

КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Open Access under [CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License

Розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку бездротових сенсорних мереж (БСМ). Проаналізовано еволюцію стандартів передавання даних, зокрема IEEE 802.15.4, ZigBee, BLE, LoRaWAN, NB-IoT, а також глобальні тенденції масштабованості, енергоефективності та інтелектуалізації сенсорних вузлів. Визначено ключові виклики сучасного етапу розвитку БСМ, серед яких енергетичні обмеження, кібербезпека, стандартизація та інтероперабельність. Окрему увагу приділено принципам побудови архітектури БСМ, таким як модульність, адаптивність, масштабованість, інтероперабельність і безпека, а також архітектурним рішенням – централізованим, децентралізованим і гібридним. Наведено огляд сучасних комерційних рішень БСМ для екології, агро секторі, промисловості та медицині (Bosch, Libelium, John Deere, Siemens, Philips тощо). Зосереджено увагу на ролі БСМ як фундаменту цифрової трансформації та їх інтеграції у глобальні IoT-екосистеми.

Ключові слова: бездротові сенсорні мережі, IoT, бездротові сенсорні розподілені інтелектуальні системи, архітектура, комерційні рішення, кібербезпека, БСМ, WSN.

© О.В. Вороненко, 2026

УДК 004.75

DOI:10.34229/2707-451X.26.1.9

О.В. ВОРОНЕНКО

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ БЕЗДРотовИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Вступ. Бездротові сенсорні мережі (БСМ) або Wireless Sensor Networks (WSN), є однією з базових технологій цифрової трансформації, що забезпечує збір, передавання та оброблення даних у режимі реального часу. Сфери їх застосування охоплюють широкий спектр галузей – від екологічного моніторингу та прецизійного землеробства до промислової автоматизації й медицини. В умовах розвитку Інтернету речей (IoT) БСМ відіграють роль фундаменту кіберфізичних систем, інтегруючи фізичні процеси з інформаційними потоками.

БСМ належить до ширшого класу бездротових мереж і базуються на стандартах фізичного рівня передавання даних та протоколах обміну інформацією, що забезпечують сумісність між різними системами. Важливу роль у розвитку БСМ відіграє діяльність виробників елементної бази, які створюють електронні компоненти для широкого спектра бездротових застосувань. Такі компоненти можуть використовуватися не лише у БСМ, але й в багатьох інших галузях, що сприяє уніфікації технологічних рішень та зниженню вартості впровадження сенсорних мереж.

Створення архітектури БСМ стало свідомим кроком у напрямі системного розвитку наукових досліджень «Відділу перетворювачів форми інформації» Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, започаткованих у 2012 році. Цей підхід ґрунтується на стратегічному баченні етапів створення універсальних платформ, здатних до швидкої адаптації відповідно до специфіки прикладних задач. Такий підхід дає змогу не лише розв'язувати актуальні технічні проблеми, а й формує основу для подальшої наукової експансії, зокрема патентування розробок, їх міжнародної реєстрації та міждисциплінарної інтеграції. У межі досліджень було розроблено структурні компоненти системи – сенсорні вузли, координатори, маршрутизатори, концентратори, радіо USB-конвертери та користувачькі ПК – з чітким визначенням їхніх функціональних взаємозв'язків.

Особливу увагу приділено забезпеченню надійності, масштабованості та простоти адаптації системи до конкретних прикладних задач. Результати цих досліджень продемонстровано на міжнародних конференціях серії IEEE IDAACS [1–6], що підтверджує їх актуальність і визначення у глобальному науковому дискурсі.

На початок 2015 р. єдиного міжнародного стандарту архітектури БСМ не існувало. Водночас у 2011–2014 рр. розроблено серію стандартів ISO/IEC 29182 (Sensor Network Reference Architecture, SNRA) [7], у яких визначено базові принципи побудови сенсорних мереж, а також стандарт ISO/IEC 30101:2014 [8], орієнтований на застосування сенсорних мереж у системах типу Smart Grid. У середовищі IEEE активно застосовувалися стандарти IEEE 1451 [9] та IEEE 802.15.4 [10], а також розвивалися міжнародні ініціативи oneM2M [11] та IETF, зокрема протоколи 6LoWPAN [12], RPL [13]. Саме ці документи формували міжнародний науково-технічний контекст, в межах якого здійснювалося розроблення архітектури БСМ, що згодом отримала підтвердження у публікаціях, у журналах IJRIS [14] та Cybernetics and Systems Analysis [15].

Актуальність дослідження зумовлена низкою чинників:

- стрімким зростанням кількості сенсорних вузлів та потребою у масштабованих архітектурних рішеннях;
- розвитком технологій енергоефективності та energy harvesting, що забезпечують автономність функціонування сенсорних систем;
- інтеграцією БСМ з технологіями edge computing та алгоритмами штучного інтелекту (ШІ) для локального оброблення даних;
- підвищенням вимог до кібербезпеки та інтероперабельності у критично важливих сферах застосування.

