

# АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МАГНІТНИХ СЕНСОРІВ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ

Вінницький національний технічний університет

## **Анотація.**

*Проведено аналіз сучасних магнітних сенсорів. Визначена їх класифікація, особливості та сфери застосування кожного типу, наведено їх переваги та недоліки. Особлива увага приділена сенсорам на основі наночастинок. Проаналізований їх принцип роботи. Розглянуті сфери застосування магнітних сенсорів на основі наночастинок. В результаті проведеного аналізу визначено переваги та недоліки магнітних сенсорів на основі наночастинок. Розглянуті напрямки та перспективи розвитку магнітних сенсорів на основі наночастинок.*

**Ключові слова:** магнітні наноматеріали, сенсори, магніторезистивний ефект, суперпарамагнетизм, нанотехнології.

## **Abstract.**

An analysis of modern magnetic sensors has been conducted. Their classification, features and areas of application of each type have been determined, their advantages and disadvantages have been given. Special attention has been paid to sensors based on nanoparticles. Their principle of operation has been analyzed. The areas of application of magnetic sensors based on nanoparticles have been considered. As a result of the analysis, the advantages and disadvantages of magnetic sensors based on nanoparticles have been determined. The directions and prospects for the development of magnetic sensors based on nanoparticles have been considered.

**Keywords:** magnetic nanomaterials, sensors, magnetoresistive effect, superparamagnetism, nanotechnology.

## **Вступ**

Магнітні сенсори – це пристрої, які перетворюють магнітне поле в електричний сигнал. Вони відіграють важливу роль у багатьох галузях, від автомобільної промисловості до електроніки та медицини. Сучасні магнітні сенсори – це високотехнологічні пристрої, які відіграють важливу роль у багатьох галузях промисловості, науки та повсякденного життя. Вони характеризуються високою чутливістю, точністю та мініатюризацією.

Основний принцип роботи магнітних сенсорів полягає у зміні електричних властивостей матеріалу сенсора під впливом магнітного поля. Найпоширенішим ефектом, який використовується в таких сенсорах, є ефект Холла. Коли електричний струм протікає через напівпровідникову пластину, перпендикулярно до якої прикладено магнітне поле, на її бічних гранях виникає електрична напруга, пропорційна індукції магнітного поля. Ця напруга і є вимірюваною величиною.

Існує декілька типів магнітних сенсорів, кожен з яких має свої особливості та сфери застосування [1]:

- Сенсори Холла: Відрізняються простотою конструкції, високою чутливістю та широким діапазоном вимірюваних магнітних полів.
- Магніторезистивні сенсори: Їх робота заснована на зміні опору напівпровідника під впливом магнітного поля.
- Технологія GMR: Сенсори на основі гігантського магніто-резистивного ефекту (GMR) мають вищу чутливість порівняно з простими магніторезистивними сенсорами.
- Тунельні магніторезистивні сенсори (TMR): Характеризуються ще вищою чутливістю, ніж GMR сенсори.
- Магнеторезистивні сенсори на основі анізотропного магнітоопору (AMR): Мають просту конструкцію і використовуються в сенсорах визначення кута повороту.
- Сенсори на основі наночастинок: Використовують наночастинки феромагнітних матеріалів для виявлення магнітних полів.

Таким чином, розвиток магнітних сенсорів є важливим напрямком сучасної електроніки. Вони відіграють ключову роль у створенні нових технологій та покращенні якості життя. Завдяки своїм унікальним властивостям, магнітні сенсори знаходять застосування в найрізноманітніших галузях. Сучасні дослідження спрямовані на створення більш чутливих, мініатюрних і енергоефективних магнітних сенсорів. Нові матеріали та технології, такі як нанотехнології, дозволяють створювати сенсори з унікальними характеристиками.

### **Аналіз особливостей сенсорів на основі наночастинок**

Магнітні наноматеріали, завдяки своїм унікальним властивостям, знайшли широке застосування в створенні високочутливих і мініатюрних сенсорів. Їх малі розміри, велика площа поверхні та квантові ефекти роблять їх ідеальними кандидатами для виявлення слабких магнітних полів, біомолекул та інших фізичних величин. Магнітні наноматеріали мають магнітні властивості та розміри частинок в діапазоні від 1 до 100 нанометрів. Завдяки своїм унікальним властивостям, вони знаходять широке застосування в різних галузях науки і техніки [2].

