

ПЕДЯШ Володимир

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

ORCID: 0000-0002-4071-357X

e-mail: vpedyash@gmail.com

МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАВАННЯ ОТН З КВАДРАТУРНОЮ АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

В роботі наведено результати дослідження якісних характеристик волоконно-оптичної системи передавання ОТН. Розроблена імітаційна MatLab модель каналу із швидкістю передавання 43,018 Гбіт/с (OTU3) з модуляцією КАМ-4, що дозволяє врахувати лінійні та нелінійні спотворення сигналу в оптичному середовищі розповсюдження, а також параметри функціональних блоків системи. Виконано співставлення отриманих даних з результатами моделювання, отриманих в спеціалізованих програмних продуктах і доведена коректність запропонованої моделі.

Ключові слова: імітаційна модель, спотворення, оптичний канал, квадратурна амплітудна модуляція

PEDYASH Volodymyr

State University of Intellectual Technologies and Communications

CHANNEL MODELING OF THE OTH OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM WITH QUADRATURE AMPLITUDE MODULATION

The rapid development of services for providing broadband access to the Internet and multimedia content delivery services required the widespread use of fiber optic transmission systems (FOTS) for the transmission of digital traffic. The transmitter signal passes through an optical line, which includes optical fiber and optical amplifiers. In the optical fiber, linear and nonlinear distortions are introduced into the signal, and optical amplifiers generate additive noise of amplified spontaneous emission. In this paper, we develop a model of the optical channel of OTH system with QAM modulation, which takes into account linear and nonlinear distortions of the optical propagation medium and additive noise of the amplified spontaneous radiation of optical amplifiers. To obtain accurate results, the method of simulation modeling was used. The block diagram of the developed model contains a transmitter, an optical line and a coherent receiver of the optical signal. The expression for the time form of the electric field intensity of the optical signal at the transmitter output is given. Modeling of the optical fiber was performed by the split step Fourier method. The noise of the amplified spontaneous emission of optical amplifiers was formed in the frequency domain by means of the Fourier transform operation.

The quality of the optical channel was estimated by calculating the average value of the Q-factor of the optical signal at the receiver output. The dependence of the Q-factor from the number of sections of the optical line and the power level of the optical signal was obtained. It is shown that to maximize the quality characteristics of the optical channel, the optimal value of the signal power should be used. The comparison of the obtained results with the data from specialized software products is carried out. Sufficient accuracy of the proposed model was demonstrated. It is recommended to use the developed channel model in the design of new and modernization of existing fragments of networks based on OTH systems with QAM modulation.

Keywords: simulation model, distortion, optical channel, quadrature amplitude modulation

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Швидкий розвиток послуг з надання широкопозвоного доступу до мережі Інтернет та сервісів доставки мультимедійного контенту привів до широкого впровадження волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) для передавання цифрового трафіку. Сьогодні на ділянці транспортної мережі активно використовуються ВОСП оптичної транспортної ієрархії (ОТН), що дозволяють організувати цифрові тракти із швидкістю від 2,7 Гбіт/с (OTU1) до 111,8 Гбіт/с (OTU4) [1]. Для передачі цифрових потоків OTU1 та OTU2 (10,7 Гбіт/с) застосовують модуляцію по інтенсивності. З метою підвищення завадостійкості ВОСП, цифрові потоки вищих рівнів ієрархії OTU3 (43 Гбіт/с) і OTU4 передаються з використанням методів модуляції, що передбачають когерентний прийом: фазової (ФМ), диференційної фазової (ДФМ) та квадратурної амплітудної (КАМ).

Сигнал передавача транспондера ВОСП проходить через лінійний тракт, що містить оптичне волокно (ОВ) та підсилювачі. Оптичне волокно вносить в сигнал лінійні (дисперсійні) та нелінійні спотворення, а оптичні підсилювачі формують шум посиленого спонтанного випромінювання. Ці ефекти призводять до зменшення відношення сигнал/шум сигналу на вході приймача ВОСП та підвищення ймовірності помилки в оптичному каналі. Тому при проектуванні нових та модернізації існуючих фрагментів транспортних мереж виникає актуальне завдання з визначення якісних характеристик каналу оптичної системи передавання з когерентним прийомом в залежності від конфігурації ВОСП та параметрів оптичного сигналу.

Аналіз останніх досліджень

Зважаючи на складність фізичних процесів передачі оптичного сигналу по каналу ОТН, коректне вирішення поставленого завдання можливе шляхом застосування одного з методів моделювання систем [2]. Використаний метод дослідження повинен враховувати властивості оптичного сигналу, його спотворення у процесі передачі та взаємодію з шумом. Найбільш розповсюдженими варіантами дослідження систем передачі є методи аналітичного та імітаційного моделювання [3–5], які дозволяють виконувати визначення

параметрів сигналу та окремих блоків системи передачі з метою покращення її якісних характеристик.

Аналітичне моделювання використовується для дослідження систем передачі із середовищем поширення без істотних нелінійних спотворень. Дослідженню робочих параметрів ВОСП, які працюють у лінійному режимі без урахування нелінійних спотворень присвячено низку робіт. У публікаціях [6, 7] виконано узагальнення аналітичних моделей поширення сигналу в системах з прямим детектуванням та когерентним прийомом. Проте отримані аналітичним моделюванням якісні параметри систем передачі є дещо завищеними. Реальні їх значення будуть меншими, оскільки розрахункові вирази не враховують всіх спотворень сигналу в оптичному середовищі розповсюдження. Найбільш важливими є нелінійні спотворення сигналу в оптичному волокні, викликані нелінійністю показника заломлення матеріалу (ефект Керра).

В основу всіх моделей поширення оптичного сигналу в дисперсійному середовищі з нелінійними спотвореннями покладено рівняння Шредінгера [8]. Узагальненого аналітичного вирішення воно немає, тому для отримання результату застосовуються чисельні методи. Найбільш точним з них є метод Фур'є з розщепленням за фізичними факторами.

Перелічені причини зумовили вибір методу імітаційного моделювання у дослідженнях цієї роботи, оскільки він дозволяє врахувати всі спотворення сигналу в середовищі поширення та функціональних блоках станційного обладнання ВОСП.

Формулювання цілей статті

Метою даної роботи є розробка моделі каналу ВОСП з КАМ модуляцією, що враховує лінійні та нелінійні спотворення оптичного середовища розповсюдження та адитивний шум підсиленого спонтанного випромінювання оптичних підсилювачів.

Виклад основного матеріалу

При побудові імітаційної моделі слід опиратися на математичну модель сигналу та шуму, а також їх подальшу взаємодію у функціональних блоках системи передавання. В даній роботі виконано дослідження моделі когерентної ВОСП з модуляцією КАМ-4. Її суттєвою перевагою є нульовий пікфактор сигналу передавача (всі точки сигнального сузір'я мають однакову енергію), що зменшує прояв нелінійних спотворень сигналу в ОВ. В подальшому запропонована модель каналу ВОСП може бути модифікована для більшої кількості точок сигнального сузір'я.

Структурна схема моделі каналу (рис. 1) містить передавач, волоконно-оптичний лінійний тракт (ВОЛТ) та приймач оптичного сигналу. Генератори псевдовипадкової послідовності (ГПВП) формують багатопозиційні символи синфазного a_i та квадратурного b_i каналів КАМ, які в передавачі перетворюються в модулюючі сигнали NRZ $a(t)$ та $b(t)$. Вихідний сигнал КАМ-4 є сумою двох ортогональних сигналів ФМ-2 з напруженістю електричного поля згідно виразу:

$$E_{\text{пер}}(t) = \frac{\sqrt{P_{\text{ло}}}}{2} \left(\exp \left[j \left(\omega_{\text{ло}} t + \pi a(t) \right) \right] + \exp \left[j \left(\omega_{\text{ло}} t + \pi b(t) - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right), \quad (1)$$

де $P_{\text{ло}}$ та $\omega_{\text{ло}}$ – потужність та частота лазерного випромінювача передавача відповідно.

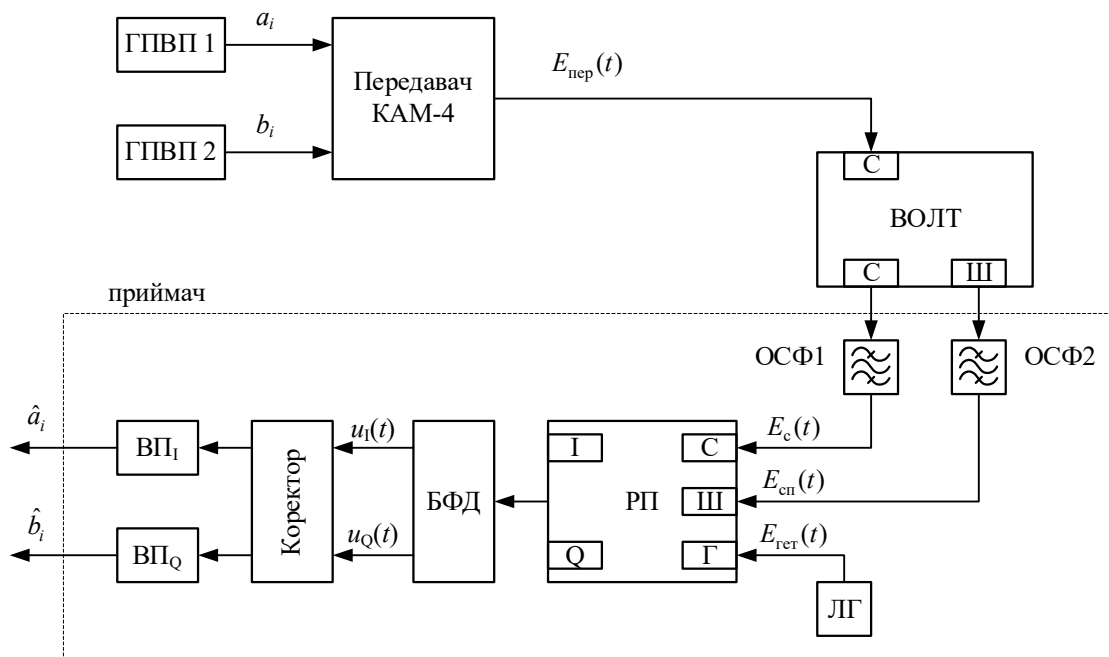


Рис. 1. Структурна схема каналу ВОСП ОТН з КАМ-4

Далі сформований сигнал проходить через блок ВОЛТ, який має вхід та вихід сигналу "С" та окремий вихід "Ш", на якому присутнє коливання $E_{сп}(t)$, що за своїми характеристиками еквівалентне до сумарного шуму спонтанного випромінювання оптичних підсилювачів.

Приймач оптичного сигналу КАМ складається з розділюючого пристрою (РП), балансного фотодетектора (БФД) для оптоелектронного перетворення, коректора та вирішуючих пристроїв (ВП). Приймач також містить лазерний гетеродин (ЛГ), що формує опорне коливання $E_{гет}(t)$ для коректної роботи блоків РП та БФД. Для виділення з групового сигналу ВОСП СРК смуги окремого каналу виконується операція фільтрації сигналу та шуму в оптичних смугових фільтрах ОСФ1 та ОСФ2 відповідно.

При визначенні співвідношення сигнал/шум на виході каналу слід виконати аналіз взаємодії коливань лазерного гетеродина та вхідного сигналу E_c сумісно з шумом оптичних підсилювачів $E_{сп}$. В літературі наводиться ряд стандартних схем для побудови РП та БФД, але в їх основу покладена схема з роботи [9] з чотирма оптичними розгалужувачами 2x2 P1-P4 (рис. 2).

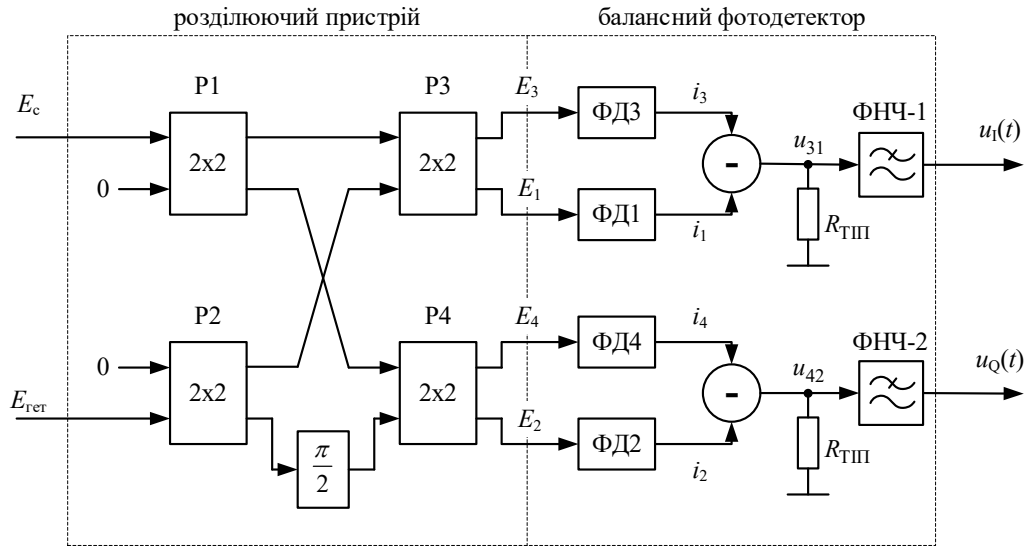


Рис. 2. Функціональна схема приймача когерентної ВОСП

Сигнал на його виході оптичного розгалужувача 2x2 є добутком матриці його передатної функції та вхідного сигналу:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{j}{2} & -\frac{j}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{j}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{j}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_c + E_{сп} \\ E_{гет} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{j}{2}(E_c + E_{сп} + E_{гет}) \\ -\frac{1}{2}(E_c + E_{сп} - jE_{гет}) \\ \frac{1}{2}(E_c + E_{сп} - E_{гет}) \\ -\frac{1}{2}(jE_c + jE_{сп} - E_{гет}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Вирази для струму на виході фотодіодів ФД1 та ФД3:

$$\begin{aligned} i_1 = R|E_1|^2 &= R \left| -\frac{j}{2}(E_c + E_{сп} + E_{гет}) \right|^2 = R \left| -\frac{j}{2} \right|^2 |E_c + E_{сп} + E_{гет}|^2 = \\ &= \frac{R}{4} \left[|E_c|^2 + |E_{сп}|^2 + |E_{гет}|^2 + 2|E_c||E_{сп}|\cos\angle(E_c, E_{сп}) + \right. \\ &\quad \left. + 2|E_c||E_{гет}|\cos\angle(E_c, E_{гет}) + 2|E_{сп}||E_{гет}|\cos\angle(E_{сп}, E_{гет}) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} i_3 = R|E_3|^2 &= R \left| \frac{E_c + E_{сп} - E_{гет}}{2} \right|^2 = \frac{R}{4} |E_c + E_{сп} - E_{гет}|^2 = \\ &= \frac{R}{4} \left[|E_c|^2 + |E_{сп}|^2 + |E_{гет}|^2 + 2|E_c||E_{сп}|\cos\angle(E_c, E_{сп}) - \right. \\ &\quad \left. - 2|E_c||E_{гет}|\cos\angle(E_c, E_{гет}) - 2|E_{сп}||E_{гет}|\cos\angle(E_{сп}, E_{гет}) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де R – чутливість фотодіоду, А/Вт.

Аналізуючи складові у виразах (3) та (4) приходимо до висновку, що вони містять по чотири однакових перших доданки, які компенсуються на виході віднімаючого пристрою. В результаті струм на

виході синфазного каналу матиме тільки два доданки, які є биттями сигнал-гетеродин та шум-гетеродин:

$$i_3 - i_1 = -R|E_c||E_{гет}| \cos \angle(E_c, E_{гет}) - R|E_{сп}| |E_{гет}| \cos \angle(E_{сп}, E_{гет}). \quad (5)$$

Далі в балансному фотодетекторі виконується підсилення струму в трансїмпедансному підсилювачі (ТПП), що має опір $R_{ТПП}$ і послідоюча фільтрація у ФНЧ з імпульсною характеристикою $h_{фнч}(t)$.

Аналогічно, в квадратурному каналі приймача ВОСП отримуємо:

$$i_4 - i_2 = R|jE_c||E_{гет}| \sin \angle(E_c, E_{гет}) + R|jE_{сп}| |E_{гет}| \sin \angle(E_{сп}, E_{гет}). \quad (8)$$

В коректорі відбувається формування комплексного сигналу $i_{вих}(t) = u_I(t) * h_{фнч}(t) + ju_Q(t) * h_{фнч}(t)$ та послідоюче відновлення фази і амплітуди прийомного сигналу.

На основі вищенаведеної математичної моделі каналу системи передавання, в середовищі MatLab була розроблена відповідна імітаційна модель. За її допомогою були визначені параметри якості каналу ВОСП ОТУЗ з КАМ-4 (рис. 3) для параметрів функціональних блоків згідно табл. 1. Як вже вказувалося раніше, сигнал КАМ-4 можна розглядати у вигляді суми двох ортогональних сигналів з модуляцією ФМ-2. Тому в даному дослідженні використано метод оцінки якісних характеристик каналу на основі Q -фактору сигналу на виході коректора [10]. Для перевірки достовірності результатів моделювання була створена контрольна імітаційна модель каналу ВОСП СРК в спеціалізованій програмі Optiwave Optisystem. Оскільки в цій програмі реалізовано два варіанти обробки сигналу у фотодіоді (чисельний та аналітичний), моделювання також проводилося двома вказаними методами.

Таблиця 1

Параметри математичної моделі каналу ВОСП СРК в MatLab

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Швидкість передавання $V_{пер}$	43,018 Гбіт/с	Нелінійність ОВ n_2	$2,6 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$
Кількість двійкових символів $N_{симв}$	10000	Ефективна площа ОВ $A_{эф}$	$80 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$
Робоча довжина хвилі лазера	1550 нм	Шум-фактор ОП nf	6 дБ
Довжина секції $L_{ОВ}$	100 км	$PSD_{сп}$	$2,521 \cdot 10^{-16} \text{ Вт/Гц}$
Загасання ОВ α	0,2 дБ/км	Смуга пропускання ОСФ	100 ГГц
Дисперсія ОВ σ_{01}	16,75 пс/(нм*км)	Чутливість ФД R	1 А/Вт

Отримані результати показали, що при наявності шумів оптичних підсилювачів ВОЛТ та нелінійних спотворень сигналу в ОВ, залежність Q -фактору від рівня сигналу передавача $p_{пер}$ при фіксованій довжині ВОЛТ в $N_{секц}$ має екстремум у вигляді максимуму (рис. 3, а). Це пояснюється тим, що при збільшенні рівня потужності передавача збільшується захищеність від адитивних завад оптичних підсилювачів, але також підвищується і рівень нелінійних спотворень сигналу в ОВ. Збільшення протяжності оптичної лінії призводить до зменшення рівня оптимальної потужності сигналу внаслідок накопичення нелінійних спотворень на кожній секції ВОЛТ.

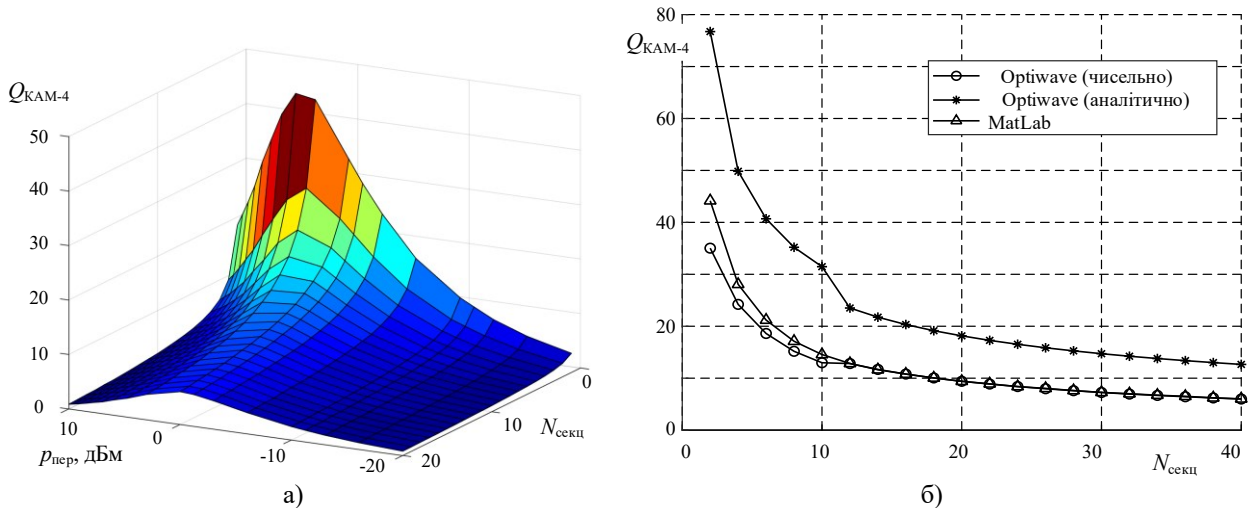


Рис. 3. Характеристики каналу ВОСП СРК ОТУЗ з КАМ-4:

а) залежність Q -фактору від $N_{секц}$ та $P_{пер}$;

б) максимальне значення Q -фактора

Дослідження показали, що при збільшенні довжини ВОЛТ, середній показник Q -фактору сигналу зменшується по експоненціальному закону (рис. 3, б). Результати моделювання в MatLab та Optiwave Optisystem (чисельна модель обробки сигналу в фотодіоді) для протяжних ліній майже збігаються, що підтверджує коректність розробленої імітаційної моделі каналу ВОСП СРК. Аналітична модель фотодіода в Optiwave Optisystem основана на статистичних характеристиках вхідного сигналу та шуму, тому її використання призвело до отримання дещо завищених характеристик якості каналу.

В процесі дослідження також було проведено порівняння потужності биття шум-гетеродин на виході приймача. Як і в попередньому випадку, результати моделювання MatLab досить близькі до чисельної моделі фотодіода в Optiwave Optisystem.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В статті запропонована MatLab модель каналу оптичної системи передавання ОТН з квадратурною амплітудною модуляцією. Розроблена її структурна схема та проаналізовано обробку сигналу у відповідних функціональних блоках. Модель враховує параметри оптичного сигналу, його лінійні та нелінійні спотворення в середовищі розповсюдження, а також у функціональних блоках системи передавання. На прикладі оптичного каналу ОТН ОУЗ з модуляцією КАМ-4 проведено дослідження його якісних характеристик. Отримана залежність Q -фактору від рівня потужності сигналу передавача і протяжності лінійного тракту ВОСП. Показано, що підвищення якісних показників каналу зв'язку досягається використанням оптимальної потужності сигналу передавача транспондера. Запропоновану імітаційну модель доцільно використовувати на етапі проектування телекомунікаційних мереж на базі ВОСП з КАМ модуляцією з метою підвищення їх експлуатаційних характеристик. В подальшому розроблену модель доцільно доопрацювати в напрямі використання модуляції з більшою кількістю точок сигнального сузір'я (КАМ-16 і вище).

Література

1. Соломенчук В.Д. Оптические транспортные сети / Соломенчук В.Д. – К. : Центр последилоного образования ПАО «Укртелеком», 2014. – 294 с.
2. Стеценко І.В. Моделювання систем : навч. посіб. / Стеценко І.В. – Черкаси : ЧДТУ, 2010. – 399 с.
3. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / Shaw J.K. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – 103 p.
4. Педяш В.В. Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 109-114.
5. Педяш В.В. Влияние нелинейных искажений оптических волокон на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш // Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 2. – С. 70-74.
6. Keang-Po H. Phase-Modulated Optical Communication Systems / Keang-Po H. – Springer, 2005. – 430 p.
7. Seimetz M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Seimetz M. – Berlin : Springer, 2009. – 252 p.
8. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / Agrawal G.P. – New York : Wiley-Interscience, 2002. – 580 p.
9. Hoffman D. Integrated optics eight-port 90 degrees hybrid on LiNbO₃ / D. Hoffman; H. Heidrich; G. Wenke; R. Langenhorst; E. Dietrich // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7, No 5. – P. 794-798.
10. Kaminow I.P. Optical Fiber Telecommunications IV-A: Components / Kaminow I.P. – Academic Press, 2002. – 876 p.

References

1. Solomenchuk V.D. Opticheskie transportnye seti / Solomenchuk V.D. – K. : Centr poslediplomnogo obrazovaniya PAO «Ukrtelekom», 2014. – 294 s.
2. Stetsenko I.V. Modeliuvannia system : navch. posib. / Stetsenko I.V. – Cherkasy : ChDTU, 2010. – 399 s.
3. Shaw J.K. Mathematical Principles of Optical Fiber Communication / Shaw J.K. – Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004. – 103 p.
4. Pedyash V.V. Vliyanie fazovoj samomodulyacii opticheskogo signala na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedyash, O.S. Reshetnikova // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 1. – S. 109-114.
5. Pedyash V.V. Vliyanie nelinejnyh iskazhenij opticheskikh volokon na kachestvo kanalov VOSP SRK / V.V. Pedyash // Naukovi praci UDAZ im. O.S. Popova. – 2010. – № 2. – S. 70-74.
6. Keang-Po H. Phase-Modulated Optical Communication Systems / Keang-Po H. – Springer, 2005. – 430 p.
7. Seimetz M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Seimetz M. – Berlin : Springer, 2009. – 252 p.
8. Agrawal G.P. Fiber-Optic Communication Systems / Agrawal G.P. – New York : Wiley-Interscience, 2002. – 580 p.
9. Hoffman D. Integrated optics eight-port 90 degrees hybrid on LiNbO₃ / D. Hoffman; H. Heidrich; G. Wenke; R. Langenhorst; E. Dietrich // Journal of Lightwave Technology. – 1989. – Vol. 7, No 5. – P. 794-798.
10. Kaminow I.P. Optical Fiber Telecommunications IV-A: Components / Kaminow I.P. – Academic Press, 2002. – 876 p.

Надійшла/Paper received : 15.08.2022 p. Надрукована/Printed : 01.11.2022 p.