

ОБ'ЄДНАННЯ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МУЛЬТИПРОТОКОЛЬНОЇ ІОТ

Dakova L.V., Dakov S.Y. Connecting sensor networks to create multiprotocol IoT. Possible ways of integrating heterogeneous networks at several levels are considered, including at the level of applications, gateways, and sensor devices. The main advantages and disadvantages of multiprotocol networks for each of the proposed approaches to unification are identified. A comprehensive integration option is proposed, which involves combining networks at different levels in order to increase the efficiency of their functioning. Particular attention was paid to analyzing network integration methods, improving the efficiency of data exchange, and ensuring the scalability, reliability, and security of the unified information environment.

Keywords: Internet of Things, sensor networks, network integration, network topology.

Дакова Л.В., Даков С.Ю. Об'єднання сенсорних мереж для створення мультипротокольної ІоТ. Розглянуто можливі способи інтеграції різноманітних мереж на кількох рівнях, зокрема на рівні додатків, шлюзів і сенсорних пристроїв. Визначено основні переваги та недоліки мультипротокольних мереж для кожного із запропонованих підходів до об'єднання. Запропоновано комплексний варіант інтеграції, який передбачає поєднання мереж на різних рівнях з метою підвищення ефективності їх функціонування. Особливу увагу приділено аналізу методів інтеграції мереж, підвищенню ефективності обміну даними, забезпеченню масштабованості, надійності та безпеки функціонування єдиного інформаційного середовища.

Ключові слова: інтернет речей, сенсорні мережі, інтеграція мереж, топологія мережі.

Вступ

Технологія Internet of Things (IoT) передбачає побудову інформаційних мереж, у яких основними джерелами даних виступають різноманітні фізичні об'єкти або «речі». Відповідно до рекомендацій International Telecommunication Union Y.2060 та Y.2069, щоб об'єкт фізичного чи інформаційного середовища міг належати до IoT, він повинен бути ідентифікований у мережі та мати засоби взаємодії з нею. Переваги цієї концепції, а також закономірності її виникнення та розвитку неодноразово розглядалися у науковій літературі. Концепція Internet of Things виявилася надзвичайно перспективною, тому сьогодні спостерігається її активне впровадження у дедалі ширші та різноманітніші сфери діяльності, зокрема в медицині, системах безпеки, енергетиці, транспорті, а також у проєктах Smart City та інших напрямках [3–5]. Підключення об'єктів до мережі та організація інформаційного обміну між ними є тривалим процесом, що зумовлено значною кількістю вже наявних пристроїв і постійною появою нових елементів концепції IoT.

Забезпечення зазначених, а часто й суперечливих, вимог може здійснюватися кількома способами. Один із підходів передбачає створення універсального стандарту та відповідного апаратно-програмного комплексу, здатного максимально враховувати як сучасні, так і перспективні потреби таких систем. Інший підхід, що розглядається у статті, полягає в інтеграції різноманітних технічних засобів, зокрема мереж Internet of Things, із подальшим формуванням мультипротокольної інфраструктури для створення єдиного інформаційного простору.

Аналіз останніх досліджень. В [1] описується підхід сучасних досліджень щодо використання мультипротокольних шлюзів як основного засобу об'єднання сенсорних мереж. В [2] автори показують, що недостатньо вирішеними залишаються питання інформаційної безпеки, стандартизації інтерфейсів, оптимізації маршрутизації, керування енергоспоживанням сенсорних вузлів та забезпечення гарантованої якості обслуговування в мультипротокольних мережах. В [3] продемонстровано розроблення ефективних методів об'єднання сенсорних мереж для створення надійної, масштабованої та безпечної IoT-інфраструктури.

Постановка завдання. Стрімкий розвиток Internet of Things супроводжується широким використанням сенсорних мереж, побудованих на основі різних стандартів зв'язку, протоколів передавання даних та апаратних платформ. Наявність значної кількості несумісних технологічних рішень ускладнює організацію єдиного інформаційного середовища, обмін даними між пристроями та централізоване керування мережею. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення ефективних підходів до об'єднання різнорідних сенсорних мереж у мультипротокольну IoT-інфраструктуру. Основним завданням статті є аналіз існуючих методів інтеграції сенсорних мереж, визначення їх переваг і недоліків, а також розроблення моделі об'єднання мереж, яка забезпечить сумісність пристроїв, надійний обмін даними, масштабованість системи та ефективне використання мережевих ресурсів.