Наукова новизна роботи полягає у системному аналізі сучасних стандартів, архітектурних рішень та комерційних реалізацій БСМ, що дає змогу сформуванню узагальнену методологію побудови бездротових сенсорних розподілених інтелектуальних систем (БСРІС). Під БСРІС у роботі розуміються БСМ, які:

- інтегрують сенсорні вузли з алгоритмами ШІ;
- реалізують функції розподіленого оброблення даних на рівні вузлів (edge computing);
- забезпечують інтелектуальну взаємодію між сенсорами, координаторами та користувацькими системами;
- орієнтовані на сценарії прийняття рішень у реальному часі (екологічний моніторинг, аграрні застосування, медицина).

Мета статті полягає у дослідженні сучасного стану і тенденцій розвитку БСМ, визначенні ключових викликів і принципів побудови архітектури БСРІС, а також аналізі практичних прикладів комерційних сенсорних мереж у різних галузях.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі завдання:

- проаналізувати еволюцію стандартів БСМ та їх інтеграцію у глобальні IoT-екосистеми;
- визначити глобальні тенденції розвитку та ключові виклики сучасного етапу;
- дослідити принципи побудови архітектури БСРІС і відповідні архітектурні рішення;
- оцінити сучасні комерційні реалізації БСМ у сферах екології, агропромислового комплексу та промисловості медицини.

Еволюція стандартів БСМ

БСМ стали однією з ключових технологій цифрової трансформації, забезпечуючи збір і передавання даних у режимі реального часу. Їх розвиток нерозривно пов'язаний із формуванням міжнародних стандартів, які визначають архітектурні принципи, протоколи комунікації та вимоги до інтероперабельності.

Ранні стандарти

• IEEE 802.15.4 [16] (2003, оновлення 2011, 2017, 2020, 2022) – базовий стандарт для мереж типу Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), що став основою для протоколів ZigBee, Thread та інших рішень.

• ZigBee Alliance [17] (2004) – протокол верхнього рівня IEEE 802.15.4, орієнтований на енергоефективні mesh-мережі для систем smart building та домашньої автоматизації.

• Bluetooth Low Energy [18] (BLE, 2010) – оптимізований для носимих пристроїв і локальних сенсорних груп, який забезпечує низьке енергоспоживання та простоту інтеграції.

Розвиток протоколів широкого охоплення

• LoRaWAN [19] (2015) – протокол для сенсорних мереж із великою дальністю зв'язку (>10 км) та низьким енергоспоживанням, орієнтований на агро- та екологічні застосування.

• NB-IoT та LTE-M [20] (3GPP Release 16, 2021) – стандарти мобільного зв'язку для IoT, що інтегрують БСМ у 5G-екосистему.

Інтеграція з IoT-екосистемами

• oneM2M Release 2 [11] (2016) – специфікація, що забезпечує інтероперабельність між IoT-платформами та інтеграцію БСМ у глобальні сервісно-орієнтовані середовища.

• ISO/IEC 30141:2018 [21] – перша узгоджена міжнародна архітектурна модель IoT, у якій БСМ визначено як один із ключових доменів.

• IEEE Std 2413-2019 [22] – системна модель IoT, що інтегрує сенсорні мережі, комунікаційні технології та прикладні сервіси в єдину архітектурну структуру.

• ISO/IEC 30165:2023 [23] – архітектурна модель промислового IoT, орієнтована на виробничі сенсорні системи.

Узагальнене порівняння основних стандартів БСМ наведено в табл. 1.

ТАБЛИЦЯ 1. Порівняння основних стандартів БСМ (WSN)

Стандарт / Протокол	Рік	Організація	Дальність	Енергоспоживання	Особливості
IEEE 802.15.4 [16]	2003–2022	IEEE	10–100 м	Низьке	Базовий стандарт LR-WPAN, основа ZigBee/Thread
ZigBee [17]	2004	ZigBee Alliance	10–100 м	Дуже низьке	Mesh-топология, AES-128 безпека
BLE [18]	2010	Bluetooth SIG	1–100 м	Низьке	Носимі пристрої, простота інтеграції
LoRaWAN [19]	2015	LoRa Alliance	>10 км	Дуже низьке	Агро, екологія, довгі дистанції
NB-IoT / LTE-M [20]	2021	3GPP	>10 км	Дуже низьке	Інтеграція у 5G, промислові застосування
ISO/IEC 30141 [21]	2018	ISO/IEC	–	–	Reference Architecture for IoT
IEEE Std 2413 [22]	2019	IEEE	–	–	Архітектурний фреймворк IoT
ISO/IEC 30165 [23]	2023	ISO/IEC	–	–	Industrial IoT Reference Architecture

Еволюція стандартів БСМ (WSN) демонструє поступовий перехід від локальних енергоефективних мереж таких як ZigBee, BLE у глобальні IoT-екосистеми на основі протоколів LoRaWAN, NB-IoT, та архітектурних моделей ISO/IEC 30141. Важливою тенденцією є інтеграція сенсорних мереж у мобільну інфраструктуру та промислові системи, що забезпечує підвищену масштабованість і універсальність архітектурних рішень.

Глобальні тенденції розвитку БСМ

Сучасний розвиток БСМ визначається поєднанням технологічних інновацій та організаційних викликів. БСМ поступово переходять від вузькоспеціалізованих систем до універсальних, масштабованих і адаптивних архітектур, інтегрованих у глобальні цифрові екосистеми.

