

О. В. ІВАНЧУК

аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-2058-4707

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОВИТРАТ У ПРОТОКОЛАХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

У роботі було проведено дослідження протоколів обміну даними, які отримали модифікації щодо підвищення енергоефективності для можливості використання їх в системах інтернету речей, та визначено методи підвищення енергоефективності, що є у протоколах, та їх вплив на загальне споживання енергії.

Було розглянуто протоколи Wi-Fi, Bluetooth та NB-IoT. Протокол Wi-Fi використовує методи: Power Saving Mode, Wi-Fi HaLow, керування частотою передачі, керування потужністю передавача, агрегація кадрів. Протокол Bluetooth використовує режим сну, режим рідкого пошуку пристроїв, керування потужністю передавача, керування параметрами пакетів. Протокол NB-IoT має такі методи оптимізації: Power Saving Mode, режим розширеного періодичного оновлення, керування частотним спектром, адаптивні схеми модуляції та кодування, кешування даних.

В рамках дослідження обрано критерії, за якими було розподілено методи оптимізації в протоколах Інтернету речей: Керування часом активності пристрою; Керування частотними характеристиками передачі; Керування потужністю передавача; Керування пакетами даних.

Протоколи Bluetooth та NB-IoT мають методи оптимізації, що відносяться до трьох з визначених категорій. Через особливості оптимізації, що проводились для зменшення споживання енергії, усі протоколи мають декілька методів оптимізації, що відносяться до однієї категорії, що в цілому вирівнює їх показники загальної оптимізації енергоспоживання.

Найкращі показники у методів оптимізації, які відносяться до категорії «Керування часом активності пристрою», що зумовлено повним відключенням пристрою на певні проміжки часу, поки не настає момент збору даних та відправки їх до центру обробки.

Методи категорії «Керування пакетами даних» показують гірші показники, ніж ті, що відносяться до категорії «Керування часом активності пристрою», через неможливість відмовитись від заголовків пакетів даних та через необхідність підтримки актуальності даних, що не дозволяє затримувати дані у кеші на великі проміжки часу.

Показники у інших категоріях показують різні результати в у протоколах через відмінності у методах оптимізації.

**Ключові слова:** інтернет речей, протоколи, енергоспоживання, оптимізація, пристрої.

О. І. IVANCHUK

Postgraduate Student at the Department of Computer Systems and Networks  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-2058-4707

## STUDY OF METHODS OF OPTIMIZING ENERGY CONSUMPTION IN INTERNET OF THINGS PROTOCOLS

In the work, a study of data exchange protocols that received modifications to increase energy efficiency for the possibility of using them in Internet of Things systems was carried out, and the methods of increasing energy efficiency included in the protocols and their impact on total energy consumption were determined.

Wi-Fi, Bluetooth and NB-IoT protocols were considered. The Wi-Fi protocol uses the following methods: Power Saving Mode, Wi-Fi HaLow, transmission frequency control, transmitter power control, frame aggregation. The Bluetooth protocol uses sleep mode, liquid device search mode, transmitter power control, packet parameter control. The NB-IoT protocol has the following optimization methods: Power Saving Mode, advanced periodic update mode, frequency spectrum management, adaptive modulation and coding schemes, data caching.

As part of the study, the criteria were chosen according to which optimization methods were distributed in Internet of Things protocols: Device activity time management; Control of transmission frequency characteristics; Control of transmitter power; Data packet management.

Bluetooth and NB-IoT protocols have optimization methods that fall into three of the defined categories. Due to the optimization features performed to reduce energy consumption, all protocols have multiple optimization methods belonging to the same category, which generally equalizes their overall energy consumption optimization performance.

*The best results are in the optimization methods that belong to the category "Device activity time management", which is due to the complete shutdown of the device for certain time intervals until the moment of data collection and sending to the processing center arrives.*

*Methods in the "Data Packet Management" category perform worse than those in the "Device Uptime Management" category due to the inability to discard data packet headers and the need to maintain data freshness, which prevents data from being cached for long periods of time.*

*Indicators in other categories show different results in protocols due to differences in optimization methods.*

**Key words:** *Internet of Things, protocols, energy consumption, optimization, devices.*

### Постановка проблеми

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це система, яка забезпечує зв'язок між електронними пристроями та датчиками через Інтернет, щоб полегшити життя людини. IoT використовує інтелектуальні пристрої та Інтернет, щоб надавати інноваційні рішення для викликів і проблем, пов'язаних з різноманітними галузями промисловості по всьому світу.

