

УДК 621.391.6; 621.383 ; 681.3,

В.І. МАЛІНОВСЬКИЙ

ОЦІНКА ВПЛИВУ ФАКТОРІВ ПЕРЕДАЧІ НА ІНФОРМАЦІЙНІ СИГНАЛИ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЯХ В СКЛАДІ БІНАРНИХ ПРОВІДНИКІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛЕП

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

Анотація. В роботі розглянуто і приведено матеріали окремих досліджень, впливу факторів електричних полів та температури на оптичний світловий сигнал у волоконно-оптичних структурах ліній зв'язку, які працюють в складі ЛЕП (бінарний провідник, кабель ЛЕП із ВОЛЗ) та/або об'єднано та/або чи сумісно із лініями електропередачі високої напруги із підвісом ВОЛЗ до провідників ЛЕП безпосередньо.

Ключові слова: волоконно-оптичні лінії зв'язку(ВОЛЗ), волоконно-оптичні системи, лінії електропередачі (ЛЕП), дисперсія, оптичне волокно(ОВ), бінарні провідники, нелінійні ефекти (НЕ).

Abstract. The paper reviews and presents materials from individual studies, and presents materials from studies of the influence of electric fields on the optical light signal in fiber-optic structures of communication lines that operate as part of (binary conductor, power line cable with FOLS) or combined and/or compatible (with FO lines sub-suspension) with high-voltage power lines.

Key words: fiber-optic (FO), communication lines (CL), fiber-optic systems, power transmission lines, dispersion, optical fiber (OF), binary conductors, nonlinear effects (NE).

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-331-339

ВСТУП

В наш час для задач комунікації та транспорту даних широко використовуються волоконно-оптичні лінії зв'язку, які працюють в складі магістральних ліній зв'язку у бінарних провідниках і високовольтних комбінованих структурах, в конструкціях кабелів ЛЕП із ВОЛЗ [1] об'єднано та/або сумісно із лініями електропередачі високої напруги (із підвісом ВОЛЗ до провідника ЛЕП). Такі структури, відомі як кабелі ЛЕП із ВОЛЗ або бінарні провідники [2, 3] широко використовуються для магістрального зв'язку та організації високошвидкісних каналів передачі інформації (10-200GE) по провідникам магістральних та регіональних ЛЕП. Також, часто вони використовують паралельно розміщені оптичні волоконні канали для захищеної передачі даних та сервісної інформації (телеметрії та/або телекерування) в енергетичних системах.

Оскільки оптоволоконні кабелі є діелектричними провідниками, на них фактично не впливає високонапружене електричне поле силової частини ЛЕП (із напругою 10-750кВ і вище, та із напруженістю > 200-1000В/см²), а також й інші фактори передачі. Також це дуже зручно із точки зору конструювання і проектування, що дозволяє зменшувати кількість комунікацій, водночас підвищуючи безпеку і забезпечуючи захист передачі даних і обмежений доступ до оптичних провідників.

Подібні технології були описані в багатьох наукових роботах [4-7], в т.ч. в наукових роботах видатного, але вже покійного вченого ВНТУ проф. Кожем'яки В.П. [8-10] із акцентом на використання бінарних провідників при побудові геоінформаційно-енергетичних мереж і каналів.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Структуру каналів на основі бінарного провідника показано на рис.1. та рис.2.

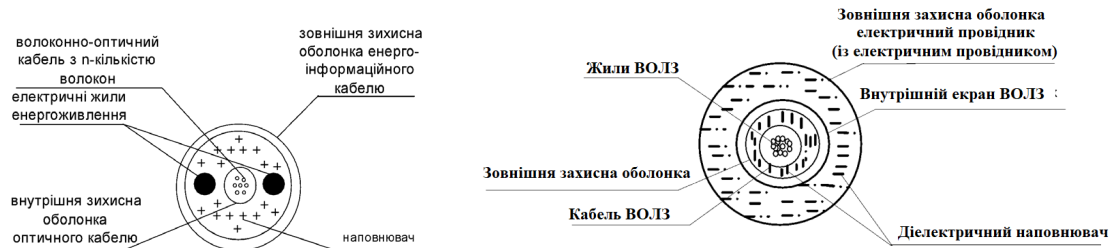


Рисунок 1 – Конструкції інформаційно-енергетичного бінарного провідника на базі ВОЛЗ та високовольтних каналів в складі ЛЕП і Smart Grid(розумних електромереж)

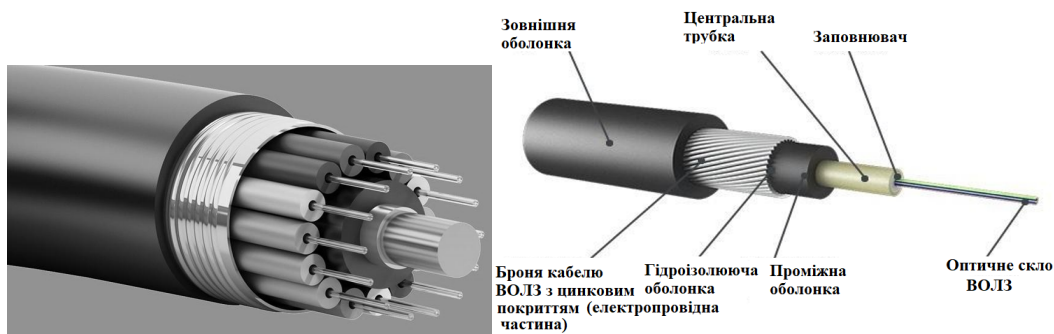


Рисунок 2 – Структура і поперечний переріз бінарного провідника із ВОЛЗ

Канали на основі бінарних провідників (інформаційно-енергетичні канали) являють собою кабельну структуру, до складу якої входять об'єднані під захисною оболонкою оптичні волокна і струмонесучі жили на основі металевого провідника електроенергії. Такі провідники і кабелі часто виготовляються сучасною промисловістю у вигляді закінченої кабельної продукції, так і у вигляді комбінованих структур (в яких до струмонесучої електричної лінії знизу прикріплюють діелектричний волоконно-оптичний кабель). На рис.3 показано вигляд реальних кабелів ЛЕП із об'єднанням із ВОЛЗ.

