

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-15>

УДК 519.6

Новосад Катерина Сергіївна¹, бакалавр

Никируй Любомир Іванович², к.ф.-м.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0002-3754-0348>

Яремій Іван Петрович², д.ф.-м.н., професор,

<https://orcid.org/0000-0002-8549-1173>

Федосов Сергій Анатолійович³, д.ф.-м.н., професор

<https://orcid.org/0000-0003-3457-8911>

¹Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

²Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, Україна

³Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

СУЧАСНІ ПІДХОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИЧНИХ АНАЛОГОВИХ І ЦИФРОВИХ СИСТЕМ

Новосад К.С., Никируй Л.І., Яремій І.П., Федосов С.А. Сучасні підходи реалізації оптичних аналогових і цифрових систем. У нашому дослідженні розглядаються новітні підходи до реалізації оптичних аналогових і цифрових систем на основі огляду провідних наукових статей останніх років. Проаналізовано сучасний стан і перспективи розвитку аналогових і цифрових оптичних інформаційних систем, визначено їхні переваги, обмеження та потенціал практичного застосування, зокрема, в оптичних обчисленнях, волоконно-оптичних сенсорних мережах, цифрових двійниках тощо. Розвиток оптичних інформаційних систем – один із ключових напрямів у сфері сучасних технологій. Завдяки своїм унікальним властивостям, оптичні аналогові та цифрові системи вже зараз знаходять застосування в критично важливих галузях, а у найближчому майбутньому вони можуть повністю змінити ландшафт обчислень, телекомунікацій і промисловості. Порівняльний критичний аналіз аналогових і цифрових систем показав, що обидва підходи мають свої унікальні переваги та певні обмеження, однак їхнє поєднання у вигляді гібридних систем відкриває нові перспективи у швидкісній і енергоефективній обробці інформації. Ключові технології, такі як оптичні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, оптичні нейромережі та сенсорні мережі, знаходяться на передовій світових наукових розробок. Дослідження з використанням глибокого навчання для проектування оптичних пристроїв свідчать про новий рівень адаптивності та автоматизації в оптичній інженерії.

Ключові слова: оптичний діапазон, аналогова система, цифрова система, оптичні обчислення, волоконно-оптична мережа, сенсор.

Novosad K., Nykyruy L., Yaremiy I., Fedosov S. Modern approaches to the implementation of optical analog and digital systems. Our study examines the latest approaches to the implementation of optical analog and digital systems based on a review of leading scientific articles of recent years. The current state and prospects for the development of analog and digital optical information systems are analyzed, their advantages, limitations and potential for practical application are identified, in particular, in optical computing, fiber-optic sensor networks, digital twins, etc. The development of optical information systems is one of the key directions in the field of modern technologies. Due to their unique properties, optical analog and digital systems are already finding applications in critical industries, and in the near future they can completely change the landscape of computing, telecommunications, and industry. A comparative critical analysis of analog and digital systems has shown that both approaches have their unique advantages and certain limitations, but their combination in the form of hybrid systems opens up new prospects in high-speed and energy-efficient information processing. Key technologies, such as optical analog-to-digital and digital-to-analog converters, optical neural networks and sensor networks, are at the forefront of global scientific developments. Research using deep learning for the design of optical devices indicates a new level of adaptability and automation in optical engineering.

Keywords: optical range, analog system, digital system, optical computing, fiber optic network, sensor.

Постановка наукової проблеми. У сучасному світі оптичні технології відіграють ключову роль у забезпеченні високошвидкісного передавання, обробки і зберігання інформації. Інформаційні системи, що працюють в оптичному діапазоні, використовують як аналогові, так і цифрові методи обробки сигналів. Завдяки використанню фотонів замість електронів, оптичні системи забезпечують вищу пропускну здатність, енергоефективність і меншу затримку, що особливо важливо для сучасних телекомунікацій, суперкомп'ютерів, штучного інтелекту та систем керування.