З кожним роком збільшується кількість пристроїв інтернету речей. Через це збільшується кількість нових протоколів для проектування систем, або модернізованих вже існуючих протоколів для забезпечення вимог функціонування систем інтернету речей. Головною вимогою при оновленні протоколів зазвичай є підвищення енергоефективності протоколів для можливості використання пристроїв протягом років без супутнього обслуговування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [2] проаналізовано моделі споживання енергії на основі передбачень без прив'язки до конкретних протоколів та без зазначення методів, якими досягаються ці результати.

Робота [3] аналізує енергоефективність пристроїв Wi-Fi, але тільки для певного пристрою в обмежених умовах без перевірки усіх методів оптимізації.

В роботі [4] проведено дослідження енергоефективності протоколу NB-IoT лише за одним методом оптимізації, що не дозволяє сформулювати повну картину щодо методів оптимізації споживання енергії.

### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз протоколів обміну даними, що отримали модифікації щодо підвищення енергоефективності для можливості використання їх в системах інтернету речей. На основі дослідження потрібно визначити методи підвищення енергоефективності, що є у протоколах, та їх вплив на загальне споживання енергії.

### Викладення основного матеріалу дослідження

До основних протоколів, що були змінені для використання у системах Інтернету речей, є Wi-Fi, Bluetooth та NB-IoT.

Wi-Fi можна вважати не одним протоколом, а цілим сімейством стандартів на основі IEEE 802.11, оскільки кожна з версій Wi-Fi має окремий стандарт з описанням частотних характеристик, структури повідомлення, шифрування і т.д [5].

Для оптимізації енерговитрат Wi-Fi використовує такі методи:

– Power Saving Mode (PSM) – це основний режим енергозбереження для пристроїв WiFi, які відповідають стандарту 802.11. У PSM пристрій переходить у стан низького енергоспоживання («сон»), коли в нього немає даних для відправки чи отримання, і періодично «прокидається», щоб перевірити наявність вхідних пакетів [6]. Пристрій інформує точку доступу (Access Point, AP), що вона знаходиться в режимі PSM, надсилаючи кадр Power Save Poll (PSP), і AP буферизує пакети, призначені для пристрою, доки не отримає кадр PSP. PSM може заощадити значну кількість енергії, особливо для пристроїв, які мають низький або переривчастий трафік, але він також має деякі недоліки, такі як збільшення затримки, втрата пакетів і перевантаження мережі.

– Стандарт Wi-Fi HaLow. Wi-Fi HaLow, заснований на протоколі IEEE 802.11ah і представлений у 2016 році, працює на частотах нижче 1 ГГц, на відміну від традиційних частот 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц, які використовуються в Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 і Wi-Fi 7 [7].

Низькочастотний діапазон дозволяє Wi-Fi HaLow забезпечувати підключення на великі відстані, підтримуючи з'єднання до трьох кілометрів і далі в сценаріях прямої видимості, а також проникаючи через щільні матеріали своїми вузькосмуговими сигналами. Незважаючи на те, що використання низьких частот призводить до вузьких каналів і меншої пропускної здатності, стандарт забезпечує швидкість передачі даних від 150 Кбіт/с до 86,7 Мбіт/с залежно від відстані.

Wi-Fi HaLow не замінює традиційні стандарти Wi-Fi, а доповнює їх. Він розширює зв'язок на великі відстані без потреби у власних концентраторах, множинних точках доступу чи складних дротових з'єднаннях, що робить його особливо корисним для пристроїв Інтернету речей, проєктів «розумного міста» та сітчастих мереж.

У США Wi-Fi HaLow працює в діапазоні частот 900 МГц у суб-ГГц-спектрі, який не підлягає ліцензуванню, що дозволяє кожному безкоштовно користуватися ним. У всьому світі Wi-Fi HaLow може використовувати різні частоти нижче 1 ГГц залежно від регіональних правил і доступного спектру, адаптуючись до різних національних налаштувань.

