



Alexandr V. Chermalykh
Чермалих
Олександр
Валентинович

УДК 621.874:621.398:004.032.26

INVESTIGATION OF THE ATMOSPHERIC OPTICAL COMMUNICATION AS A PART OF THE BRIDGE CRANE CONTROL SYSTEM OF THE RADIOACTIVE WASTE STORAGE

ДОСЛІДЖЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ОПТИЧНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ В СКЛАДІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МОСТОВИМ КРАНОМ СХОВИЩА РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2020.2\(14\).5](https://doi.org/10.15589/smi2020.2(14).5)

Alexandr V. Chermalykh Чермалих Олександр Валентинович,
канд. техн. наук, доц. alvalrik@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8609-7525



Daniil D. Muhenov
Мугенов Данііл
Джалільович

Daniil D. Muhenov Мугенов Данііл Джалільович, аспірант
daniila8902@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7780-3416

*National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Abstract. The article considers atmospheric optical communication structure of the bridge crane electric drive control system of the radioactive waste storage. The criterion for the quality of atmospheric optical communication is bit error rate: the lower bit error rate, the more reliable the data transmission. The effect of factors that increase bit error rate, such as beam divergence, noise, ionizing radiation, natural degradation of laser emissions, attenuation of radiation in the atmosphere are considered. Moving the crane bridge to the far position leads to optical communication channel bit error rate increasing. Therefore, the probability of inaccurate transmission of commands from the control panel to the controller of electric drives increases. In the conditions of work with potentially dangerous cargoes (radioactive waste) the mistake can lead to an emergency situation.

Purpose. The aim is to investigate the factors that contribute to the increase in the bit error rate and to develop demodulator to perform atmospheric optical communication quality enhancement through reducing bit error rate in a software way. **Methodology.** To achieve this goal, the use of artificial neural networks in the demodulator structure is considered appropriate. The atmospheric optical communication model is built in Matlab Simulink. Synthesis, training and testing of artificial neural networks were performed.

Results. The atmospheric optical communication models with conventional and neural network demodulators are received. Exploration of neural networks demodulators models demonstrates that the use of a feed forward network with an input delay can reduce bit error rate over the entire range of signal-to-noise ratio. Probabilistic neural network performs the lowest bit error rate in the signal-to-noise ratio range from 0 to 0.7 dB. **Scientific novelty.** In order to improve the quality of bridge crane electric drive control channel, demodulators based on nine types of artificial neural networks were investigated. Two neural network demodulators which allowed to reduce the bit error rate are considered in this article. The bridge crane electric drives optical control channel models with conventional and neural network demodulators are compared. **Practical significance.** The improvement of the bridge crane electric drives atmospheric optical control channel is proposed. The developed neural network demodulator allows the use of an optical control channel in conditions of increased radiation.

Key words: atmospheric optical communication, electric drive, bridge crane, artificial neural network, ionizing radiation, radioactive waste.

Анотація. У статті розглянуто структуру атмосферного оптичного каналу зв'язку системи управління електроприводами мостового крана сховища радіоактивних відходів. Критерієм якості атмосферного оптичного каналу зв'язку є коефіцієнт бітових помилок: чим нижчий коефіцієнт бітових помилок, тим надійніша передача даних. Розглянуто вплив факторів, що збільшують коефіцієнт бітових помилок, таких як: не безкінечно вузька діаграма спрямованості випромінювача передавача, шум, іонізуюче випромінювання, природна деградація емісії лазера передавача, ослаблення випромінювання в атмосфері. Переміщення мосту крана в дальнє положення призводить до збільшення коефіцієнту бітових помилок оптичного каналу зв'язку. Тому зростає імовірність недостовірної передачі команд із пульта управління на контролер керування електроприводами. В умовах роботи з потенційно небезпечними вантажами (блоки радіоактивних відходів) помилка може призвести до аварійної ситуації. **Метою** роботи є дослідження факторів, що сприяють збільшенню коефіцієнта бітових помилок, та розробка демодулятора для підвищення якості атмосферного оптичного зв'язку за допомогою програмного зменшення коефіцієнта бітових помилок. **Методика.** Для досягнення поставленої мети вважається доцільним використання штучних нейронних мереж у структурі демодулятора. Модель атмосферного оптичного зв'язку побудована в Matlab Simulink. Проведено синтез, навчання та тестування штучних нейронних мереж. **Результати.** Отримано і досліджено моделі атмосферного оптичного зв'язку із традиційним та нейромережевими демодуляторами. Виявлено, що застосування штучної нейронної мережі прямого поширення із затримками входу дає змогу знизити коефіцієнт бітових помилок на усьому дослідженому діапазоні відношення сигнал/шум, у той час як ймовірнісна мережа демонструє найнижчий коефіцієнт бітових помилок лише в діапазоні від 0 до 0,7 дБ. Запропоновано вдосконалення конструкції демодулятора приймача, що дає змогу застосовувати атмосферний оптичний канал керування електроприводами мостового крану в умовах підвищеної радіації. **Наукова новизна.** Для покращення якості каналу управління електроприводом мостового крана були досліджені демодулятори на основі дев'яти типів штучних нейронних мереж. У цій статті розглянуто два типи нейромережових демодуляторів, які дозволили зменшити коефіцієнт бітових помилок. **Практична значимість.** Запропоновано вдосконалення атмосферного оптичного каналу зв'язку системи управління електроприводами мостового крану сховища радіоактивних відходів. Розроблений нейромережевий демодулятор дає змогу використовувати оптичний канал управління в умовах підвищеної радіації.

Ключові слова: атмосферний оптичний канал, електропривод, мостовий кран, штучна нейронна мережа, іонізуюча радіація, радіоактивні відходи.