Аналіз досліджень. У дослідженні [1] розглядаються новітні підходи до реалізації оптичних аналогових і цифрових систем на основі огляду провідних наукових статей останніх років. Було проаналізовано сучасний стан і перспективи розвитку аналогових та цифрових оптичних інформаційних систем, визначено їхні переваги, обмеження та потенціал практичного застосування, зокрема, в оптичних обчисленнях, ШІ, промисловості та цифровому моделюванні.

Аналогові інформаційні системи оптичного діапазону використовують безперервні зміни амплітуди, фази або частоти світлових хвиль для передавання інформації. Такі системи мають

менше кроків обробки сигналів і зазвичай забезпечують нижчу затримку. У 2020 році запропоновано використання глибоких нейронних мереж для розробки багатшарових просторових оптичних диференціаторів [2]. Завдяки використанню машинного навчання вдалося досягти точного моделювання оптичних пристроїв, здатних до аналогових обчислень, таких як операції диференціювання. Це відкриває нові перспективи для створення аналогових процесорів, які працюють із зображеннями, сигналами чи навіть об'ємними даними в реальному часі [3].

Цифрові інформаційні системи в оптичному діапазоні працюють на основі дискретних станів світлових хвиль, зокрема, двійкових (0 або 1). Це дозволяє надійно кодувати, передавати й декодувати інформацію. Такі системи особливо ефективні при інтеграції в цифрову інфраструктуру та комп'ютерні мережі [4].

Мета. Проаналізувати сучасний стан і перспективи розвитку аналогових і цифрових оптичних інформаційних систем, визначити їхні переваги, обмеження та потенціал практичного застосування, зокрема, в оптичних обчисленнях, ШІ, промисловості й цифровому моделюванні.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

Оптичні обчислення (аналогові та цифрові) для ШІ. Із зростанням обсягів оброблюваних даних і популярністю штучного інтелекту, виникає потреба в нових архітектурах, які б поєднували високу швидкість, низьке енергоспоживання та масштабованість. Оптичні обчислення – це один із перспективних напрямів, що може забезпечити прорив у реалізації нейромереж та інших моделей ШІ.

Оптичні нейронні мережі прямого зв'язку	Спайкові нейронні мережі	Модель штучної нейронної мережі початкової структури цифрово-аналогового перетворювача
У штучній нейронній мережі з прямим зв'язком усі нейрони в сусідніх шарах з'єднані між собою з різними синаптичними вагами	Спайкові нейронні мережі імітують біологічну поведінку мозку з допомогою світлових імпульсів	У 2-бітному оптичному ЦАП розроблено модель штучної нейронної мережі (ШНМ) з прямим зв'язком за допомогою MATLAB

1. Оптичні нейронні мережі прямого зв'язку. Вони працюють на основі інтерференції та дифракції світла. У штучній нейронній мережі з прямим зв'язком усі нейрони в сусідніх шарах з'єднані між собою з різними синаптичними вагами. Для кожного нейрона спочатку виконується лінійно-зважена операція підсумовування. Вважається, що з попереднього шару надійшло N вхідних сигналів, позначених вектором-стовпцем

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T,$$

де x_N – інтенсивність N -го сигналу; N – загальна кількість вхідних сигналів; T – транспонування матриці.

Відповідні вагові коефіцієнти позначені іншим вектором-рядком

$$\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N],$$

де ω_N – N -й ваговий коефіцієнт; N – загальна кількість вагових коефіцієнтів.

Результат лінійного підсумовування для цього окремого нейрона буде $y = \sum_{n=1}^N x_n \omega_n$, що додатково запускає нелінійну функцію активації $f(y)$. Кінцевий вихід цього нейрона є $f(\sum_{n=1}^N x_n \omega_n)$. Якщо розглядати всі M нейронів в одному шарі, то вся лінійна операція є множенням векторів на матриці,

$$y' = \omega' x,$$

де y' належать до вектора, що складається з M результатів лінійного зваженого підсумовування для різних нейронів і ω' стосується $M \times N$ матриця, що складається з усіх вагових коефіцієнтів.

Порівняно з електронною реалізацією штучних нейронних мереж, оптична реалізація може підтримувати внутрішні паралельні обчислення зі швидкістю світла з меншими витратами енергії [5].

2. Спайкові нейронні мережі імітують біологічну поведінку мозку з допомогою світлових імпульсів. Спайкові нейромережі покращують здатність обробляти просторово-часові дані. З одного боку, нейрони в спайковій нейромережі з'єднані лише з сусідніми нейронами та обробляються окремо для покращення здатності обробляти просторову інформацію. З іншого боку, оскільки навчання залежить від інтервалу спайків, інформацію, втрачену у двійковому коді, можна отримати з часової інформації спайку, тим самим збільшуючи здатність обробляти часову інформацію. Факти показали, що спайкові нейрони є кращими обчислювальними одиницями, ніж

традиційні штучні нейрони. Однак, через труднощі в навчанні та фізичній реалізації спайкові нейромережі ще не отримали широкого використання [5].

3. Модель штучної нейронної мережі початкової структури цифро-аналогового перетворювача. У 2-бітному оптичному ЦАП розроблено модель штучної нейронної мережі (ШНМ) з прямим зв'язком за допомогою MATLAB. ШНМ структурована як мережа багатошарового перцептрона, де два розміри дефектних стрижнів, R_1 і R_2 , використовуються як вхідні дані, а вихідна потужність лазерів розглядається як вихідні дані. На рис. 1 показано архітектуру моделі ШНМ, що використовується в дослідженні. Мережа складається з двох прихованих шарів, кожен з яких має п'ять нейронів, і ця структура повторюється для кожного виходу.

Фаза вхідного джерела А вибирається із затримкою 102 градуси відносно В. Ця різниця фаз вибирається такою, щоб вона відповідала заданим хвилеводам і радіусу початкових дефектних стрижнів вихідної характеристики. Після отримання прийнятних вихідних сигналів, радіус дефектних стрижнів змінювався за допомогою нейронної мережі для покращення вихідних результатів. У фотонно-кристалічних хвилеводах взаємодія світла та матеріалу викликає зміну шляху поширення світла. У цій структурі поширення світла до виходу можна контролювати, змінюючи радіус стрижнів R_1 і R_2 .

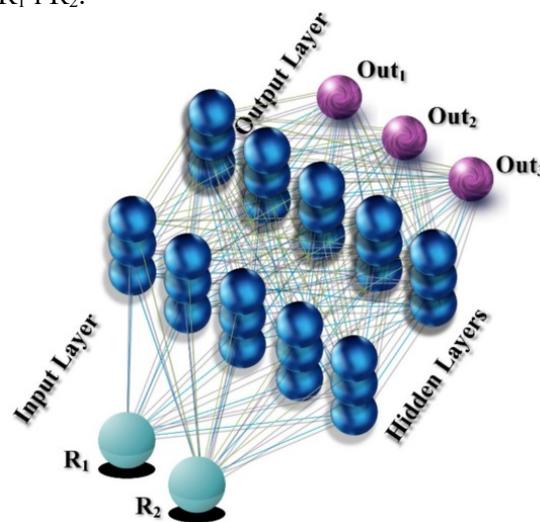


Рис. 1. Архітектура запропонованої моделі штучної нейронної мережі

ШНМ навчається на наборі даних, згенерованому шляхом моделювання структури фотонного кристала, з метою визначення оптимальних розмірів дефектних стрижнів, що максимізує продуктивність ЦАП. Мережа використовує алгоритм зворотного поширення сигналу прямого зв'язку для ітеративного налаштування вагових коефіцієнтів та зміщень, мінімізуючи похибку між прогнозованими та фактичними значеннями вихідної потужності.

Навчання моделі ШНМ для запропонованого повністю оптичного ЦАП виконується за допомогою алгоритму зворотного поширення, тоді як для оптимізації ваг мережі застосовується градієнтний алгоритм десенсації. Набір даних отримано за допомогою моделювання FDTD базової конструкції ЦАП. Крім того, набір даних ретельно оброблено та масштабовано з нормалізацією для забезпечення послідовного навчання та покращення конвергенції. Мережа навчається за допомогою алгоритму навчання з учителем. Тому, для оптимізації розробленої структури ЦАП, найкраща продуктивність ЦАП була прогнозована за допомогою запропонованої моделі ШНМ та алгоритму пошуку в сітці. Нарешті, найкращі результати R_1 і R_2 , отримані за допомогою моделі ШНМ, будуть застосовані в структурі ЦАП та оцінені за допомогою результатів FDT. Результат показує, що запропонована структура є компактною. Найважливішою перевагою цієї структури над іншими є її низький час стабільності та компактний розмір [6].

Перевага таких систем – надвисока паралельність, пропускна здатність у сотні Тбіт/с і менша затримка. Іншими словами, оптичні обчислення не лише прискорюють ШІ, але й формують нову парадигму в побудові нейромереж.

Волоконно-оптичні сенсорні мережі та цифрові двійники. Сучасне виробництво, зокрема у сфері авіабудування, машинобудування та енергетики, потребує постійного моніторингу стану

конструкцій у реальному часі. Одним із найперспективніших рішень є використання волоконно-оптичних сенсорних мереж, що поєднуються з концепцією цифрових двійників.

Цифровий двійник – це віртуальна модель фізичного об'єкта, яка постійно оновлюється на основі реальних даних з сенсорів. Такий підхід дозволяє не лише виявляти помилки та деформації під час складання, а й передбачати потенційні відмови чи неточності.

Інтелектуальна система складання на основі цифрових двійників в основному включає фізичні об'єкти, віртуальні моделі, системи обслуговування та процеси збору даних про двійників. На фізичному об'єкті розподілена багатофізична сенсорна мережа для отримання необхідної інформації про параметри стану від фізичного об'єкта. У віртуальній моделі розрахунок складання фізичного об'єкта виконується з використанням математичних моделей для кожної структури складання. Система обслуговування з'єднує фізичний об'єкт з віртуальною моделлю за допомогою різних алгоритмів обробки даних, щоб дозволити йому максимально відновити фактичний стан процесу складання, а також виконати онлайн-корекцію складання. Модель цифрових двійників, заснована на цій комбінації віртуальних і реальних моделей, зображено на рис. 2.

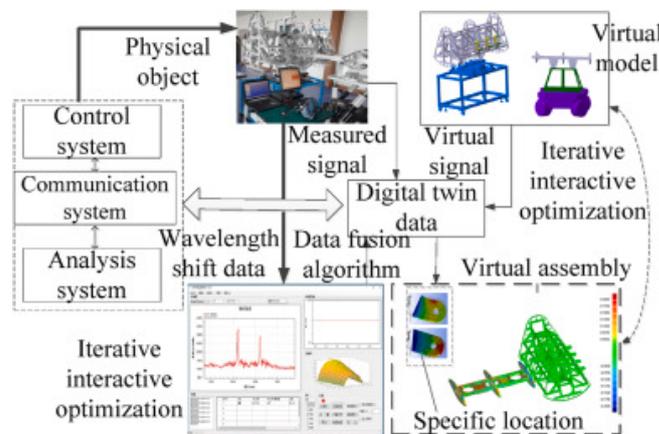


Рис. 2. Система складання оптичних волоконно-оптичних датчиків на основі моделі цифрових двійників

На рисунку показано, що мережа волоконно-оптичних датчиків є модулем онлайн-моніторингу поля деформації складання в цій віртуальній системі складання на основі цифрових двійників. Мережа датчиків використовується для вимірювання змін поля напружень між вузлами, які неможливо отримати за допомогою LiDAR або тензодатчиків. Оскільки процес складання фактично закриває місце випробування, датчик LiDAR не може бути освітлений, а розмір необхідного тензодатчика вплине на герметичність складання.

Важливо, що система має зворотний зв'язок – тобто інформація з датчиків не лише фіксується, але й використовується для реального коригування віртуальної моделі. Таким чином, цифровий двійник адаптується до змін у фізичному світі, дозволяючи виконувати точне складання навіть у складних або недоступних для звичайних засобів вимірювання зонах [7].

Ця концепція проєктування пропонує нові ідеї для інтелектуального складання та гнучкого онлайн-налаштування великих конструкцій. Запропонована система може отримувати розподіл напружень у чутливих точках на заготівлі в режимі реального часу та може надавати опорні дані про відхилення положення заготівлі для системи точного налаштування складання, щоб реалізувати корекцію відстеження складання в режимі реального часу та зменшити вплив помилок складання.

Система дозволяє досягти середньої точності відхилення положення на рівні 0,043 мм, що відповідає високоточному виробництву. Такий підхід може бути використаний у:

- складанні літаків;
- будівництві мостів;
- виробництві великогабаритних об'єктів з великою кількістю елементів.

Поєднання сенсорної мережі та цифрового моделювання відкриває нові можливості для автоматизації виробничих процесів, зменшення браку та підвищення якості кінцевого продукту.

Аналогові та цифрові інформаційні системи в оптичному діапазоні мають як спільні риси, так і суттєві відмінності, що визначають їхню доцільність у конкретних сферах застосування.

Обидва підходи мають свої переваги. Аналогові системи – надзвичайно швидкі й природні для реального середовища, але менш точні. Цифрові – більш надійні та універсальні, але потребують складної обробки сигналів. Саме тому новітні дослідження активно вивчають гібридні системи, які поєднують кращі риси обох підходів.

Перспективи розвитку та застосування. Розвиток оптичних інформаційних систем – один із ключових напрямів у сфері сучасних технологій. Завдяки своїм унікальним властивостям, оптичні аналогові та цифрові системи вже зараз знаходять застосування в критично важливих галузях, а у найближчому майбутньому вони можуть повністю змінити ландшафт обчислень, телекомунікацій і промисловості.

1. *Великомасштабна інтеграція оптичних процесорів.* Очікується, що у наступні кілька років на ринку з'являться фотонні процесори, які виконуватимуть аналогові та цифрові обчислення без перетворення в електронні сигнали. Це дозволить зменшити енергоспоживання дата-центрів у рази, збільшити швидкість нейромережних обчислень і знизити теплові навантаження.

2. *Оптичні системи для ШІ.* Штучний інтелект вимагає величезних обсягів обчислень. Тому аналогові оптичні нейромережі, які вже зараз реалізуються у вигляді просторових інтерферометрів або матричних пристроїв, здатні радикально пришвидшити тренування й інференс нейронних моделей. Дослідження підтверджують, що гібридні оптоелектронні архітектури стануть основою наступного покоління ШІ.

3. *Інтелектуальні цифрові двійники.* Завдяки волоконно-оптичним сенсорним мережам стає можливим створення точних цифрових моделей фізичних об'єктів у реальному часі. Це відкриває шлях до повної автоматизації:

- авіа- та автоскладання;
- будівництва мостів, кораблів, інфраструктури;
- медичної діагностики (на основі 3D-моделей органів у режимі реального часу).

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Було розглянуто основи, сучасні досягнення та перспективи розвитку аналогових і цифрових інформаційних систем в оптичному діапазоні. Аналіз показав, що обидва підходи мають свої унікальні переваги та певні обмеження, однак їхнє поєднання у вигляді гібридних систем відкриває нові перспективи у швидкісній і енергоефективній обробці інформації.

Ключові технології, розглянуті в роботі, такі як оптичні аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, оптичні нейромережі та сенсорні мережі, знаходяться на передовій світових наукових розробок. Дослідження з використанням глибокого навчання для проєктування оптичних пристроїв свідчать про новий рівень адаптивності та автоматизації в оптичній інженерії.

Таким чином, розвиток аналогових та цифрових оптичних інформаційних систем – не лише технічний виклик, а й стратегічний напрямок, який визначатиме вигляд інформаційного суспільства XXI століття.

Список бібліографічного опису

- Новосад К., Никируй Л., Яремій І., Федосов С. Аналогові та цифрові інформаційні системи оптичного діапазону. *Проблеми комп'ютерних наук, програмного моделювання та безпеки цифрових систем* : матеріали ІІ Міжнар. наук.-практ. конф., 9–11 черв. 2025 р., Луцьк–Світязь, Україна. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2025. С. 229–230. <https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/conf/article/view/266>
- Чжоу Ю., Чень Р., Чень В. [та ін.]. Оптичні аналогові обчислювальні пристрої, розроблені за допомогою глибокої нейронної мережі. *Оптичні комунікації*. 2020. Т. 458. С. 124674. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124674>
- Ян Х., Ван Д., Рен Х. [та ін.]. Оптичні аналогові обчислення для виявлення яскраво виражених об'єктів у складних сценах через діелектричну метаповерхню. *Фізичні листи А*. 2024. Т. 525. С. 129839. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129839>
- Джафарі Д., Нурмохаммаді Т., Асаді М.-Дж., Аббасян К. Повністю оптичний аналого-цифровий перетворювач на основі ефекту Керра у фотонному кристалі. *Оптика та лазерні технології*. 2018. Т. 101. С. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.007>
- Ву Дж., Лінь Х., Го Ю. [та ін.]. Аналогові оптичні обчислення для штучного інтелекту. *Інженерія*. 2021. Том 10. С. 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.021>
- Карамі П., Ях'я С. І., Чаудхарі М.-А. [та ін.]. Розробка компактного повністю оптичного цифро-аналогового перетворювача на основі фотонних кристалів з використанням нейронних мереж. *Результати в оптиці*. 2025. Т. 19. С. 100802. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100802>
- Лю З., Ян Дж., Ван Дж., Юе Л. Розробка модифікованої моделі інтелектуальної збірки цифрових двійників на основі волоконно-оптичної сенсорної мережі. *Цифровий зв'язок та мережі*. 2022. Т. 10, № 5. С. 1542–1552. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.06.013>

References

1. Novosad K., Nykyruy L., Yaremiy I., Fedosov S. Analog and digital optical range information systems. *Problems of Computer Science, Software Modeling and Security of Digital Systems* : Proc. II Inter. Sci. Pract. Conf., June 09–11, 2025, Lutsk–Svityaz', Ukraine. Lutsk : Lesya Ukrainka Volyn Nat. Univ., 2025. P. 229–230. <https://apcssm.vnu.edu.ua/index.php/conf/article/view/266>
2. Zhou Y., Chen R., Chen W. [et al.]. Optical analog computing devices designed by deep neural network. *Optics Communications*. 2020. Vol. 458. P. 124674. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124674>
3. Yang X., Wang D., Ren H. [et al.]. Optical analog computing for salient object detection in complex scenes via dielectric metasurface. *Physics Letters A*. 2024. Vol. 525. P. 129839. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2024.129839>
4. Jafari D., Nurmohammadi T., Asadi M.-J., Abbasian K. All-optical analog-to-digital converter based on Kerr effect in photonic crystal. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 101. P. 138–143. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.11.007>
5. Wu J., Lin X., Guo Y. [et al.]. Analog optical computing for artificial intelligence. *Engineering*. 2021. Vol. 10. P. 133–145. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.06.021>
6. Karami P., Yahya S. I., Chaudhary M.-A. [et al.]. Design of a compact all-optical digital-to-analog converter based on photonic crystals using neural networks. *Results in Optics*. 2025. Vol. 19. P. 100802. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2025.100802>
7. Liu Z., Yang J., Wang J., Yue L. Design of modified model of intelligent assembly digital twins based on optical fiber sensor network. *Digital Communications and Networks*. 2022. Vol. 10, № 5. P. 1542–1552. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.06.013>

Історія статті:

Отримано: 12.01.2026 Доопрацьовано: 10.02.2026 Прийнято до друку: 23.03.2026 Опубліковано: 29.03.2026