– Керування частотою передачі – усі версії Wi-Fi до 802.11n (a, b, g, n) включно працюють на частотах від 2400 до 2500 МГц. Ці 100 МГц розділені на 14 каналів по 20 МГц кожен. Оскільки 14 каналів по 20 МГц – це набагато більше, ніж 100 МГц, то кожен канал 2,4 ГГц перекривається принаймні двома або чотирма іншими каналами (рис. 1) [8].

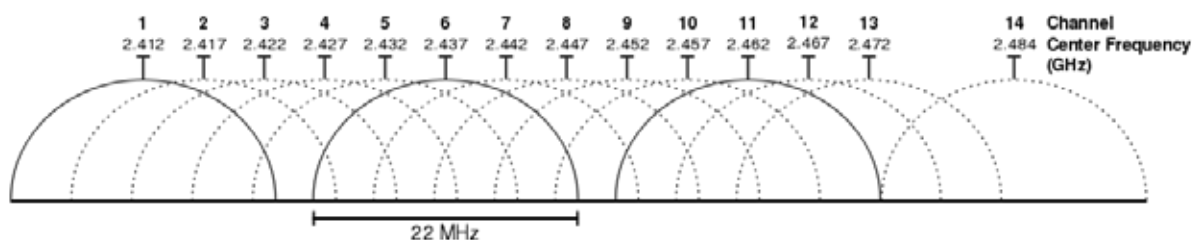


Рис. 1. Частотне розподілення каналів Wi-Fi на 2.4 ГГц

Канали 1, 6 і 11 розташовані досить далеко один від одного, щоб вони не перекривалися, тому вони є оптимальними для передачі даних коли декілька базових станцій знаходяться поруч. При використанні каналів 40 МГц, можлива ситуація, коли ефір буде перевантажений.

– Керування потужністю передавача – це технічний механізм, який використовується в деяких мережевих пристроях для запобігання надмірної кількості небажаних перешкод між різними бездротовими мережами [9].

Ідея механізму полягає в тому, щоб автоматично зменшувати використану вихідну потужність передачі, коли інші мережі знаходяться в зоні дії. Наслідком зменшення потужності є зменшення проблем із перешкодами, що означає менше повторних передач, які витрачають енергію.

– Агрегація кадрів. Агрегація кадрів збільшує пропускну здатність, надсилаючи кілька кадрів даних за одну передачу. Це зменшує накладні витрати на протокол 802.11, оскільки кілька пакетів можна надсилати з одним заголовком РНУ і MAC замість того, щоб кожен пакет мав власні заголовки. Кількість ACK і міжкадрових проміжків (і періодів конфлікту, якщо не в TXOP) також зменшується [10].

У стандарті 802.11 є два типи агрегації кадрів:

Агрегація блоку даних служби MAC (MSDU): пакети, отримані MAC від верхнього рівня, є MSDU. Кожен пакет отримує заголовок субфрейму MSDU. Два або більше субфреймів об'єднуються і разом поміщаються в кадр MAC 802.11 (заголовок + трейлер). Отриманий кадр є агрегатним MSDU (a-MSDU). По радіостанції a-MSDU передаються з одним заголовком РНУ.

Агрегація блоків даних протоколу MAC (MPDU): MPDU – це кадри, що передаються від MAC до рівня РНУ. Кожен MPDU має MAC-заголовок і трейлер. Кілька MPDU об'єднуються, щоб створити сукупний MPDU (a-MPDU), який передається з заголовком РНУ по радію.

Технологія Bluetooth – це технологія бездротового зв'язку малого радіусу дії, яка використовує для зв'язку частотний діапазон ISM 2,4 ГГц. Спочатку він використовувався для передачі даних між мобільними телефонами, комп'ютерами та зовнішніми пристроями [11].

В сфері інтернету речей велике розповсюдження має окрема версія Bluetooth, а саме Bluetooth Low Energy, що з'явилась разом з версією Bluetooth 4.0 [12].

Оптимізація енерговитрат Bluetooth можлива такими методами:

– Режим сну (Sleep Mode) – пристрій переходить у сплячий режим, у якому більшість компонентів вимикається, за винятком радіоприймача, який залишається частково активним для прослуховування певних тригерів пробудження. Варіанти тригерів для пробудження [13]:

Спрямовані рекламні пакети: пристрій виходить із режиму сну після отримання рекламних пакетів, націлених на його конкретну адресу.

Події підключення: пристрій виходить із режиму сну через заздалегідь визначені проміжки часу, очікуючи події підключення від підключеного пристрою.

Зовнішні події: деяке обладнання може дозволяти пробудження через зовнішні події, такі як натискання кнопки або отримання показання датчиків.

– Режим рідкого пошуку пристроїв (Low Duty Cycle Advertising) – в процесі роботи стандарт розсилає пакети для підтримки зв'язку (реклама) [14]. Інтервал реклами регулюється від 20 мс до 10,24 с (без підключення: мінімум 100 мс). Збільшення рекламного інтервалу може значно зменшити середнє споживання струму пристроєм BLE. Наприклад, збільшення інтервалу реклами зі 100 мс до 1 с знижує середнє споживання струму на 93%.

– Керування потужністю передавача – потужність передачі регулюється від -26 дБм до +8 дБм (за замовчуванням 8 дБм). 0 дБм достатньо, щоб охопити діапазон від 10 до 15 м, на основі тестів, проведених на прикладі iBeacon і телефоні Android [14].

Зміна потужності передачі з 8 дБм до 0 дБм може зменшити споживання струму до 57% при використанні інтервалу реклами 100 мс.

– Керування параметрами пакетів – для оптимізації енерговитрат можна використати агрегацію пакетів даних. Це зменшить час на передачу декількох пакетів, оскільки заголовки потрібно буде передавати лише один раз. Винятком є дані, які обов’язково мають передаватися одразу та не можуть очікувати декілька циклів для агрегації в один пакет. Це можуть бути дані, від яких залежить життя людини, або безпека цілих міст.

Narrow Band-IoT (NB-IoT) був запущений у 2006 році з метою обслуговування постійно зростаючої кількості підключених пристроїв у сфері IoT. Він сформований за стандартом 3GPP на основі стільникових LTE мереж, що дозволило розгорнути його на вже існуючих базових станціях зв’язку [15].

Оптимізація енерговитрат NB-IoT виконується такими методами:

– Power Saving Mode (PSM) – розроблений, щоб допомогти пристроям IoT економити заряд акумулятора. Хоча програма пристрою завжди може вимкнути свій радіомодуль для економії батареї, пристрій згодом доведеться повторно підключити до мережі, коли радіомодуль буде знову ввімкнено.

Процедура повторного підключення споживає невелику кількість енергії, але кумулятивний ефект збільшення енергоспоживання при повторних підключеннях може стати значним протягом терміну служби пристрою. Тому термін служби батареї можна подовжити, якщо уникнути цієї процедури.

Коли пристрій ініціює PSM з мережею, він надає два бажаних таймера (T3324 і T3412). Час PSM – це різниця між цими таймерами (T3412-T3324). Мережа може приймати ці значення або встановити інші. Тоді мережа зберігає інформацію про стан, а пристрій залишається зареєстрованим у цій мережі. Якщо пристрій прокидається і надсилає дані до закінчення погодженого інтервалу часу мережі, процедура повторного підключення не потрібна.

– Режим розширеного періодичного оновлення (Extended Discontinuous Reception) – це метод енергозбереження, який використовується в пристроях Інтернету речей і мінімізує енергоспоживання шляхом періодичного отримання пакетів даних [16]. Цей підхід особливо корисний для пристроїв, розгорнутих у віддалених районах з обмеженим бездротовим покриттям, оскільки він дозволяє їм підключатися до стільникових мереж, зберігаючи час роботи батареї.

Цикл eDRX – це процес, за допомогою якого пристрої IoT, що використовують eDRX, періодично отримують пакети даних. Цикл складається з двох основних фаз:

Активний період: протягом цієї фази пристрій IoT підключений до мережі та активно отримує пакети даних. Він спілкується з мережею та виконує будь-які необхідні завдання, наприклад надсилання або отримання інформації.

Період сну: після активного періоду пристрій переходить у режим сну, від’єднується від мережі та зберігає енергію. Пристрій залишається в цьому стані до початку наступного активного періоду, коли він знову підключається до мережі та відновлює прийом пакетів даних.

Тривалість періодів активності та сну може відрізнятися залежно від таких факторів, як потреби пристрою в енергії, умови мережі та конкретні випадки використання. Адаптувавши цикл eDRX до потреб кожного пристрою IoT, можна оптимізувати енергоефективність і продуктивність.

