

УДК 621.391

ТРУБЧАНИНОВА К. А., к.т.н., доцент,

КУРЦЕВ М. С., к.т.н.,

МИХАЙЛОВ М. В., магістрант,

ДУЧЕНКО В. Ю., магістрант

(Український державний університет залізничного транспорту)

## Модуляція випромінювання лазерного діода OFDM-сигналом

*Досліджується вплив нелінійності ВАХ лазерного діода на якісні показники OFDM-сигналу з подальшою можливістю вибору максимальної кількості піднесних каналів в OFDM-сигналі при заданій нормі перехресних перехрестів. У статті подано схему моделювання процесу OFDM-модуляції і розраховано спектри сигналів на виході лазерного діода при модуляції OFDM-сигналом при різних значеннях глибини модуляції.*

**Ключові слова:** лазерний діод, нелінійність ВАХ, OFDM-сигнали, DWDM.

### Вступ

Останні досягнення високошвидкісної передачі в безпроводних системах телекомунікацій пов'язані із застосуванням технології OFDM (анг. Orthogonal frequency division multiplexing – мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів). Сигнали OFDM є базовими для сімейства стандартів IEEE 802.11 (WiFi) і IEEE 802.16 (WiMax), відповідних пакетній передачі по каналах безпроводних локальних WLAN (анг. Wireless local area network – безпроводна локальна мережа) і міських WMAN (анг. Wireless metropolitan area network – безпроводна мережа масштабу міста) мереж, а також для низки прийнятих стандартів цифрового телебачення та мобільної мережі 4G. Застосування OFDM технології в електричному діапазоні спільно з технологією щільного спектрального поділу каналів в оптичному діапазоні (DWDM) відкриває широкі перспективи в мережах доступу. Очевидно, що з техніко-економічної точки зору, вигідно використовувати недороге абонентське обладнання, наприклад застосовуючи на передачі пряму модуляцію випромінювання ЛД (лазерного діода) OFDM-сигналом, а на прийомі – пряме детектування оптичного сигналу за допомогою ФД (фотодетектування). Водночас необхідне врахування впливу нелінійності ЛД на показники якості піднесних сигналів. При модуляції випромінювання ЛД OFDM-сигналом необхідно враховувати, що OFDM-сигнал порівняно з багатоканальним сигналом, що складається з суми піднесних каналів з випадковими фазами, має потужні викиди (сплески) амплітуди, які схильні до кліпування при модуляції випромінювання ЛД. Сплески амплітуд призводять до спотворення OFDM-сигналу. Для оцінки цього явища використовують параметр відношення пікового значення потужності сигналу до середньої потужності

(PAPR – peak-to-average power ratio). Розробники прагнуть зменшити величину PAPR. Таким чином, виникає можливість прямої модуляції випромінювання ЛД OFDM-сигналом з необхідною якістю сигналу. Використання прямої модуляції випромінювання ЛД OFDM-сигналом є актуальним завданням не тільки для мереж доступу, побудованих на волоконно-оптичній інфраструктурі, а й для оптичних безпроводних мереж доступу при організації точок доступу або розгалуженої безпроводної інфраструктури (VLC / Li-Fi – visible light communication / light fidelity).

Тому **метою роботи** є дослідження впливу нелінійності ВАХ ЛД на якісні показники OFDM-сигналу, що дозволило б обґрунтовано вибрати максимальну кількість піднесних каналів в OFDM-сигналі при заданій нормі перехресних перехрестів.

### Основна частина

Під OFDM-сигналом розглядаємо сигнал в основній смузі частот без фазових форматів модуляції в піднесних (baseband). Для цього створена програма об'єктно-орієнтованою мовою Delphi, що дає змогу за допомогою ШПФ оцінити SNR у піднесних каналах.

