

# МЕТАМАТЕРІАЛИ У РОЗРОБЦІ НОВІТНІХ СЕНСОРІВ ДЛЯ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

*Дроздук Віталій Андрійович<sup>1</sup>*

Опубліковано	Секція	УДК
30.06.2025	Економіка	539.394

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17151084>

**Анотація.** У статті розглядаються теоретичні основи та практичні аспекти застосування метаматеріалів у розробці високочутливих сенсорів для сучасних радіотехнічних систем. Акцент зроблено на унікальних властивостях метаматеріалів, які дозволяють суттєво розширити функціональні можливості сенсорних пристроїв, забезпечити їх мініатюризацію, підвищити точність та адаптивність до змін навколишнього середовища. Описано ключові типи метаструктур, зокрема метаповерхні, плазмонні та гіперболічні метаматеріали, що демонструють нові підходи до керування електромагнітними хвилями на субхвильових масштабах.

Детально проаналізовано сучасні технології виготовлення метаматеріалів, включаючи фотолітографію, електронно-променеву літографію, 3D-друк, а також використання гнучких підкладок для створення портативних і носимих сенсорів. Показано, що структура метаповерхонь дозволяє забезпечити високу добротність резонансів і точне налаштування на специфічні частоти, що є особливо важливим для задач точкового виявлення у складних електромагнітних умовах. Такі сенсори демонструють здатність до мультипараметричного аналізу — зокрема температури, вологості, тиску — завдяки інтеграції мультичастотних резонансів у структурі метаматеріалу.

У роботі також висвітлено інтелектуальні підходи до проектування метаматеріалів, зокрема використання згорткових нейронних мереж (CNN) для моделювання двовимірних структур метаповерхонь. Наведено переваги застосування машинного навчання для швидкої оптимізації геометричних параметрів метаструктур з метою досягнення заданих електромагнітних характеристик. Це дозволяє суттєво скоротити терміни проектування та знизити кількість фізичних прототипів, необхідних для дослідного виробництва.

Розглянуто також виклики, пов'язані з впровадженням метаматеріалів у реальні технічні системи: складність виготовлення, висока вартість компонентів, чутливість до виробничих дефектів та складність інтеграції з класичною електронікою. Водночас запропоновано низку стратегій для подолання цих бар'єрів, включаючи застосування MEMS-технологій, впровадження гнучких матеріалів і розвиток енергозберігаючих технологій бездротового зв'язку.

---

<sup>1</sup> Провідний науковий співробітник  
Український науково-дослідний інститут  
спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України  
<https://orcid.org/0000-0002-1062-0532>

У контексті перспектив, метаматеріали розглядаються як ключовий елемент для розвитку сенсорних систем нового покоління — автономних, енергоефективних, із високим ступенем адаптивності. Потенційні області застосування охоплюють не лише традиційні сфери радіотехніки, а й медицину, екологічний моніторинг, системи безпеки, телекомунікації та інтернет речей. Підкреслюється необхідність подальших міждисциплінарних досліджень, що поєднують матеріалознавство, наноінженерію, радіотехніку та штучний інтелект.

Таким чином, стаття пропонує комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку сенсорних технологій на основі метаматеріалів, доводячи, що їх широке впровадження може стати фундаментом для створення високоефективних адаптивних радіотехнічних систем майбутнього.

**Ключові слова:** метаматеріали, сенсори, радіотехнічні системи, метаповерхні, резонансні структури, плазмоніка, штучний інтелект, електромагнітне моделювання.

## METAMATERIALS IN THE DEVELOPMENT OF ADVANCED SENSORS FOR RADIO SYSTEMS

**Abstract.** The article considers the theoretical foundations and practical aspects of the application of metamaterials in the development of highly sensitive sensors for modern radio engineering systems. The emphasis is on the unique properties of metamaterials, which allow to significantly expand the functionality of sensor devices, ensure their miniaturization, increase accuracy and adaptability to environmental changes. Key types of metastructures are described, in particular metasurfaces, plasmonic and hyperbolic metamaterials, which demonstrate new approaches to controlling electromagnetic waves on subwavelength scales.

Modern technologies for manufacturing metamaterials are analyzed in detail, including photolithography, electron beam lithography, 3D printing, as well as the use of flexible substrates to create portable and wearable sensors. It is shown that the structure of metasurfaces allows to provide high Q-factor of resonances and precise tuning to specific frequencies, which is especially important for point detection tasks in difficult electromagnetic conditions. Such sensors demonstrate the ability to perform multiparametric analysis — in particular, temperature, humidity, pressure — due to the integration of multifrequency resonances in the metamaterial structure.

The paper also highlights intelligent approaches to the design of metamaterials, in particular, the use of convolutional neural networks (CNN) for modeling two-dimensional metasurface structures. The advantages of using machine learning for rapid optimization of the geometric parameters of metastructures in order to achieve the specified electromagnetic characteristics are presented. This allows significantly reducing the design time and reducing the number of physical prototypes required for experimental production.

The challenges associated with the implementation of metamaterials in real technical systems are also considered: the complexity of manufacturing, the high cost of components, sensitivity to manufacturing defects, and the difficulty of integration with classical electronics. At the same time, a number of strategies are proposed to overcome these barriers, including the use of MEMS technologies, the introduction of flexible materials, and the development of energy-saving wireless communication technologies.

In the context of prospects, metamaterials are considered as a key element for the development of new generation sensor systems — autonomous, energy-efficient, with a high degree of adaptability. Potential areas of application include not only traditional areas of radio engineering, but also medicine, environmental monitoring, security systems, telecommunications and the Internet of Things. The need for further interdisciplinary research combining materials science, nanoengineering, radio engineering and artificial intelligence is emphasized.

Thus, the article offers a comprehensive analysis of the current state and prospects for the development of sensor technologies based on metamaterials, proving that their widespread implementation can become the foundation for the creation of highly efficient adaptive radio engineering systems of the future.

**Keywords:** metamaterials, sensors, radio engineering systems, metasurfaces, resonant structures, plasmonics, artificial intelligence, electromagnetic modeling.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Сучасний розвиток радіотехнічних систем ставить перед наукою й технікою низку нових викликів, серед яких ключовими є підвищення чутливості, мініатюризація, розширення функціональності та забезпечення стійкості до завад. Традиційні матеріали, що використовуються при створенні сенсорів, досягають межі своїх можливостей у контексті роботи на високих частотах, адаптації до змінних зовнішніх умов і забезпечення багатофункціональності. У цьому контексті зростає інтерес до використання метаматеріалів — штучно створених композитних структур, що демонструють незвичні електромагнітні властивості, не характерні для природних матеріалів. Метаматеріали відкривають нові можливості для покращення характеристик сенсорів, зокрема їх чутливості, селективності та мініатюризації. Їх застосування у сенсорах дозволяє радикально змінити принципи вимірювання, забезпечуючи нові рівні вибірковості й адаптивності [1 – 3].

Практичне використання метаматеріалів відкриває нові можливості в конструюванні сенсорів, що працюють на основі резонансних явищ, керованої зміни електричних та магнітних властивостей, а також взаємодії з електромагнітними хвилями у діапазоні від радіочастот до терагерц. Проте на сьогодні існує потреба в систематизації знань про типи метаматеріалів, придатних до сенсорних задач, їх поведінку в умовах реального застосування та ефективну інтеграцію у структури радіотехнічних систем.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Протягом останніх десятиліть дослідження метаматеріалів зазнали значного розвитку, що відкрило нові можливості для їх застосування в радіотехнічних сенсорах та комунікаційних системах. На початковому етапі досліджень метаматеріалів передбачалася можливість існування матеріалів з від'ємним показником заломлення, що стало теоретичною основою для сучасних експериментальних розробок. У XXI столітті, особливо після значного прогресу в нанотехнологіях, почали активно розвиватися інженерні методи створення складних структур, які змінюють взаємодію електромагнітних хвиль із матеріалами [2].

Наукові дослідження демонструють, що штучні резонансні структури можуть забезпечувати високочутливі властивості, що дозволяє використовувати метаматеріали для створення інтелектуальних сенсорів, здатних точно виявляти слабкі сигнали в складному електромагнітному середовищі. У публікаціях останніх років широко висвітлюється розробка плазмонних метаматеріалів, які мають особливі оптичні та радіочастотні характеристики, що дають змогу підвищити ефективність сенсорів. Зокрема, дослідження з використанням металевих наноструктур демонструють суттєве збільшення локалізації електромагнітного поля, що сприяє розширенню можливостей точкового виявлення [4].

Іншим важливим напрямом є дослідження гіперболічних метаматеріалів, які володіють анізотропними оптичними властивостями та дозволяють керувати електромагнітними хвилями на нано- та мікромасштабі. Дослідники активно вивчають такі матеріали для застосування в телекомунікаціях, а також у медичних сенсорних системах, зокрема для спектроскопічного аналізу біологічних зразків.

Останні наукові результати, також висвітлюють використання метаповерхонь у проектуванні адаптивних сенсорів, здатних змінювати свої властивості залежно від

зовнішніх умов. Це відкриває перспективи для створення динамічних радіочастотних пристроїв, які можуть гнучко змінювати свою поведінку при зміні інтенсивності або частоти сигналу. Зокрема, новітні дослідження демонструють, що зміна геометрії метаповерхні в реальному часі може призводити до покращення пропускання сигналу або його фільтрації.

Серед передових інновацій у даній галузі можна відзначити розробку штучних нейронних мереж для моделювання поведінки метаматеріалів та їх оптимізації. Завдяки алгоритмам машинного навчання стає можливим передбачити спектральні характеристики матеріалу, що значно пришвидшує пошук ефективних структур для конкретних застосувань [5].

Таким чином, сучасні дослідження метаматеріалів демонструють значний прогрес у сфері сенсорних технологій та комунікаційних систем, відкриваючи нові можливості для підвищення точності вимірювання та покращення ефективності радіотехнічних пристроїв. Незважаючи на існуючі виклики, такі як складність виробництва і високі витрати енергії у деяких структурах, перспективи практичного застосування метаматеріалів для радіотехнічних систем залишаються надзвичайно широкими та продуктивними.

**Мета статті** – дослідження та систематизація основних підходів до застосування метаматеріалів у конструкції сенсорів для радіотехнічних систем.

### Результати

Метаматеріали є унікальними штучно створеними матеріалами, які мають особливі властивості, що не зустрічаються в природі. Вони дозволяють управляти електромагнітними хвилями, змінювати їх напрямок і взаємодіяти з ними в нетрадиційний спосіб. Однією з ключових характеристик таких матеріалів є можливість отримання від'ємного показника заломлення, що дозволяє створювати суперлінзи з надзвичайно високою роздільною здатністю, а також невидимі покриття, які приховують об'єкти від радіолокаційних або оптичних сенсорів.

Таким чином, у сфері радіотехнічних систем метаматеріали активно використовуються для створення високочутливих сенсорів, які здатні покращити прийом та передачу сигналів. Такі сенсори мають мінімальні втрати енергії, а їх резонансні властивості забезпечують підвищену селективність у визначенні певних частот.

У зв'язку з тим, що сучасні радіотехнічні системи потребують високочутливих сенсорів, здатних працювати в складному електромагнітному середовищі, то саме використання метаматеріалів відкриває нові можливості для створення таких сенсорних пристроїв, забезпечуючи покращену селективність, зменшення втрат енергії та адаптивність до змін навколишнього середовища. Основними технологіями, що застосовуються для розробки сенсорів, є метаповерхні, резонансні структури, штучні плазмони та гіперболічні метаматеріали. Метаповерхневі сенсори складаються з планарних масивів нанорозмірних елементів, які ефективно контролюють електромагнітні хвилі та забезпечують ультратонкі сенсорні матриці з високою чутливістю до прийому сигналів. Їх виробництво включає використання літографічних методів, фазово-інженерних метаповерхонь та матеріалів на основі графену. Створення метаповерхонь із високою добротністю резонансів дозволяє здійснювати детектування на рівні одних часток на мільярд (ppb). Наприклад, при зміні навколишнього середовища на поверхні метаматеріалу змінюється ефективна електрична довжина елементів структури, що спричиняє зсув резонансної частоти. Такий підхід дозволяє побудувати сенсори на основі частотних зсувів, що легко фіксуються радіотехнічними методами. Такі сенсори широко застосовуються в точковому виявленні радіосигналів, антенних решітках для комунікацій та оптичних датчиках.

Резонансні структури дозволяють створювати сенсори високої точності, які з високою селективністю реагують на зміни електромагнітного поля. За рахунок температурної залежності діелектричних властивостей матеріалів основи (наприклад, полімідних плівок або оксидів металів), можна досягти детектування температурних змін з точністю до десятих часток градуса. Крім того, метаматеріали здатні досягати селективності, що дозволяє одночасно розрізняти кілька фізичних параметрів, наприклад, температуру та вологість, завдяки мультичастотним резонансам.

Сучасні технології розробки таких сенсорів включають використання фотолітографії, електронно-променевої літографії, мікроелектромеханічних систем (MEMS) та 3D-друку для створення складних мікроструктур. Висока точність виготовлення дозволяє реалізувати метаповерхні з контрольованою геометрією, що забезпечує стабільність резонансних характеристик. Наприклад, у процесі виготовлення сенсорів для терагерцового діапазону застосовуються мікрофрезерування, травлення та інжекційне формування, які дають змогу отримати мініатюрні структури з нано- та мікрометричною точністю.

Резонансні структури використовуються для розробки суперрезонансних сенсорів завдяки застосуванню локальних плазмонних резонансів, індуктивно-ємнісних контурів та багатошарових метаматеріалів. Такі сенсори знаходять своє застосування у радіолокаційних системах, моніторингу електромагнітного середовища та медичних біоелектричних датчиках.

Гіперболічні метаматеріали відіграють ключову роль у створенні багатофункціональних сенсорних систем завдяки їх здатності керувати електромагнітними хвилями, що підвищує точність вимірювання сигналів та мінімізує енергетичні втрати. Вони базуються на графенових наноструктурах, оптимізації дисперсійних характеристик та розробці метаповерхонь з адаптивними властивостями. Такі технології впроваджуються в прецизійні сенсорні матриці для інтелектуальних комунікаційних систем, гіперспектральні камери для аналізу електромагнітного спектра та сенсори для аерокосмічної галузі. Інтеграція метаматеріалів у мікросхеми досягається за допомогою нанесення тонких плівок на діелектричні або гнучкі підкладки, що дозволяє створювати сенсори на згинальних поверхнях, які можна вмонтовувати в портативні пристрої або використовувати у біомедичних системах моніторингу.

Інтелектуальні сенсори нового покоління також доповнюються електронними блоками обробки сигналу та бездротової передачі даних (Bluetooth, Wi-Fi, NFC). Це створює основу для повноцінних автономних сенсорних систем, які можуть працювати у важкодоступних або рухомих об'єктах, здійснюючи моніторинг в реальному часі. При цьому метаматеріальні структури забезпечують високу селективність і мінімальне споживання енергії. Тобто, впровадження метаматеріалів у сенсорні технології дозволяє значно покращити ефективність радіотехнічних пристроїв, забезпечуючи компактність, адаптивність та високочутливість.

Крім цього, зазначимо, що останні дослідження демонструють, що застосування штучних нейронних мереж у проектуванні метаматеріалів дозволяє з високою точністю прогнозувати їхні електромагнітні параметри, що значно спрощує процес їх оптимізації для реальних пристроїв. Зокрема, вчені розробили методіку збагачення даних, що дозволяє покращити точність прогнозування коефіцієнта пропускання метаматеріалів, використовуючи топологічну структуру та склад матеріалу

У процесі прогнозування електромагнітних характеристик метаматеріалів, представлених у вигляді двовимірних зображень, моделювання властивостей метаповерхонь виявляється менш трудомістким у порівнянні з об'ємними конфігураціями. Такі дослідження умовно поділяють на два основні підходи. Перший

базується на використанні згорткових нейронних мереж (CNN), тоді як другий застосовує штучні нейронні мережі без операцій згортки.

Використання CNN виявляється особливо ефективним у випадках, коли зображення мають високу роздільну здатність, а процес растеризації призводить до втрати просторових особливостей структури. Завдяки механізму згортки, нейромережа здатна зменшувати розмірність вхідного зображення, зберігаючи при цьому ключову інформацію про геометрію елементів метаповерхні. Приклад реалізації такого методу представлено на Рис.1 [3].

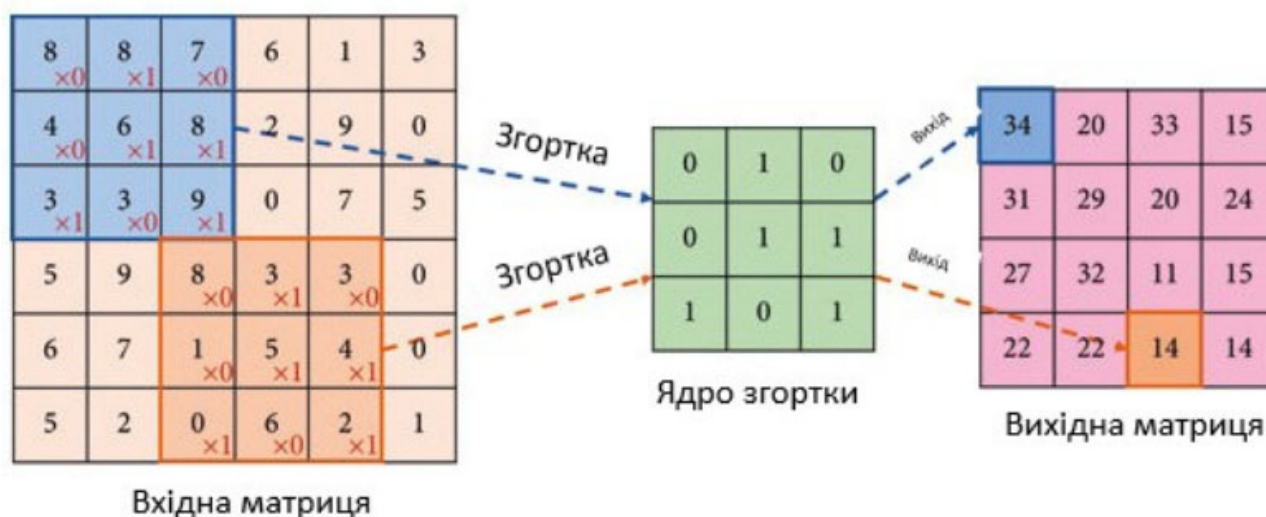


Рис.1. Схема зменшення розмірності зображення за допомогою згорткового ядра

Наведений підхід також може бути адаптований для задач, пов'язаних із моделюванням молекулярних або кристалічних структур, де просторове розташування атомів передається у вигляді тривимірних візуалізацій.

Попри значний прогрес у розробці метаматеріалів, науковці стикаються з певними викликами. Зокрема, складність виготовлення таких матеріалів обмежує їх практичне застосування у комерційних продуктах, а висока вартість виробництва робить їх недоступними для масового використання. Крім того, більшість сучасних розробок зосереджені на мікрохвильових та інфрачервоних діапазонах, тоді як ефективне використання метаматеріалів у видимому спектрі залишається складним завданням.

Незважаючи на вказані виклики, перспективи розвитку метаматеріалів надзвичайно великі. Вони вже знаходять застосування у наносенсорах, адаптивних антенах, біомедичних пристроях та навіть у сфері акустичних технологій, де нові штучні матеріали дозволяють створювати ефективні звукопоглинальні системи. У майбутньому метаматеріали можуть кардинально змінити підхід до розробки сенсорних систем, відкриваючи нові можливості у галузі телекомунікацій, безпеки та медичної діагностики.

## Висновки

Використання метаматеріалів у створенні сенсорів для радіотехнічних систем відкриває нові горизонти у галузі високоточної, мініатюрної та багатофункціональної сенсорики. Впровадження метаматеріалів у сенсорні системи дозволяє значно покращити ефективність радіотехнічних пристроїв, забезпечуючи високочутливі, компактні та адаптивні сенсорні технології. Метаповерхневі сенсори, резонансні

структури та гіперболічні метаматеріали є основними напрямками розвитку цієї галузі, пропонуючи можливості для створення інтелектуальних сенсорних мереж, автоматизованих діагностичних систем та новітніх технологій зв'язку.

Перспективи використання включають як традиційні задачі (вимірювання тиску, температури, вологості), так і новітні сфери — біомедицину, безконтактне виявлення, інтернет речей та розумне середовище.

Однак впровадження таких технологій пов'язане з низкою викликів — складністю виготовлення, потребою в точному моделюванні, інтеграції у складні радіотехнічні схеми та забезпеченням стабільності в реальних умовах. Виходячи з цього, можна спрогнозувати, що подальші дослідження варто зосередити на розробку стандартизованих технологічних рішень, вдосконалення методів виготовлення та інтеграцію метаматеріалів у промислові сенсорні системи нового покоління.

#### *Література:*

1. Вашпанов, Ю. О. Сучасні сенсори автоматичних систем: навч. посіб. / Вашпанов Юрій Олександрович. – Одеса : ВМВ, 2014. – 240 с. : рис. – Бібліогр.: с. 227-229. – ISBN 978-966-413-509-9.

2. Herwanto H. W., Handayani A. N., Wibawa A. P., Chandrika K. L. and Arai K., «Comparison of Min-Max, Z-Score and Decimal Scaling Normalization for Zoning Feature Extraction on Javanese Character Recognition» 2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE), Malang, Indonesia, 2021, pp. 1 – 3, doi: 10.1109/ICEEIE52663.2021.9616665.

3. Krysenko P. I., Zoziuk M. O. «Using Information about Experimental Conditions to Predict Properties of Metamaterials,» *Microsystems, Electronics and Acoustics*, vol. 28, no. 3, 2023, pp. 287808.1-287808.7, Dec. 2023. doi: 10.20535/2523-4455.me.287808.

4. Wang C., Chen Y., Snizhko D., Du F., Ma X., Lou B., Li J., and Xu G., «Development of luminol-fluorescamine-PVP chemiluminescence system and its application to sensitive tyrosinase determination», *Talanta*, vol. 218, p. 121–177, Oct. 2020.

5. Xu F., P. Wang, H. Xu. Deep pyramidal residual networks with inception sub-structure in image classification. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 45, 1-22, 2023, 10.3233/JIFS-230569.