– Адаптивні схеми модуляції та кодування (Modulation and Coding Scheme) – адаптація зв’язку NB-IoT передбачає адаптивну модуляцію та схеми кодування, а також адаптивний розподіл потужності [17]. Однак схеми модуляції обмежені квадратурно-фазовою модуляцією (QPSK), щоб забезпечити низьку складність і, отже, зменшити загальне енергоспоживання. Для розширення зони покриття і підвищення надійності зв’язку введено кількість повторень до 128 разів.

– Керування частотним спектром – масовий NB-IoT є однією з цілей оптимізації мережі 5G. Однак колізії можуть часто виникати в щільних передачах NB-IoT щоразу, коли два таких пристрої NB-IoT передають одночасно через той самий канал довільного доступу, що призводить до втрати однієї або обох передач [18].

Використовуючи різні частотні канали можна зменшити шанс того, що відбуватиметься колізія при передачі даних. Для NB-IoT є декілька десятків частотних каналів, що при невеликій кількості пристроїв можуть повністю прибрати виникнення колізій [19].

– Кешування даних – об’єднуючи декілька пакетів даних в один, можна економити споживання енергії на з’єднаннях з мережею та на передачі заголовків пакетів даних, оскільки замість кількох заголовків буде лише один.

В рамках дослідження було обрано категорії, за якими було розподілено методи оптимізації в протоколах Інтернету речей:

- Керування часом активності пристрою;
- Керування частотними характеристиками передачі;
- Керування потужністю передавача;
- Керування пакетами даних.

Використовуючи інформацію про наявні методи оптимізації енерговитрат, було виконано розподілення їх за категоріями та проаналізовано їхній вплив на витрати у кожному наявному протоколі та стандарті (табл. 1–3).

Таблиця 1

**Оптимізації за критеріями для Wi-Fi**

Категорія	Метод оптимізації
Керування часом активності пристрою	Power Saving Mode (PSM) – до 45-90% [20]
Керування частотними характеристиками передачі	Стандарт Wi-Fi HaLow – до 76% [21]
	Керування частотою передачі – до 71.4% [22]
Керування потужністю передавача	Керування потужністю передавача – до 60% [23]
Керування пакетами даних	Агрегація кадрів – до 49%

Таблиця 2

**Оптимізації за критеріями для Bluetooth**

Категорія	Метод оптимізації
Керування часом активності пристрою	Режим сну (Sleep Mode) – до 90% [24]
	Режим рідкого пошуку пристроїв (Low Duty Cycle Advertising) – до 90% [14]
Керування частотними характеристиками передачі	-
Керування потужністю передавача	Керування потужністю передавача – до 57.1% [14]
Керування пакетами даних	Керування параметрами пакетів – до 46.7%

Таблиця 3

**Оптимізації за критеріями для NB-IoT**

Категорія	Метод оптимізації
Керування часом активності пристрою	Power Saving Mode (PSM) – до 40% [25]
	Режим розширеного періодичного оновлення (Extended Discontinuous Reception) – до 9.4% [26]
Керування частотними характеристиками передачі	Керування частотним спектром – до 25% [27]
Керування потужністю передавача	-
Керування пакетами даних	Адаптивні схеми модуляції та кодування (Modulation and Coding Scheme) – до 25% [27]
	Кешування даних – до 43.7%

**Висновки**

В результаті проведеного дослідження були визначені основні методи оптимізації енерговитрат у протоколах Інтернету речей. Наявні методи були розподілені на 4 основні категорії оптимізації та визначено вплив кожного методу на енергоспоживання при активності методу у мережі протоколу. Лише протокол Wi-Fi має методи оптимізації за всіма визначеними категоріями. Протоколи Bluetooth та NB-IoT мають по 3 категорії методів оптимізації. Через особливості оптимізації, що використовується для зменшення споживання енергії, усі протоколи мають декілька методів оптимізації, що відносяться до однієї категорії, що в цілому вирівнює їх показники загальної оптимізації енергоспоживання.

Найкращі показники виявлені у методів оптимізації, які відносяться до категорії «Керування часом активності пристрою», що зумовлено повним відключенням пристрою на певні проміжки часу, поки не настає момент збору даних та відправки їх до центру обробки.

Методи категорії «Керування пакетами даних» показують гірші показники, ніж методи категорії «Керування часом активності пристрою» через неможливість відмовитись від заголовків пакетів даних, та через необхідність підтримки актуальності даних, що не дозволяє затримувати дані у кеші на великі проміжки часу.

Показники у інших категоріях показують різні результати в у протоколах через відмінності у методах оптимізації.

**Список використаної літератури**

- Sfar A.R., Zied C., Challal Y. A systematic and cognitive vision for IoT security: a case study of military live simulation and security challenges. Proc. 2017 international conference on smart, monitored and controlled cities (SM2C). 2017. DOI: 10.1109/sm2c.2017.8071828
- Xing Li, Haiping Zhao, Yiming Feng, Jinze Li, Yunfei Zhao, Xiao Wang. Research on key technologies of high energy efficiency and low power consumption of new data acquisition equipment of power Internet of Things based on artificial intelligence. International Journal of Thermofluids. 2024. Vol. 21. p. 100575. DOI:10.1016/j.ijft.2024.100575.
- F. Montori, R. Contigiani and L. Bedogni. Is WiFi suitable for energy efficient IoT deployments? A performance study. 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI). 2017. Pp. 1-5. DOI: 10.1109/RTSI.2017.8065943.

4. E. Migabo, K. Djouani and A. Kurien. Energy Efficient Data Rate Enhancement Channel Coding Technique for Narrowband Internet of Things (NB-IoT). 2021 IEEE AFRICON. 2021. Pp. 1-6, DOI: 10.1109/AFRICON51333.2021.9570868
5. Mohammad Mansour, Amal Gamal, Ahmed I. Ahmed, Lobna A. Said, Abdelmoniem Elbaz, Norbert Herencsar, and Ahmed Soltan. Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions. *Energies* 2023. Vol. 16. Pp. 3465. DOI: 10.3390/en16083465
6. Rob Brownstein. What are the benefits and drawbacks of WiFi power saving modes (PSM and U-APSD)? 2023. URL: <https://www.linkedin.com/advice/1/what-benefits-drawbacks-wifi-power-saving-modes-psm-u-apsd> (дата звернення: 07.10.2024).
7. Michael De Nil. Wi-Fi HaLow: What is it and why you might need it. 2024. URL: <https://www.iotinsider.com/iot-insights/technical-insights/wi-fi-halow-what-is-it-and-why-you-might-need-it/> (дата звернення: 07.10.2024).
8. Joel Hruska. How to Boost Your Wi-Fi Speed by Choosing the Right Channel. 2021. URL: <https://www.extremetech.com/internet/179344-how-to-boost-your-wifi-speed-by-choosing-the-right-channel> (дата звернення: 07.10.2024).
9. Transmit Power Control. URL: <https://www.winncom.com/en/glossary/162/transmit-power-control> (дата звернення: 07.10.2024).
10. IEEE 802.11 Frame Aggregation. URL: <https://inet.omnetpp.org/docs/showcases/wireless/aggregation/doc/index.html> (дата звернення: 07.10.2024).
11. Jinxiao Zhang. The application of bluetooth technology in the internet of things. *Applied and Computational Engineering*. 2023. Vol. 12(1). Pp. 177-183. DOI: 10.54254/2755-2721/12/20230334
12. Chendong Liu, Yilin Zhang, Huanyu Zhou. A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. *Journal of Physics Conference Series*. 2021. Vol. 2093(1). DOI:10.1088/1742-6596/2093/1/012021
13. Different BLE States: Standby, Scanning, Initiating, Connection, Synchronization. URL: <https://coreedges.com/different-ble-states-standby-scanning-initiating-connection-synchronization> (дата звернення: 07.10.2024).
14. Optimizing Current Consumption in Bluetooth Low Energy Devices. URL: <https://docs.silabs.com/bluetooth/6.1.0/bluetooth-fundamentals-system-performance/current-consumption> (дата звернення: 07.10.2024).
15. Malvinder Singh Bali, Kamali Gupta, Kanwalpreet Kour Bali, Pramod K. Singh. Towards energy efficient NB-IoT: A survey on evaluating its suitability for smart applications. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Volume 49, Part 8. pp. 3227-3234. DOI: doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.1027.
16. eDRX. URL: <https://www.narrowband.com/nbiot-glossary/edrx> (дата звернення: 07.10.2024).
17. Mwakwata CB, Malik H, Mahtab Alam M, Le Moullec Y, Parand S, Mumtaz S. Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives. *Sensors*. 2019. Vol. 19(11):2613. DOI: 10.3390/s19112613
18. Bilal Doori, Ahmed Zurfi. Decreasing the RA Collision Impact for Massive NB-IoT in 5G Wireless Networks. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*. 2021. Vol. 07(03):1. DOI: 10.5455/jjcit.71-1620292048
19. Internet of Things (IoT). URL: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/internet-of-things-iot/> (дата звернення: 07.10.2024).
20. G. Anastasi, M. Conti, E. Gregori, A. Passarella. Saving Energy in Wi-Fi Hotspots through 802.11 PSM: an Analytical Model. 2011.
21. Serena Santi, Le Tian, Jeroen Famaey. Accurate Energy Modeling and Characterization of IEEE 802.11ah RAW and TWT. *Sensors*. 2019. № 11. 2614 p. DOI: 10.3390/s19112614.
22. Raksha Upadhyay, Arpita Tiwari, Uma Rathore Bhatt. Energy Efficient Rate Adaptation Algorithm for FiWi Access Network. *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. 2017. Vol. 16(4). Pp. 908-921. DOI: 10.1590/2179-10742017v16i41013
23. What is Transmit Power & Transmit Power Control in Wi-Fi? 2022. URL: <https://thenetworkguys.wordpress.com/2022/11/10/what-is-transmit-power-transmit-power-control-in-wi-fi/> (дата звернення: 07.10.2024).
24. Mohammad Afaneh. Bluetooth Low Energy Power Consumption – How to Achieve Maximum Battery Life. 2023. URL: <https://novelbits.io/ble-power-consumption-optimization/> (дата звернення: 07.10.2024).
25. Ashish Kumar Sultania, Pouria Zand, Chris Blondia, Jeroen Famaey. Energy Modeling and Evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX. *IEEE Global Communications Conference*. 2018. DOI:10.1109/GLOCOMW.2018.8644074
26. Nassim Labdaoui, Fabienne Nouvel, Stéphane Dutertre. NB-IoT Power Consumption: A Comparison of SFR and Objenious Network Operators. *17ème Colloque du GDR SoC2*. 2023.
27. Zheng Jiang, Bin Han, Peng Chen, Fengyi Yang. On Novel Access and Scheduling Schemes for IoT Communications. *Mobile Information Systems* 2016. 2016. Vol. 1-9. DOI:10.1155/2016/3973287

#### References

1. Sfar, A.R., Zied, C. & Challal Y. (2017). A systematic and cognitive vision for IoT security: a case study of military live simulation and security challenges. *Proc. 2017 international conference on smart, monitored and controlled cities (SM2C)*, doi: 10.1109/sm2c.2017.8071828

2. Li, X., Zhao, H., Feng, Y., Li, J., Zhao, Y. & Wang, X. (2024). Research on key technologies of high energy efficiency and low power consumption of new data acquisition equipment of power Internet of Things based on artificial intelligence. *International Journal of Thermofluids*, 21, 100575. doi:10.1016/j.ijft.2024.100575.
3. Montori, F., Contigiani, R. & Bedogni, L. (2017). Is WiFi suitable for energy efficient IoT deployments? A performance study. 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), 1-5, doi: 10.1109/RTSI.2017.8065943.
4. Migabo, E., Djouani, K. & Kurien, A. (2021). Energy Efficient Data Rate Enhancement Channel Coding Technique for Narrowband Internet of Things (NB-IoT). 2021 IEEE AFRICON. 1-6, doi: 10.1109/AFRICON51333.2021.9570868
5. Mansour, M., Gamal, A., Ahmed, A. I., Said, L. A., Elbaz, A., Herencsar, N. & Soltan, A. (2023). Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions. *Energies*, 16, 3465. doi: 10.3390/en16083465
6. Brownstein, R. (2023) What are the benefits and drawbacks of WiFi power saving modes (PSM and U-APSD)? Retrieved from: <https://www.linkedin.com/advice/1/what-benefits-drawbacks-wifi-power-saving-modes-psm-u-apsd>
7. De Nil, M. (2024). Wi-Fi HaLow: What is it and why you might need it. Retrieved from: <https://www.iotinsider.com/iot-insights/technical-insights/wi-fi-halow-what-is-it-and-why-you-might-need-it/>
8. Hruska, J. (2021). How to Boost Your Wi-Fi Speed by Choosing the Right Channel. Retrieved from: <https://www.extremetech.com/internet/179344-how-to-boost-your-wifi-speed-by-choosing-the-right-channel>
9. Winncom Technologies. Transmit Power Control. Retrieved from: <https://www.winncom.com/en/glossary/162/transmit-power-control>
10. INET. IEEE 802.11 Frame Aggregation. Retrieved from: <https://inet.omnetpp.org/docs/showcases/wireless/aggregation/doc/index.html>
11. Zhang, J. (2023). The application of bluetooth technology in the internet of things. *Applied and Computational Engineering*, 12(1), 177-183. doi: 10.54254/2755-2721/12/20230334
12. Liu, C., Zhang, Y. & Huanyu Zhou. (2021). A Comprehensive Study of Bluetooth Low Energy. *Journal of Physics Conference Series*, 2093(1), doi:10.1088/1742-6596/2093/1/012021
13. CoreEdges. Different BLE States: Standby, Scanning, Initiating, Connection, Synchronization. Retrieved from: <https://coreedges.com/different-ble-states-standby-scanning-initiating-connection-synchronization>
14. Silicon Labs. Optimizing Current Consumption in Bluetooth Low Energy Devices. Retrieved from: <https://docs.silabs.com/bluetooth/6.1.0/bluetooth-fundamentals-system-performance/current-consumption>
15. Bali, M.S., Gupta, K., Bali, K.K. & Singh, P.K. (2022). Towards energy efficient NB-IoT: A survey on evaluating its suitability for smart applications. *Materials Today: Proceedings*, 49(8), 3227-3234. doi: doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.1027.
16. Narrowband. eDRX. Retrieved from: <https://www.narrowband.com/nbiot-glossary/edrx>
17. Mwakwata, C.B., Malik, H., Mahtab, A.M., Le, M.Y., Parand, S. & Mumtaz, S. (2019). Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives. *Sensors*, 19(11), 2613. doi: 10.3390/s19112613
18. Doorri, B. & Zurfi, A. (2021). Decreasing the RA Collision Impact for Massive NB-IoT in 5G Wireless Networks. *Jordanian Journal of Computers and Information Technology*, 07(03):1, doi: 10.5455/jjcit.71-1620292048
19. CableFree. Internet of Things (IoT). Retrieved from: <https://www.cablefree.net/wirelesstechnology/internet-of-things-iot/>
20. Anastasi, G., Conti, M., Gregori, E. & Passarella, A. (2011). Saving Energy in Wi-Fi Hotspots through 802.11 PSM: an Analytical Model.
21. Santi S., Tian, L. & Famaey, J. (2019). Accurate Energy Modeling and Characterization of IEEE 802.11ah RAW and TWT. *Sensors*, 11, 2614. doi: 10.3390/s19112614.
22. Upadhyay, R., Tiwari, A. & Bhatt, U.R. (2017). Energy Efficient Rate Adaptation Algorithm for FiWi Access Network. *Journal of Microwaves Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(4), 908-921. doi: 10.1590/2179-10742017v16i41013
23. (2022). What is Transmit Power & Transmit Power Control in Wi-Fi? Retrieved from: <https://thenetworkguys.wordpress.com/2022/11/10/what-is-transmit-power-transmit-power-control-in-wi-fi/>
24. Afaneh M. (2023). Bluetooth Low Energy Power Consumption – How to Achieve Maximum Battery Life. Retrieved from: <https://novelbits.io/ble-power-consumption-optimization/>
25. Sultania, A.K., Zand, P., Blondia, C. & Famaey, J. (2018). Energy Modeling and Evaluation of NB-IoT with PSM and eDRX. *IEEE Global Communications Conference*. doi:10.1109/GLOCOMW.2018.8644074
26. Labdaoui, N., Nouvel, F. & Dutertre, S. (2023). NB-IoT Power Consumption: A Comparison of SFR and Objenious Network Operators. 17ème Colloque du GDR SoC2.
27. Jiang, Z., Han, B., Chen, P. & Yang, F. On Novel Access and Scheduling Schemes for IoT Communications. *Mobile Information Systems* 2016. 2016. Vol. 1-9. DOI:10.1155/2016/3973287