На рис. 1 показано структурну схему імітаційної моделі, в якій немає блоків, що забезпечують випадковість фаз піднесних каналів. Для формування OFDM-сигналу використовується опорна частота  $\Omega_0$ , що виробляється високостабільним генератором опорної частоти. На виході генератора OFDM маємо піднесні частоти, величини яких кратні опорній частоті  $\Omega_0$ . Спектр цих сигналів зосереджений на певній частоті  $\Omega_i$  де  $i = 1, 2 \dots N$ , а мінімуми спектра потрапляють у максимуми сусідніх піднесних каналів, частотний інтервал між піднесними  $\Delta\Omega$ . Після підсумовування всіх піднесних сигналів формується

© К. А. Трубочанінова, М. С. Курцев, М. В. Михайлов, В. Ю. Дученко, 2019

електричний OFDM-сигнал, який модулює ЛД. Припускаємо, що глибина оптичної модуляції  $m_i$  (де

$i = 1, 2 \dots N$ ) однакова в усіх піднесних каналах і може варіюватися в межах від 0,1 до 0,2.

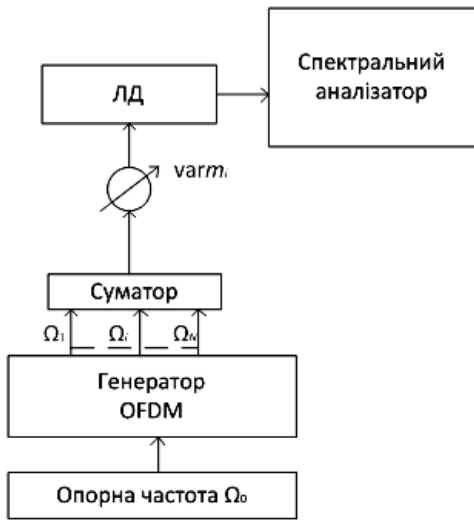


Рис. 1. Структурна схема моделювання процесу модуляції випромінювання ЛД OFDM-сигналом

Вихід ЛД підключений до спектрального аналізатора, який аналізує спектр випромінювання і виводить його на екран. Спектр в аналізаторі спектра обчислюється за допомогою ШПФ (швидке перетворення Фур'є), яке реалізовано за допомогою програмування об'єктно-орієнтованою мовою Delphi.

На рис. 2 показано приклад спектра при модуляції ідеального ЛД OFDM-сигналом з 64 піднесними каналами, частотний інтервал між якими складає 64 МГц, а глибина модуляції  $m_i = 0,1$ . Як видно з рис. 2, перший піднесний канал обраний на достатній віддаленості від низькочастотної (НЧ) частини спектра - на частоті 4096 МГц.

Таким чином, передбачена захисна частотна смуга рівна смузі OFDM-сигналу, що обумовлено появою в НЧ-області спектра сильних комбінаційних частотних складових другого порядку виду  $\Omega_i - \Omega_j$ , де  $i, j = 1, 2 \dots N$ . Зазначимо, що такі перешкоди з'являються також на приймальній стороні, після ФД, у спектрі фотоструму, тому що фотострум прямо пропорційний квадрату оптичного поля сигналу. У високочастотній (ВЧ) області спектра, вище частоти OFDM-сигналу з'являються складові другого порядку  $\Omega_i - \Omega_j$ , де  $i, j = 1, 2 \dots N$ , проте їх рівень приблизно в два рази менший за рівень перешкод у НЧ-області. Складові спектра типу  $\Omega_i - \Omega_j$  можуть успішно фільтрувати в приймально-передавальних трактах і не впливати на якість сигналу. При такому розташуванні в спектрі частот OFDM-сигналу найнебезпечнішими комбінаційними складовими є складові третього порядку виду  $2\Omega_i - \Omega_j$ , де  $i, j = 1, 2 \dots N$ , у  $i \neq j$ , тому що вони потрапляють у смуги пропускання піднесних каналів і спотворюють сигнали. Щільність спектрального розподілу перешкод такого виду у смузі OFDM-сигналу має форму параболи, що призводить до викривлення рівня піднесних (рис. 2).