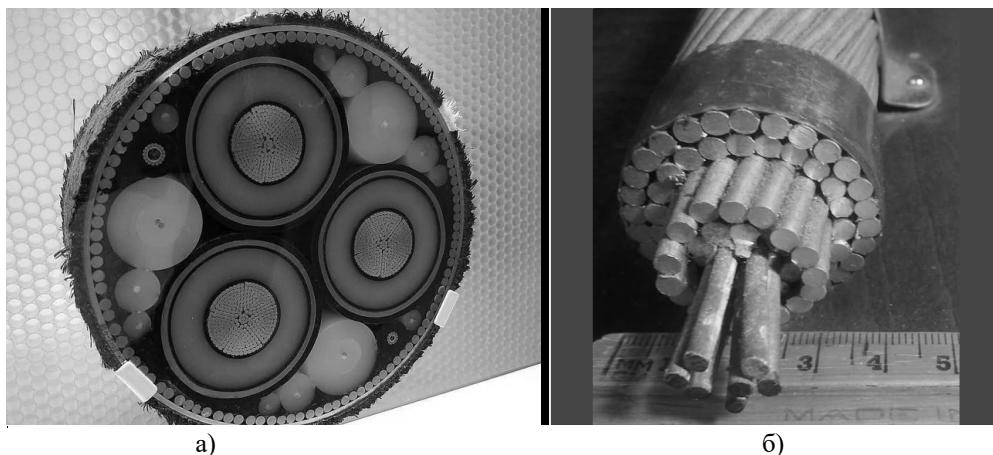


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд реальних кабелів ЛЕП із ВОЛЗ: а) – 150-220кВ ЛЕП 3ф; б) – 110кВ ЛЕП 1ф

Вони знаходять застосування як у ЛЕП високої напруги (10-750кВ), так і у лініях порівняно не високої напруги (0.4 - 10кВ), і дозволяють ефективно вирішувати задачі передачі як інформаційних потоків на високих швидкостях волоконно-оптичним каналом (100Мбіт/с - 200Гбіт/с), так і задачі передачі електроенергії їх живлення (10-750кВ, 100-1000КВА і більше).

Але, не зважаючи на "інертність" і "гальванічну нейтральність" світлових потоків до дії електричних і магнітних полів, все ж таки залишається відкритим і не до кінця дослідженим вплив

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

електричного поля на оптичний сигнал в інформаційних каналах саме у оптичних середовищах із проявом окремих явищ, що можуть виникати і спричиняти вплив на основні характеристики передачі інформаційного каналу.

Метою статті є дослідження і оцінка впливу електричного поля та інших факторів (таких як температура) в складі бінарного провідника на інформаційні оптичні сигнали у ОВ ВОЛЗ.

ПРОБЛЕМИ ВРАХУВАННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРІВ У ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ КАНАЛАХ В СКЛАДІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ ВОЛЗ

Хоча вважається, що світловий потік є “інертним” і нейтральним до впливу полів, ряд досліджень [7, 9-13] свідчать про вплив нелінійних ефектів та інших явищ на сам процес проходження світлового випромінювання саме через матеріальні оптичні середовища. Вплив електричного поля на оптичний сигнал все ж таки існує [7,10, 11, 14, 15] і проявляється у вигляді нелінійних ефектів безпосередньо в самому оптичному середовищі, якщо воно знаходиться в самому цьому полі. Тому також постає проблема і перспективи дослідження цього впливу, оскільки в магістральних провідниках при високій швидкості будь-які спотворення повинні бути вивчені, досліджені і обов’язково враховані на практиці при проєктуванні таких ліній. Будь які спотворення оптичному сигналу і впливи, що можуть вплинути на швидкість і якість передачі інформації у ВОЛЗ повинні бути враховані у ВОЛЗ.

Як показують дослідження [7-8, 10-11, 14-16], на оптичний сигнал у оптичному волокні (зокрема в інформаційно-енергетичних каналах)можуть впливати декілька чинників, зокрема: напруженість електричного поля, викликаючи ефект Керра (КЕ) і ефект фазової крос-модуляції (ФКМ) [7, 10, 14-15]; вплив температури середовища, тобто самого оптичного волокна (його серцевини), за рахунок впливу і нагрівання струмонесучих частин бінарних провідників ЛЕП; вплив звукових хвиль та вторинних явищ.

Останній чинник фактично є незначним і не потребує значного розгляду в силу того, що оптичні серцевини і оптичні середовища у ВОЛЗ в складі бінарного провідника досить добре захищені від звукових і вібраційних хвиль металевим повивом/зовнішнім струмонесучим тросом, що не дозволяє хвилям вплинути на оптичне середовище оптичних сигналів.