Основний принцип роботи сенсорів на основі магнітних наноматеріалів заснований на зміні їх магнітних властивостей під впливом зовнішніх факторів, таких як магнітне поле, температура, присутність певних молекул. Ці зміни можуть бути виявлені різними методами, наприклад, шляхом вимірювання зміни магнітного моменту, електричного опору або частоти резонансу [3].

Магнітні наноматеріали можна класифікувати за типом магнітного порядку:

- Ферромагнетики: Мають спонтанну намагніченість, тобто навіть без зовнішнього магнітного поля зберігають намагніченість. Використовуються в жорстких дисках, магнітних рідинах.
- Ферримагнетики: Мають складнішу магнітну структуру, ніж ферромагнетики. Застосовуються в мікрохвильовій техніці.
- Антиферромагнетики: Магнітні моменти сусідніх атомів впорядковані антипаралельно. Використовуються в сенсорах тиску, температури.
- Парамагнетики: Не мають спонтанної намагніченості, але їх магнітна сприйнятливість зростає при зниженні температури. Використовуються в деяких типах сенсорів.

В таблиці 1 наведено порівняння магнітних матеріалів для сенсорів [4].

Таблиця 1. Порівняння магнітних матеріалів для сенсорів.

| Характеристика          | Ферромагнетики                             | Ферримагнетики             | Антиферромагнетики                       |
|-------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------|
| Магнітний порядок       | Спонтанна намагніченість                   | Складна магнітна структура | Антипаралельна впорядкованість спінів    |
| Застосування в сенсорах | Біосенсори, магніторезистивні сенсори      | Мікрохвильова техніка      | Сенсори тиску, температури               |
| Переваги                | Висока намагніченість, хороша стабільність | Висока частота резонансу   | Висока чутливість до змін зовнішніх умов |
| Недоліки                | Можуть бути схильні до розмагнічування     | Складні у виготовленні     | Вузький діапазон робочих температур      |

Механізми роботи сенсорів на основі магнітних наноматеріалів [2]:

- Магніторезистивний ефект: Зміна електричного опору матеріалу під впливом магнітного поля. Використовується в магніторезистивних сенсорах.
- Суперпарамагнетизм: Зміна намагніченості наночастинок під впливом зовнішнього магнітного поля або температури. Використовується в біосенсорах.
- Спін-залежний тунельний ефект: Зміна тунельного струму через бар'єр між двома ферромагнітними шарами під впливом магнітного поля. Використовується в магнітних тунельних переходах (МТТ).

Переваги сенсорів на основі магнітних наноматеріалів [4]:

- Висока чутливість: Здатність виявляти дуже слабкі сигнали.
- Селективність: Можливість виявлення конкретних молекул або частинок.
- Мініатюризація: Можливість створення дуже маленьких сенсорів.
- Швидкодія: Швидка реакція на зміни зовнішніх умов.

Застосування сенсорів на основі магнітних наноматеріалів [5]:

- Біомедицина: Діагностика захворювань, доставка ліків, створення штучних органів.
- Електроніка: Жорсткі диски, сенсори положення, сенсори для мобільних пристроїв.
- Екологічний моніторинг: Виявлення забруднювачів у воді та повітрі.
- Промислова автоматизація: Контроль якості продукції, виявлення дефектів.

Після проведеного аналізу можна виділити наступні особливості магнітних наноматеріалів:

- Квантові ефекти: На нанорівні проявляються квантові ефекти, які надають матеріалам незвичайних властивостей, зокрема магнітних.
- Велика площа поверхні: Малі розміри частинок забезпечують велику площу поверхні, що дозволяє ефективно взаємодіяти з навколишнім середовищем.
- Суперпарамагнетизм: Дрібні магнітні частинки можуть спонтанно змінювати напрямок намагніченості під впливом теплових флуктуацій, що надає їм унікальних властивостей.

Область застосування магнітних наноматеріалів дуже велика, зокрема [6]:

- Біомедицина:
  - Таргетна доставка ліків: Магнітні наночастинки можуть бути використані для доставки ліків до конкретних органів або тканин.
  - Магнітно-резонансна томографія (МРТ): Покращення контрастності зображень.
  - Гіпертермія: Нагрівання пухлинних тканин за допомогою магнітних наночастинок.
- Електроніка:
  - Жорсткі диски: Використання магнітних наночастинок для збільшення щільності запису інформації.
  - Сенсори: Виявлення магнітних полів, біологічних молекул.
- Енергетика:
  - Магнітні рідини для охолодження електроніки.
  - Матеріали для магнітних батарей.
- Каталізатори: Прискорення хімічних реакцій.
- Захисні покриття: Для захисту від корозії та зношування.

Незважаючи на великі перспективи, використання магнітних наноматеріалів пов'язано з деякими проблемами:

- Токсичність: Деякі наноматеріали можуть бути токсичними для організму людини.
- Взаємодія з біологічними системами: Не всі наноматеріали біосумісні.
- Синтез і функціоналізація: Створення наноматеріалів з заданими властивостями є складною задачею.

Перспективи розвитку [1]:

- Розробка нових матеріалів: Створення наноматеріалів з унікальними магнітними властивостями.
- Мініатюризація пристроїв: Використання магнітних наноматеріалів для створення мікро- і нанопристроїв.
- Нові методи синтезу: Розробка більш ефективних і екологічно чистих методів синтезу наноматеріалів.

Отже, проведений аналіз показав, що магнітні наноматеріали є однією з найбільш перспективних областей сучасної науки і технологій. Вони відкривають нові можливості для створення інноваційних матеріалів, пристроїв та систем.

### **Висновки**

Сучасні магнітні сенсори відіграють все більш важливу роль у нашому житті, забезпечуючи точні вимірювання магнітних полів і дозволяючи створювати нові технології та пристрої.

Сенсори на основі магнітних наноматеріалів є перспективним напрямком розвитку сенсорних технологій. Завдяки своїм унікальним властивостям, вони знаходять все більше застосування в різних галузях науки і техніки.

Використання наноматеріалів дозволяє створювати сенсори з унікальними властивостями, такими як висока чутливість та швидкість відгуку. Також комбінація різних матеріалів в одній гетероструктурі дозволяє створювати сенсори з заданими характеристиками. Подальша інтеграція магнітних сенсорів з іншими мікроелектронними компонентами дозволяє створювати компактні та багатофункціональні мікроелектромеханічні системи.

Подальші дослідження в сенсорів на основі магнітних наноматеріалів дозволять створити нові покоління сенсорів з ще більш високими характеристиками.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yassine Slimani, Essia Hannachi. Magnetic nanosensors and their potential applications. In International Journal Nanosensors for Smart Cities. Vol. 11, January 2020; pp. 143-155. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819870-4.00025-6>.
2. Elisenda Rodriguez, Victor S. Lelyvelda, Tatjana Atanasijevica, Satoshi Okadaa, Alan Jasanoffa. Magnetic nanosensors optimized for rapid and reversible self-assembly. In International Journal Chemical Communications. Issue 27, 2024; pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4CC00314D>.
3. Zhen Yang, Ziqin Meng, Jiabao Huang, Jian Cao, He Zhang, Xuecheng Sun, Chong Lei. Analysis of Magnetic Properties of Magnetostrictive FeCoGa Thin Film Patterns Grown on Flexible Substrates. Journal of Electronic Materials. Vol. 10, 2025; pp. 123-146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-025-11764-3>.
4. Saurabh Kumar, Sarit Chakraborty, Debabrata Das, A. Nath, M. Suman Kalyan. Magnetically tunable DC electrical properties of LSMO-PVDF magnetoelectric composite flexible film. Interactions. Vol. 245, 2024; pp. 245-254. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10751-024-02142-2>.
5. Bahareh Rezaei, Hur-E-Jannat Moni, Ioannis H. Karampelas, Arjun Sharma, Shahriar Mostufa, Ebrahim Azizi, Xiaolong Liu, Minxiang Zeng, Jenifer Gómez-Pastora, Rui He, Kai Wu. Additive Manufacturing of Magnetic Materials for Energy, Environment, Healthcare, and Industry Applications. Advanced Functional Materials. Vol. 990, 2024; pp. 651-663. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202416823>.
6. Yang Yang, Huiling Liu, Hao Sun, Qiaozhen Zhang. A Differential Surface Acoustic Wave Magnetic Field Sensor With Temperature Compensation. 2024 IEEE MTT-S International Conference on Microwave Acoustics & Mechanics (IC-MAM). 2024, pp. 81-84. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC-MAM60575.2024.10539049>.

**Притула Максим Олександрович** – к.т.н., старший викладач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: [pritulamo@ukr.net](mailto:pritulamo@ukr.net)

**Prytula Maksym Oleksandrovyh** - Ph.D., Senior Lecturer of the Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [pritulamo@ukr.net](mailto:pritulamo@ukr.net)