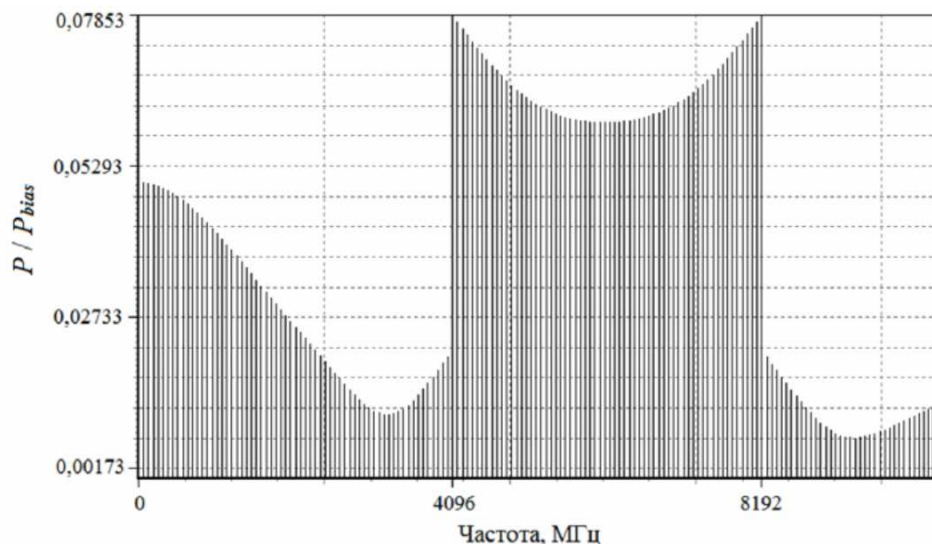


Рис. 2. Нормований спектр на виході ідеального ЛД ( $A \rightarrow 0$ ) при модуляції OFDM-сигналом ( $N = 64, \Delta\Omega = 64$  МГц,  $m_i = 0,1$ )

Знизити небажаний вплив на сигнал використання ЛД, що має плавну ВАХ. На рис. 3 комбінаційних частотних складових дозволяє показано приклад спектра при модуляції

випромінювання ЛД з параметром  $A = 1$  OFDM-сигналом з 64 піднесними каналами, частотний інтервал між якими складає 64 МГц, а глибина модуляції  $m_i = 0,1$ .

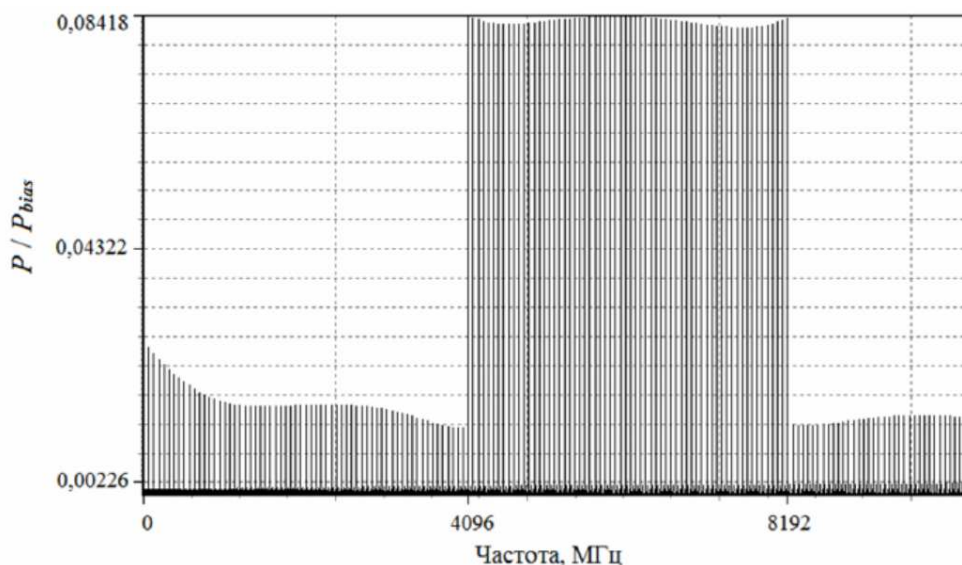


Рис. 3. Нормований спектр на виході ЛД з параметром  $A = 1$  при модуляції OFDM-сигналом ( $N = 64$ ,  $\Delta\Omega = 64$  МГц,  $m_i = 0,1$ )