References

- [1] Rongqing H. (2019). Introduction to Fiber-Optic Communications: Optical transmission system design. Elsevier Academic Press. doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00008-1.
- [2] Yanghyo K. (2012). Analysis of Noncoherent ASK Modulation-Based RF-Interconnect for Memory Interface. *IEEE Journal On Emerging And Selected Topics In Circuits And Systems*, 2, 200–209. DOI: 10.1109/JETCAS.2012.2193511.
- [3] Alimi I., Shahpari A., Sousa A., Ferreira R., Monteiro P., Teixeira A. (2017). Challenges and Opportunities of Optical Wireless Communication Technologies. *Optical Communication Technology, Aveiro, Portugal*. DOI: 10.5772/intechopen.69113.
- [4] Gower J. (1989). Opticheskie sistemy svyazi [Optical communication systems]. Moscow: Radio i svyaz' [Publishing house Radio and Communication].
- [5] Alsulami O., Taha H.A., Alresheedi M.T., Elmirghani J.M.H. (2018). Optical Wireless Communication Systems, A Survey. *Engineering, Computer Science*, 2, 1–22. DOI: 10.13140/RG.2.2.11751.09129.
- [6] Ghassemlooy Z., Papoola W., Rajbhandari S. (2013). Optical Wireless Communication. CRC Press.
- [7] Gevorgiz R.G., Malakhov A.S. (2018). Pereschyot velichiny` osveshhyonnosti fotobioreaktora v velichinu obluchyonnosti [Conversion of the photobioreactor illumination value into the irradiance value]. Sevastopol': FGBUN IMBI [Publishing house FGBUN IMBI].
- [8] Gill K. (1997). Radiation Damage Studies of Optoelectronic Components for the CMS Tracker Optical Links. *RADECS 97 Conf., Cannes*. DOI: 10.1109/RADECS.1997.698956.
- [9] Mozhaev R.K., Cherniak M.E. (2018). Research of Quantum Well Laser Diode's and Heterostructural P-I-N Photodiode's of Fiber-Optic Modules Radiation Hardness to Gamma-ray and Neutron Irradiation. *VII International Conference on Photonics and Information Optics, Moscow*. 393–399. DOI 10.18502/ken.v3i3.2053.

- [10] Phifer C.C. (2004). Effects of Radiation on Laser Diodes. *Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, Sandia Rep. SAND2004-4725*.
- [11] Buriev N.N., Buriev N.T. (2016). Vneshnee Izluchenie Kombinirovannogo Khranilishha Radioaktivnykh Otkhodov [External Radiation of the Combined Storage of Radioactive Waste]. *Mezhdunarodnyj Nauchnyj Zhurnal «Simvol Nauki» [International Scientific Journal “Symbol of Science”]*, 10-1, 18–20.
- [12] Häusler K., Zeimer U., Sump B., Tränkle G., Erbert G. (2008). Degradation model analysis of laser diodes. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*, 19(1), 160-164. DOI 10.1007/s10854-007-9534-8.
- [13] Lam S.K.K., Mallard R.E. (2004). Analytical model for saturable aging in semiconductor lasers. *Journal of Applied Physics*, 94, 135–148. <https://doi.org/10.1063/1.1589594>.
- [14] Klimkov Yu.M., Khoroshev M.V. (2014). *Lazernaya Tekhnika [Laser Technique]*. Moskva: MIIGAiK [Publishing house MIIGAiK].
- [15] Timofeev Yu.M., Vasil'ev A.V. (2007). *Osnovy teoreticheskoy atmosfernoj optiki [Fundamentals of Theoretical Atmospheric Optics]*. SPb.: Fizicheskij f-t SPbGU [Publishing house Physical Faculty of St. Petersburg State University].
- [16] Li M., Zhong H.Sh. (2008). Neural Network Demodulator for Frequency Shift Keying. *International Conference on Computer Science and Software Engineering, Hubei, China*. DOI: 10.1109/CSSE.2008.1440.
- [17] Amini M.R. (2010). A BFSK Neural Network Demodulator With Fast Training Hints. *Second International Conference on Communication Software and Networks, Hong Kong*, 578–582. DOI 10.1109/ICCSN.2010.123.
- [18] Amini M.R., Balarastaghi E., Branch B. (2011). Universal Neural Network Demodulator for Software Defined Radio. *International Journal of Engineering and Technology*, 3, 263–268.
- [19] Chow T.W.S., Feng J.Ch., Ng K.T. (2000). An Adaptive Demodulator for the Chaotic Modulation Communication System with RBF Neural Network. *IEEE Transactions On Circuits And Systems: Fundamental Theory And Applications*, 47(6), 902–909.
- [20] Onder M., Akan A., Dogan H. (2013). Neural network based receiver design for Software Defined Radio over unknown channels. *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey*, 297–300. DOI: 10.1109/ELECO.2013.6713848.
- [21] Veselov O.V., Saburov P.S. (2015). *Metody Iskusstvennogo Intellekta V Diagnostike [Artificial Intelligence Techniques in Diagnostics]*. Vladimir: VIGU [Publishing house Vladimir State University].

Постановка проблеми. Згідно зі Стратегією поводження з радіоактивними відходами в Україні, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2009 р. № 990-р, безпечне поводження з РАВ є важливою складовою частиною загальної системи забезпечення безпеки під час використання ядерної енергії.

Дослідженню підлягає реальний об'єкт одного з підрозділів КВ «Вектор». Цех сховища радіоактивних відходів (РАВ) має протяжність 120 м. Для роботи з упаковками РАВ сховище оснащується мобільною будівлею з мостовим краном. Робочий орган мостового крану має доступ до всього простору сховища. Системи електроприводів крану розташовані безпосередньо на мосту, а робоче місце оператора – в приміщенні управління поза сховищем, тобто

застосовується віддалене управління. Застосування дротового з'єднання для забезпечення інформаційного каналу зв'язку між оператором і електроприводами на відстанях (120 м) неможливе або викликає труднощі. У системі застосовується лазерний атмосферний оптичний канал зв'язку (АОКЗ) за допомогою пристроїв ISD400. Один із пристроїв монтується на стіні цеху, інший – на мості крану. Обидва пристрої розташовані на одній оптичній вісі і складаються із передавача і приймача кожен. Оскільки АОКЗ використовується в умовах радіації для складування потенційно небезпечних вантажів (РАВ), підвищення надійності кожної ланки системи управління є актуальною задачею. Критерієм якості оптичного каналу є коефіцієнт бітових помилок (КБП) [1]. У разі переміщення мосту крану в дальнє

положення і внаслідок дії супутніх факторів (не безкінечно вузька діаграма спрямованості випромінювача передавача, шум, іонізуюче випромінювання, природна деградація емісії лазера, ослаблення випромінювання в атмосфері) підвищується КБП оптичного каналу зв'язку. Тому зростає імовірність недостовірної передачі команд із пульта управління на контролер керування електроприводами. В умовах роботи з потенційно небезпечними вантажами (блоки РАВ) помилка може призвести до аварійної ситуації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

З робіт [1–3] випливає, що основним показником системи передачі інформації, що визначає якість зв'язку, є коефіцієнт бітових помилок, надано його аналітичний вираз і пояснення.

У дослідженнях [4; 5] розглянуто шуми передавача атмосферного оптичного каналу зв'язку, а в [6] – шуми приймача. Посібник [7] дає змогу визначити потужність шумів середовища каналу від його освітленості.

Експериментальні дослідження впливу іонізуючої радіації на лазерний діод (випромінювач передавача) проведено в роботах [8–10]. Характер радіаційного випромінювання сховища радіоактивних відходів розглянуто в роботі [11].

Природна деградація параметрів лазерного діоду проаналізовано в роботах [12; 13], а послаблення випромінювання в атмосфері – в [14] і [15].

У роботах [16] і [17] проведено синтез нейромережових демодуляторів, що оперують із частотною модуляцією сигналу. Обидва запропоновані демодулятори не потребують фільтра нижніх частот і застосовують штучні нейронні мережі (ШНМ) прямого поширення із затримкою вхідного сигналу. У статтях [18] і [19] запропоновано цифрові демодулятори на основі радіально базисних мереж. В роботі [20] показано, що нейромережовий демодулятор у системі бездротового зв'язку, для якої характерна зміна спектральної щільності потужності шуму в частотній області, показує нижчий КБП на відміну від традиційного демодулятора на всьому дослідженому діапазоні відношення сигнал/шум. У посібнику [21] надані прак-

тичні рекомендації щодо збору і обробки даних для навчальної вибірки ШНМ.

Відокремлення не вирішених раніше частин загальної проблеми. У жодному джерелі, окрім [17], де розглянуто частотну модуляцію сигналу, і [20], де спектральна щільність потужності шуму змінюється в часі, не було розглянуто способи підвищення коефіцієнта бітових помилок для амплітудної модуляції сигналу, тим паче в умовах іонізуючої радіації.

Мета дослідження – визначити і дослідити фактори, що сприяють підвищенню КБП, розробити нейромережовий демодулятор для зниження КБП, запропонувати практичні рекомендації для усунення факторів, що сприяють підвищенню КБП.

Методи, об'єкт та предмет дослідження.

Натурні дослідження впливу таких факторів, як іонізуюча радіація і природна деградація емісії лазера передавача (старіння), становлять труднощі. Для дослідження впливу радіації на пристрої оптичної передачі даних ISD400 необхідно застосовувати установки гамма і нейтронного випромінювання. До того ж пошкодження лазерного діода випромінювача мають накопичувальний незворотний характер, що призведе до некоректної роботи пристрою і його виходу з ладу. Дослідження ж старіння емісії лазера передавача потребує значних часових затрат. Оскільки дослідження цих факторів на лазерний діод були вже проведені у роботах [8; 12], доцільним вважаємо застосування методу математичного імітаційного моделювання в програмному середовищі Matlab Simulink.

Об'єктом дослідження є атмосферний оптичний канал зв'язку в складі системи управління електроприводами мостового крану сховища радіоактивних відходів.

Предметом дослідження є критерій якості оптичного каналу зв'язку, який чисельно виражається системним показником – коефіцієнтом бітових помилок.

Основний матеріал. Залежно від типу сигналів, що передаються, розрізняють аналогові і цифрові АОКЗ, спотворення сигналу в яких докорінно відрізняються. У цьому випадку розглядається цифрова система з амплітудною модуляцією (АМ) сигналу: логічній одиниці

відповідає ввімкнений лазер, логічному нулю – вимкнений. Зазвичай застосовують системний показник якості передачі даних, що визначає граничну ймовірність правильного детектування оптичного імпульсу в цей момент часу, тобто кількість помилок у потоці даних. Таким показником є коефіцієнт бітових помилок (КБП), англ. Bit Error Rate (BER). Його значення дорівнює числу помилкових двійкових символів на виході системи, поділеному на загальне число прийнятих двійкових символів, при довжині переданої двійкової послідовності, що прямує до нескінченності (1):

$$КБП = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{N_{пом}}{N}, \quad (1)$$

де $N_{пом}$ – кількість прийнятих біт із помилками; N – загальна кількість прийнятих біт [1].

Якщо КБП прямує до нуля, передача даних відбувається вірогідніше, і навпаки, чим сильніше КБП прямує до одиниці, тим передана інформація більш спотворена [3]. Для оцінки якості каналу зв'язку застосовують криву залежності КБП від відношення сигнал/шум (ВСШ), в англійській літературі позначається як BER vs SNR, [2, рис. 2] з якого простежується, що чим більше ВСШ, тим менший КБП, і, навпаки, при ВСШ близьких до 0 КБП прямує до 1.

На рис. 1 представлено структуру АОКЗ з амплітудною модуляцією сигналу. Позначення такі: адресант – програмований логічний контролер (ПЛК), входами якого є органи управління мостовим краном; модулятор – реалізовує амплітудну модуляцію;

випромінювач – лазерний діод (ЛД); атмосфера – атмосферний простір між лінзами передавача і приймача; фотоприймач – фотодіод; детектор – елемент, що пропускає додатній сигнал, діод; фільтр – фільтр нижніх частот (ФНЧ); поріг – величина порогу прийняття рішення, з якою порівнюється вихід фільтра для подальшого формування послідовності біт; компаратор – порівнює вихід ФНЧ із порогом прийняття рішення і формує вихідний сигнал приймача; адресат – ПЛК, який безпосередньо керує електроприводами мостового крану; калькулятор помилок – елемент запропонованої моделі, що підраховує КБП, кількість помилкових біт і загальну кількість отриманих біт (у реальному об'єкті відсутній).

Враховуючи властивості оптичного каналу передачі даних і специфіку об'єкту, в якому він застосовується, перелічимо фактори, що сприяють підвищенню КБП: послаблення потужності отриманого приймачем сигналу внаслідок не безкінечно вузької діаграми спрямованості передавача; шумові перешкоди (передавача, атмосфери і приймача); деградація, спричинена впливом іонізуючої радіації; природна деградація лазера; послаблення лазерного випромінювання в атмосфері.

Розглянемо окремо кожен із цих факторів.

1) Послаблення потужності отриманого приймачем сигналу внаслідок не безкінечно вузької діаграми спрямованості передавача.

Потужність прийнятого сигналу може бути розрахована за формулою (2), пояснення її складників наведено на рис. 2.

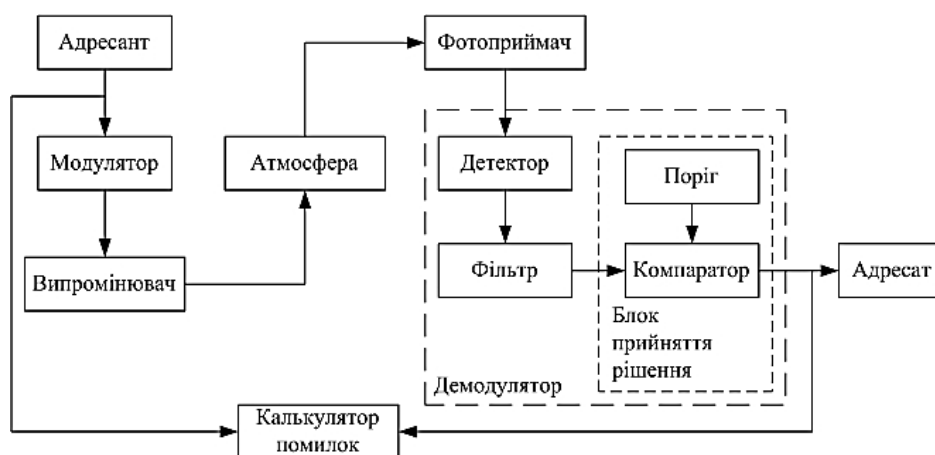


Рис. 1. Структура АОКЗ з амплітудною модуляцією сигналу

$$P_{np} = P_{nep} \cdot \frac{S_{np}}{S_{nep}} = P_{nep} \cdot \frac{S_{np}}{\pi \cdot (d \cdot \operatorname{tg} \theta_{nep})^2}, \quad (2)$$

де P_{np} – потужність сигналу, який отримує приймач, Вт; P_{nep} – потужність сигналу передавача, Вт; S_{np} – площа чутливого органу приймача, m^2 ; S_{nep} – площа світлової плями на відстані d між приймачем і передавачем, m^2 ; θ_{nep} – половинний кут діаграми спрямованості передавача, $^\circ$.

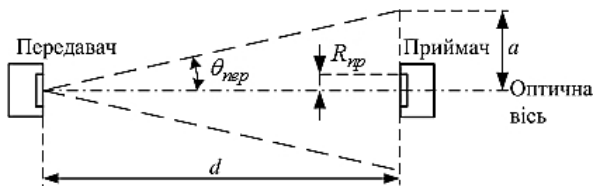


Рис. 2. Схема розходження лазерного променя, R_{np} – радіус лінзи світлочутливого елементу приймача; d – відстань між приймачем і передавачем; a – радіус світлової плями, яку створює передавач на відстані d

2) Шумові перешкоди (передавача, атмосфери і приймача).

Шуми передавача можуть бути представлені адитивним білим шумом, тобто тим, спектральна густина якого не залежить від частоти сигналу [4, с. 348].

Шуми атмосфери. Приймач отримує сигнал із шумами, викликаними, зокрема, оточуючим світлом. Джерела такого світла поділяються на природні (сонячне випромінювання) і штучні (передавачі інших оптичних пристроїв, лампи розжарювання) [5]. Згідно з інструкції з експлуатації ISD400, освітленість оточуючого середовища не має перевищувати 10 клк, що відповідає освітленості ясного сонячного дня. Оскільки світло, так само як іонізуюча радіація і радіохвилі, є електромагнітним випромінюванням, воно характеризується довжиною хвилі. Спектр видимого світла наближено обмежується величинами від 380 до 780 нм. Довжина хвилі 555 нм знаходиться в середині видимої частині спектра. Одному люксу сонячного світла відповідає енергетична освітленість $1.46 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$ при довжині хвилі 555 нм. Тобто освітленості 10 клк відповідає енергетична освітленість $E_{сон} = 14,6 \text{ Вт/м}^2$ [7 с. 13]. Площа чутливого органу приймача має габарити $S_{np} = 1.257 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ при радіусі

лінзи 20 мм, отже, максимально допустима потужність шуму, яку отримує приймач від навколишньої освітленості дорівнює:

$$P_{сон} = E_{сон} \cdot S_{np} = 18.34 \text{ мВт}, \quad (3)$$

Шуми приймача можна взяти до уваги за рахунок підсумовування до отриманого сигналу білих шумів із нульовим математичним очікуванням і з відповідними дисперсіями. В роботі [6, с. 66] представлено перелік причин шумів приймача і розрахунок їх дисперсій.

Результуюча потужність суміші сигналу з шумом залежить від випадкових змін фази шумових викидів. Відношення сигналу до шуму по потужності описується виразом:

$$BSH = \frac{P_{c \max}}{P_u}, \quad (4)$$

де $P_{c \max}$ – потужність корисного сигналу; P_u – потужність шуму.

3) Деградація, спричинена впливом іонізуючої радіації.

У роботі [8] було проведено експериментальне дослідження радіаційної стійкості ЛД. Зразки напівпровідникових ЛД піддавалися опромінюванню нейтронами, протонами і гамма-квантами. З роботи [11] відомо, що для сховищ радіоактивних відходів, де застосовується АОКЗ, що розглядається, характерне нейтронне і гамма випромінювання, тому параметри, на які впливає опромінювання протонами, до уваги братися не будуть.

Відповідно до робіт [8–10] радіаційно чутливими параметрами ЛД були пороговий струм [8, рис. 4] і втрата потужності світлового випромінювання [8, рис. 7], значний вплив чинить нейтронне випромінювання енергією 1 МеВ. Із зростанням флюенсу до $8 \cdot 10^{14} \text{ нейтронів/см}^2$ спостерігається лінійне зростання порогового струму в 3 рази і лінійне падіння потужності світлового випромінювання на 20%.

У пристроях ISD400 застосовується випромінювач потужністю 27 мВт із довжиною хвилі 660 нм, для подальших розрахунків як прототип приймемо лазерний діод QFLD-650-20SAX. На рис. 3а представлено робочу характеристику вищезазначеного діода. Залежність потужності випромінювання від робочого струму можна

апроксимувати виразом (5), графік якого представлено на рис. 3б, крива 1:

$$P_{\text{л}} = \begin{cases} k_c \cdot (I_p - I_{\text{нор}}(\Phi)), & I_p \geq I_{\text{нор}}(\Phi) \\ 0, & I_p < I_{\text{нор}}(\Phi) \end{cases}, \quad (5)$$

де k_c – лінійний коефіцієнт залежності потужності від струму, визначається на основі паспортних даних окремого ЛД; I_p – робочий струм ЛД; $I_{\text{нор}}(\Phi)$ – функція залежності порогового струму від флюенсу нейтронів.

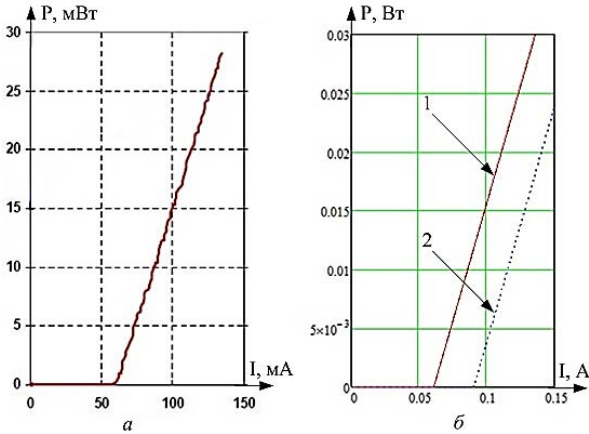


Рис. 3. Характеристики лазерного діоду QFLD-650-20SAX: а – заводські; б – побудовані аналітично, крива 1 – до опромінювання, крива 2 – після опромінювання флюенсом $8 \cdot 10^{14}$ нейтронів/см²

З рис. 3б видно, що, подаючи робочий струм 114 мА, на неопромінену ЛД отримуємо потужність 21 мВт, а на опромінений флюенсом $8 \cdot 10^{14}$ 1/см² нейтронів енергією 1 МеВ – 9,4 мВт, без врахування втрат енергії світлового випромінювання. Отже, розглядаючи ЛД як об’єкт впливу ІВ, доцільно враховувати деградацію енергії світлового випромінювання і збільшення порогового струму, яке призводить до зниження потужності випромінювання.

4) Природна деградація лазера.

У роботі [12] проведено експериментальне дослідження деградації параметрів лазера, викликаних його природним старінням. Із зростанням часу експлуатації до 1250 год спостерігалось збільшення порогового струму в 1,72 раза і незначне зниження нахилу кривої потужності лазера.

Поступова деградація параметрів ЛД із прискореним збільшенням струму була описана за допомогою моделі рекомбінації посиленого утворення дефектів у роботі [13].

Згідно із цією моделлю утворення дефектів кількісно пропорційне до споживаного ЛД струму, який не витрачається на створення світлового потоку, $I_{\text{нс}}(t)$. Цей струм викликає експоненційне зростання порогового струму $I_{\text{нор}}(t)$ для забезпечення тієї ж потужності світлового випромінювання:

$$I_{\text{нор}}(t) = I_0 + I_{\text{нс}}(t), \quad (6)$$

$$I_{\text{нс}}(t) = \beta \cdot e^{k \cdot t}, \quad (7)$$

У виразах (6) і (7): I_0 – струм ЛД до початку деградаційних процесів старіння; β – випадково розподілена величина, яка характеризує струм, який не витрачається на випромінювання світла; k – параметр деградації; t – час, годин.

Відповідно до моделі Ейрінга, параметр деградації може бути розрахований за формулою:

$$k = P^n \cdot e^{\mu_0 - E_A/k_B \cdot T}, \quad (8)$$

де P – оптична потужність; n – показник деградації; μ_0 – параметр масштабу; E_A – енергія активації процесу старіння; k_B – стала Больцмана; T – температура в активній зоні ЛД.

Для лазерного діоду QFLD-650-20SAX за виразом (6), з огляду на (7) і (8), побудовано залежність порогового струму від часу експлуатації, рис. 4.

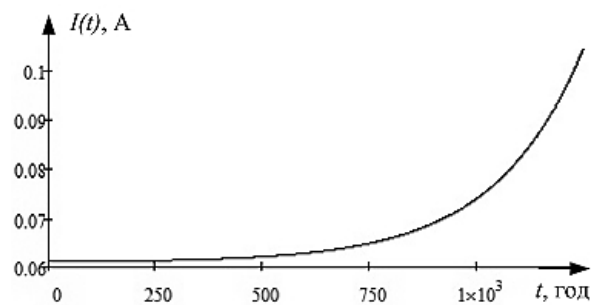


Рис. 4. Графік залежності порогового струму лазерного діоду від часу експлуатації

Згідно з виразом (6) і його графічною інтерпретацією (рис. 4) отримуємо значення порогового струму 105 мА при 1250 год експлуатації, при номінальному пороговому струмі в 61 мА. Таким чином, пороговий струм, що змінюється під впливом природної деградації лазера, призведе до зміни потужності, яку випромінює ЛД, за законом (5).

5) Послаблення лазерного випромінювання в атмосфері.

Відомо, що послаблення лазерного променя в атмосфері відбувається внаслідок двох типів ефектів [14]. До першого типу належать ті, що викликають зміну сумарної інтенсивності світлового випромінювання, а до другого – ті, які викликають зміну «геометричних» параметрів світлового пучка, тобто його розширення і відхилення, ці явища пов'язані із турбулентним характером атмосфери і розглядатися в цьому випадку не будуть.

Серед ефектів першого типу варто виділити явища поглинання і розсіяння. Аерозольне поглинання відбувається завдяки газовій складовій частині атмосфери: молекули пари (вологість повітря), метан, окис азоту, окис вуглецю, озон, кисень [15]. Наближено можна розрахувати показник аерозольного послаблення випромінювання за законом Бугера:

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-k_\lambda \cdot d}, \quad (9)$$

де $I(d)$ – інтенсивність світла, що пройшло шар атмосфери товщиною d ; I_0 – інтенсивність світла на виході джерела, $\text{Вт}/\text{м}^2$; k_λ – показник поглинання, $1/\text{м}$.

Оскільки характер газової складової частини атмосфери мінливий і нестабільний, точні достовірні дані про показник поглинання випромінювання можна отримати лише експериментальним шляхом. Теоретично показник поглинання розраховується за виразом [15]:

$$k_\lambda = \frac{4 \cdot \pi \cdot k}{\lambda}, \quad (10)$$

де k – безрозмірний показник поглинання; λ – довжина світлової хвилі.

Згідно з роботою [14, с. 55], коефіцієнт поглинання обернено пропорційний до четвертого ступеня довжини хвилі $k_\lambda \equiv 1/\lambda^4$. У [14, с. 56] наведені чисельні значення показників поглинання і розсіювання для довжини хвилі 480 нм. Розрахувати ці показники для інших довжин хвиль можна за співвідношенням:

$$k_{\lambda 2} = k_{\lambda 1} \cdot \frac{\lambda_1^4}{\lambda_2^4}. \quad (11)$$

Відповідно до (11) отримуємо показники поглинання $k_{\lambda n} = 5.6 \cdot 10^{-3}$ і розсіювання $k_{\lambda p} = 8.4 \cdot 10^{-3}$, $1/\text{м}$, для довжини хвилі 660 нм.

За формулою (9) побудовано графік залежності інтенсивності світла лазера в складі ISD400 з урахуванням його послаблення в атмосфері від відстані між передавачем і приймачем, рис. 5.

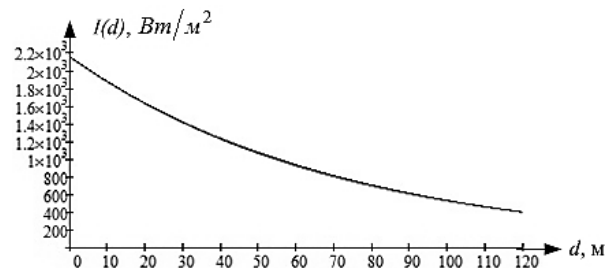


Рис. 5. Графік залежності інтенсивності світла лазера з урахуванням його послаблення в атмосфері від відстані між передавачем і приймачем

Спостерігається зниження інтенсивності світлового потоку і на відстані між передавачем і приймачем 120 м інтенсивність становить 18,7% від вихідної.

Усі вищезазначені фактори призводять до того, що в умовах максимально допустимого світлового шуму у разі збільшення відстані між передавачем і приймачем, коли міст крану пересунуто на дальню дистанцію від стіни, на якій встановлено передавач, спостерігається значне зниження ВСШ. Тому АОКЗ працює із КБП, близьким до свого максимального значення, і зростає імовірність недостовірної передачі команд із пульта управління на контролер керування електроприводами. В умовах роботи з потенційно небезпечними вантажами (блоки РАВ) помилка може призвести до аварійної ситуації. Тому доцільно внести зміни в АОКЗ, що дадуть змогу знизити КБП при низьких значеннях ВСШ.

Недоліками традиційного АМ демодулятора (в ISD400 застосовується саме він) є:

1) налаштування порогу прийняття рішення компаратора на середнє арифметичне математичного очікування сигналів логічних 0 і 1 необхідно проводити для кожного окремого значення ВСШ;

2) принципова неспроможність компаратора достовірно розпізнавати сигнал при низьких значеннях ВСШ.

Огляд літератури [17; 19; 20] дає зрозуміти, що застосування ШНМ як демодулятора доречне і при низьких рівнях ВСШ може

показувати кращі результати, ніж традиційні демодулятори. Очевидно, що додатковий програмний елемент у складі демодулятора потребуватиме більшої обчислювальної потужності. Зрозуміло також, що ШНМ здатні демодулювати сигнали різних типів модуляції, чому сприяє їхня здатність до навчання.

Тому для зниження КБП пропонується застосувати штучну нейронну мережу в блоці прийняття рішення демодулятора (рис. 1). Такий підхід продиктований змогою ШНМ оперувати не лише миттєвими значеннями сигналів (як це робить компаратор), а векторами, елементи яких складаються з дискретного сигналу і його затримок у часі на певну кількість кроків. Обробка такого пакунку дасть змогу оцінювати відфільтрований вхідний сигнал у контексті часу і вірно розпізнавати інформацію при низьких значеннях ВСШ.

Задача полягає в тому, щоб синтезувати нейромережевий блок прийняття рішення демодулятора, який матиме нижчі показники КБП при низьких ВСШ.

Для успішного застосування ШНМ необхідно зібрати й обробити вибірку для її тренування – вхідні сигнали і бажані виходи. В роботі [21, с. 57] описаний «ефект нуля», з яким ми зіткнулися в процесі моделювання. Для забезпечення адекватної роботи нейронної мережі необхідно нормувати вхідні сигнали. У нашому випадку виконано нормування вхідного сигналу в діапазоні (0;1). Нормування реалізовано методом ділення сигналу на його максимальну амплітуду.

У подальшому дослідженні як вхідний сигнал тренувальної вибірки застосовується вектор, який складається з виходу ФНЧ і його затриманих на n кроків значень. У цій роботі проводиться дослідження з лініями затримок (ЛЗ) у кількості від 1 до 10, тобто вхідний вектор, відповідно, має розмірність від 2 до 11. Вихідним (бажаним, або цільовим) вектором є вихід блоку Адресант (рис. 1). Тренувальна вибірка складається із кривих, знятих для значень ВСШ: 0, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2, 2,5, 5, 7, 8, 9, 10 дБ. Для кожного значення ВСШ представлено по логічному 0 і логічній 1. Усі далі перелічені мережі були навчені і протестовані на вхідних даних із

ЛЗ, тому далі це мається на увазі, але не обмовляється.

Задача, яку покладено на ШНМ у складі демодулятора, – це задача класифікації образів, тому відповідно до проведеного огляду літератури, було вибрано такі типи мереж: прямого поширення (Feed-forward backprop); мережа Елмана (Layer recurrent); ймовірнісна ШНМ (Probabilistic neural network); прямого поширення із ЛЗ прихованого шару (Feed-forward distributed time delay); узагальнена нейронна мережа регресії (Generalized regression); прямого поширення з лінійною функцією активації (Linear layer (design)); прямого поширення з лінійною функцією активації (Linear layer (train)); нелінійна авторегресія екзогенна (NARX); перцептрон (Perceptron).

Для збору навчальної вибірки і тестування ШНМ у складі демодулятора, на базі схеми зображеної на рис. 1, створено модель АОКЗ у програмному середовищі MATLAB/Simulink, рис. 6.

У результаті створення та дослідження моделей демодуляторів із кожною з дев'яти вищезазначених мереж позитивного результату досягнуто тільки з двома ШНМ: прямого поширення (рис. 7а) і ймовірнісною мережею (рис. 7б).

У моделі на рис. 6 після фільтра додано блок дискретизації із частотою дискретизації $32 \cdot 10^{-10}$ с. Далі застосовано прийом для усунення «ефекту нуля» і додано блок нормування, щоб на вхід ШНМ надходив сигнал у діапазоні (0;1). Далі встановлено лінії затримки із затримкою на $32 \cdot 10^{-10}$ с. З блоку попередньої обробки сигнали потрапляють на ШНМ, після якої встановлено блок дискретизації із часом дискретизації, що дорівнює довжині одного біта 32 нс. Оскільки вихідний нейрон мережі прямого поширення має тангенційну функцію активації, його вихід хоча і прямує до 1 при логічній 1 і до 0 – при 0, проте не досягає цього значення і коливається в межах кількох відсотків. Калькулятор бітових помилок сприймає такий сигнал як помилковий, хоча він відрізняється від непомилкового на деякий процент (<10%), тому після ШНМ встановлено компаратор для усунення цього ефекту.

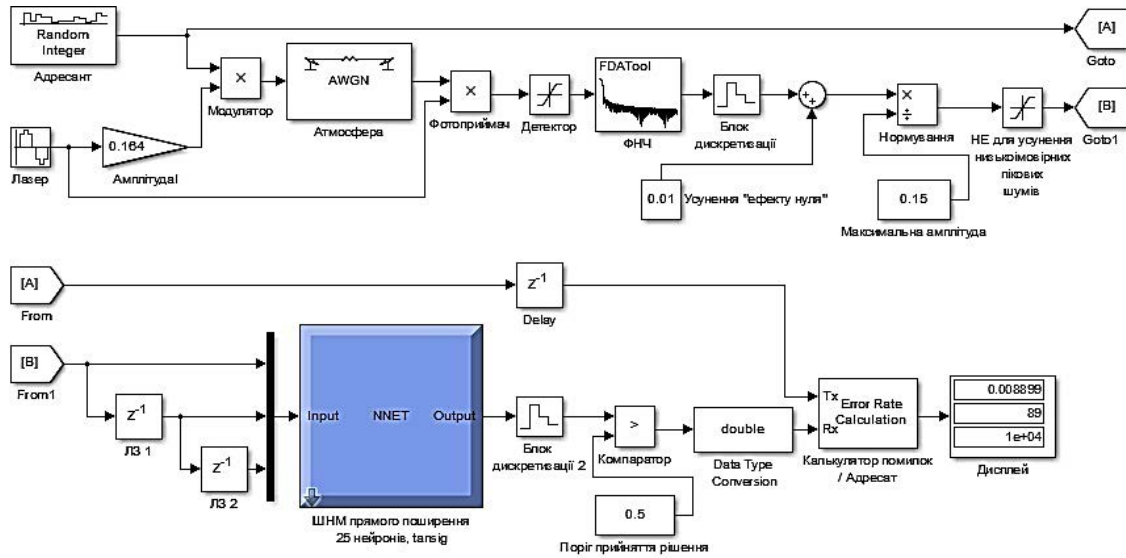


Рис. 6. Модель АОКЗ у середовищі MATLAB/Simulink

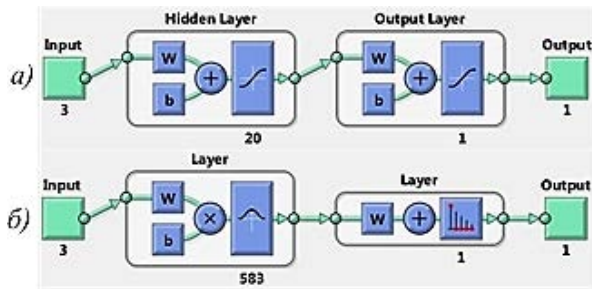


Рис. 7. Візуалізація архітектури досліджених типів штучних нейронних мереж із двома ЛЗ на вході, які показали прийнятний результат: а – прямого поширення; б – ймовірнісна ШНМ

Побудовані криві залежності КБП від ВСШ систем АОКЗ із нейронними мережами в складі демодулятора зображені на рис. 8.

Для побудови кривих на рис. 8 проводилась серія моделювань із кроком 0,1 дБ для ВСШ від 0 до 2,5, 1 дБ – для ВСШ від 3 до 10 дБ. Характер кривих схожий із кривою [2, рис. 2], що свідчить про достовірність створеної моделі.

Обговорення отриманих результатів. Ймовірнісна радіально базисна мережа показала найнижчий КБП при ВСШ

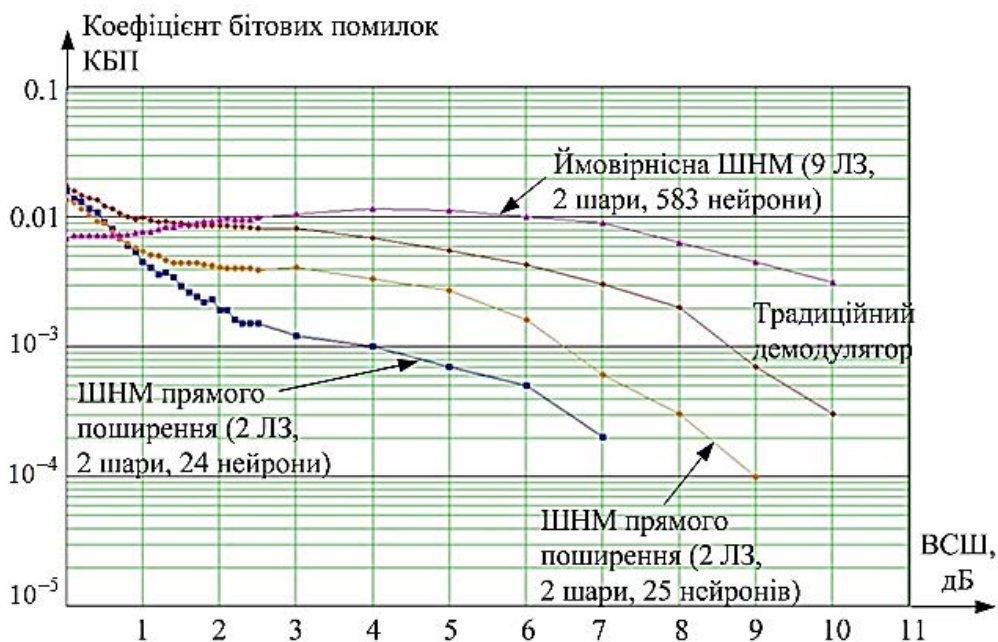


Рис. 8. Залежність КБП від ВСШ із використанням синтезованих штучних нейронних мереж у складі демодулятора

від 0 до 0,7 дБ, проте велика кількість нейронів прихованого шару (583) потребувало значного часу моделювання, на побудову однієї кривої було затрачено 12 годин машинного часу (Intel Core i3-2350M CPU, 2.30 ГГц, оперативна пам'ять 4 Гб). Окрім того, при ВСШ більше 2 дБ ця ШНМ показала гірший КБП за традиційний демодулятор на основі компаратора.

Мережа прямого поширення із 24 нейронами прихованого шару і двома лініями затримки входу показала найнижчий КБП при ВСШ більше за 0,7 дБ. На нижчих ВСШ її крива збігається з кривою ШНМ із 25 нейронами і вони нижчі за криву традиційного демодулятора.

У роботі [17] крива залежності КБП від ВСШ синтезованого нейромережевого демодулятора практично збігається з кривою традиційного когерентного демодулятора на ділянці від 0 до 3 дБ. Головною перевагою запропонованого демодулятора є відсутність необхідності смугового фільтра на вході.