Метою роботи є формування узагальненого огляду та розроблення підходів до об'єднання сенсорних мереж для створення мультипротокольної Internet of Things-інфраструктури, здатної забезпечувати сумісну роботу пристроїв, що використовують різні стандарти зв'язку.

Виклад основного матеріалу дослідження

Топологія мережі IoT. Згідно з нормативними документами [1, 5], мережі IoT містять чотири функціональні рівні, рис. 1. Найнижчий рівень архітектури IoT складається з «розумних» (smart) об'єктів, інтегрованих із сенсорами (датчиками). Сенсори реалізують з'єднання фізичного та віртуального (цифрового) світів, забезпечуючи збір та обробку інформації в реальному часі. Сенсори безпосередньо пов'язані як між собою, так і з одним або декількома шлюзами та формують сенсорну мережу.

Другий рівень охоплює шлюзи взаємодії та зовнішні глобальні мережі, зокрема Internet. Цей рівень являє собою конвергентну мережеву інфраструктуру, що формується шляхом об'єднання різнорідних мереж у єдину мережеву платформу для забезпечення узгодженого обміну даними та централізованої взаємодії. Третій, сервісний рівень, включає комплекс інформаційних послуг, призначених для автоматизації технологічних і бізнес-процесів у середовищі Internet of Things. До таких сервісів належать підтримка операційної та управлінської діяльності, аналітичне опрацювання даних, моніторинг стану систем, керування бізнес-процесами, а також інші функції, спрямовані на підвищення ефективності роботи організацій. На четвертому рівні архітектури Internet of Things розміщуються різноманітні прикладні рішення, орієнтовані на потреби окремих галузей промисловості та сфер діяльності. До них належать застосунки для енергетики, транспорту, торгівлі, медицини, освіти, житлово-комунального господарства та інших напрямів використання IoT-технологій. [2, 4]

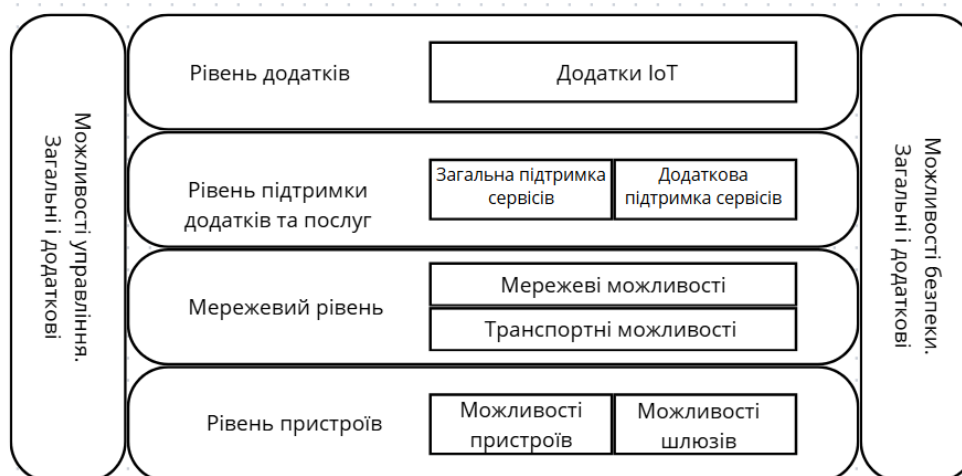


Рис. 1. Еталонна модель IoT згідно з МСЕ-ТУ.2060

Аналіз показує, що сучасні сенсорні мережі характеризуються рядом параметрів, серед яких можна виділити наступний базовий набір: смуга використовуваних частот; швидкість передачі; структура переданого пакета; методи авторизації, реєстрації пристроїв (сенсорів, шлюзів, серверів) та захисту даних; дальність дії; споживана потужність та економічність;

методи модуляції сигналу; методи управління частотним діапазоном, поділу та ущільнення каналів. Відносно повна таблиця характеристик сучасних сенсорних мереж наведена в [7, 8]. Наразі кожен із використовуваних стандартів реалізує певний діапазон характеристик, що належать до набору базових параметрів. Зокрема, широко застосовувані стандарти сенсорних мереж

LoRaWAN та ZigBee відрізняються за частотним діапазоном, швидкістю передачі даних, розміром зони радіовидимості тощо. Порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок про те, що для кожного стека протоколів взаємодії характерні певні набори значень базових показників. Це дає підстави називати сучасні сенсорні мережі для IoT монопротокольними мережами (МС). Як приклад на рис. 2 наведено типову топологію МС IoT.

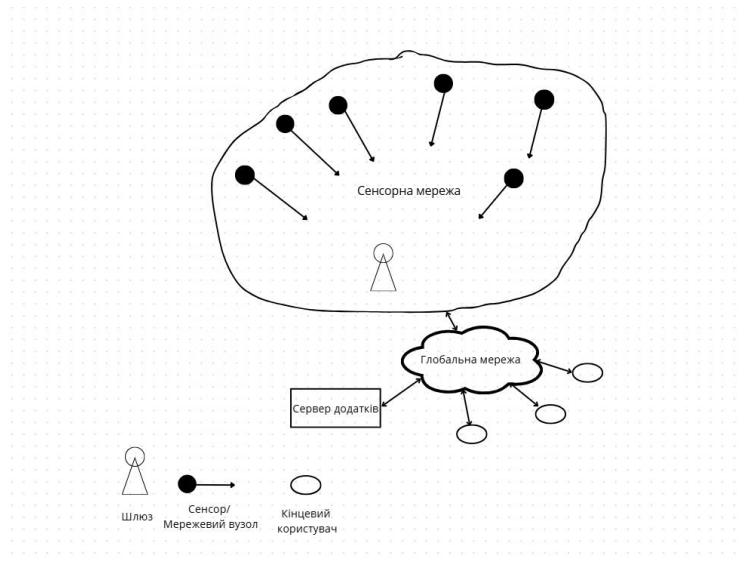


Рис. 2. Топологія типової МС

У запропонованому варіанті топології мережі сервер додатків реалізує функції третього та четвертого рівнів, зокрема, функції керування збором даних від сенсорів, обробки інформації, що надходить, її зберігання, надання користувачам у заданому вигляді. Розширити експлуатаційні характеристики, а отже, і сферу застосування IoT можна кількома шляхами.

У рамках цієї статті розглянемо варіант спільного використання декількох МС для розширення сфери використання мережі та поліпшення її функціональних і експлуатаційних характеристик. Такі мережі надалі називатимемо мультипротокольними мережами (МПС).

Нижче представлені варіанти створення МПС на трьох рівнях: сенсорів/виконавчих пристроїв, шлюзів і додатків. Наявність на кожному рівні програмованих елементів значно спрощує реалізацію додаткового функціоналу для об'єднання мереж.

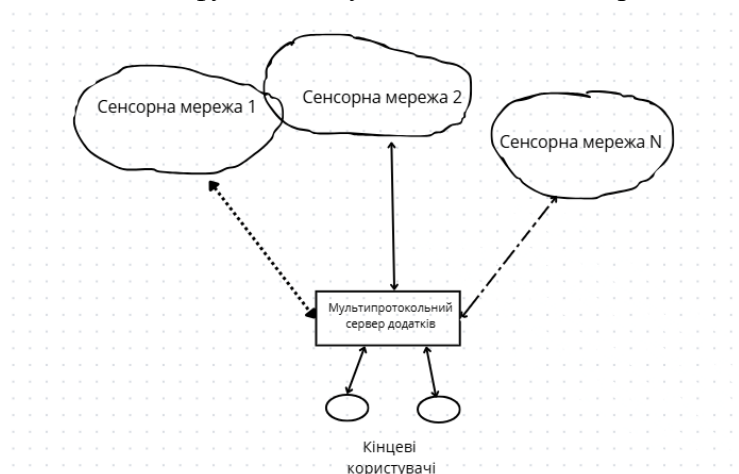


Рис. 3. Топологія МПС.