Залишаються перші два явища. У роботах [7, 14-15] автором раніше було досліджено в основному вплив оптичних складових високої інтенсивності на суміжні спектральні канали, які поширюються спільно в одному середовищі. Але для умов бінарного провідника із ВОЛЗ-лінією в середині або розташованою поряд в околі струмонесучої жили із високим значенням напруженості електричного поля E , умови дещо інші і прояв самого фактору впливу теж буде іншим. Але принцип впливу і сама природа нелінійних ефектів є подібними: - основний вплив чинять нелінійні ефекти Керра, і ФКМ,ФСМ що полягає у впливі і модифікації світлового поля в середовищі через наявну напруженість зовнішнього електричного поля по формулам (1), (2). Це буде проявлятися у зміні ефективного радіусу серцевини (2), появі і збільшенні додаткового копоненту нелінійної дисперсії τ_{NE} . В результаті цього буде змінюватись ефективні: оптичний шлях і реальна ефективна площа перерізу світлового потоку в серцевині оптоволокна, в результаті це спричинить до супутньої зміни фази оптичного сигналу (до її збільшення, як правило), що на практиці буде проявлятися у виникненні деякого зсуву (4) і появи додаткових уширень тривалостей імпульсів сигналів(за рахунок копоненту нелінійної дисперсії τ_{NE}). Тому саму мат. модель для аналізу впливу електричного поля може вважатись попередньо базовою при розгляді явищ впливу електричного поля на оптичний сигнал у в серцевині ОВ і апарат для аналізу. Це також знаходить підтвердження в інших роботах [16-19].

ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ОПТИЧНИЙ СИГНАЛУ У ВОЛЗ В СКЛАДІ ЛЕП

В роботах [7, 14] показано, що вплив явища нелінійної взаємодії може бути описаний нелінійним ефектом Керра, що проявляється в оптичному середовищі ВОЛЗ в результаті впливу електричного поля - через ефекти ФКМ та ФСМ (ефекти фазової само-модуляції та фазової крос-модуляції).

У [7, 14-15] також показано, що рівні оптичних потужностей є сталими відносно нескінченно малого часового проміжку $[0, t]$, що значно більший за період напруженості електричного поля E_j , це говорить про те, що у першому наближенні квадрат напруженості електричних полів в енергетичних каналах умовно можна прирівняти до ототожненого рівня інтенсивності енергії і виразити через потужність, тобто: $E_j^2 \sim k_{ji}I_j \sim k_{ji}P_j/S_{ef}$, $E_j^2 = k_{ji}I_j = k_{ji}P_j/S_{ef}$; – квадрат напруженості електричного поля, що умовно чисельно оцінюється його інтенсивністю, тобто $E_j^2 \approx I$, k_{ji} – коефіцієнт відповідності.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Показник заломлення сердцевини ОВ ВОЛЗ стає в такому випадку функцією від інтенсивності електричного поля виду:

$$n_{core}(E) = n_{0core} + \Delta n_{core} = n_{0core} + n_2 n_{core}(E^2) = n_{0core} + n_2 n_{core}(I) \quad (1)$$

де n_2 – нелінійний показник заломлення (для ОВ на основі кварцу $n_2 = 2,2 - 3,6 \cdot 10^{-20}$ м²/Вт), як це показано автором у [7].

Також, у дослідженні [7, 14-15] автором показано, що виникають 3 основних нелінійних ефекта, що впливають на фазу сигналу: 1) фазова самомодуляція (ФСМ); 2) фазова крос-модуляція (ФКМ); 3) нелінійний ефект Керра. Для каналів у дослідженні [7], зокрема були досліджені суто оптичні канали ВОІЕК, впливи ФКМ/ФСМ відбувається зі сторони оптичних сусідніх енергетичних каналів і є, як показано, незначним [7]. Вплив на інформаційні сигнали з боку енергетичних складових обумовлений проявом ФКМ та ефектом Керра, що проявляється у нелінійному набігу фази оптичного поля інформаційного спектрального каналу λ_i , нелінійній зміні ефективної площі і показника заломлення сердцевини $n_{core}(E)$ що наведений полем енергетичного λ_j :

$$\Delta \phi_{NL} = 2\gamma z P_j = 2\gamma z E_j^2 S_{ef} \quad (2)$$

де E_j – усереднена напруженість електричного поля сусіднього енергетичного електропровідника ЛЕП каналу; γ – нелінійний коефіцієнт, $\gamma = \chi^3 n^2$. χ^3 – коефіцієнт, що отримав назву коефіцієнта кубічної або квадратичної нелінійності $\chi = \chi^3$ [7]; $\chi = \chi^2$ [7, 10-11] в галузі нелінійної оптики; S_{ef} – ефективна площа сердцевини ОВ; z – довжина ділянки нелінійного впливу; $\Delta \phi_{NL}$ – величина зсуву фази.

Окрім того спостерігається ще й зменшення ефективного діаметру зони світлового поля в поперечному перерізі сердцевини ОВ, що займає світловий потік (область хвилі), враховуючи залежність деяких величин інтенсивності від напруженості електричного поля по закону Керра $I = f(E^2)$:

$$n_{core}(I) = n_{0core} + \Delta n_{core} = n_{0core} + n_2 n_{core}(k_j E^2), \quad (3)$$

де, E – напруженість електричного поля; k_i – коефіцієнт узгодженості, який має квадратичний характер. Слід відмітити, що у роботах [7, 14-15], в яких розглядалось суто оптичний вплив і крос-оптичні впливи і нелінійні ефекти, які ними спричинені – із самого початку було зроблене спрощення, що квадратична напруженість поля E^2 була умовно наближена до інтенсивності світлової хвилі, що відповідає умовам оптичних хвиль високої інтенсивності у спец. каналах, таких як ВОІЕК, де поряд із оптичними інформаційними потоками низької інтенсивності передаються ще й енергетичні, із високою інтенсивністю а й високою відповідно напруженість ел. поля, де можуть бути застосовані правила ототожнювання квадратичної залежності електричного поля і світлової хвилі її макс. потужності [7, 14]. В умовах, класичного впливу тільки електричного поля на оптичний інформаційний сигнал порівняно слабкої потужності ($P_{opt} = 1..10$ мВт) працює класичне явище і традиційна формула по закону Керра:

$f(I) = n_0 + n_2 f(n_{core}, E) \gg n_0 + n_2 E$, або за формулою (3). Це спрощує опис для випадку впливу зовнішнього поля і також показує, що основним явищем, який матиме вплив у волоконно-оптичних середовищах бінарних провідників буде саме ефекти фазової крос-модуляції (ФКМ) і Керра, що описується формулами (2), (3) і дозволить зрозуміти природу і врахувати фактор впливу, зі сторони ел. поля (ЛЕП) у каналах ВОЛЗ в складі бінарних провідників.

Інформаційну пропускну спроможність оптичних каналів визначають елементи, що її обмежують. Канал має інформаційну пропускну здатність S (біт/с), якщо він здатний передавати сигнал, що займає смугу частот ΔB і підтримувати на виході приймача відношення пікового значення сигналу до середньоквадратичного значення шуму P_s/P_N . У цьому випадку величина V визначається по формулі Шеннона [7-8]:

$$S = 2\Delta B \log_2 [1 + (P_s/P_N)] = 0,332 X_{sm} \Delta f \quad (4)$$

де P_s/P_N – відношення сигнал шум; ΔB – смуга частот; $X_{sm} = 20 \lg(P_s/P_N)$.

Швидкість передачі інформації прямопропорційна смузі частот Δf в якій вона передається і логарифмічно залежить від відношення сигнал–шум. Відношення сигнал–шум визначається ефективним рівнем шуму на вході підсилювача приймача. На практиці відношення A_s/A_N значно менше одиниці і його виражають у [дБ]. В аналогових системах відношення сигнал – шум визначає якість зв'язку, у цифрових системах – імовірність передачі помилки визначає окрім якості ще й стабільність. Корегуючи рівень впливів і відповідно рівень корисного сигналу, можна звести BER до мінімуму. В сучасних системах, наприклад, ця величина досягає значень $10^{-6} - 10^{-9}$, на швидкостях $10^9 - 10^{12}$ біт/с і високій стабільності.

По характеристикам дисперсії у ОВ, яка на пряму впливає на швидкість, в результаті впливу факторів які описані вище, можна стверджувати, що прояв ефекту зміни фази світлової хвилі через вплив ефектів Керра та ФКМ буде проявлятися у прояві додаткового компоненту матеріальної дисперсії $\Delta\tau_K$ (матеріально керівська дисперсія). Цей компонент обумовлений впливом середовища і внесенням додаткових затримок у розповсюдження сигналу у серевині ОВ в результаті впливу електричного поля, по законам Керівської нелінійності. Сумарний вплив проявляється у збільшенні матеріального компонента дисперсії за рахунок збільшення затримок: $\tau_{mat\ ef} = \tau_{mat} + \Delta\tau_K$. Також, можна показати, що компонент адитивної дисперсії може бути аналогічно доданий і представлений як компоненти нелінійної дисперсії: $\tau_{dNE\ ef} \rightarrow \tau_{NE\ Z} + \Delta\tau_K$. Сумарний вплив дисперсії показаний у роботах по ВОЛЗ [7, 14, 18]:

$$\tau^2 = \tau_{mat\ ef}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{mod}^2 + \Delta\tau_{dNE\ ef}^2;$$

$$\tau = \sqrt{\tau_{mat\ ef}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{mod}^2 + \Delta\tau_{dNE\ ef}^2} \quad (6)$$

де τ – загальне значення сумарної дисперсії у каналі ВОЛЗ; $\tau_{mat\ ef}$, τ_{chr} , τ_{mod} , $\tau_{dNE\ ef}$ – значення матеріальної, хроматичної, модової та нелінійної складових дисперсії.

Дисперсія - це розсіювання у часі спектральних або модових складових оптичного сигналу. Дисперсія приводить до збільшення довжини імпульса при проходженні по оптичному кабелю. Уширення імпульсів - має розмірність часу і визначається як квадратична різниця тривалостей імпульсів на виході і вході кабеля довжини L по формулі $\tau(L) = \sqrt{t_{вих}^2 - t_{вх}^2}$ [18] на рівні половини амплітуди імпульсів. Звичайно дисперсія нормується в розрахунку на 1 км, і вимірюється в пс/км. Дисперсія в загальному випадку характеризується трьома основними чинниками [18]:

- розходженням швидкостей поширення спрямовуючих мод (*міжмодовою дисперсією* τ_{mod}),
- направляючими властивостями світловодної структури (*хвильоводною дисперсією* τ_w),
- властивостями матеріалу оптичного волокна (*матеріальною дисперсією* τ_{mat}).

Дисперсія виникає внаслідок різної швидкості поширення в волокні різних мод, і має місце тільки у багатомодовому волокні. Уширення імпульсу через модову дисперсію характеризується часом наростання сигналу і знаходиться як різниця між самим більшим і самим меншим часом приходу у перетині світловода. Внаслідок квадратичної залежності від Δ , значення міжмодової дисперсії у градієнтного волокна значно менше, ніж у східчастого, що дає йому перевагу при використанні у лініях зв'язку. При описі багатомодового волокна, частіше користуються терміном *смуга пропускання*. При розрахунку смуги пропускання W можна скористатися формулою: $\Delta F = W = 0,44/\tau$ [МГц·км] [18].

Сумарний вплив дисперсії буде проявлятися у вигляді додаткового збільшення компонент дисперсії за рахунок додаткових значень адитивного компоента дисперсії $\Delta\tau_K$.

Вплив на кінцеву символну швидкість у ВОЛЗ буде складатись із додаткового збільшення кінцевого значення сумарної дисперсії τ_z . Символьна швидкість в каналі ВОЛЗ (біт/с), враховуючи смугу пропускання для ВОЛЗ буде складати:

$$S = 0.44/\tau \cdot \{N_i (\log_2[2+(P_s/P_N)^2])\} = 0.44/\sqrt{[\tau_{mat\ ef}^2 + \tau_{chr}^2 + \tau_{mod}^2 + \Delta\tau_{dNE\ ef}^2]} \cdot \{N_i (\log_2[2+(P_s/P_N)^2])\}. \quad (7)$$

Саме рівняння перетворення, яке описує оптичний сигнал, із урахуванням часових показників і довжини хвилі λ_i , матиме загальний вигляд неперіодичного інформаційного сигналу:

$$S(t, \lambda_i) = S_m[a_j] \cdot \sin(t \cdot a_j + j\Delta T \varphi \pm \Delta\varphi_{NL}) + N_e(t, \lambda_i), \quad (8)$$

де a_j – коефіцієнт, рівний 0 при передаванні логічного «0» та 1 при передаванні логічної «1»; S_m – амплітуда оптичного сигналу, що передається; $N_e(t, \lambda_i)$ – рівень адитивних завад в момент часу передавання t , який представляє собою вузькосмугові квазігармонічні коливання шумів із випадковими параметрами; $j\Delta T$ – фаза інформаційного сигналу, яка залежить від параметрів: ΔT – часового зсуву та фази φ , $\Delta\varphi_{NL}$ – фазо-часовий фактор зсуву інформаційного сигналу (нелінійний зсув фази), який викликаний впливом енергетичної складової електричного поля в струмонесучих каналах і визначається по формулі (2).

Модель (8) є базовою в представленні сигналів і такою, що може бути взята за основу для роботи моделювання впливів у інформаційних каналах ВОЛЗ на прямий сигнал із оптичними параметрами. Якщо розглядати вплив компонентів нелінійної дисперсії τ_z на символну швидкість в каналах ВОЛЗ (біт/с), у формулі (7), то слід врахувати покомпонентний вплив всіх компонентів дисперсії [18]:

$$\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2 + \tau_{\text{NE}}^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{\text{mat}} + \tau_{\text{w}})^2 + \tau_{\text{NE}}^2;$$

$$\tau_{\text{mod grad}}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L & L < L_c; \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{L \cdot L_c} & L > L_c \end{cases}$$

$$\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda LM(\lambda);$$

$$\tau_{\text{w}} = \Delta\lambda LN(\lambda);$$

$$\tau_{\text{NE}}^2 = \tau(L) = \sqrt{t_{\text{ВНХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2} \pm V(t_{\text{ВНХ}} \cdot k \cdot \Delta\phi_{\text{NL}})^2 \quad (9)$$

де, τ_{mod} – міжмодова дисперсія; τ_{mat} – матеріальна дисперсія; τ_{w} – хвильова дисперсія. Для ВОЛЗ із східчастим профілем оптоволока τ_{mod} обчислюється за формулою (9) рівняння 2, а для градієнтного волокна – за формулою (9) рівняння 3. Для градієнтного волокна довжина міжмодового зв'язку $L_c = 10^4$ м, для східчастого волокна $L_c = 1-5$ км; $\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda LM(\lambda)$ – матеріальний компонент дисперсії; $\Delta\lambda$ – ширина спектра; $M(\lambda)$ – питома матеріальна дисперсія; $\tau_{\text{w}} = \Delta\lambda LN(\lambda)$, де $N(\lambda)$ – питома хвильова дисперсія, $N(\lambda) = M(\lambda) = 0,5$ D; L_c – довжина міжмодового зв'язку (для східчастого волокна вона 5-7 км, для градієнтного – 10-15 км) [18].

Тобто, пропускна спроможність градієнтного хвильоводу в $2/\Delta$ разів вища, ніж у східчастого при однаковому значенні Δ .

У випадку, коли $L < L_c$ відсутній міжмодовий зв'язок. Коли ж $L > L_c$ починається процес взаємного перетворення мод і настає сталий режим. Спочатку дисперсія збільшується по лінійному закону, а починаючи з $L > L_c$ по квадратичному закону. Зміна закону дисперсії з лінійного на квадратичний пов'язана з неоднорідностями, що є у реальному волокні. Ці неоднорідності призводять до взаємодії між модами, і перерозподілу енергії усередині них. При $L > L_c$ усі моди у визначеній сталій пропорції присутні у випромінюванні.

Умовний попередній аналіз, в результаті моделювання впливу ел.поля на швидкість в каналах ВОЛЗ показано на рис. 4. Кількість каналів у ОВ ВОЛЗ позначена як N_i (де N_i – кількість логічних чи часових/спектральних TDM-WDM та ін.).

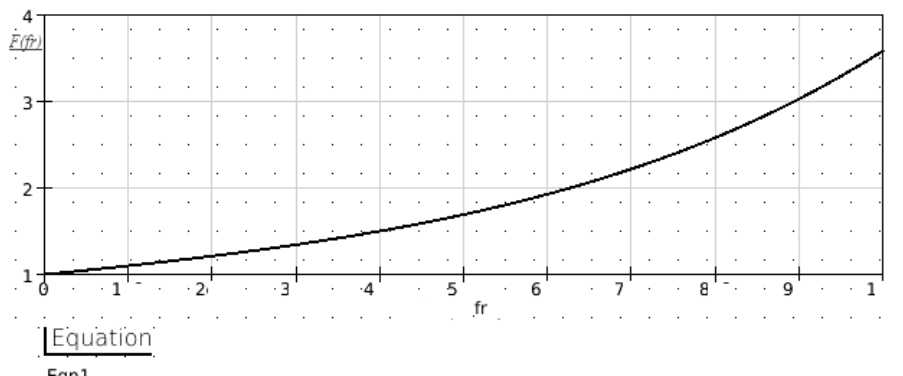


Рисунок 4 – Умовний вигляд інтегральної функції впливу (узагальнений інтегральний вплив $F(fr\{S\})$) на інформаційну символну швидкість в ЛЕП напругою 10кВ на ВОЛЗ ($n_1=1.13$; $n_2=1.03$) із 5-ма спектральними каналами (I.c.1=1310nm; I.c.2=1325nm; I.c.2=13245nm; I.c.2=1355nm; I.c.2=1385nm)

Підводячи підсумки по дослідженню впливу електричного поля високої напруженості в ЛЕП на оптичний сигнал у ВОЛЗ із блоку електричного поля у бінарних провідниках ВОЛЗ у складі ЛЕП, можна сказати, що якщо оптичні жили ВОЛЗ не знаходяться в середині самого металевого повиву ЛЕП (наприклад, рис.3,б)) і електричне поле присутнє в оптичній частині ОВ ВОЛЗ, то вплив буде проявлятися у збільшенні невеликих додаткових затримок у вигляді додакових дисперсій у ОВ, як це показано вище згідно формул (1) – (8) із врахуванням (9). Це буде призводити до незначного зниження символної швидкості передачі сигналів у ВОЛЗ за рахунок цих додаткових компонент дисперсії.

Якщо ж поле відсутнє за рахунок розміщення ВОЛЗ в середині металевого повиву бінарного провідника із утворення клітки Фарадея навколо ВОЛЗ, то впливи на оптичний сигнал будуть відсутніми.

**ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ СЕРЕДОВИЩА ОПТОВОЛОКНА
НА ОПТИЧНИЙ СИГНАЛУ У ВОЛЗ**

Іншим фактором, який може становити вплив на оптичний сигнал у ВОЛЗ в складі ліній ЛЕП в складі бінарних провідників є температурний вплив і група вторинних явищ, що пов'язана із ним.

Для елементарної теплоти dP , що виникає у одному спеклі з інтенсивністю інтерференційного максимуму I_{max} , який може поглинутись оптичним середовищем, виконується співвідношення:

$$dQ = \eta \cdot \tau_i \cdot I_{max} dP \quad (10)$$

При цьому теплота dQ , що утворюється буде пропорційна коефіцієнту поглинання матеріалу $\tau_{погл}$, елементарній тепловій (джоулевій) потужності dP , та η -коефіцієнту перетворення оптичного випромінювання в тепло.

Термодинамічне рівняння, яке описує тепловий режим волокна:

$$\frac{dT}{dt} = C_{n\text{core}} \tau \cdot \eta \frac{dI_{max}}{dt} \stackrel{=}{=} C_{n\text{core}} \tau \cdot \eta \frac{1}{S_{ef}} \frac{dP_{погл}}{dt} \stackrel{=}{=} C_{n\text{core}} \tau \cdot \eta \frac{1}{S_{ef}} \frac{1}{E(t)} \quad (11)$$

де $\frac{dQ}{dt}$ – приріст теплоти; $\frac{dI_{max}}{dt}$ – максимальна зміна оптичної інтенсивності хвилі, що продукується

зміною теплоти; $C_{n\text{core}}$ – коефіцієнт теплопровідності ОВ; $\tau_{погл}$ – коефіцієнт поглинання оптичного випромінювання; η – нормований коефіцієнт теплового приросту матеріалу ОВ; $E(t)$ – оптична енергія, яка передається.

При цьому буде відбуватись зміни показника заломлення, що пропорційні тепловому приросту $\frac{dT}{dt} < k_t \frac{dn_{core}}{dt}$, де k_t – коефіцієнт теплового розширення. Ці зміни зумовлюватимуть збільшення дисперсії волокна та оптичних втрат волокна згідно з загальною теорією волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Таким чином пропорційно із нагріванням активної зони серцевини ОВ відбувається і модуляція і збільшення втрат та зміна (як правило не значне зменшення швидкості) в каналі ОВ ВОЛЗ.

Це негативне явище, яке повинно бути враховане при проєктуванні ВОЛЗ в складі бінарного провідника ЛЕП і може виникати при нагріванні струмопровідної частини (енергетичний канал) бінарного провідника чи суміжної електропровідної лінії ЛЕП, або при перевищенні оптичної потужності P_j в каналі ВОЛЗ на якій це волокно розміщується і закріплюється.

Шляхами до стабілізації параметрів ОВ в складі ВОЛЗ бінарного провідника ЛЕП є:

- використання оптичного волокна із якомога меншим відсотком оптичних втрат і більш стабільними параметрами ОВ - наприклад кварцового скла SiO_2 чи іншого скловолокна (НЕ РОФ-пластикового волокна);

- використання матеріалу серцевини ОВ з меншим коефіцієнтом теплопровідності $C_{n\text{core}}$;

- оптимальний вибір вікон прозорості ОВ, у яких оптичні втрати на розсіювання та поглинання є найменшими $a \rightarrow a_{\min}$;

- забезпечення імпульсного режиму роботи оптичних лазерних джерел в складі SFP-модулів активної апаратури ВОЛЗ із більш низькими рівнями оптичної потужності (P_i) і із обов'язковим запасом оптичної потужності і межах допустимих норм $0 < P_j < P_{max}$ при спільній роботі і передачі даних по ОВ ВОЛЗ і при суміжному передаванням енергії живлення по електропровідній частині.

Тому матеріал ОВ має вибиратись максимально чистим, з максимально можливою витривалістю по густині оптичної потужності (променева міцність). Таким матеріалом є кварцове скло SiO_2 леговане іонами германію Ge або кремнію Si. Променева міцність такого кварцового скла порядку $2 \cdot 10^9 \text{Вт/см}^2$.

Взагалом при дотриманні нормальних умов роботи в межах допустимих робочих характеристик допустимі відхилення температури суттєво не зможуть вплинути на оптичний сигнал у ОВ. При окремих режимах роботи бінарних провідників в режимі нагрівання можуть спостерігатись стрибкоподібні впливи і різке збільшення оптичних втрат і погіршення характеристик оптоволоконна на окремих ділянках. Але суттєвих впливів це не повинно спричиняти в рамках всієї лінії ВОЛЗ.

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

ВИСНОВКИ

В статті розглянуто і досліджено процеси, що відбуваються в волоконно-оптичних структурах в складі спеціалізованих провідників, що працюють в лініях електропередачі. В роботі розглянуто і приведено матеріали окремих досліджень, наведено матеріали досліджень впливу окремих факторів передачі, таких як: електричне поле і температура на оптичні світлові сигнали у волоконно-оптичних структурах ліній зв'язку, які працюють в складі (бінарний провідник, кабель ЛЕП із ВОЛЗ) або об'єднано та/або сумісно (із підвісом ВОЛЗ до ЛЕП) із лініями електропередачі високої напруги. Було встановлено, що в результаті дії сильних електричних полів, а також в результаті впливів коливань температур може спостерігатись не значні впливи на світлові сигнали і характеристики оптичного волокна які проявляються зокрема у деякому сповільненні передачі даних (зменшення символічних швидкостей), а також збільшення оптичних втрат. Дані матеріали досліджень можуть бути використані і враховані при проектуванні і впровадженні на практиці магістральних волоконно-оптичних каналів передачі даних, які працюють в складі ліній електропередачі сумісно із ВОЛЗ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Стандарт СОУ НЕК 33.180.1-27:2023 Волоконно-оптичні лінії зв'язку по повітряних лініях електропередавання. Проектування та будівництво : [Електронний ресурс] / Протокол від 04.01.2023 № 01/2023. СОУ НЕК 33.180.1-27:2023//Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (ДП «НЕК «Укренерго»). - Режим доступу URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=103376
2. Оптичний зв'язок по лініях електропередач: [Електронний ресурс] / Матеріали електронної енциклопедії Wikipedia. - Режим доступу URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki>
3. Оптико-електронна геоінформаційно-енергетична система, як глобальний засіб гармонійного вирішення проблем розвитку цивілізації / В. П. Кожем'яко, С. С. Білан, О. В. Кожем'яко, А. В. Кожем'яко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2004. – № 2 (8), С. 5-10.
4. В. П. Кожем'яко, С. В. Дусанюк, Л. О. Волонтир. Методи моделювання геоінформаційно-енергетичної системи тотального тестування і оптимального управління науково-освітніми і бібліотечними ресурсами // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 1 (13), С. 169-174.
5. Аналіз сучасного стану розвитку геоінформаційно-енергетичних технологій / В. П. Кожем'яко, В. І. Малиновський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1, С. 86-99.
6. Аналітичний огляд та класифікаційний аналіз технологій сучасних об'єднаних інформаційних мереж на основі ліній передавання електроенергії / В. П. Кожем'яко, В. І. Малиновський, М. Г. Тарновський, Я. І. Ярославський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології . – Том 25. – № 1. – 2013, С. 100–116.
7. Малиновський В.І. Волоконно-оптичні канали для об'єднаного передавання інформації та енергетичного живлення / В.І. Малиновський, В.П. Кожем'яко // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010 – № 2(20), С. 244–255.
8. Осадчук В.С. Волоконно-оптичні системи передачі : [Навчальний посібник] / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук. — Вінниця: ВНТУ, 2005, 225с.
9. Педяш В. Математичне моделювання волоконно-оптичної системи передавання ОТН з модуляцією по інтенсивності // Вісник Хмельницького національного університету. – Том 317. – № 1. – 2023, С.162-166.
10. Agraval G. P. Nonlinear Fiber Optics. N.Y.: Acad. Press, 2013, 631p. – ISBN 0-12-045143-3.
11. Detlev Wolff. Powering Up. Improving materials and structure yields 120-W diode-laser bars / Wolff Detlev, Jenoptik Laserdiode GMBH // SPIE OE magazine, Vol. 50, No. 6, pp. 26 –28, Nov./Dec. 2005.
12. Кожем'яко В.П., Малиновський В.І. Моделі волоконно-оптичних інтерфейс-каналів геоінформаційно-енергетичних мереж // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2009. – №1(17), 2009, С. 179-193., ISSN 1681-7893.
13. Малиновський В.І. Технології інформаційного та енергетичного обміну в оптичних геоінформаційно-енергетичних мережах // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – №2(16),2008, С. 207-222., ISSN 1681-7893.
14. Лобода О. І. Оптична система виміру струму в умовах лінії електропередач високої напруги // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – Том 8. – № 2. – 2018. , С.2-11, URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/34>
15. Павлов В., Заболотна Н., Штофель Д., інш. «Реалізація лазерного волоконно-оптичного приладу для оцінювання тканинної мікроциркуляції », *Опті-ел. інф-енерг. техн.*, вип. 48, вип. 2, с. 205–211, Лист. 2024. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-205-211>
16. Лисенко Г. Л. Волоконна та інтегральна оптика. Ч.1. ; [навч. посіб.] / Г. Л. Лисенко. – Вінниця: ВДТУ, 1998. – 127 с.

