

УДК 004.7

DOI: 10.31673/2412-9070.2025.024081

Н. В. КОЛОМІЄЦЬ, студент;

ORCID: 0009-0006-4258-0412

Ю. В. ВЛАДАРЧИК, аспірант;

ORCID: 0009-0008-5271-6285

С. П. ЗАЙЧЕНКО, аспірант;

ORCID: 0009-0003-3422-8927

С. В. УНГУРЯН, аспірант,

ORCID: 0009-0009-8813-2350

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ТЕХНОЛОГІЇ BLE ТА ZIGBEE В ІОТ-СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ КЛІМАТОМ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

Вибір мережної технології є ключовим у розробці IoT систем. Оскільки в IoT та PoT використання “розумних пристроїв” тільки масштабується, вочевидь це відносить дротове з'єднання пристроїв в минуле, надаючи можливість бездротовим мережним технологіям охоплювати все більше і більше сфер для їхнього застосування. Останнє досягається розробниками бездротових технологій, які на основі світових потреб — адаптують бездротові технології і оптимізують їх саме під малоспоживаючі електроенергію пристрої. Варто також відзначити і екологічну складову, оскільки на проведення сотень або тисяч кабелів для IoT пристроїв, проводилися б затратніші монтажні і більша шкода екології від більших потужностей виробництва кабелів.

У статті розглянуто основні тенденції розвинутих в наш час двох економічних по електроспоживанню пристроїв — бездротових мережних технологій Bluetooth LE та ZigBee. Основна увага при виборі конкретно цих двох бездротових технологій була акцентованою на їхній популярності, схожості однієї до одної щодо принципу роботи, шифрування даних, які передаються у мережі, однаковий частотний діапазон, економічності щодо розряджання пристроїв, а також відносно мала дальність радіусу дії (менше 200 метрів).

Було розглянуто порівняння стеків протоколів обох мереж, виокремлено процес роботи мережі та інші різні особливості технологій. Останнє — розгляд основних характеристик надало чіткість погляду на обидві мережні технології, що за ознаками вирізнило Bluetooth Low Energy, як кращу в усіх характеристиках мережу, у порівнянні з ZigBee. Саме тому, стало зрозумілим, що в фото-передаванні та більш масштабних проєктах — Bluetooth LE може забезпечити більші функціональні потреби системи. Але, це не відміння застосування ZigBee в малих та середніх по масштабності системах, оскільки для пристроїв, які передають малобітову інформацію або не дуже важливу в режимі реального часу — ZigBee зможе чудово забезпечити їхню функціональність і не мати суттєвої різниці з Bluetooth LE.

Ключові слова: Bluetooth LE, ZigBee, IoT, енергоспоживання, стек протоколів, швидкість передавання даних, діапазон, бездротова мережа, схема з'єднань приладів, Mesh.

Вступ

Постановка задачі. В IoT та PoT дедалі популярнішим є використання бездротових технологічних рішень для передавання даних у мережі. Існує чимало технологічних рішень бездротових мереж, здатних забезпечити ті чи інші потреби систем. До цих потреб можна віднести: дальність зв'язку, швидкість передавання даних, завадостійкість сигналу, безпеку передавання даних, тощо. Було прийнято рішення виокремити огляд двох технологій бездротової ме-

режі: Bluetooth BLE і ZigBee. Обрання даних мереж було обумовлено тим, що обидві достатньо популярні у використанні IoT систем та забезпечують достатні технологічні властивості, для використання їх у мікрокліматичних «розумних системах».

Саме тому, детальний огляд з порівнянням цих двох мереж, здатний відобразити найбільш ефективну доцільність використання тієї або іншої технології бездротового зв'язку, а також забезпечить подальше розуміння у доцільності проєктування систем і підбору для них мережевих технологій.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження останніх років надали достатньо розгорнутої інформації для популярних та непопулярних бездротових мереж, які можуть застосуватися в PoT (промисловий Інтернет речей), а також схематичних архітектур і нюансів щодо розгортання даних архітектур без прив'язки до конкретної мережевої бездротової технології.

Дане дослідження не містило у списку бездротової мережі ZigBee, через що бездротова технологія Bluetooth була викоремлена як єдина економічна в енергоспоживанні бездротова технологія. Широкий опис технології Bluetooth надав достатньо інформації на основі даних, досліджень та розрахунків, а також опису принципу роботи даної мережі на основі потреб промислового Інтернету речей [1].