Порівнюючи рис. 2 і 3, бачимо, що перешкодна обстановка значно поліпшилася для ЛД, що має плавну ВАХ. Це обумовлено в першу чергу тим, що при використанні ідеального ЛД відбувається кліпування OFDM-сигналу, що призводить до виникнення в спектрі потужних комбінаційних частотних складових другого і особливо шкідливого для OFDM-сигналу – третього порядку. При використанні ЛД, що має плавну ВАХ, практично відсутні кліпування, а небажані комбінаційні частотні складові, що виникають при кліпуванні, мають відносно низький рівень, при цьому з'являється незначний спектральний шумовий фон (на рис. 3 відображений майже суцільним спектром).

Прогони програми проводилися при різних значеннях глибини оптичної модуляції  $m_i$  з можливістю оцінки сумарної потужності перешкоди в кожному з  $N$  ( $N = 8, 16, 32, 64$ ) піднесних каналів для двох типів ЛД. Обчислювалося мінімальне значення  $SNR_{min}$  у піднесних каналах, що мають ширину смуги 64 МГц залежно від  $m_i$  при  $A \rightarrow 0$  і  $A = 1$ . Результати обчислень показано на рис. 4 і 5 відповідно.

Як бачимо, збільшення  $m_i$  призводить до зменшення  $SNR_{min}$ , однак швидкості зменшення сильно відрізняються. Так, наприклад, як видно з рис. 4, модуляція випромінювання ідеального ЛД 16-канальним OFDM-сигналом при  $m_i < 0,7$  відбувається без кліпування (в ідеальному випадку  $SNR_{min} \rightarrow \infty$ , в нашому випадку 300 дБ відповідає межі обчислення при моделюванні).

При  $m_i > 0,7$  ЛД переходить у режим кліпування OFDM-сигналу і  $SNR_{min}$  різко погіршується. При  $N = 32$  і при  $N = 64$  кліпування майже завжди наявне навіть при незначних величинах глибини оптичної модуляції.

При  $N = 32$  і при  $N = 64$  кліпування майже завжди наявне навіть при незначних величинах глибини оптичної модуляції. Для забезпечення, наприклад,  $SNR_{min} > 20$  дБ при  $N = 32$  необхідно утримувати  $m_i < 0,04$ . При  $N = 64$  практично неможлива модуляція ідеального ЛД OFDM-сигналом і надалі передача оптичного сигналу по оптичному тракту без попереднього використання методів перешкодостійкого кодування (FEC – Forward Error Correction), що забезпечує задану ймовірність помилки в каналах при малих значеннях  $SNR_{min}$ .

Як бачимо, показники якості сигналу поліпшуються при використанні ЛД з плавною ВАХ, наприклад, коли  $A = 1$ . Модуляція випромінювання ЛД OFDM-сигналом з числом піднесних каналів, яке не перевищує 32, можлива при більш глибокій оптичній модуляції – величина  $m_i$  може досягати 0,2. Подальше зростання числа піднесних каналів вимагає зменшення  $m_i$ . Так, наприклад, при  $N = 64$  необхідно обмежити глибину оптичної модуляції величиною близько 0,1. Конкретне значення  $m_i$  залежить від необхідних вимог до якісних показників сигналів у піднесних каналах OFDM-сигналу, а також від використовуваного формату модуляції.

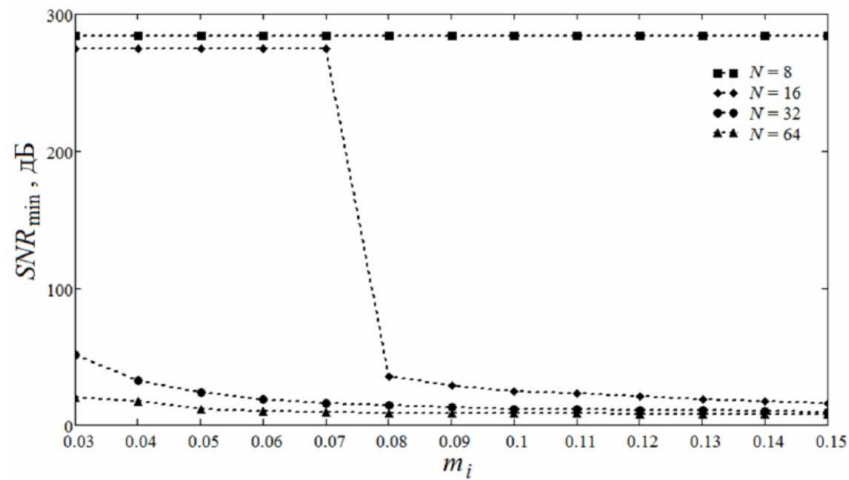


Рис. 4. Залежність  $SNR_{min}$  від  $m_i$  при модуляції випромінювання ідеального ЛД  $N$ -каналним OFDM-сигналом ( $N = 8, 16, 32, 64$ )

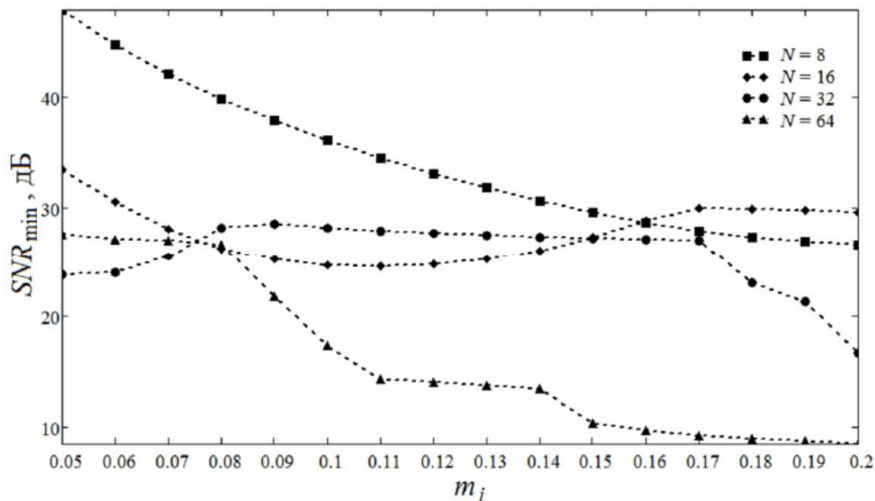


Рис. 5. Залежність  $SNR_{min}$  від  $m_i$  при модуляції випромінювання ЛД з параметром нелінійності  $A = 1$   $N$ -каналним OFDM-сигналом ( $N = 8, 16, 32, 64$ )

### Висновки

1. ЛД з близькою до ідеальної ВАХ не кращий для прямої модуляції OFDM-сигналом (baseband), тому що через явища кліпування виникають потужні перешкоди, які потрапляють у частотні смуги піднесних каналів. Подолати це обмеження можливо при використанні перешкодостійких методів кодування даних до модуляції.
2. ЛД або оптоелектронні модулятори з плавною передавальною характеристикою більш прийнятні для модуляції OFDM-сигналом (baseband). Можлива модуляція випромінювання ЛД OFDM-сигналом 64 піднесними каналами без застосування перешкодостійких методів кодування.
3. Для забезпечення плавності і зменшення впливу

нелінійностей ВАХ можна використовувати маломодові або багатомодові ЛД, а також двокаскадні схеми з використанням одномодового лазера і введеного ЛД, що працює в режимі посилення.

### Список використаних джерел

1. Panchenko S. Minimization method for average packet delay in data transmission networks / S. Panchenko, K. Trubchaninova, I. Koragob // ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018), Procedia Computer Science. – Latvia: Riga Technical University, 2019. - No 149. – P. 177-184.
2. Трубочанінова К. А. Дослідження моделі гібридної радіооптичної телекомунікаційної системи. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. № 6. С. 20-24.

3. Шуаїбов О. К., Опачко І. І., Качер І. Е., Чучман М. П. Лазерні джерела випромінювання та їх застосування в мікроелектроніці : навч. посіб. Ужгород : Ужгородський національний університет, фізичний та інженерно-фізичний факультети, 2009. 238 с.
4. Колесник Ю. І. Кіпєнський А. В. Елементи та пристрої квантової електроніки : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», 2016. 318 с. .

**Трубчанинова К. А., Курцев М. С., Михайлов Н. В., Дученко В. Ю. Модуляція излучения лазерного диода OFDM-сигналом.**

**Аннотация.** Исследуется влияние нелинейности ВАХ лазерного диода на качественные показатели OFDM-сигнала с последующей возможностью выбора максимального количества поднесущих каналов в OFDM-сигнале при заданной норме перекрестных помех. В статье приведена схема моделирования процесса OFDM-модуляции и рассчитаны спектры сигналов на выходе лазерного диода при модуляции OFDM-сигналом при различных значениях глубины модуляции.

**Ключевые слова:** лазерный диод, нелинейность ВАХ, OFDM-сигналы, DWDM.

**Trubchaninova K. A., Kurtsev M. S., Mykhailov M. V., Duchenko V. U. Modulation of laser diode OFDM-signal.**

**Abstract.** Recent advances in high-speed transmission in wireless telecommunications systems have been due to the use of OFDM technology (orthogonal frequency division multiplexing). The use of OFDM technology in the electric band together with the Dense Optical Bandwidth Splitting (DWDM) technology open up wide prospects in access networks.

When modulating the laser diode OFDM signal, it must be borne in mind that the OFDM signal, compared to a multichannel signal consisting of the sum of subtle channels with random phases, has powerful emission (bursts) of amplitude, which are prone to clipping when modulating radiation. The amplitude bursts lead to distortion of the OFDM signal. Therefore, the urgent task is to use direct modulation of OFDM laser diode radiation not only for fiber optic based access networks, but also for optical wireless access networks in the organization of access points or branched wireless infrastructure (VLC / Li-Fi - visible light). communication / light fidelity).

The influence of the nonlinearity of the laser diode voltages on the qualitative indicators of the OFDM signal is investigated, with the further possibility of selecting the maximum number of sublime channels in the OFDM signal at a given norm of cross-talk. It is shown that a laser diode close to the ideal VAC is better not to use for direct

modulation of the OFDM signal (baseband), because due to clipping phenomena there are powerful interferences that fall into the frequency bands of the subway channels. It is possible to overcome this limitation by using noise-proof methods of data encoding before modulation. At the same time, smooth diode laser diodes are more acceptable for OFDM signal modulation. It is possible to modulate the radiation of the OFDM LD signal by 64 subchannel channels without the use of interfering coding methods. In the article the scheme of modeling of the OFDM-modulation process is presented and the spectra of signals at the laser diode output during the modulation of the OFDM signal at different values of the modulation depth are calculated.

**Key words:** laser diode, non-linearity of VAC, OFDM signals, DWDM.

Надійшла 18.09.2019 р.

**Трубчанинова Карина Артурівна**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [ika2@ukr.net](mailto:ika2@ukr.net), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

**Курцев Максим Сергійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [kurtsev\\_m@ukr.net](mailto:kurtsev_m@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7250-4468>.

**Михайлов Микола Володимирович**, магістрант кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [18102016miha@gmail.com](mailto:18102016miha@gmail.com).

**Дученко Вікторія Юрївна**, магістрант кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту, м. Харків, Україна. E-mail: [viktoriyanazymko@gmail.com](mailto:viktoriyanazymko@gmail.com).

**Trubchaninova Karyna**, PhD. Sc., associate professor, Department of transport communication of Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [ika2@ukr.net](mailto:ika2@ukr.net), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2078-2647>.

**Kurtsev Maksym Serhiyovych**, PhD. Sc., associate professor, Department of Specialized computer systems of Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: [kurtsev\\_m@ukr.net](mailto:kurtsev_m@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7250-4468>.

**Mykhailov Mykola**, gs. of Department of transport communication (Ukrainian State University of Railway Transport). E-mail: [18102016miha@gmail.com](mailto:18102016miha@gmail.com).

**Duchenko Viktoriia**, gs. of Department of transport communication, (Ukrainian State University of Railway Transport). E-mail: [viktoriyanazymko@gmail.com](mailto:viktoriyanazymko@gmail.com).