REFERENCES

1. Standard SOU NEK 33.180.1-27:2023 Fiber-optic communication lines over overhead power lines. Design and construction: [Electronic resource] / Protocol dated 04.01.2023 No. 01/2023. SOU NEK 33.180.1-27:2023//State Enterprise "National Energy Company "Ukrenergo" (SE "NEC "Ukrenergo"). - Access mode URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=103376
2. Optical communication over power lines: [Electronic resource] / Materials of the electronic encyclopedia Wikipedia. - URL access mode: <https://uk.wikipedia.org/wiki>
3. Optical-electronic geoinformation-energy system as a global means of harmoniously solving the problems of civilization development / V. P. Kozhem'yako, S. S. Bilan, O. V. Kozhem'yako, A. V. Kozhem'yako // Optical-electronic information and energy technologies. – 2004. – No. 2 (8), pp. 5-10.
4. V. P. Kozhem'yako, S. V. Dusanyuk, L. O. Volontyr. Methods of modeling the geoinformation-energy system of total testing and optimal management of scientific, educational and library resources // Optical-electronic information and energy technologies. – 2007. – No. 1 (13), pp. 169-174.
5. Analysis of the current state of development of geo-information and energy technologies / V. P. Kozhem'yako, V. I. Malinovsky // Optical-electronic information and energy technologies. – 2008. – No. 1, pp. 86-99.
6. Analytical review and classification analysis of technologies of modern combined information networks based on electricity transmission lines / V. P. Kozhem'yako, V. I. Malinovsky, M. G. Tarnovsky, Ya. I. Yaroslavsky // Optical-electronic information and energy technologies. – Volume 25. – No. 1. – 2013, pp. 100–116.
7. Malinovsky V.I. Fiber-optic channels for combined information transmission and energy supply / V.I. Malinovsky, V.P. Kozhem'yako // Optical-electronic information and energy technologies. – 2010 – No. 2(20), pp. 244–255.
8. Osadchuk V.S. Fiber-optic transmission systems: [Textbook] / V.S. Osadchuk, O.V. Osadchuk. — Vinnytsia: VNTU, 2005, 225p.
9. Pedyash V. Mathematical modeling of the OTH fiber-optic transmission system with intensity modulation // Bulletin of the Khmelnytsky National University. – Volume 317. – No. 1. – 2023, pp. 162-166.
10. Agraval G. P. Nonlinear Fiber Optics. N.Y.: Acad. Press, 2013, 631p. – ISBN 0-12-045143-3.
11. Detlev Wolff. Power Up. Improving materials and structure yields 120-W diode-laser bars / Wolff Detlev, Jenoptik Laserdiode GMBH // SPIE OE magazine, Vol. 50, No. 6, pp. 26-28, Nov./Dec. 2005.
12. Kozhem'yako V.P., Malinovsky V.I. Models of fiber-optic interface channels of geoinformation and energy networks // Optical-electronic information and energy technologies. – 2009. – No. 1(17), 2009, pp. 179-193., ISSN 1681-7893.
13. Malinovsky V.I. Technologies of information and energy exchange in optical geoinformation and energy networks // Optical-electronic information and energy technologies. – 2008. – No. 2(16), 2008, pp. 207-222., ISSN 1681-7893.
14. Loboda O.I. Optical current measurement system in high-voltage power transmission line conditions // Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University. – Volume 8. – No. 2. – 2018. , P.2-11, URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/34>
15. Pavlov V., Zabolotna N., Shtofel D., et al. "Implementation of a laser fiber-optic device for assessing tissue microcirculation", Opt-el. inf-energ. tech., vol. 48, vol. 2, pp. 205–211, Nov. 2024. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-48-2-205-211>
16. Lysenko G. L. Fiber and integral optics. Part 1. ; [tutorial] / G. L. Lysenko. – Vinnytsia: VDTU, 1998. – 127 p.

Надійшла до редакції 10.06.2025р.

МАЛИНОВСКИЙ ВАДИМ ІГОРЕВИЧ – к.т.н., доцент кафедри захисту інформації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, [e-mail: vadmalinovsky@gmail.com](mailto:vadmalinovsky@gmail.com)

V.I. MALINOVSKY
**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TRANSMISSION FACTORS ON INFORMATION
SIGNALS IN FIBER-OPTICAL LINES AS A COMPOSITION OF BINARY CONDUCTORS OF
HIGH-VOLTAGE TRANSMISSION LINES**

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine