефект 4ХЗ; $q = 1 \dots P$, де P — загальне число всіх каналів у волокні, які мультиплексується, $P = N + K$ (N — кількість інформаційних, K — кількість енергетичних каналів); $S_{qk} \Delta f$ — значення розкиду між каналами з оптичними частотами f ($f = c/\lambda$, c — швидкість світла в оптичному волокні, λ — довжина хвилі визначеного каналу); k — кількість груп каналів, під час взаємодії яких спостерігається ефект 4ХЗ; m — ціле число, більше за 1.

Значення розкиду між каналами при оптичному хвильовому мультиплексуванні у волокні повинно бути дещо більшим за значення мінімального розкиду по оптичним частотам Δf . Завдяки чому можливо досягти мінімального прояву ефекту чотирьоххвильового змішування (4ХЗ) і досягти максимально стабільної передачі. Тому, з урахуванням рівності (3) спектри оптичних каналів повинні оптимально розміщуватися по всій смузі частот мультиплексування $q = 1 \dots P$, з урахуванням умови максимальної їх кількості та максимальної величини розкиду оптичних частот $S_{qk} \Delta f$.

Слід також зазначити, що ефективне функціонування оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж визначається умовою стабільності інформаційного та енергетичного балансу в цих мережах. Можна запропонувати залежність для визначення енергетичного балансу мережі

$$P_{ЗАГ} \geq \sum_{i=1}^J P_{ОД\max} + P_{ВТР} + P_{РЕЗ}, \quad (4)$$

де $P_{ЗАГ}$ — загальна потужність, що надходить у систему; $P_{ОД\max}$ — значення максимальної потужності, яку може спожити один споживач; $P_{ВТР}$ — величина втрат потужності в каналах системи та у вузлах електрооптичного та оптоелектричного перетворень; $P_{РЕЗ}$ — значення запасу потужності, яка зарезервована на майбутніх користувачів та іншого кінцевого обладнання, і визначає ступінь

потенційної енергетичної нароснуваності мережі.

Критерієм функціонування тут буде достатній рівень загальної потужності $P_{ЗАГ}$ на вводиті її в мережу.

Інформаційний баланс визначається величиною пропускної спроможності (трафіку), як всієї мережі в цілому, так і окремих магістральних її ланок.

$$B_{ЗАГ} \geq \sum_{i=1}^J B_{ОД} + B_{РЕЗ}; \quad B_{МАГ} \geq \sum_{j=1}^Q B_{ОДМАГ}, \quad (5)$$

де $B_{ЗАГ}$ — пропускна спроможність всієї мережі; $B_{ОД}$ — пропускна спроможність одиначної ланки мережі; $B_{РЕЗ}$ — зарезервована пропускна спроможність ГЕМ; $B_{МАГ}$ — пропускна спроможність магістрального вузла ГЕМ; $B_{ОДМАГ}$ — пропускна спроможність будь-якої одиначної ланки, що підключена до магістрального вузла мережі; J — кількість всіх одиначних ланок мережі; Q — кількість одиначних ланок, що підключені до одного магістрального вузла.

У будь-якому випадку загальна величина пропускної спроможності повинна бути не меншою за суму трафіків кожного з одиначних вузлів.

Енергетична пропускна спроможність волоконно-оптичних каналів ГЕМ

Розглядаючи будь-яку систему енергозабезпечення, доцільним є визначення верхньої та нижньої границь величин енергетичної потужності, з якими ця система буде надійно працювати. Для волоконно-оптичних каналів ГЕМ дані границі можна визначити як нижню $P_{гр. ниж}$ і верхню $P_{гр. верх}$ межі оптичних потужностей, які вводяться на стороні станції енергозабезпечення. Нижня границя залежить зокрема від n — кількості кінцевих споживачів ГЕМ та від загальної потужності енергетичних втрат у всіх каналах ГЕМ $P_{втр. заг.}$, і наближено може бути визначена, як $P_{гр. ниж} \approx n P_{макс. од. спож.} + P_{втр. заг.}$. Верхня границя визначається виключно граничною оптичною потужністю руйнації оптичного волокна (променевою міцністю), тобто $P_{гр. верх} \approx P_{кр. волок.}$. Результати досліджень найприйнятніших для енергетичної передачі полікристалічних (ПК-світловодів) оптичних волокон були описані у [18]. Через ПК — світловоди передавали випромінювання потужних CO , CO_2 — лазерів для хірургічних оптичних скальпелів, і як з'ясувалось в результаті, їх руйнація відбувалась у разі досягнення величини граничної густини оптичної потужності $4...5 \text{ кВт/см}^2$ [18, 19] для ПК — світловодів без охолодження місць введення, та $38...50 \text{ кВт/см}^2$ [18, 19] з інтенсивним охолодженням торців введення випромінювання, на яких руйнація відбувається у вигляді оплавлення кінців. Руйнації світловодів відбувається переважно через френелівське підсумування амплітуд падаючої і відбитої хвиль на торці світловода, а також через інтерференційну картину спекл—поля випромінювання, з утворенням максимумів, де інтенсивність в багато разів перевищує середню інтенсивність по площі світловода. Існують інші роботи, де було доведено можливість збільшення граничної потужності світловодів шляхом нанесення просвітлювальних плівок на їх торці та шляхом використання імпульсного лазерного випромінювання з малою тривалістю енергетичного імпульсу [19].

Дана область потребує детальнішого вивчення, зокрема розробки нових світловодів із малою кількістю енергетичних втрат і загасання сигналу та з кращими характеристиками передачі для реалізації оптичної інформаційно-енергетичної передачі.

Висновки

Розглянуто основні принципи побудови та критерії функціонування оптичних каналів для геоінформаційно-енергетичних мереж на основі запропонованих структурних схем. Серед основних проблем, що виникають у інформаційно-енергетичних оптичних каналах і потребують детальніших досліджень, можна виділити такі: нелінійні ефекти у оптичних волокнах; гранична витривалість волокон за густиною оптичної потужності; відносно низька ефективність електрооптичного та оптоелектричного перетворень на вході і виході системи передачі. Вирішення цих проблем дозволить перейти на новий, ефективніший — оптичний рівень інформаційного та енергетичного транспорту і до побудови оптичних геоінформаційно-енергетичних мереж.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кожем'яко В. П., Домбровський О. Г., Івасюк І. Д., Шевченко О. В., Дусанюк С. В., Білан С. С., Кожем'яко А. В. Оптико-електронна геоінформаційна система тотального тестування і оптимального управління науково-освітняськими і бібліотечними ресурсами для створення і розвитку централізованої бази знань // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2005. — № 1(9). — С. 5—10.
2. Кожем'яко В. П., Білан С. С., Кожем'яко О. В., Кожем'яко А. В. Оптико-електронна геоінформаційно-енергетична

система, як глобальний засіб гармонійного вирішення проблем розвитку цивілізації // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2004. — № 2(8). — С. 5—10.

3. Андрушко Л. М., Гроднев И. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические линии связи: — М.: Радио и связь, 1984. — 135 с.
4. Носов Ю. Р. Волоконно-оптическая связь. — М.: Знание, 1990. — 56 с.
5. Кожем'яко В. П., Цирульник С. М., Кожем'яко К. В. Віртуальні складові інтелектуальної око-процесорної розподіленої геоінформаційно-енергетичної системи // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2005. — № 1(9) — С. 88—114.
6. Каток В., Ковтун А., Руденко И. Волокно на весу. — Библиотека on-line, CITForum, — Режим доступу: <http://www.citforum.ru/nets/hard/hang/>.
7. Шидловський А. К., Перхач В. С., Скрипник О. І. Енергетичні системи з електропередачами та вставками постійного струму / АН України. Ін-т електродинаміки. — К.: Наук. думка, 1992. — 286 с.
8. Снайдер А., Дж. Лав. Теория оптических волноводов / Под ред. Диановой, Е. М. Шевченка В. В. — М.: Радио и связь, 1987. — 655 с.
9. Синяк М., Морев Д. Лазеры в современных системах СтР. — Журнал on-line, Компюарт № 9. 2003, — Режим доступу: <http://www.compuart.ru/article.aspx?id=9138&iid=384>.
10. Аракелов Г. А., Магнусевский В. Р., Сивенкова В. Н., Троицкий И. М., Казанцев Г. А. Конструкция многоплощадочного фотоприемника с термоэлектрическим охладителем // Прикладная физика. — 2002. — № 4. — С. 69—75
11. Сысоев В. К. Анализ архитектуры лазерного информационно-измерительного канала дистанционной передачи энергии в космосе // Электронный научный журнал «Исследовано в России». — Режим доступу: <http://zhurnal.arcelam.ru/articles/2007/076.pdf>.
12. Лисенко Г. Л. Волоконна та інтегральна оптика Ч.1: Навчальний посібник / Мін. Освіти і науки України. — Вінниця: ВДГУ, 1998. — 127 с.
13. Кожем'яко В. П., Павлов С. В., Мартинюк Т. Б., Лисенко Г. Л. Волоконно-оптичні структури комутації та передачі інформації: Навчальний посібник / Мін. Освіти і науки України. — Вінниця: ВДГУ, 2002. — 105 с.
14. Пат. 2001075383 (UA) МПК 7 H04B10/12, H04N7/173. Оптикоелектронна інформаційно-енергетична мережа / Кожем'яко В. П., Білан С. М., Кожем'яко О. В., Білан С. С., Ільницький В. А. / WO 9935845, 15.07.1999. Заявл. 27.07.2001.
15. Agraval. G. Nonlinear Fiber Optics. N. Y.: Acad. Press, 1989, 247 p.
16. Петров М. П. Световолокна для оптических линий связи. // СПТУ. — Режим доступу: <http://www.cito.ru/states/optofibers.pdf>.
17. Пат. 95028164 (UA) МПК 8 H04B10/10. Система оптического зв'язку зі спектральним ущільненням каналів / Ейті Енд Ті Корп. / WO 4503794, 15.07.1992. Заявл. 17.02.1995.
18. Артюшенко В. Г. Поликристаллические световоды для среднего инфракрасного диапазона // Труды ИОФАН. — 1988. — Т. 15. — С. 3—17.
19. Артюшенко В. Г., Войцеховский В. В. и др. Макет волоконно-оптического устройства для передачи мощности лазерного излучения и измерения температуры объектов излучения // Квантовая электрон. — 1985. — Т. 12. — С. 879—881.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптоелектронної техніки

Надійшла до редакції 6.12.07
Рекомендована до друку 12.12.07

Кожем'яко Володимир Прокопович — завідувач кафедри, **Маліновський Вадим Ігоревич** — аспірант.

Кафедра лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет