

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-24>

УДК 621.391

ПЕДЯШ Володимир

Міжнародний гуманітарний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4071-357X>

e-mail: vpedyash@gmail.com

МАЗУР Ганна

Міжнародний гуманітарний університет

<http://orcid.org/0000-0002-1420-4923>

e-mail: Anna2102@i.ua

РОЗЕНВАССЕР Денис

Міжнародний гуманітарний університет

<http://orcid.org/0000-0001-7254-8321>

e-mail: denysrozenvasser@gmail.com

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ДІЛЯНКИ 3R РЕГЕНЕРАЦІЇ ВОСП З ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ

В даній роботі наводяться результати дослідження якісних характеристик цифрового каналу ВОСП ОТН зі швидкістю передачі 264 Гбіт/с та модуляцією КАМ-16. Також досліджено вплив потужності сигналу на величину вірогідності помилки у оптичному каналі. Для отримання достовірних результатів, в середовищі MatLab, на основі математичної моделі обробки сигналу ВОСП, була розроблена відповідна імітаційна модель. З метою зменшення довжини тестової послідовності символів та вимог до обчислювальних ресурсів алгоритму, по вихідній послідовності символів КАМ-16 визначалося значення відносної помилки модуляції EVM та відповідна їй вірогідність помилки біта BER. Встановлено, що при використанні в приймачі декодера з гнучким рішенням (SD-FEC), довжина ділянки 3R регенерації оптичного каналу становить близько 1600 км.

Ключові слова: оптична система передавання, квадратурна модуляція, спотворення, оптичне волокно, регенерація

PEDYASH Volodymyr, MAZUR Hanna, ROZENVASSER Denys
International Humanitarian University

ESTIMATION OF THE 3R REGENERATION SECTION LENGTH OF THE OPTICAL SYSTEM WITH POLARISATION MULTIPLEXING

The development of a digital society is directly linked to the continuous improvement and expansion of telecommunications networks. The modern world is in the process of a significant transition to the digital paradigm, where information and communication have become the basis for further development. Today, fibre-optic transmission systems (FOTS) provide reliable real-time communication and are the core of transport and access networks. In modern optical transport systems, a combination of several methods is used to increase the spectral efficiency of the optical signal. This paper presents the results of studying the quality characteristics of the digital channel of an OTH FOCS with a transmission rate of 264 Gbps and QAM-16 modulation. It is known that in fiber-optic networks, the signal quality is affected not only by the additive noise of optical amplifiers, but also by linear (attenuation and dispersion) and nonlinear signal distortions in the optical fibre. Therefore, this paper also investigates the effect of signal power on the error probability in an optical channel. To obtain reliable results, a corresponding simulation model of the transmission system was developed in MatLab, On the basis of the mathematical model of the signal processing. In order to reduce the length of the test sequence of symbols and the requirements for the algorithm's computing resources, the value of the error vector magnitude EVM and the corresponding bit error probability BER were determined from the output sequence of QAM-16 symbols. It was shown that when a flexible decision decoder (SD-FEC) is used in the receiver, the length of the 3R regeneration section of the optical channel is about 1600 km.

Keywords: fibre optic transmission system, quadrature modulation, distortion, optical fibre, signal regeneration

Постановка проблеми у загальному вигляді та

її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

На сьогоднішній день, впровадження цифрової економіки залишається дуже актуальним та важливим процесом. Цифрові технології вже змінюють спосіб, яким ми живемо, працюємо та спілкуємося, і їх вплив на наше суспільство та економіку зростає з кожним днем. Відповідно, актуальність розширення набору телекомунікаційних послуг та пропускної здатності цифрових систем передавання зростає з кожним днем. Залежність суспільства від інформації та цифрових комунікацій стає все більшою, і динамічний розвиток технологій спонукає операторів зв'язку до розширення набору послуг та пропускної здатності телекомунікаційних мереж.

Основним типом систем зв'язку для сучасних телекомунікаційних мереж є волоконно-оптичні системи передавання (ВОСП), які здатні забезпечити ефективну та стійку інфраструктуру зв'язку. Зменшення вартості середовища поширення (оптичного волокна), оптичних та електронних компонентів для станційного обладнання призвело до їх широкого застосування як на транспортних мережах, так і на мережах доступу.

Аналіз останніх досліджень

Проблема збільшення швидкості передавання ВОСП вирішується комбінуванням кількох методів підвищення ефективності показників системи зв'язку [1-3]. По перше, збільшується кількість оптичних каналів системи, що призводить до розширення робочого спектру частот лінійного сигналу. По друге, в сучасних ВОСП використовуються більш ефективні модуляційні формати - фазова модуляція (ФМ) чи квадратурна амплітудна модуляція (КАМ). Це дозволяє використовувати багатопозиційне кодування і передавати кілька інформаційних біт даних за один символ, що суттєво підвищує показники ефективності передачі. По третє, оптичне волокно є хвилеводом, який здатний передавати електромагнітні сигнали в двох ортогональних площинах поляризації, що вдвоє збільшує пропускну здатність оптичного каналу системи передавання [4].

Сучасні ВОСП оптичної транспортної ієрархії (ОТН) є основою для створення потужних оптичних мереж, які забезпечують організацію високошвидкісних оптичних каналів для передавання цифрових сигналів зі стандартизованими швидкостями від 2,7 (OTU1) до 112 Гбіт/с (OTU4). В останніх модифікаціях ВОСП використовуються транспондери для передавання цифрових сигналів з інформаційною швидкістю 200 Гбіт/с і вище, що передбачає передавання кількох потоків OTU4 в одному оптичному каналі. В документації до транспондерів ВОСП наводяться їх основні технічні параметри: діапазон рівнів потужності вихідного сигналу, метод модуляції та корегуючого кодування, чутливість приймача, тощо. Одним із важливих показників ВОСП є довжина ділянки 3R регенерації, яка також залежить також і від характеристик лінійного тракту: шум-фактору оптичного підсилювача, лінійних та нелінійних спотворень оптичного волокна.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є визначення довжини ділянки 3R регенерації когерентної ВОСП з поляризаційним мультиплексуванням.

Виклад основного матеріалу

Для вірного обрання методу дослідження спочатку виконаємо аналіз особливостей поширення сигналу в середовищі розповсюдження ВОСП. Розповсюдження сигналу в оптичному волокні описується відомим рівнянням Шредінгера, скорочена форма якого має наступний вигляд [4]

$$j \frac{dA}{dz} = -\frac{j}{2} dA + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{d^2 A}{dT^2} - \gamma |A|^2 A, \quad (1)$$

де A – огибаюча оптичного сигналу; T – час; α , β_2 та γ – відповідно загасання, хроматична дисперсія та нелінійність середовища розповсюдження.

Лінійні спотворення сигналу (загасання та хроматична дисперсія) на сьогодні не є перешкодою, що суттєво обмежують довжину ділянки регенерації, оскільки усуваються оптичним підсилювачем та пристроєм компенсації хроматичної дисперсії відповідно. В останніх поколіннях транспондерів ВОСП виконується повністю цифрова обробка сигналів в тракці прийому, тому реалізується ефективно усунення дисперсійних спотворень за допомогою методів цифрової корекції. Відповідно, найбільш суттєвою перешкодою до збільшення довжини ділянки регенерації є нелінійні завади.

Фазова самомодуляція призводить до фазового зсуву вихідного оптичного сигналу, який залежить від напруженості електричного поля вхідного сигналу [5]. Явище перехресної фазової модуляції полягає в тому, що сигнал одного каналу ВОСП модулює фази сигналів у сусідніх каналах. Перехресна фазова модуляція залежить від потужності вхідного оптичного сигналу, знаку та модуля хроматичної дисперсії. Чотирихвильове змішування проявляється у формуванні на виході ОВ нових спектральних компонентів оптичного сигналу з частотами, які відсутні у вхідному сигналі. Для зменшення прояву перелічених нелінійних ефектів використовуються наступні методи: зменшення потужності оптичного сигналу транспондера та використання ОВ з більшою ефективною площею серцевини.

Досліджувати якісні характеристики ВОСП можливо аналітичним або імітаційним методом [6]. З врахуванням вищенаведених особливостей середовища розповсюдження, використання аналітичного методу дослідження потребує суттєвого спрощення моделі ВОСП (нехтування нелінійними спотвореннями сигналу), що призведе до збільшення похибки у визначенні якості оптичного каналу. Більш достовірним є метод імітаційного моделювання, який має більшу достовірність і дозволяє врахувати всі спотворення сигналу у лінійному тракці ВОСП [7].

В даній роботі наведено результати досліджень MatLab моделі каналу ВОСП ОТН, побудованій згідно функціональної схеми та технічних характеристик транспондера FlexRate 200G для платформи MICROSENS MSP3000 [8]. Цей транспондер призначений для організації дуплексного оптичного каналу з лінійною швидкістю передавання 264,536 Гбіт/с. На вхід тракту передачі поступає два стандартні цифрові

потоки OTU4 з інформаційною швидкістю по 100 Гбіт/с кожен, які упаковуються в пропрітарний цикл передавання 200G (рис. 1). Він містить службову та інформаційну частини, а також дані надлишкового кодування для послідувочого виправлення помилок в приймальній частині транспондера. Далі сформований цифровий потік розподіляється на дві частини, кожна з яких обробляється в маппері (формувачі багатопозиційних символів КАМ-16). На виході маппера та блока цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) формується два потоки символів КАМ-16 зі швидкістю 33,067 Гсимв/с кожен. Ці послідовності символів поступають на блок оптичних модуляторів, які формують оптичні сигнали горизонтальної (H) та вертикальної (V) поляризації. В тракці прийому транспондера виконується обробка сигналу за зворотнім алгоритмом перетворення оптичного сигналу 200G в два цифрові потоки OTU4.

Імітаційне моделювання ОВ доцільно виконувати методом Фур'є з розщепленням по фізичним факторам [1, 9]. Класичний варіант даного методу, що відповідає виразу (1) відповідає неполяризованому оптичному сигналу. Але оскільки в даній роботі досліджується ВОСП з поляризованим оптичним сигналом, в даній роботі використовувався удосконалений варіант даного методу із використанням MatLab бібліотеки SSPROP [10].

Структурна схема розробленої MatLab моделі оптичного каналу (рис. 2) включає блоки передавача, волоконно-оптичного лінійного тракту (ВОЛТ) і приймача. Основні характеристики функціональних блоків наведено у табл. 1. Передавач ВОСП містить два генератори псевдовипадкової послідовності символів (ГПВП) та два модулятори КАМ-16. На їх виході формуються оптичні сигнали $E_x(t)$ та $E_y(t)$ у двох взаємно ортогональних площинах поляризації.

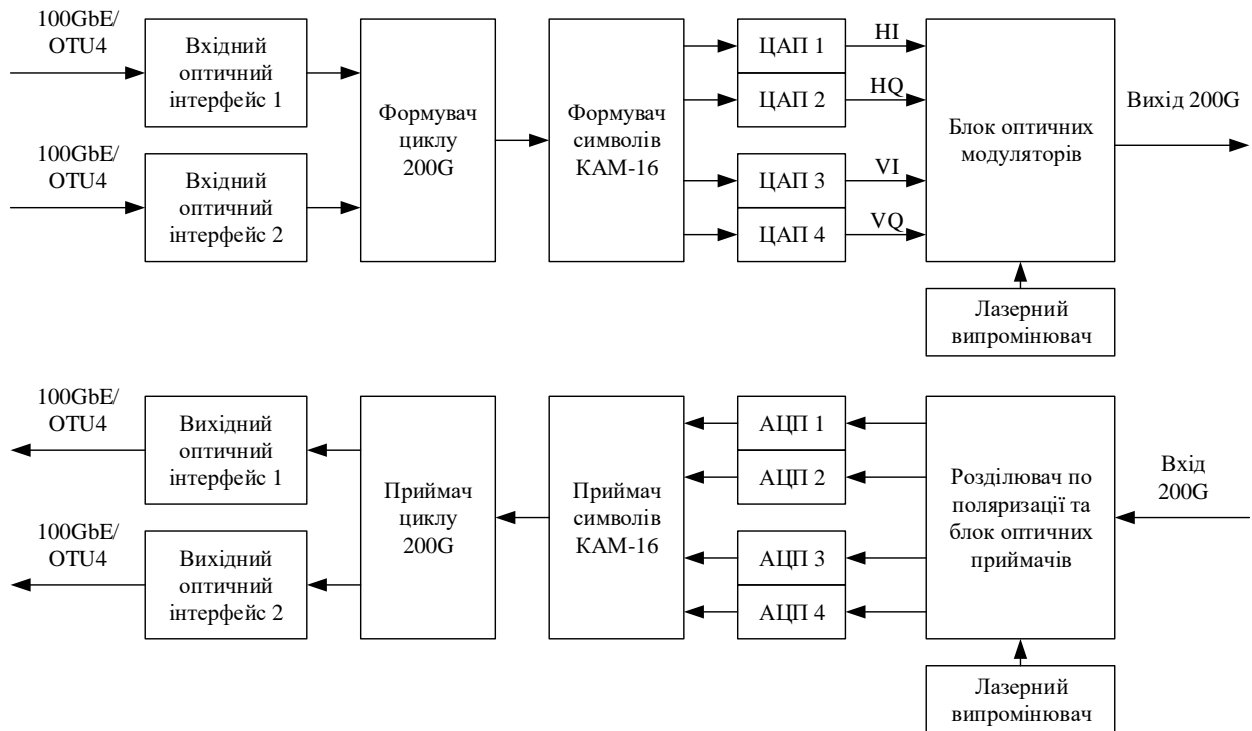


Рис. 1. Функціональна схема транспондера FlexRate 200G для мультисервісної платформи MICROSENS MSP3000

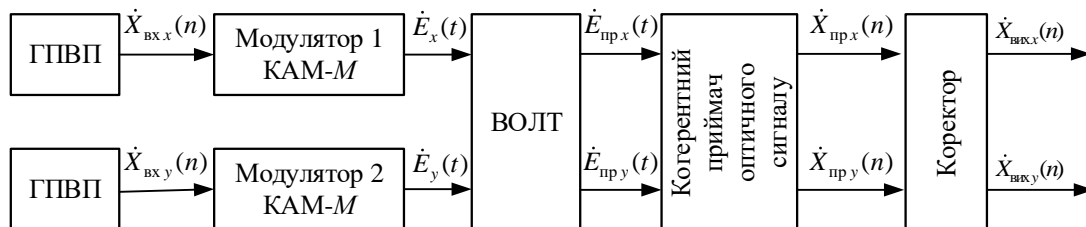


Рис. 2. Структурна схема моделі каналу ВОСП з КАМ модуляцією та поляризаційним мультиплексуванням

Таблиця 1

Характеристики MatLab моделі каналу ВОСП з КАМ модуляцією

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Швидкість передавання $V_{\text{пер}}$	264,536 Гбіт/с	Довжина підсилювальної секції $L_{\text{секц}}$	100 км
Тип модуляції	КАМ-16	Шум-фактор оптичного підсилювача nf	6 дБ
Кількість тестових символів	20000	Смуга частот каналу ВОСП	100 ГГц
Символьна швидкість $V_{\text{симв}}$	33,067 Гсимв/с	Смуга пропускання ФНЧ приймача	0,75 $V_{\text{симв}}$

Волоконно-оптичний лінійний тракт (ВОЛТ) складається з $N_{\text{секц}}$ однакових оптичних секцій. Кожна з них включає середовище поширення завдовжки $L_{\text{секц}}$, оптичний підсилювач на базі волокна, легованого ербієм та компенсатор хроматичної дисперсії. До вихідного сигналу ВОЛТ додавався шум посиленого спонтанного випромінювання, який відповідає шум-фактору оптичного підсилювача.

Когерентний приймач оптичного сигналу виконує функцію демодулятора з поділом з поляризації [11]. Компенсація амплітудних і фазових спотворень сигналу в середовищі поширення проводиться в блоці коректора. Для кожної з вихідних послідовностей символів $\dot{X}_{\text{вих},x}(n)$ та $\dot{X}_{\text{вих},y}(n)$ розраховувалися показники якості оптичного каналу – відносна помилка модуляції EVM та ймовірність помилки біта BER (рис. 3).

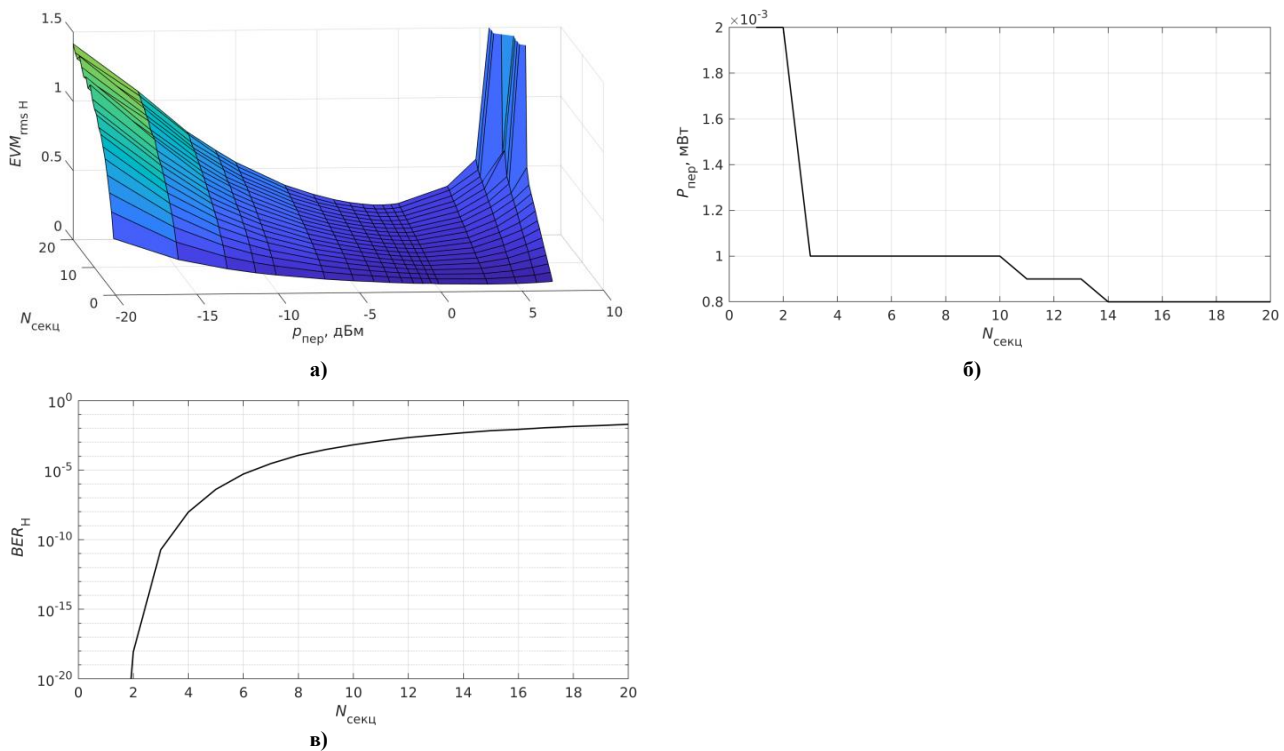


Рис. 3. Результати моделювання каналу ВОСП з КАМ-16 та поляризаційним мультиплексуванням (підканал горизонтальної поляризації): а) відносна помилка модуляції EVM; б) оптимальна потужність сигналу; в) ймовірність помилки BER

В ході досліджень визначалася залежність відносної помилки модуляції $EVM(P_{\text{пер}}, N_{\text{секц}})$ і було встановлено, що якісні характеристики цифрових потоків горизонтальної та вертикальної площини поляризації оптичного сигналу в каналі практично однакові. Тому в подальшому тексті роботи наведено результати дослідження потоку даних для горизонтальної поляризації ($\dot{X}_{\text{вих},x}(n)$). Також було встановлено, що для фіксованої протяжності ВОЛТ (числа секцій $N_{\text{секц}}$) залежність $EVM(P_{\text{пер}})$ має екстремум у вигляді мінімуму (рис. 3, а), якому відповідає оптимальне значення потужності сигналу передавача (рис. 3, б) та мінімальна ймовірність помилки (рис. 3, в). Збільшення протяжності ВОЛТ призводить до накопичення нелінійних перешкод фазової самомодуляції, тому оптимальне значення потужності передавача слід зменшувати з 2 до 0,8 мВт одну площину поляризації.

До сучасних ВОСП висувається вимога щодо припустимої ймовірності помилки біта $BER_{\text{вих}} < 10^{-12}$ на виході оптичного каналу. Тому цифровий сигнал транспондером ВОСП передається за допомогою коду з виправленням помилок, який у разі використання декодерів з м'яким рішенням SD-FEC припускає роботу каналу при входному $BER_{\text{вх}} < 10^{-2}$ [12]. Виходячи з цієї умови, за кривою вірогідності помилки на вході декодера (рис. 3, в) було встановлено, що довжина ділянки регенерації складе 1600 км (16 секцій по 100 км).

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Підсумовуючи проведені дослідження, можна стверджувати, що поставлене в роботі завдання з визначення довжини ділянки 3R регенерації ВОСП з поляризаційним мультиплексуванням виконано повністю. З врахуванням впливу лінійних та нелінійних спотворень оптичного сигналу в середовищі розповсюдження ВОСП, було обрано метод імітаційного моделювання. На основі функціональної схеми та технічних характеристик транспондера FlexRate 200G зі швидкістю передавання 264,536 Гбіт/с для мультисервісної оптичної платформи MICROSENS MSP3000 була розроблена відповідна імітаційна модель каналу ВОСП.

В якості критерію оцінки якості оптичного каналу була обрана відносна помилка модуляції *EVM*, що безпосередньо пов'язана з вірогідністю помилки в цифровому каналі *BER*. Проведені дослідження показали, що для покращення характеристик каналу слід оптимізувати потужність сигналу транспондера на вході ВОЛТ. Встановлено, що при використанні в приймачі декодера з гнучким рішенням, довжина ділянки регенерації становитиме близько 1600 км.

Література

1. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / Agrawal G.P. – New York: Wiley-Interscience, 2002. – 580 p.
2. Kaminow, T. Li, AE Willner. Optical Fiber Telecommunications VB: Systems and Networks. New York: Academic Press, 2008. 916 p.
3. Pedyash, V., Mazur, A., Rozenvasser, D. (2021). Evaluation of Quality Parameters of an Intensity-Modulated Optical Transmission System. In: Vorobiyenko, P., Ilchenko, M., Strelkovska, I. (eds) Current Trends in Communication and Information Technologies. IPF 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 212. Springer, Cham.
4. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics / Agrawal G.P. - New York: Academic Press, 2013. – 631 p.
5. Педяш В.В. Дослідження математичної моделі оптичного волокна // Вісник Хмельницького національного університету, Том 1, No1, 2023 (317). - С. 167-173.
6. Стеценко І.В. Моделювання систем: навч. посіб. / Стеценко І.В. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
7. Педяш В.В. Моделювання каналу оптичної системи передавання ОТН з квадратною амплітудною модуляцією // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2022. – № 5. – С.61-65.
8. FlexRate 200G Muxponder (MS430943/4M) URL: https://www.microsens.com/fileadmin/files/uploads/products/1_public/0_DAT/4_OTN/DAT422b_MS430943-4M_MSP3000-200G-FFI-Module_EN_1019.pdf
9. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / Shaw J.K. – Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – 103 p.
10. SSPROP. URL: <https://photonics.umd.edu/software/ssprop/>
11. Stephen A.B. Optical communication receiver design / Stephen A.B. - London: SPIE Publications, 1997. – 337 p.
12. Alvarado A., Agrell E., Lavery D., Maher R., Bayvel P. Replacing the soft-decision FEC limit paradigm in the design of optical communication systems. Journal of lightwave technology. 2015. Vol. 33, No. 20. P. 4338-4352.

References

1. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / Agrawal G.P. – New York: Wiley-Interscience, 2002. – 580 p.
2. Kaminow, T. Li, AE Willner. Optical Fiber Telecommunications VB: Systems and Networks. New York: Academic Press, 2008. 916 p.
3. Pedyash, V., Mazur, A., Rozenvasser, D. (2021). Evaluation of Quality Parameters of an Intensity-Modulated Optical Transmission System. In: Vorobiyenko, P., Ilchenko, M., Strelkovska, I. (eds) Current Trends in Communication and Information Technologies. IPF 2020. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 212. Springer, Cham.
4. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics / Agrawal G.P. - New York: Academic Press, 2013. – 631 p.
5. Pedyash V.V. Doslidzhennia matematychnoi modeli optychnoho volokna // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Tom 1, No1, 2023 (317). - S. 167-173.

-
6. Stetsenko I.V. Modeliuvannia system: navch. posib. / Stetsenko I.V. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.
 7. Pedyash V.V. Modeliuvannia kanalu optychnoi systemy peredavannia OTH z kvadratumoiu amplitudnoi moduliatsiieiu // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky. – 2022. – № 5. – S.61-65.
 8. FlexRate 200G Muxponder (MS430943/4M) URL: https://www.microsens.com/fileadmin/files/uploads/products/1_public/0_DAT/4_OTN/DAT422b_MS430943-4M_MSP3000-200G-FFI-Module_EN_1019.pdf
 9. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / Shaw J.K. – Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – 103 p.
 10. SSROP. URL: <https://photonics.umd.edu/software/ssprop/>
 11. Stephen A.B. Optical communication receiver design / Stephen A.B. - London: SPIE Publications, 1997. – 337 p.
 12. Alvarado A., Agrell E., Lavery D., Maher R., Bayvel P. Replacing the soft-decision FEC limit paradigm in the design of optical communication systems. Journal of lightwave technology. 2015. Vol. 33, No. 20. P. 4338-4352.