Масштабування та інтеграція з IoT. Ринок БСМ демонструє стабільне зростання: за прогнозами, його обсяг перевищить 110 млрд дол. США у 2028 р., із середньорічним темпом зростання понад 17 % [24–26]. Основними драйверами розвитку є інтеграція з IoT, розвиток концепцій smart city та промислової автоматизації.

Адаптивність і самоконфігурація. Сучасні архітектури БСМ орієнтовані на динамічне переналаштування топології, зміну ролей вузлів, використання механізмів самовідновлення (self-healing), що підвищує стійкість систем у динамічних середовищах [13].

Енергоефективність та автономність. Застосування технологій energy harvesting (сонячної, теплової, вібраційної енергії) у поєднанні з оптимізованими протоколами режимів sleep/active дає змогу суттєво збільшити тривалість автономної роботи мереж [19].

Інтелектуалізація вузлів. Впровадження обчислень на межі мережі (edge computing) та алгоритмів машинного навчання забезпечує локальне оброблення даних, зменшуючи навантаження на мережеву інфраструктуру та підвищуючи ефективність роботи системи у реальному часі [22].

Модульність і гнучкість архітектури. Архітектури БСМ дедалі частіше будуються за принципами модульності, що забезпечує швидку інтеграцію нових сенсорів, протоколів та сервісів без необхідності повної перебудови системи [21, 23].

Безпека та захист даних. Зростання кількості застосувань БСМ у критичних галузях (медицина, енергетика, транспорт) актуалізує питання шифрування, аутентифікації та захисту від атак на IoT-інфраструктуру [25, 26].

Узагальнення глобальних тенденцій розвитку БСМ наведено в табл. 2.

ТАБЛИЦЯ 2. Глобальні тенденції розвитку БСМ

№	Тенденція	Ключові характеристики
1	Масштабування та інтеграція з IoT	Ринок >110 млрд дол. США у 2028 р.; CAGR >17%; драйвери – IoT, smart city, автоматизація
2	Адаптивність і самоконфігурація	Динаміка топології, ролей вузлів; механізми self-healing
3	Енергоефективність та автономність	Energy harvesting (сонце, тепло, вібрації); оптимізовані протоколи sleep/active
4	Інтелектуалізація вузлів	Edge computing, ML-алгоритми; локальне оброблення даних у реальному часі
5	Модульність і гнучкість	Швидка інтеграція нових сенсорів, протоколів і сервісів без перебудови системи
6	Безпека та захист даних	Шифрування, аутентифікація, захист від атак у критичних сферах

Глобальні тенденції розвитку БСМ свідчать про перехід від локальних сенсорних систем до універсальних платформ, інтегрованих у цифрові екосистеми. Ключовими напрямками є масштабованість, енергоефективність, інтелектуалізація та безпека, що формують основу для побудови нових архітектур БСМ.

Виклики сучасного етапу розвитку БСМ

Попри значні досягнення у сфері БСМ, їх масове впровадження супроводжується низкою проблем, що обмежують ефективність та універсальність застосувань. Сучасний етап розвитку БСМ визначається поєднанням технологічних інновацій (ШІ, обчислення на межі, energy harvesting) та організаційних викликів, серед яких масштабованість, стандартизація, безпека.

Масштабованість. Мережі, що налічують тисячі вузлів стикаються з проблемами балансування навантаження, уникнення колізій та підтримки різних типів топологій. Виклики масштабованості є особливо актуальними для застосувань у сфері smart city та промислових систем [13, 14].

Енергетичні обмеження. Автономні сенсорні вузли працюють у віддалених або екстремальних умовах, що потребує необхідності оптимізації енергоспоживання та застосування технологій energy harvesting [19].

Кібербезпека. Зростання кількості атак на IoT-інфраструктуру актуалізує питання шифрування, аутентифікації та захисту від DoS-атак. Особливо критичними ці виклики є для систем у сферах медицини, енергетики та транспорту [25, 26].

Стандартизація та інтероперабельність. Різноманітність протоколів і платформ створює проблему сумісності. Відсутність єдиних стандартів ускладнює інтеграцію БСМ у глобальні цифрові екосистеми [9–11, 21, 22].

Універсальність архітектури. Необхідність адаптації БСМ до різних галузей застосування (екологія, агросектор, медицина, промисловість) вимагає розроблення модульних і гнучких архітектур, здатних ефективно функціонувати в гетерогенних середовищах [21, 23].

Узагальнення викликів сучасного етапу та їх потенційних рішень у БСМ наведено в табл. 3.

ТАБЛИЦЯ 3. Виклики сучасного етапу та потенційні рішення у БСМ

Виклик	Потенційне рішення
Адресація вузлів	Ієрархічні схеми, IPv6
Пропускна здатність	Edge computing, агрегація даних
Маршрутизація	LEACH, PEGASIS, AI-алгоритми
Витривалість	Самовідновлення, кластеризація
Обробка даних	Локальна аналітика, ML-модулі
Кібербезпека	AES-128, TLS, багаторівнева аутентифікація
Інтероперабельність	Використання ISO/IEC та IEEE стандартів

Виклики сучасного етапу розвитку БСМ зумовлюють потребу у створенні нових архітектурних рішень, що поєднують модульність, адаптивність і масштабованість. Особливу увагу слід приділяти енергоефективності та кібербезпеці, оскільки саме ці чинники визначають довготривалу життєздатність сенсорних систем у критичних галузях.

Стандартизація у БСМ

Стандартизація є ключовим чинником розвитку БСМ, оскільки забезпечує інтероперабельність, безпеку та масштабованість систем. Відсутність єдиних стандартів у минулому призводила до фрагментації ринку, тоді як сучасні міжнародні організації формують узгоджені моделі інтеграції БСМ у глобальні цифрові екосистеми.

Міжнародні стандарти:

- IEEE 802.15.4 [10, 16] – базовий стандарт для мереж LR-WPAN, що визначає фізичний та канальний рівні комунікації.
- IEEE Std 2413-2019 [22] – архітектурний фреймворк IoT, спрямований на інтеграцію сенсорних мереж у системну модель.
- ISO/IEC 30141:2018 [21] – референтна архітектура IoT, що визначає ключові домени, зокрема БСМ.

- ISO/IEC 30165:2023 [23] – архітектура промислового IoT, орієнтована на виробничі сенсорні системи.

- oneM2M Release 2 (2016) [11] – глобальний стандарт забезпечення інтероперабельності IoT-платформ.

Європейський та український контекст. У ЄС стандартизацію БСМ інтегровано у програми Horizon Europe [24] та ETSI IoT [25], що забезпечують гармонізацію протоколів і сертифікацію обладнання. В Україні актуальним є впровадження стандартів ISO/IEC та IEEE у сферах smart city, аграрних та медичних застосувань, а також адаптація до вимог ENISA [26] щодо забезпечення кібербезпеки.

Значення стандартизації:

- Забезпечення сумісності обладнання різних виробників.
 - Підвищення рівня безпеки та захисту даних.
 - Спрощення інтеграції БСМ у глобальні IoT-екосистеми.
 - Формування єдиної термінології і методології для наукових і прикладних досліджень.
- Узагальнення ключових стандартів для БСМ/IoT наведено в табл. 4.

ТАБЛИЦЯ 4. Ключові стандарти для БСМ/IoT

Стандарт / Протокол	Організація	Рік	Сфера застосування	Особливості
IEEE 802.15.4 [10, 16]	IEEE	2003–2022	LR-WPAN	Базовий стандарт для ZigBee, Thread
IEEE Std 2413 [22]	IEEE	2019	IoT Architecture	Системна модель IoT, інтеграція БСМ
ISO/IEC 30141 [21]	ISO/IEC	2018	IoT Reference Architecture	Визначає ключові домени IoT
ISO/IEC 30165 [23]	ISO/IEC	2023	Industrial IoT	Орієнтована на виробничі сенсорні системи
oneM2M Release 2 [11]	oneM2M	2016	IoT Interoperability	Інтероперабельність між платформами

Стандартизація у сфері БСМ є фундаментальною умовою їх подальшого розвитку. Вона забезпечує не лише технічну сумісність компонентів, а й створює основу для глобальної інтеграції сенсорних мереж у цифрові екосистеми. Для України важливою є гармонізація національних рішень з європейськими та міжнародними стандартами, що дасть змогу інтегрувати локальні розробки у світовий ринок інформаційних технологій.

Принципи побудови архітектури БСРІС

Архітектура БСРІС формується на основі низки принципів, які забезпечують їх універсальність, масштабованість та адаптивність. В умовах стрімкого розвитку IoT та інтеграції сенсорних мереж у критично важливі сфери (екологія, агросектор, медицина, промисловість) саме дотримання цих принципів визначає довготривалу життєздатність систем.

Модульність. Модульний підхід дає змогу створювати архітектури, які легко адаптуються до нових функціональних вимог. Кожен функціональний блок (сенсорний вузол, шлюз, сервер оброблення даних) може бути заміненим або розширеним без необхідності повної перебудови системи [21, 23].

Масштабованість. Архітектура повинна забезпечувати ефективну роботу як у малих мережах (десятки вузлів), так і у великих розподілених системах (тисячі вузлів). Це досягається завдяки використанню ієрархічних топологій, механізмів кластеризації та енергоефективних протоколів маршрутизації [13, 14].

Адаптивність. Системи мають автоматично реагувати на зміни середовища: втрату окремих вузлів, зміну топології або варіації навантаження. Адаптивність забезпечується застосуванням алгоритмів самоконфігурації та самовідновлення (self-healing) [15].

Інтероперабельність. Важливим принципом є сумісність із різними протоколами та платформами. Це забезпечує інтеграцію БСРІС у глобальні IoT-екосистеми та підтримує довготривалу актуальність системи [21, 22].

Безпека та надійність. Захист даних, стійкість до кібератак і відмовостійкість є критично важливими для застосувань у медицині, енергетиці та промисловості. Архітектура БСРІС повинна передбачати багаторівневі механізми шифрування, аутентифікації та контролю доступу [25, 26].

Узагальнення принципів побудови архітектури БСРІС наведено в табл. 5.

ТАБЛИЦЯ 5. Принципи побудови архітектури БСРІС

Принцип	Характеристика	Приклади реалізації
Модульність	Поділ на функціональні блоки	Сенсорні вузли, шлюзи, сервери
Масштабованість	Підтримка від десятків до тисяч вузлів	Ієрархічні топології, кластеризація
Адаптивність	Автоматична реакція на зміни середовища	Self-healing, динамічна маршрутизація
Інтероперабельність	Сумісність із різними протоколами	Підтримка ZigBee, LoRaWAN, NB-IoT
Безпека та надійність	Захист даних і відмовостійкість	AES-128, TLS, багаторівнева аутентифікація

Принципи побудови архітектури БСРІС формують основу для створення універсальних сенсорних систем, здатних функціонувати у різних сферах застосування. Вони забезпечують баланс між гнучкістю, масштабованістю та безпекою, що є критично важливим для інтеграції БСМ у сучасні цифрові екосистеми.

Архітектурні рішення у БСМ

Архітектурні рішення визначають ефективність функціонування БСМ, їх масштабованість, надійність та адаптивність. У сучасному науково-практичному контексті виділяють три основні підходи до побудови архітектур БСМ: централізований, децентралізований та гібридний.

Централізовані архітектури. У таких системах дані від сенсорних вузлів передаються до центрального вузла (шлюзу або сервера), де здійснюється їх оброблення та прийняття управлінських рішень.

Переваги: простота управління, централізований контроль безпеки.

Недоліки: ризик перевантаження центрального вузла, низька стійкість до відмов [14].

Децентралізовані архітектури. Оброблення даних здійснюється безпосередньо на сенсорних вузлах або у межах локальних кластерів.

Переваги: висока стійкість до відмов, зменшення навантаження на центральний сервер.

Недоліки: підвищена складність координації та потреба у більш обчислювально-потужних вузлах [15].

Гібридні архітектури. Поєднують елементи централізованого та децентралізованого підходів. Частина даних обробляється локально із застосуванням концепції edge computing, тоді як критично важлива інформація передається до центрального вузла.

Переваги: досягнення балансу між ефективністю оброблення даних і стійкістю системи.

Недоліки: складність проектування, реалізації та стандартизації [22].

Узагальнене порівняння архітектурних рішень у БСМ наведено в табл. 6.

ТАБЛИЦЯ 6. Порівняння архітектурних рішень у БСМ

Тип архітектури	Переваги	Недоліки	Приклади застосувань
Централізована	Простота управління, централізований контроль	Перевантаження вузла, низька стійкість	Smart home, невеликі екологічні системи
Децентралізована	Стійкість до відмов, локальна обробка	Складність координації, потреба у потужних вузлах	Smart city, агро, промисловість
Гібридна	Баланс ефективності та стійкості	Складність проєктування	Медицина, критичні інфраструктури

Архітектурні рішення у БСМ демонструють еволюцію від простих централізованих систем до складних гібридних моделей, що інтегрують edge computing та хмарні сервіси. Гібридні архітектури нині розглядаються як найбільш перспективні, оскільки вони забезпечують оптимальний баланс між ефективністю, масштабованістю та безпекою.

Сучасні комерційні БСМ: огляд

Бездротові сенсорні мережі є основою для цифрової трансформації інфраструктури у багатьох галузях – від екологічного моніторингу та розумного сільського господарства до промислової автоматизації й медицини. Сучасні комерційні рішення провідних виробників поєднують передові сенсорні технології, енергоефективну архітектуру вузлів, інтелектуальні протоколи зв'язку, високий рівень захисту даних, масштабованість і глибоку інтеграцію з IoT-платформами. У цьому аналітичному огляді здійснено аналіз практичних рішень від провідних виробників у чотирьох ключових сферах застосування БСМ: екологія, сільське господарство, промисловість і медицина, з акцентом на архітектурні, функціональні та безпекові аспекти, типи сенсорів і рівень IoT-інтеграції.

Екологія та моніторинг довкілля:

- Bosch Connected Environmental Monitoring [27] – сенсорні станції для вимірювання якості повітря, рівня шуму, температури та вологості.
- Libelium Waspmote [28, 29] – модульні платформи для моніторингу водних ресурсів, ґрунтів і забруднень у міських середовищах.
- EpOcean [30] – сенсори з енергохарвестингом для «зелених» будівель і екологічних проєктів.

Сільське господарство (AgTech):

- John Deere Precision Agriculture [31] – інтегровані системи для моніторингу стану ґрунту та оптимізації внесення добрив.
- CropX [32] – сенсорні мережі для контролю вологості ґрунту й управління зрошенням.
- Arable Mark [33, 34] – багатофункціональні сенсори для вимірювання кліматичних параметрів і стану рослин.

Промисловість:

- Siemens MindSphere [35] – IoT-платформа для моніторингу обладнання та виробничих процесів.
- Honeywell Wireless Sensor Networks [36] – рішення для контролю температури, вібрацій і тиску.
- Emerson WirelessHART [37] – сенсорні системи для застосування в хімічній і харчовій промисловості.

Медицина та біомоніторинг:

- Philips HealthSuite [38] – системи для безперервного моніторингу життєвих показників пацієнтів.
- Medtronic Guardian Connect [39] – сенсори для постійного контролю рівня глюкози в крові.
- Abbott FreeStyle Libre [40] – системи моніторингу глюкози без необхідності проколювання пальця.

- GE Healthcare Wireless Monitoring [41] – рішення для дистанційного контролю ЕКГ, сатурації та інших фізіологічних параметрів.

Таким чином у:

- екології акцент зроблено на моніторингу довкілля та якості повітря/води;
- аграрному секторі – на прецизійному землеробстві та ефективному управлінні ресурсами;
- промисловості – на контролі виробничих процесів і підвищенні рівня безпеки;
- медицині – на персоналізованому та дистанційному моніторингу пацієнтів.

Узагальнене порівняння комерційних рішень застосування БСМ наведено в табл. 7.

ТАБЛИЦЯ 7. Порівняння комерційних рішень застосування БСМ

Бренд	Тип сенсорів	Протокол	Енерго споживання	Дальність	Особливості
1	2	3	4	5	6
Bosch	Газові, шумові, кліматичні	Wi-Fi, LPWAN	Середнє	1–2 км	Інтеграція з міськими платформами
Libelium Waspote	Вода, ґрунт, забруднення	ZigBee, LoRaWAN	Низьке	до 10 км	Модульність, підтримка різних сенсорів
EnOcean	Температура, вологість, освітленість	EnOcean, BLE	Дуже низьке (energy harvesting)	30–300 м	Автономність без батарей
John Deere	Ґрунтові, кліматичні	NB-IoT, LTE-M	Середнє	>10 км	Інтеграція з агро платформами
CropX	Вологість ґрунту	LoRaWAN	Дуже низьке	до 15 км	Хмарна аналітика, мобільний додаток
Arable Mark	Кліматичні, сонячна радіація	GSM, LTE	Середнє	>5 км	Комплексний агромоніторинг
Siemens MindSphere	Вібрація, температура, тиск	OPC-UA, MQTT	Середнє	до 2 км	Хмарна інтеграція, аналітика
Honeywell	Температура, тиск, вібрація	ISA100, WirelessHART	Низьке	до 1 км	Висока надійність, безпека
Emerson	Хімічні, промислові	WirelessHART	Низьке	до 1 км	Оптимізація для критичних процесів
Philips HealthSuite	Біометричні (ЕКГ, сатурація)	Wi-Fi, BLE	Середнє	до 100 м	Хмарна інтеграція, аналітика
Medtronic Guardian	Глюкозні сенсори	Bluetooth	Низьке	до 10 м	Безперервний моніторинг
Abbott FreeStyle Libre	Глюкозні сенсори	NFC	Дуже низьке	до 5 см	Без проколів пальця
GE Healthcare	ЕКГ, сатурація, тиск	Wi-Fi, LTE	Середнє	>1 км	Дистанційний моніторинг

Висновки. Метою статті є дослідження сучасного стану та тенденцій розвитку бездротових сенсорних мереж (БСМ), визначення ключових викликів і принципів побудови архітектури бездротових сенсорних розподілених інформаційних систем (БСРІС), а також аналіз практичних рішень комерційних сенсорних мереж у різних сферах застосування.

Для досягнення поставленої мети в роботі було виконано такі завдання:

- проаналізовано еволюцію стандартів БСМ та їх інтеграцію у глобальні IoT-екосистеми;
- визначено глобальні тенденції розвитку та ключові виклики сучасного етапу;
- розглянуто принципи побудови архітектури БСРІС і основні архітектурні рішення;
- оцінено сучасні комерційні реалізації БСМ у сферах екології, аграрного сектору, промисловості та медицини.

Розвиток БСМ пройшов шлях від локальних енергоефективних протоколів (IEEE 802.15.4, ZigBee, BLE) до інтеграції у глобальні цифрові екосистеми (LoRaWAN, NB-IoT, ISO/IEC 30141, PIRA). Еволюція стандартів засвідчує поступове розширення функціональних можливостей, масштабованості та інтероперабельності, що формує підґрунтя для побудови універсальних архітектур БСРІС. Глобальні тенденції розвитку БСМ визначаються впровадженням енергоефективних технологій, інтеграцією з ШІ та edge computing, а також зростанням вимог до кібербезпеки. Виклики сучасного етапу – енергетичні обмеження, кіберзагрози, стандартизація та потреба у гнучких архітектурах – стимулюють пошук нових рішень, що поєднують модульність, адаптивність і надійність.

Принципи побудови архітектури БСРІС, зокрема модульність, масштабованість, адаптивність, інтероперабельність і безпека, формують методологічну основу для створення універсальних сенсорних систем. Архітектурні рішення еволюціонують від централізованих до гібридних моделей, які інтегрують edge computing та хмарні сервіси, забезпечуючи баланс між ефективністю та стійкістю.

Практичні результати аналізу комерційних реалізацій підтверджують універсальність застосування БСМ у різних галузях:

- екологія – Bosch, Libelium, EnOcean;
- сільське господарство – John Deere, CropX, Arable;
- промисловість – Siemens, Honeywell, Emerson;
- медицина – Philips, Medtronic, Abbott, GE Healthcare.

Ці приклади свідчать, що БСМ вже стали фундаментом сучасних кіберфізичних систем і ключовим елементом цифрової трансформації, забезпечуючи моніторинг, управління та аналітику в режимі реального часу. Подальший розвиток БСМ визначатиметься гармонізацією стандартів, впровадженням ШІ та хмарних технологій, а також створенням гнучких архітектур, здатних адаптуватися до потреб майбутніх застосувань.

Подяка. Автор висловлює щирі вдячність панові В. Романову та панові І. Галелюці за цінні консультації та підтримку під час підготовки роботи.

References

1. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O., Artemenko D., Kovyrova O., Sarakhan Ye. Computer devices and mobile information technology for precision farming. Proc. 7th IEEE IDAACS. Berlin, 2013. P. 47–51. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2013.6662637>
2. Kryvonos Yu., Romanov V., Wojcik W., Galelyuka I., Voronenko A. Application of Wireless Technologies in Agriculture, Ecological Monitoring and Defense. Proc. 8th IEEE IDAACS. Warsaw, 2015. P. 855–858. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2015.7341424>
3. Palagin O., Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O. Wireless Smart Biosensor for Sensor Networks in Ecological Monitoring. Proc. 9th IEEE IDAACS. Bucharest, 2017. P. 679–683. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2017.8095177>
4. Romanov V., Galelyuka I., Antonova H., Kovyrova O., Hrusha V., Voronenko O. Application of wireless sensor networks for digital agriculture. Proc. 10th IEEE IDAACS. Metz, 2019. P. 340–344. <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924267>
5. Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O. WSN for Food Product Quality Control. Proc. 11th IEEE IDAACS. Cracow, 2021. P. 580–583. <https://doi.org/10.1109/IDAACS53288.2021.9660852>

6. Romanov V., Galelyuka I., Hrusha V., Voronenko O., Kovyrova O., Antonova H., Kedych A. Smart Systems for Precision Agriculture, Environmental Protection and Healthcare. Proc. 12th IEEE IDAACS. Dortmund, 2023. P. 408–413. <https://doi.org/10.1109/IDAACS58523.2023.10348758>.
7. ISO/IEC 29182:2013. Sensor networks – Reference architecture (SNRA). Geneva: ISO, 2013.
8. ISO/IEC 30101:2014. Sensor networks – Smart Grid systems. Geneva: ISO, 2014.
9. IEEE Std 1451.0-2007. Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators. *IEEE Standards Association*. 2007.
10. IEEE Std 802.15.4-2020. Low-Rate Wireless Networks. IEEE Standards Association. 2020.
11. oneM2M Release 2 Technical Specifications. oneM2M, 2024. <https://www.onem2m.org/technical/published-specifications/release-2> (accessed: 18.11.2025)
12. IETF RFC 6282. Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks (6LoWPAN). IETF. 2011.
13. IETF RFC 6550. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. IETF. 2012.
14. Romanov V., Galelyuka I., Voronenko O. Wireless sensor networks for smart agriculture. *IJRIS*. 2021. Vol. 13, No. 3. P. 147–154. <https://doi.org/10.1504/IJRIS.2021.117079>.
15. Romanov V.O., Galelyuka I.B., Hrusha V.M., Voronenko O.V., Kovyrova O.V., Antonova H.V., Kedych A.V. Wireless sensor networks for digital agriculture, environmental protection, and healthcare. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Vol. 59, No. 6. P. 1023–1030. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00638-3>
16. IEEE Std 802.15.4-2015. Low-Rate Wireless Networks. IEEE Standards Association. 2015.
17. Zigbee Specification. Connectivity Standards Alliance. 2023. <https://csa-iot.org/all-solutions/zigbee/> (accessed: 18.11.2025)
18. Bluetooth Core Specification. Bluetooth SIG. <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification/> (accessed: 18.11.2025)
19. LoRaWAN® L2 1.0.4 Specification. LoRa Alliance. 2020. <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications> (accessed: 18.11.2025)
20. 3GPP TS 36.331: E-UTRA; RRC Protocol specification. Release 13. 3GPP. 2016.
21. ISO/IEC 30141:2018. Internet of Things Reference Architecture. Geneva: ISO, 2018.
22. IEEE Std 2413-2019. Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things. IEEE Standards Association, 2019.
23. ISO/IEC 30165:2023. Industrial IoT Reference Architecture. Geneva: ISO. 2023.
24. Horizon Europe Programme. European Commission, 2021. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon-europe> (accessed: 18.11.2025)
25. ETSI IoT Standards. ETSI. 2022. <https://www.etsi.org/technologies/internet-of-things> (accessed: 18.11.2025)
26. ENISA. Cybersecurity for IoT. ENISA, 2022. <https://www.enisa.europa.eu/topics/iot> (accessed: 18.11.2025)
27. Bosch Connected Environmental Monitoring. Bosch, 2022. <https://www.bosch.com>
28. Libelium Waspnote. Libelium, 2022. <https://www.libelium.com> (accessed: 18.11.2025)
29. Libelium Smart Environment. Libelium, 2022. <https://www.libelium.com> (accessed: 18.11.2025)
30. EnOcean Alliance Technical Specifications. EnOcean, 2022. <https://www.enocean.com> (accessed: 18.11.2025)
31. John Deere Precision Agriculture. John Deere, 2022. <https://www.deere.com> (accessed: 18.11.2025)
32. CropX Soil Monitoring System. CropX, 2022. <https://www.cropx.com> (accessed: 18.11.2025)
33. Arable Mark 2. Arable Labs, 2020. <https://www.arable.com> (accessed: 18.11.2025)
34. Arable Mark 3. Arable Labs, 2022. <https://www.arable.com/mark3/> (accessed: 18.11.2025)
35. Siemens MindSphere White Paper. Siemens AG, 2022. https://www.plm.automation.siemens.com/media/global/en/Siemens-MindSphere-Whitepaper-69993_tcm27-29087.pdf (accessed: 18.11.2025)
36. Honeywell Wireless Sensor Networks. Honeywell, 2022. <https://www.honeywell.com> (accessed: 18.11.2025)
37. Emerson Rosemount WirelessHART. Emerson, 2022. <https://www.emerson.com>, <https://doi.org/10.1136/bmj.o2225>
38. Philips HealthSuite. Philips, 2022. <https://www.philips.com> (accessed: 18.11.2025)
39. Medtronic Guardian Connect. Medtronic, 2022. <https://www.medtronic.com> (accessed: 18.11.2025)
40. Abbott FreeStyle Libre. Abbott, 2022. <https://www.freestyle.abbott> (accessed: 18.11.2025)
41. GE Healthcare Wireless Monitoring. GE Healthcare, 2022. <https://www.gehealthcare.com> (accessed: 18.11.2025)

Received/Одержано 18.11.2025

Accepted/Прийнято 03.03.2026

Published/Надруковано 27.03.2026

Вороненко Олександр Володимирович,

молодший науковий співробітник

Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України, Київ.

<https://orcid.org/0000-0002-5022-8017>oleksandr.voronenko@dcf.kiev.ua

UDC 004.75

Oleksandr Voronenko

Current State and Development Trends of Wireless Sensor Networks

V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, Kyiv.

Correspondence: oleksandr.voronenko@dcf.kiev.ua

Introduction. Wireless Sensor Networks (WSN) have become one of the fundamental technologies of digital transformation, enabling real-time data collection, transmission, and processing. Their applications span a wide range of domains, from environmental monitoring and precision agriculture to industrial automation and healthcare. In the current context of the Internet of Things (IoT), WSN serve as the foundation of cyber-physical systems, integrating physical processes with information flows.

The scientific novelty of this work lies in the systematic analysis of contemporary standards, architectural solutions, and commercial implementations of WSN, which makes it possible to formulate a generalized methodology for designing Wireless Sensor Distributed Intelligent Systems (WSDIS). WSDIS are understood as WSN that:

- integrate sensor nodes with artificial intelligence algorithms;
- provide distributed data processing at the node level (edge computing);
- enable intelligent interaction between sensors, coordinators, and user systems;
- are oriented toward real-time decision-making scenarios (ecology, agriculture, healthcare).

Aim of the Article. The purpose of this study is to investigate the current state and development trends of WSN, to identify key challenges and principles for designing WSDIS architectures, and to analyze practical examples of commercial sensor networks across different domains.

To achieve this aim, the following objectives were set:

- to analyze the evolution of WSN standards and their integration into global IoT ecosystems;
- to identify global development trends and key challenges of the current stage;
- to examine the principles of WSDIS architecture design and architectural solutions;
- to evaluate contemporary commercial implementations of WSN in ecology, agriculture, industry, and healthcare.

Results. The article examines the current state and development trends of WSN. The evolution of standards (IEEE 802.15.4, ZigBee, BLE, LoRaWAN, NB-IoT) is analyzed, along with global tendencies toward scalability, energy efficiency, and node intelligence. The key challenges of the present stage are identified: energy constraints, cybersecurity, standardization, and interoperability. Particular attention is devoted to the principles of WSN architecture design (modularity, adaptability, scalability, interoperability, security) and to architectural solutions (centralized, decentralized, hybrid). An overview of contemporary commercial WSN implementations in ecology, agriculture, industry, and healthcare (Bosch, Libelium, John Deere, Siemens, Philips, among others) is provided. The focus is placed on the role of WSN as a foundation of digital transformation and their integration into global IoT ecosystems.

Conclusions. The development of WSN has progressed from local energy-efficient protocols (IEEE 802.15.4, ZigBee, BLE) to integration into global digital ecosystems (LoRaWAN, NB-IoT, ISO/IEC 30141, IIRA). The evolution of standards demonstrates a gradual expansion of functionality, scalability, and interoperability, forming the basis for universal WSDIS architectures. Global development trends are defined by the implementation of energy-efficient technologies, integration with AI and edge computing, and increasing requirements for cybersecurity. The challenges of the current stage – energy constraints, cyber threats, standardization, and the need for flexible architectures – stimulate the search for new solutions that combine modularity, adaptability, and reliability.

The principles of WSDIS architecture – modularity, scalability, adaptability, interoperability, and security – constitute the methodological foundation for the creation of universal sensor systems. Architectural solutions are evolving from centralized to hybrid models that integrate edge computing and cloud services, ensuring a balance between efficiency and resilience.

Keywords: wireless sensor networks, IoT, wireless sensor distributed intelligent systems, architecture, commercial solutions, cybersecurity, WSN.