Метою статті є визначення переваг за різними критеріями розглянутих бездротових мереж для систем контролю клімату, огляд перспектив щодо довгострокових впроваджень поданих бездротових рішень.

Основна частина

На сьогодні мережева технологічність сягла значних покращень в сфері бездротових мереж: зв'язок в космосі, літаку, дальній зв'язок на поверхні землі, а також ефективний і енергозаощадливий – нахшталт Bluetooth BLE та ZigBee.

Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy, також відомий як Bluetooth Smart – це варіант основного стандарту бездротової технології Bluetooth, який має основну відмінність у низькому енергоспоживанні за рахунок певного способу обробки даних та низькій швидкості передавання даних, через що дана технологія чудово зарекомендувала себе як ефективний варіант бездротової мережі IoT пристроїв. Ефективність робочого циклу, завдяки якому знижується розряджання пристроїв, виглядає наступним чином: BLE, маючи низьку швидкість передавання, якої достатньо для передавання даних малих пристроїв, використовує певний алгоритм робочого циклу, який дає змогу пристроям більшу частину часу перебувати у режимі сну щодо передавання даних у мережу і прокидатися тоді, коли необхідним стане передавання або отримання даних пристроями.[2]

Серед згаданих ключових характеристик BLE, а саме низького енергоспоживання пристроїв та економічної ефективності – слід зазначити також гнучкий діапазон передавання даних, котрий можна налаштувати до різних потреб у використанні: від кількох метрів до понад ста метрів.

Стек протоколів BLE, структурно наведений на рис. 1, складається з наступних декількох рівнів:

- Рівень додатків. Містить додатки кінцевого користувача, які взаємодіють зі стеком BLE через високорівневі API.

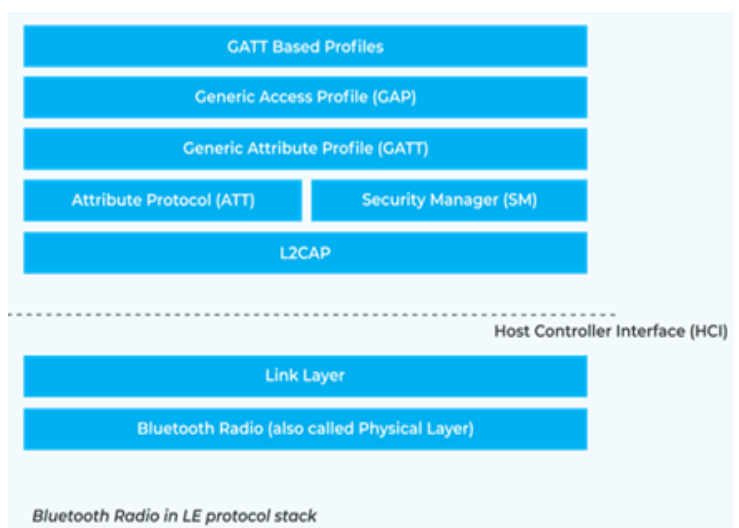


Рис. 1. Стек протоколів Bluetooth Low Energy

- Загальний профіль атрибутів (GATT). Керує обміном даними між пристроями та керує організацією служб та характеристик.
- Протокол керування та адаптації логічного каналу (L2CAP). Для передавання даних обробляє мультиплексування і сегментацію даних.
- Контролер. Зв'язується з обладнанням, керуючи певними завданнями, на кшталт зміни частоти та виправлення помилок.
- Фізичний рівень. Керує аспектами радіочастот BLE-зв'язку
- Загальний стек BLE складається з додатку, хосту і контролеру, а також має в середині блоки окремих рівнів.[4]

Bluetooth Low Energy працює в мережі по принципу «Mesh», яка являє собою послідовне з'єднання пристроїв в бездротовій мережі. Як показано на рис. 2, в такій мережі кожен новий пристрій розширює мережу, що дає змогу під'єднати ще більшу кількість пристроїв.[5]

Процес передавання даних BLE працює наступним чином за допомогою рівня GATT:

1. Встановлення з'єднання, коли пристрій під'єднується до периферійного пристрою після сканування.
2. Виявлення послуг, коли центральний пристрій перевіряє наявність на периферійному пристрої доступних послуг та характеристик.
3. Обмін даними, коли дані зчитуються або записуються на периферійний пристрій, використовуючи вищезазначені характеристики GATT.