У роботі [20] була досліджена проблема демодуляції сигналу в системі бездротового зв'язку з невідомою моделлю каналу. Результати показали, що запропонований приймач має однакову криву КБП від ВСШ із звичайним приймачем для каналу з білим шумом, проте він має явну перевагу для каналів із невідомою моделлю.

Висновки. Визначено фактори, що погіршують коефіцієнт бітових помилок атмосферного оптичного каналу керування

електроприводами мостового крану сховища радіоактивних відходів.

Задля оцінки можливого покращення КБП на всьому діапазоні ВСШ синтезовано демодулятори на основі дев'яти типів штучних нейронних мереж. Позитивний результат продемонстрували моделі з мережею прямого поширення і ймовірнісною нейронною мережею.

Виявлено, що застосування штучної нейронної мережі прямого поширення із затримками входу дає змогу знизити коефіцієнт бітових помилок на всьому дослідженому діапазоні відношення сигнал/шум, в той час як ймовірнісна мережа демонструє найнижчий коефіцієнт бітових помилок лише в діапазоні від 0 до 0,7 дБ.

Реалізовано непрямий метод нейроуправління, коли ШНМ застосована для виконання допоміжної функції – підвищення якості оптичного каналу зв'язку між органом управління і електроприводом.

На підставі проведених досліджень для зниження КБП пропонується:

1) знизити природну і штучну освітленість цеху, в якому розташовано кран;

2) забезпечити відсутність задимленості, запиленості і загазованості простору цеху;

3) застосовувати штучну нейронну мережу в складі демодулятора приймача. За результатами моделювання достатньо використовувати штучну нейронну мережу прямого поширення з двома лініями затримки вхідного сигналу, 24 нейронами прихованого шару із тангенційною функцією активації прихованого шару.

Список літератури

- [1] Rongqing H. Introduction to Fiber-Optic Communications: Optical transmission system design. Academic Press, Elsevier, 2019. 619 с. doi.org/10.1016/B978-0-12-805345-4.00008-1.
- [2] Yanghyo K. Analysis of Noncoherent ASK Modulation-Based RF-Interconnect for Memory Interface. *IEEE Journal On Emerging And Selected Topics In Circuits And Systems*, 2012. Vol. 2. P. 200–209. DOI: 10.1109/JETCAS.2012.2193511.
- [3] Alimi I. Challenges and Opportunities of Optical Wireless Communication Technologies. *Optical Communication Technology* : manual. Aveiro, 2017. P. 5–44. DOI: 10.5772/intechopen.69113.
- [4] Гауер Дж. Оптические системы связи : пособие. Москва, 1989. 501 с.
- [5] Alsulami O., Taha Hussein A., Alresheedi M. Optical Wireless Communication Systems, A Survey. *Engineering, Computer Science*. 2018. Vol. 2. P. 1–22. DOI: 10.13140/RG.2.2.11751.09129.
- [6] Ghassemlooy Z., Papoola W., Rajbhandari S. Optical Wireless Communication: manual. Boca Raton : CRC Press 2013. 557 p.

- [7] Геворгиз Р.Г., Малахов А.С. Пересчёт величины освещённости фотобиореактора в величину облучённости : учебно-методическое пособие. Севастополь : ФГБУН ИМБИ, 2018. 60 с.
- [8] Gill K. Radiation Damage Studies of Optoelectronic Components for the CMS Tracker Optical Links. *RADECS 97* : conf., Cannes, sept. 1997. P. 231–238. DOI: 10.1109/RADECS.1997.698956.
- [9] Mozhaev R.K. Research of Quantum Well Laser Diode's and Heterostructural P-I-N Photodiode's of Fiber-Optic Modules Radiation Hardness to Gamma-ray and Neutron Irradiation. *VII International Conference on Photonics and Information Optics*: conf., Moscow, 2018. P. 393–399. DOI 10.18502/ken.v3i3.2053.
- [10] Phifer C.C. Effects of Radiation on Laser Diodes. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, Sandia Rep. SAND2004-4725, 2004. 30 p.
- [11] Буриев Н.Н., Буриев Н.Т. Внешнее Излучение Комбинированного Хранилища Радиоактивных Отходов. *Международный научный журнал «Символ Науки»*. 2016. Вып. 10-1. С. 18–20.
- [12] Häusler K., Zeimer U., Sump B. Degradation model analysis of laser diodes. *Journal of Materials Science Materials in Electronics*. 2008. № 19(1). P. 160–164. DOI 10.1007/s10854-007-9534-8.
- [13] Lam S.K.K., Mallard R.E. Analytical model for saturable aging in semiconductor lasers. *Journal of Applied Physics*. 2004. № 94. P. 135–148. <https://doi.org/10.1063/1.1589594>.
- [14] Климов Ю.М., Хорошев М.В. Лазерная техника : учебное пособие. Москва : МИИГАиК, 2014. 143 с.
- [15] Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики : учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург : Физический ф-т СПбГУ, 2007. 152 с.
- [16] Li M., Zhong H. Sh. Neural Network Demodulator for Frequency Shift Keying. *International Conference on Computer Science and Software Engineering* : conf. Hubei, China, 2008. P. 76–87. DOI: 10.1109/CSSE.2008.1440.
- [17] Amini M.R., Moghadasi M., Fatehi I. A BFSK Neural Network Demodulator With Fast Training Hints. *Second International Conference on Communication Software and Networks*. Hong Kong, 2010. P. 578–582. DOI 10.1109/ICCSN.2010.123.
- [18] Amini M.R., Balarastaghi E., Branch B. Universal Neural Network Demodulator for Software Defined Radio. *International Journal of Engineering and Technology*. 2011. № 3. P. 263–268.
- [19] Chow T.W.S., Feng J.Ch., Ng K.T. An Adaptive Demodulator for the Chaotic Modulation Communication System with RBF Neural Network. *IEEE Transactions On Circuits And Systems: Fundamental Theory And Applications*. 2000. № 6. P. 902–909.
- [20] Onder M., Akan A., Dogan H. Neural network based receiver design for Software Defined Radio over unknown channels. *8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*. Bursa, Turkey, 2013, P. 297–300. DOI: 10.1109/ELECO.2013.6713848.
- [21] Веселов О.В., Сабуров П.С. Методы искусственного интеллекта в диагностике : учебное пособие. Владимир : ВлГУ, 2015. 251 с.

© Чермалих О. В., Мугенов Д. Д.

Дата надходження статті до редакції: 29.10.2020

Дата затвердження статті до друку: 27.11.2020