Об'єднання мереж на рівні додатків. Це один із найвищих рівнів об'єднання. МПС містить незалежні сенсорні мережі, дані від яких через відповідний шлюз надходять до мультипротокольного сервера додатків, клієнтами якого є кінцеві користувачі. Топологія МПС при інтеграції на рівні додатків наведена на рис. 3. У схемі зазначено, що такий вид інтеграції має фактично лише один об'єднуючий елемент – мультипротокольний сервер додатків. З метою спрощення на рис. 3 опущено глобальні мережі, що беруть участь в обміні даними між шлюзами сенсорних мереж, мультипротокольним сервером і кінцевими користувачами. Аналогічне спрощення будемо використовувати і на інших рисунках.

Об'єднання за допомогою мультипротокольного сервера додатків. Такий підхід є найбільш виправданим при об'єднанні готових сенсорних мереж, оскільки практично не потрібно вносити зміни в уже існуюче апаратно-програмне забезпечення сенсорів та шлюзів. Новим елементом є мультипротокольний сервер додатків, який повинен приймати різномірні потоки даних і приводити їх до єдиного інтерфейсу для моніторингу та управління виконавчими механізмами. Однак у разі додавання нової мережі до вже функціонуючої МПС може знадобитися істотне доопрацювання інтегрованого мультипротокольного додатка. Для часткового подолання цього недоліку при об'єднанні мереж можуть бути використані додаткові елементи – адаптери додатків, основна функція яких – приведення форматів даних від сенсорів до заданого формату, прийнятого для МПС. У цьому випадку сервер додатків кожної мережі перетворюється на адаптер додатків і створюється новий інтегрований додаток. Після попередньої обробки дані надходять до єдиного сервера додатків МПС. Варіант топології МПС наведено на рис. 4.

Загальним недоліком варіанту об'єднання мереж на рівні додатків є зростання кількості мережевих структурних елементів (сенсорів, шлюзів) пропорційно до кількості об'єднуваних МС. Зазначені мережеві елементи, загалом кажучи, не є взаємозамінними, що призводить до зростання експлуатаційних витрат і зниження надійності функціонування мережі.

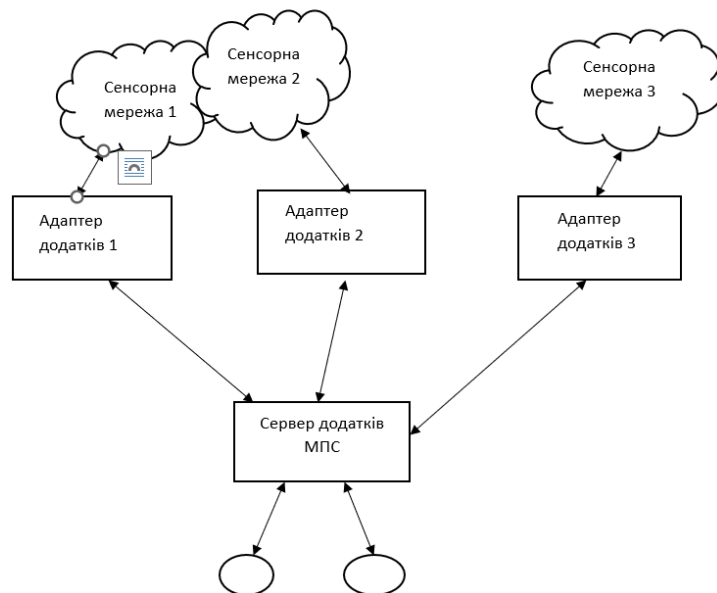


Рис. 4. Топологія МПС. Об'єднання з використанням адаптерів додатків

Об'єднання мереж на рівні шлюзів. Мультипротокольна сенсорна мережа показана на рис. 5 у нашому випадку містить набори різномірних монопротокольних сенсорів і мультипротокольних шлюзів, кожен з яких організовує обмін даними з сенсором будь-якого типу, що входить до складу мережі. Мультипротокольний шлюз забезпечує перетворення даних у єдиний формат, обраний для МПС, та уніфікований обмін з сервером додатків МПС.

Об'єднання з використанням мультипротокольних шлюзів. Вузьким місцем такого варіанту об'єднання є мультипротокольний шлюз, який повинен, з одного боку, бути сумісним з декількома типами сенсорів, а з іншого – формувати єдиний інтерфейс із сервером додатків.

Однак з точки зору розвитку мереж такий підхід видається найбільш кращим. По-перше, загальна кількість шлюзів часто може бути скорочена саме за рахунок їх багатофункціональності. У порівнянні з розглянутим вище варіантом об'єднання, це призведе до зниження експлуатаційних витрат і ймовірності відмови мережі. По-друге, для підключення нових сенсорів і мереж до МПС необхідно доопрацювати лише один елемент – шлюз нової мережі. Зворотним боком універсальності шлюзів стане збільшення їх номенклатури в міру розвитку мережі та включення до неї все більшої кількості різнотипних МС.

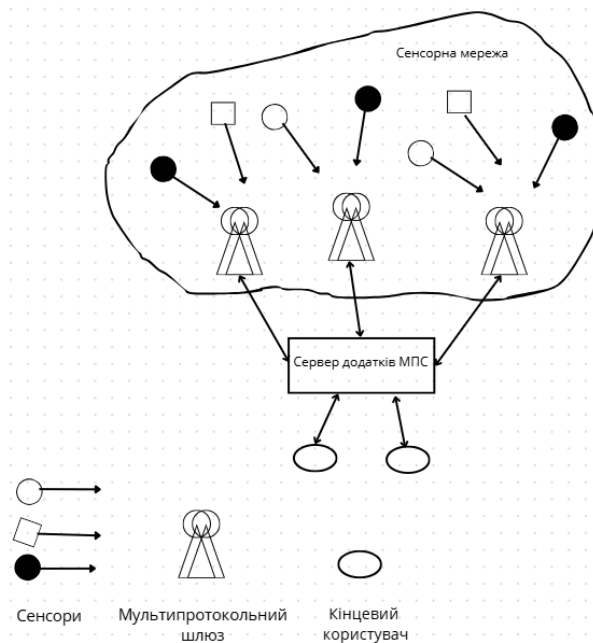


Рис. 5. Топологія МПС.

Об'єднання мереж на рівні сенсорів. Наразі на ринку пристроїв для IoT вже анонсовано випуск плат (сенсорних блоків, СБ), що поєднують кілька стандартів. Яскравим прикладом таких пристроїв є сімейство мікросхем Wireless Gecko [9], в якому об'єднані мережеві вузли двох мереж – Wi-Fi та ZigBee. Очевидно, що склад протоколів, які підтримує один СБ, може бути розширений. Варіанти топології мережі при об'єднанні на рівні сенсорів наведено на рис. 6. Кожен СБ містить програмно-апаратне забезпечення, що дозволяє здійснювати обмін даними з відповідними монопротокольними шлюзами. Універсальний СБ може передавати дані, отримані від сенсорів, по одній або декількох мережах залежно від зовнішніх умов, що складаються (зокрема, наявності перешкод у певному діапазоні частот, перешкод тощо), або внутрішнього стану (наприклад, працездатності приймально-передавальних вузлів, електроживлення тощо). Зібрані дані надходять до відповідного сервера додатків і далі до кінцевих користувачів. На рис. 6 наведено варіанти об'єднання мереж на рівні сенсорів.

Такий підхід має як позитивні, так і негативні сторони. Одночасне використання декількох протоколів однією СБ може призвести до зростання енергоємності сенсорних елементів та збільшення витрат на забезпечення необхідного рівня електроживлення. Крім того, для ефективного функціонування СБ необхідне спеціальне керуюче ПЗ, здатне автономно обирати оптимальні маршрути передачі даних. Об'єднання в одному структурному елементі сенсорів декількох мереж може в ряді випадків ускладнити процедури реєстрації сенсорів. Зазначимо також, що застосування мультипротокольних сенсорів вимагатиме додаткового доопрацювання і сервера додатків.

Позитивною стороною такого підходу до об'єднання мереж є можливість створення універсального сенсора, який може бути використаний у найрізноманітніших, у тому числі й мінливих у часі, умовах. Крім того, для таких мереж характерна висока функціональна надійність.

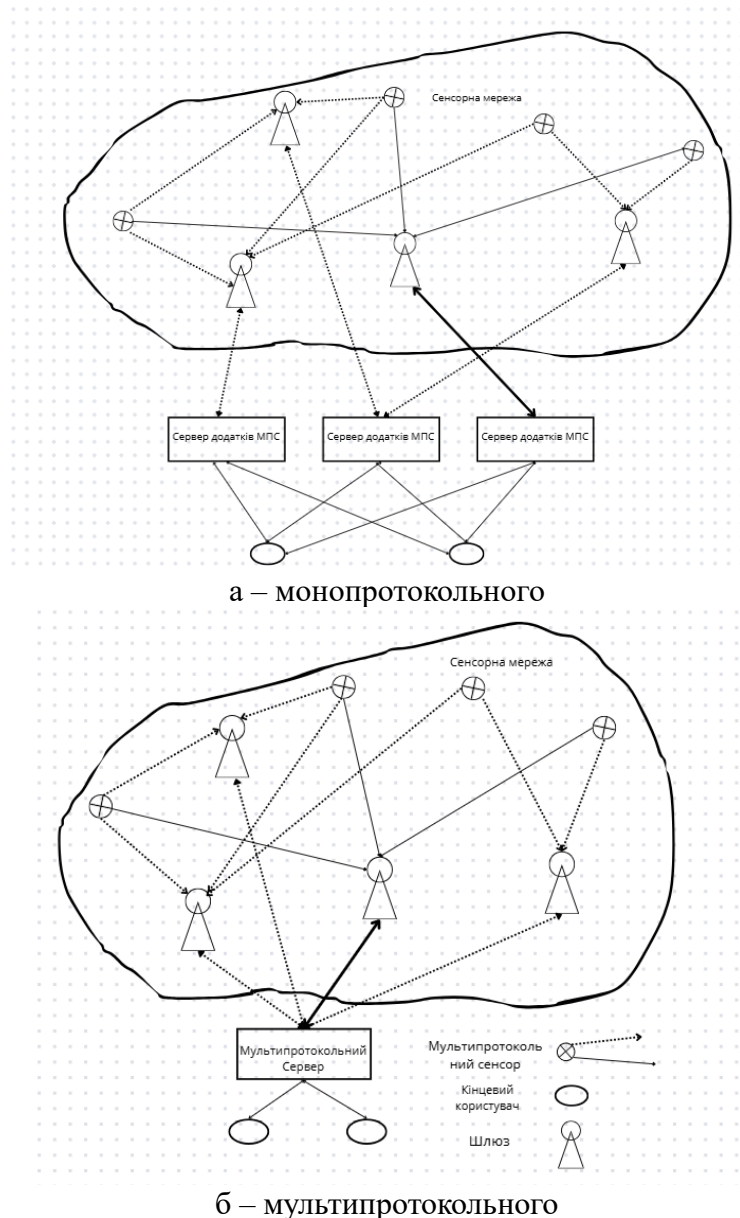


Рис. 6. Варіанти об'єднання мереж на рівні сенсорів додатків

Комплексне об'єднання мереж.

Кожен із розглянутих варіантів побудови МПС має свою сферу ефективного застосування. Очевидно, що переваги МПС можуть бути повною мірою реалізовані при спільному використанні різних варіантів об'єднання.

У наведеному фрагменті використані наступні варіанти об'єднання МС для створення МПС.

1. Автономна мережа за технологією Lo Ra, пов'язана з іншими мережами на рівні додатків.

2. Об'єднання на рівні сенсорів, виражене сенсорними блоками, в яких реалізовані мережеві функції двох стандартів: ZigBee (діапазон 2,4 ГГц) і Wi-Fi (діапазон 2,4 ГГц). Інформація з сенсорів через відповідні шлюзи надходить у глобальну мережу Інтернет.

3. Об'єднання на рівні сенсорних мереж представлено двома мережами: стандарту ZigBee (діапазон 2,4 ГГц) та мережею М'єє, яка використовує власні технології з протоколом верхнього рівня 6LoWPAN або SimpliCI TI (діапазон 868 МГц), що об'єднуються мультипроцесорним шлюзом [10].

4. Інтеграція на рівні додатків забезпечується мультипротокольним сервером додатків, який уніфікує формати даних, що надходять від різних мереж, протоколює роботу мереж та інформацію, що надходить, відображає дані кінцевому користувачеві.

5. В якості пристрою відображення може бути використаний комп'ютер (ОС Win, UNIX), планшет, мобільний телефон (ОС Android).

Додатковим об'єднуючим елементом є часткове перетинання просторових областей розташування сенсорів різних мереж. Це дозволяє, зокрема, формувати альтернативні маршрути передачі даних, резервувати канали зв'язку та розширювати загальну ємність МПС. Реалізований фрагмент МПС використовується для аналізу властивостей, оцінки функціональних характеристик та демонстрації переваг розглянутого класу мереж.

Висновки

Інтеграція сенсорних мереж Internet of Things у спільну мультипротокольну інфраструктуру може здійснюватися на кожному з трьох основних функціональних рівнів: рівні додатків, рівні шлюзів та рівні сенсорних пристроїв. Найбільш перспективним є комплексний підхід, що передбачає інтеграцію мереж одночасно на кількох рівнях. У такому випадку єдина система успадковує переваги окремих підмереж, що сприяє покращенню основних інформаційно-технічних характеристик сенсорної мережі. Зокрема, це забезпечує розширення частотного діапазону каналів передавання даних, збільшення меж регулювання швидкості обміну інформацією, а також розширення зони радіопокриття та підвищення дальності функціонування об'єднаної мережі.

Крім того, підвищується загальна надійність мережевої інфраструктури завдяки скороченню кількості окремих елементів, а також реалізації механізмів функціонального резервування. Додатковою перевагою інтеграції мереж є можливість поетапного впровадження сенсорних сегментів в експлуатацію відповідно до змінних вимог щодо інформаційного обміну як між самими сенсорами, так і між сенсорними пристроями та зовнішніми інформаційними системами.

Список використаної літератури:

1. International Telecommunication Union. (2020). Recommendation ITU-T Y.4000/Y.2060: Overview of the Internet of Things and its applications (updated edition). Geneva, Switzerland: ITU.
2. IEEE. (2020). IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (IEEE 802.15.4-2020). New York, NY: IEEE.
3. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2020). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(1), 855–873.
4. Ray, P. P., Dash, D., & De, D. (2021). Internet of Things-based smart agriculture: Technologies, practices and future direction. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12(4), 1–15.
5. LoRa Alliance. (2021). LoRaWAN Specification v1.0.4. Fremont, CA: LoRa Alliance.
6. Abdelwahed, S. H., et al. (2025). Survey of IoT multi-protocol gateways: Architectures, protocols and cybersecurity. *Internet of Things*, 31, 100670.
7. Abdulhussain, S. H., et al. (2025). A comprehensive review of sensor technologies in IoT. *Computers*, 14(8), 342.
8. Sharma, B. K. (2025). Internet of Things (IoT) systems: A survey of platforms, protocols, and application frameworks. *Journal of Global Research in Multidisciplinary Studies*, 1(10), 24–39.
9. Ojha, A., et al. (2025). Evolving landscape of wireless sensor networks: A survey of trends, challenges, and future directions. *SN Applied Sciences*, 7, Article 125.
10. Elhoseny, M., Jahid, K., Latif, R., Saddik, A., & Atassi, R. (2026). Recent advances in IoT-driven crop monitoring and precision irrigation: Technologies, models, and future challenges. *Smart Agricultural Technology*, 8, e03222.

Автори статті

Дакова Лариса – кандидат технічних наук, доцент, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-6104-8217

Даков Сергій – кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна.

ORCID: 0000-0001-9413-3709

Authors of the article

Dakova Larysa – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-6104-8217

Dakov Serhii – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine.

ORCID: 0000-0001-9413-3709

Надійшла до редакції: 27.04.2026

Прийнята до друку: 05.05.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Дакова Л.В., Даков С.Ю.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>