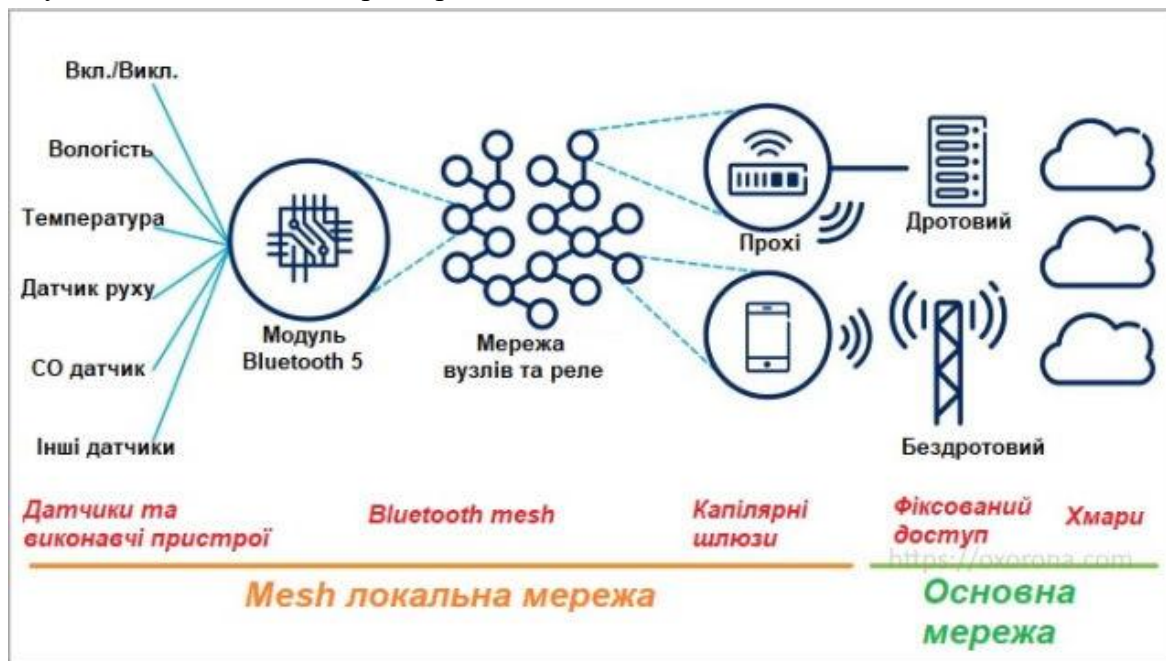


Рис. 2. Схема послідовності з'єднань приладів з використанням технології Bluetooth

ZigBee

Zigbee - це персональна мережа четвертої групи завдань, яка позиціонується як домашня мережа з низькою швидістю передавання даних. Zigbee являється технологічним стандартом, призначеним для керування та контролю мережею.

Як протокол - ZigBee є відкритим глобальним пакетним протоколом, розробка якого забезпечила просту у використанні архітектуру для безпечних та надійних бездротових мереж з низьким енергоспоживанням. Zigbee базується на стандарті зв'язку IEEE 802.15.4, тому підтримує наступні топології: "зірка", "сітчаста" та "кластерна". Стандарт ZigBee задовольняє потребу у дуже низьковитратному впровадженні низькоенергетичних пристроїв з низькою швидкістю передавання даних на коротких відстаннях [6]. Також існує розширена специфікація стандарту ZigBee 3.0, стек якої зображено на рис. 3. Ця специфікація забезпечує новою

функціональністю пристроїв: керування дочірніми пристроями, покращення безпеки та новітні параметри топології мережі [6].

Мережна схема ZigBee, зображена на рис. 4, містить в собі три типи пристроїв:

- Координатор. Пристрій взаємодіє з маршрутизаторами, використовується для підключення пристроїв в мережі.
- Маршрутизатор. Пристрій застосовується для передавання даних між пристроями.
- Кінцевий пристрій. Пристрій, керований координатором, отримуючи та передаючи дані через маршрутизатор [7].

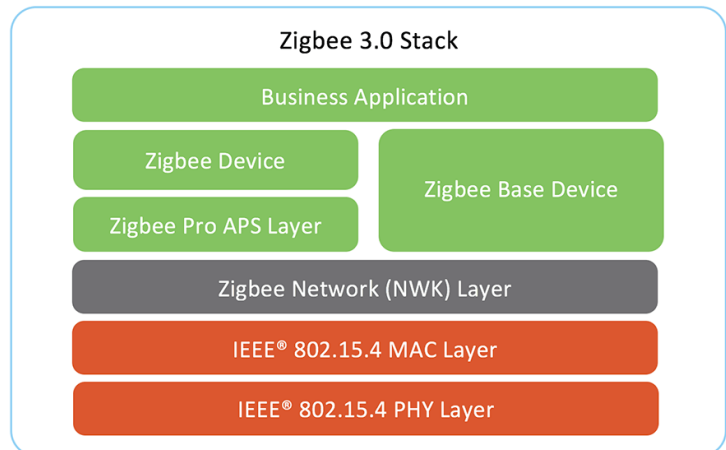


Рис. 3. Стек стандарту ZigBee 3.0

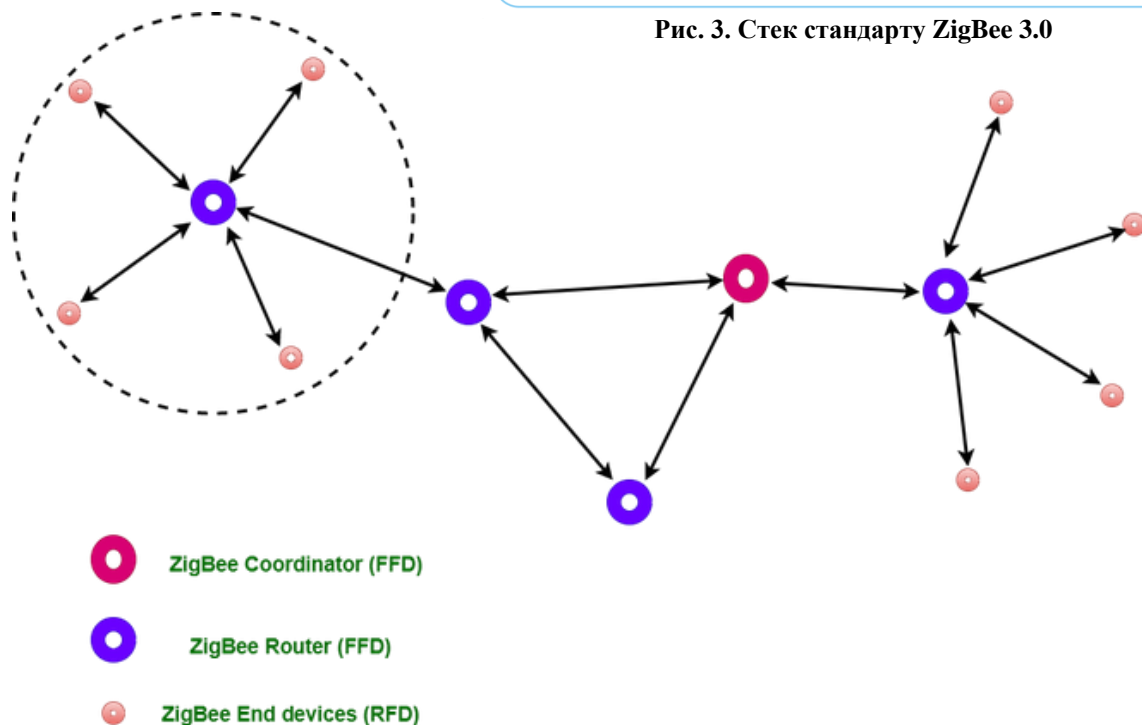


Рис. 4. Схема взаємодії різних типів пристроїв ZigBee

Особливості ZigBee полягають у наступному:

1. Стохастична адресація. Пристрою призначається випадкова адреса та оголошується в мережі. Найвний механізм вирішення конфліктів адрес. Відсутність необхідності підтримувати таблицю адрес призначення «батьківському» вузлу.
2. Керування з'єднанням. Кожен вузол самостійно підтримує якість з'єднання з «сусідами», що в свою чергу використовується як вартість з'єднання під час маршрутизації.
3. Гнучкість частоти. Вузли, які при виникненні перешкод повідомляють про це менеджера каналу, який обирає внаслідок цього інший канал.
4. Асиметричне з'єднання. Всі вузли мають різний рівень потужності передавання даних та чутливості до перешкод, тому шляхи можуть бути асиметричними.
5. Керування живленням. Маршрутизатори та координатори за замовчуванням використовують основне живлення від електромережі, в той час як кінцеві пристрої працюють від батарей [6].

Порівняльна характеристика щодо впровадження Bluetooth LE та ZigBee

Для ефективно-обумовленого впровадження тієї або іншої технології, враховуючи затратність закупівель пристроїв під певний тип мережі, пропонується навести переваги та недоліки застосування обох технологій, а також навести перспективу застосування обох технологій.

Технологія Bluetooth LE налічує наступні переваги:

- Низьке енергоспоживання через заощадливий в заряді механізм передавання даних.
- Безпечне передавання даних, завдяки власній системі шифрування передавання даних.
- Розповсюдженість, у зв'язку з чим більшість IoT пристроїв різних цінкових категорій підійдуть для цієї технології, а також легкість впровадження.

Обмеження даної технології продемонстровані таким переліком:

- Швидкість передавання даних близько 1-2 Мбіт/с, що не мало для низькоспоживаючих енергію подібних технологічних рішень.
- Покриття мережі сягає 150 метрів.

Серед згаданих переваг ZigBee, а саме економічності заряду IoT пристроїв та захищеного 128-бітним шифруванням каналу, слід зазначити й інші переваги:

- Низька вартість модулів та чіпів ZigBee і легкість впровадження системи.
- Топологія мережі Mesh, яка надає можливість пристроям взаємодіяти один з одним без необхідності використання центрального концентратора або маршрутизатора. Також, дана можливість спрощує використання пристроїв цієї технології у системах «розумного будинку», оскільки пристрої взаємодіють один з одним та з центральним керуючим центром.
- Спеціальний протокол ZigBee, розроблений для забезпечення високої надійності. Саме завдяки певним механізмам забезпечується надійне передавання даних навіть при перешкодах або інших несприятливих умовах.

До обмежень ZigBee можна віднести:

- Обмеження радіусу дії, оскільки у порівнянні з іншими технологіями бездротового зв'язку, ZigBee має коротший радіус дії, що впливає на варіанти використання даної мережі.
- Наднизька швидкість передавання даних, що підходить не для всіх систем (20-250 кб/с).
- Нюанси взаємодії через не популярне застосування протоколу ZigBee. Стосується це підтримки пристроями даної технології, які будуть сумісні з даною технологією.

Основні характеристики Bluetooth LE та Zigbee

<i>Bluetooth Low Energy</i>	<i>ZigBee</i>
Швидкість передавання даних до 1 Мбіт/с	Швидкість передавання даних 20-250 кбіт/с
Дальність діапазону мережі - до 150 метрів	Радіус дальності 75-100 метрів
Затримка в передаванні даних близько 6 мс	Затримка в передаванні даних близько 30 мс
Робочий частотний діапазон від 2402 ГГц до 2480 ГГц з розмірністю в 40 каналів	Робочий частотний діапазон від 2405 ГГц до 2480 ГГц з розмірністю в 16 каналів
62 та 128 бітовість шифрування	128-бітове мережеве шифрування

Виходячи з порівнянь обох бездротових мережних рішень, слід зазначити, що обидві бездротові мережі мають споріднений механізм економії заряду IoT пристроїв, а також 128-бітне шифрування передавання даних, у чому Bluetooth LE має власний метод шифрування на відміну від загального (AES), і окремо.

Серед затрат на IoT пристрої - обидві мережі позиціонують себе на використання різного рівня датчиків, зокрема недорогих по вартості, але в останньому ZigBee програє через свою нерозповсюдженість як мережевої технології, а тому і меншому вибору щодо існуючих IoT пристроїв для систем з використанням ZigBee.

Bluetooth LE має більшу базову дальність радіусу дії і кращу швидкість передавання даних, що може знадобитись для певних систем, на кшталт отримання знімку з камери, що в порівнянні з ZigBee буде суттєво відрізнятися в очікуванні передавання містких даних.

Висновки

У даній статті були розглянуті дві слабозатратні в енергоспоживанні бездротові мережеві технології. Огляд здійснювався за критеріями їхніх характеристик: безпеки, радіусу дії, швидкості передавання даних, а також технологічності щодо заощадження електроспоживання IoT пристроїв.

На основі розглянутої інформації, як кращий варіант для впровадження в більшість систем був визначений Bluetooth LE, але система ZigBee вразила специфікою підтримки Mesh технології, яка компенсує базову не високу дальність передавання даних.

Список літератури

1. Survey on Wireless Technology Trade-Offs for the Industrial Internet of Things / A. Seferagić et al. *MDPI*. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/2/488>.
2. A Comprehensive Guide to Bluetooth Low Energy (BLE) for IoT Development - Tech Buzz Online. *Tech Buzz Online*. URL: [https://techbuzzonline.com/bluetooth-low-energy-iot-development-guide/#:~:text=Bluetooth%20Low%20Energy%20\(BLE\)%20is%20a%20game-changing%20wireless,power%20consumption%20and%20cost-efficient%20connectivity%20for%20battery-powered%20devices](https://techbuzzonline.com/bluetooth-low-energy-iot-development-guide/#:~:text=Bluetooth%20Low%20Energy%20(BLE)%20is%20a%20game-changing%20wireless,power%20consumption%20and%20cost-efficient%20connectivity%20for%20battery-powered%20devices).
3. Afaneh M. Bluetooth Low Energy (BLE): A Complete Guide. *Novel Bits*. URL: <https://novelbits.io/bluetooth-low-energy-ble-complete-guide/>.
4. Перспективи Bluetooth Mesh для розумного будинку. *Безпека та відеоспостереження*. URL: <https://oxorona.com/bluetooth-mesh/>.
5. GeeksforGeeks. What is Bluetooth? - GeeksforGeeks. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/bluetooth/>.
6. GeeksforGeeks. Introduction of ZigBee - GeeksforGeeks. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-zigbee/>.
7. What is Zigbee? Learn About Zigbee Wireless Mesh Technology. *IIoT Devices and Services for M2M Networking | Digi International*. URL: <https://www.digi.com/solutions/by-technology/zigbee-wireless-standard>.

N. Kolomiets, Yu. Vladarchyk, S. Zaichenko, S. Unhuryan

BLE AND ZIGBEE TECHNOLOGIES IN IOT CLIMATE CONTROL SYSTEMS: A COMPARATIVE OVERVIEW AND APPLICATION PROSPECTS

The choice of network technology is key in the development of IoT systems. As the use of smart devices in IoT and IIoT continues to scale, it is clear that this is making wired device connections a thing of the past, enabling wireless networking technologies to cover more and more areas of application. The latter is achieved by wireless technology developers who, based on global needs, adapt wireless technologies and optimise them specifically for low-power devices. It is also worth noting the environmental component, as the installation of hundreds or thousands of cables for IoT devices would be more expensive and would cause more environmental damage from larger cable production facilities.

The article discusses the main trends of two currently developed devices that are economical in terms of power consumption - Bluetooth LE and ZigBee wireless network technologies. When choosing these two wireless technologies, the main focus was on their popularity, similarity to each other in terms of the principle of operation, excellent encryption of transmitted data in the network, the same frequency range, efficiency in terms of discharging devices, and a relatively short range of operation (less than 200 metres).

A comparison of the protocol stacks of both networks was considered, the network operation process and other various features of the technologies were outlined. The latter, the consideration of the main characteristics, provided a clear view of both network technologies, which distinguished Bluetooth Low Energy as a better network in all respects compared to ZigBee. That's why it became clear that in photo transmission and larger projects, Bluetooth LE can provide greater functional needs of the system. That's why it became clear that in photo transmission and larger projects, Bluetooth LE can provide more functional needs of the system. However, this does not preclude the use of ZigBee in small and medium-sized scalable systems, since for devices that transmit low-bit information or not very important information in real time, ZigBee can perfectly provide their functionality and have no significant difference from Bluetooth LE.

Keywords: Bluetooth LE, ZigBee, IoT, power consumption, protocol stack, data rate, range, wireless network, device connection scheme, Mesh.
