

АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ ЕКОНОМНИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ РОЗУМНОГО БУДИНКУ

Р. В. Ільницький, Р. І. Карпа

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра електронних обчислювальних машин
E-mail: roman.ilnytskyi.mkiks.2022@lpnu.ua, roman.i.karpa@lpnu.ua

© Ільницький Р. В., Карпа Р. І., 2023

Досліджено систему “Розумний дім” на основі розроблення системи мінімізації енергоспоживання для розумного будинку та на основі різних протоколів бездротового зв’язку. Розглянуто побудову системи моніторингу та управління будинком на основі новітнього протоколу Bluetooth Low-Energy з використанням сучасних технологій. Запропоновано пристрій для моніторингу та керування електроприладами, який є елементом цієї системи. Запропонована архітектура має переваги над іншими системами: надійність, продуктивність, простота розгортання та управління. Система є гнучкою, вона уможливує вибір режимів роботи (автоматичний або ручний) та зміну різних налаштувань, які впливають на роботу алгоритму оптимізації.

У статті наведено приклади роботи системи в різних режимах та за різних значень налаштувань алгоритму, що складається із сервера, розгорнутого на персональному комп’ютері, та двох розроблених прототипів пристроїв моніторингу та управління.

Ключові слова: розумний дім; оптимізація енергоспоживання; моніторинг та керування електроприладами; розумні розетки; Bluetooth low energy.

Вступ

У наш час комп’ютерні технології широко використовуються для підвищення ефективності в різних сферах людської діяльності. Відтепер побудова екосистеми розумного будинку є одним з найперспективніших напрямів на ринку побутової енергетики, електроніки та схемотехніки.

1. Огляд та аналіз літературних джерел

Один із підходів до побудови засобів розумних будинків може ґрунтуватися на принципах побудови кіберфізичних систем (КФС) [1]. Перед кожним виробником пристроїв КФС постає питання їх автономності та енергоефективності, адже такі пристрої повинні бути відмовостійкими і надійними, а це можливо лише за умови широкого застосування комп’ютерних технологій [2].

“Розумний будинок” [2] (Digital House, Home Automation) – це будинок або комерційне приміщення (магазин, офіс, будь-яка установа), де електроприлади функціонально пов’язані між собою. Вони можуть бути підключені до комп’ютерної мережі, що дозволяє керувати ними через ПК і забезпечує віддалений доступ до них через інтернет. Завдяки інтеграції інформаційних технологій у будинок усі системи і пристрої координують свої функції, порівнюючи заздалегідь визначені програми і зовнішні показники. “Розумний будинок” створюють за допомогою професійного дизайну і програмування компанії, які розробляють проекти “розумних будинків”. Програми, закладені в алгоритми багатоквартирного “розумного будинку”, розроблені з урахуванням конкретних потреб мешканців і ситуацій, пов’язаних зі зміною навколишнього середовища або безпеки.

Особливістю “розумного будинку” є управління за допомогою пульта дистанційного керування, де людина може натисканням однієї клавіші створити певне середовище. Система сама аналізує навколишню обстановку і параметри всередині приміщення, і, керуючись своїми висновками, виконує команди з відповідними налаштуваннями, які задає користувач. Крім того, побутові прилади, встановлені в “розумному будинку”, можна інтегрувати в домашню універсальну мережу Plug'n'Play з доступом до інтернету.

Основні сфери застосування” розумного будинку” [2]:

- системи управління освітленням;
- автоматизований моніторинг стану системи: збирання даних з різних датчиків для коригування стану системи (температура, вологість, дим, витоки газу та води тощо)
- системи опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC, Heating, ventilation, and air conditioning): дистанційне керування всіма енергоспоживальними пристроями через інтернет за допомогою простого та зручного інтерфейсу користувача;
- інтеграція побутових приладів зі Smart Grid, наприклад, для використання електроенергії, виробленої сонячними панелями в середині дня, для роботи пральної машини;
- система безпеки, інтегрована із системою домашньої автоматизації, може надавати додаткові послуги, такі як віддалений доступ до записів камер відеоспостереження через інтернет або централізоване управління усіма дверима та вікнами.

Кількість електроприладів у домогосподарствах невпинно зростає. Їх сумарна потужність може досягати 15 кВт. Водночас потужність мережі обмежена і зазвичай не перевищує 10 кВт. Тобто у разі одночасного підключення більшості електроприладів домогосподарство в аварійній ситуації відключається від мережі. Крім того, споживання електроенергії в домогосподарствах нерівномірно розподілене протягом доби [3]. Ця проблема призводить до розбалансування енергосистеми держави, необхідності маневрування генерувальними потужностями (будівництво нових АЕС, регулювання потужності наявних ТЕС та ГЕС), а також до відключень великих споживачів у пікових режимах, що призводить до зниження ефективності та надійності роботи всієї енергосистеми, мільярдних витрат для держави, приватних виробників та споживачів. Для заохочення часткового балансування енергоспоживання домогосподарств уряд запроваджує багатозонні тарифи на електроенергію (дво- та тризонні). Однак повною мірою використати цей стимул у домогосподарстві неможливо без простої та надійної системи “Розумний будинок”, яка б дала змогу автоматизовано керувати електроприладами залежно від поточного стану домашньої енергосистеми [4].

Сучасні фірми мають чимало інструментів для управління та моніторингу роботи побутових пристроїв, таких як розумні розетки, розумні лічильники тощо. Однак немає системного підходу до вирішення описаних вище проблем: рішення про ввімкнення/вимкнення того чи іншого приладу часто користувач приймає вручну, а можливості автоматизованої підтримки надійної роботи домашньої енергосистеми в разі високого навантаження відсутні [5].

Крім того, наявні системи “розумного будинку” здебільшого потребують додаткового мережевого обладнання, такого як шлюзи, маршрутизатори тощо, що спричиняє додаткові вразливості та знижує надійність [6].

Важливим компонентом системи є сертифіковані протоколи обміну інформацією між апаратними елементами [7].

Необхідно забезпечити баланс генерації та споживання електроенергії, а для цього треба мати можливість контролювати стан споживачів і генераторів і за необхідності перемикаєти їх між собою. Така система повинна бути бездротовою, захищеною від радіоперешкод і небажаних зовнішніх втручань, надійною та енергоефективною, мати низьку вартість і можливість управління з комп'ютера або смартфона. До найпоширеніших технологій бездротового зв'язку належать Zig Bee [8], WiFi [9], Bluetooth [10]. На використанні цих технологій доцільно будувати системи управління економним енергоспоживання домогосподарств.

Важливо, щоб технології бездротового зв'язку максимально підтримували побудову систем управління економним енергоспоживанням серійним випуском необхідних елементів. За цим показником технологію Bluetooth Low Energy вважають одним із лідерів [11]. Забезпечуючи мінімізоване споживання енергії, технологія Bluetooth Low Energy забезпечує довготривалий зв'язок та підключення невеликих пристроїв, таких як датчики та мобільні пристрої, у межах персональних мереж. Серед ефективних засобів доцільно звернути увагу на такі.

Smart Switch – смарт-розетка з модулем Bluetooth LE, яка передає дані про спожитий/генерований струм та напругу підключеного до неї електроприладу, поточну температуру, а також уможливорює його перемикання за сигналом керування;

Smart Dispatcher [2] – мережевий сервер, який забезпечує автоматизоване управління системою з такими функціями: збирає дані з усіх пристроїв системи; дає користувачеві змогу переглядати статистику роботи електроприладів, а також вручну підключати/відключати їх від електромережі. На основі отриманих даних автоматично приймає рішення про перемикання електроприладів за показниками, значення яких задає користувач у додатку: відключення приладу від мережі в разі отримання від нього даних про підвищену температуру; відключення приладу від мережі в разі аномальних змін струму; вимкнення приладів в разі перевищення встановленого ліміту загального енергоспоживання домогосподарства; відключення/підключення приладу від мережі залежно від встановленого для нього добового графіка роботи.

Виконаний аналіз літературних джерел вказує на актуальність та доцільність досліджень у царині економного енергоспоживання в будинках.

2. Постановка задачі

Мета роботи – дослідити інструменти створення та запропонувати ефективні засоби для управління раціональним енергоспоживанням “розумного будинку”.

3. Особливості протоколів зв'язку “розумного будинку”

Сьогодні використовують декілька спеціалізованих платформ і протоколів, розроблених спеціально для побудови локальних мереж та систем “розумного будинку”. Кожна з цих платформ по-різному спілкується з підімкненими пристроями і керує ними для виконання певних функцій. Більшість протоколів взаємодії між пристроями основані на дротовому з'єднанні, використовують електромережу, окремі гібридні бездротові або класичні, бездротових мереж. Більшість з цих протоколів не мають відкритого вихідного коду. Основні протоколи – KNX, Universal Powerline Bus, Zigbee, Z-Wave, Bluetooth. X10.

Основними недоліками всіх цих комунікаційних засобів є порівняно низький рівень сумісності між різними версіями, а також необхідність мати шлюз з мережею Wi-Fi для ручного керування системою. Типову схему інтеграції таких засобів показано на рис. 1.

Крім спеціалізованих протоколів, перелічених вище, іноді використовують поширені технології, такі як Wi-Fi або Bluetooth. Їх використання вирішує проблему сумісності та ручного управління системою, спрощує архітектуру системи, але спричиняє нові виклики щодо безпеки, енергоспоживання та надійності. Іншим важливим моментом є топології мереж, які підтримуються цими протоколами, оскільки в міських умовах або якщо будівля має товсті бетонні конструкції, найпоширеніша топологія “зірка” матиме істотні обмеження з погляду дальності дії.

4. Особливості протоколу ZigBee

ZigBee – це стандарт бездротового передавання даних [7], один із популярних протоколів, що використовується у системах “розумного будинку”. Його підтримує і розвиває однойменний альянс ZigBeeTM, створений у 2002 р. з метою об'єднання зусиль для розроблення найефективніших протоколів і забезпечення сумісності пристроїв різних виробників. У міру вдосконалення стандарту альянс публікує на своєму вебсайті стандартні специфікації, профілі програмного забезпечення та інші нормативні документи.

ZigBee – це стандарт для набору високорівневих комунікаційних протоколів, які використовують невеликі, малопотужні цифрові приймачі, оснований на стандарті IEEE 802.15.4-2006 для бездротових персональних мереж, таких як бездротові навушники, підключені до мобільних телефонів за допомогою короткохвильових радіохвиль. Технологія визначається специфікацією ZigBee. Її розробляли як простішу і дешевшу, ніж інші персональні мережі, такі як Bluetooth. ZigBee призначений для мобільних пристроїв, які потребують тривалого часу автономної роботи та безпечного передавання даних у мережі.

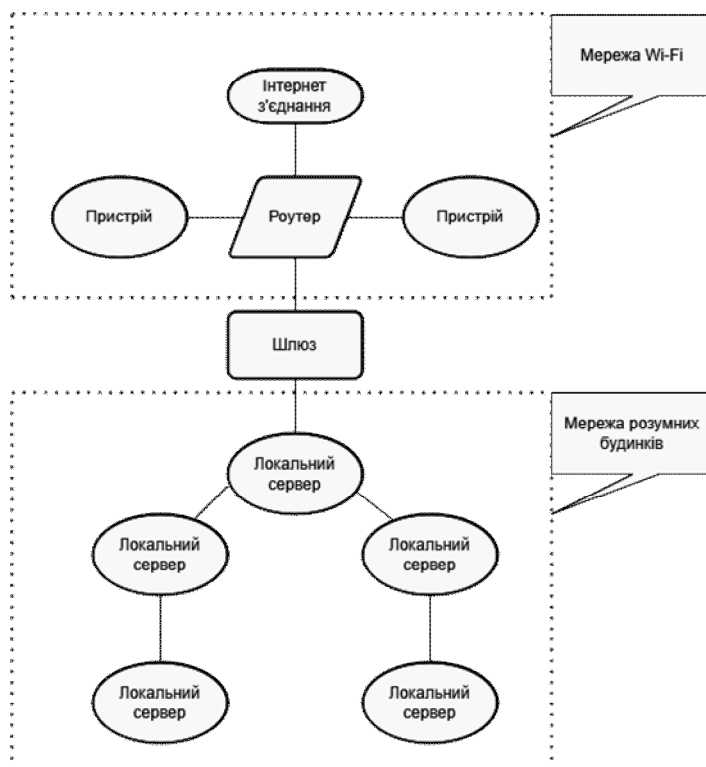


Рис. 1. Типова структура системи “Розумний дім”

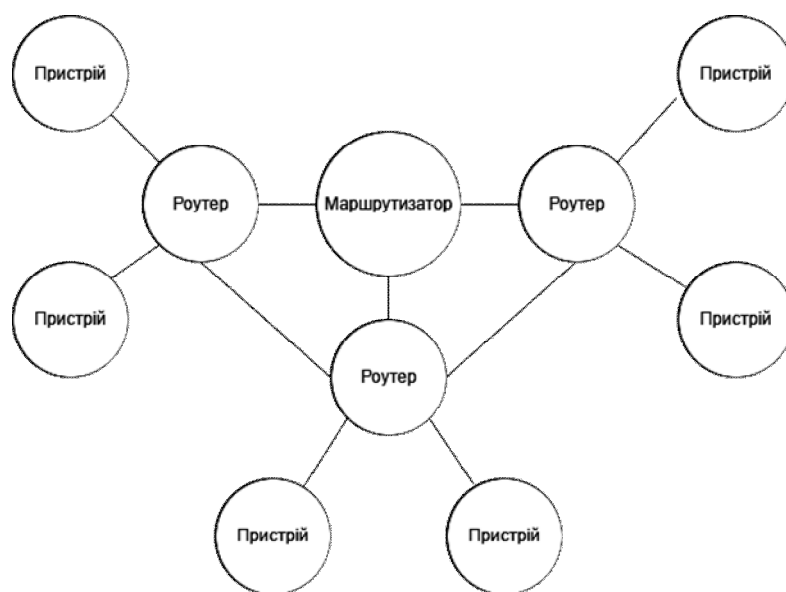


Рис. 2. Системна структура технології ZigBee

Структура системи технології ZigBee [8] складається з трьох основних компонентів (рис. 2): ZigBee координатор, маршрутизатор та кінцевий пристрій. Кожна мережа ZigBee повинна містити один координатор, який виконує роль моста мережі. Координатор діє як центр для отримання та зберігання важливої інформації під час передавання даних. Маршрутизатор ZigBee є проміжною ланкою між інформаційним центром і кінцевими пристроями, що дає змогу трафіку або командам рухатися через нього до кінцевого пристрою.

Переваги:

- низьке енергоспоживання;
- порівняно велика дальність роботи;
- швидкий вихід із режиму сну (близько 3 мс);
- підтримка різних мережевих топологій, зокрема мережі, яка здатна до “самовідновлення” у випадку збою в роботі мережі.

Недоліки:

- відсутність адаптерів ZigBee в наявних комп’ютерах, смартфонах тощо;
- необхідність встановлення дорогих адаптерів на сервері або створення шлюзу між мережею ZigBee та Wi-Fi;
- недостатньо високий рівень стандартизації та єдиної апаратно-програмної платформи для розроблення складних додатків;
- часто занадто низька швидкість передавання даних. Велика частина трафіку витрачається на передавання пакетів, що містять адресну інформацію, пакетів синхронізації тощо. Корисна швидкість передавання становить близько 30 кбіт/с.

5. Особливості потоку Wi-Fi

Wi-Fi [9] – загальноновживана назва стандарту IEEE 802.11 для передавання цифрових потоків даних по радіоканалах. Ця технологія рідше використовується в “розумному будинку” порівняно з ZigBee, але має деякі переваги. Сучасні реалізації Wi-Fi дають змогу передавати дані зі швидкістю понад 100 Мбіт/с, а користувачі можуть переміщатися між точками доступу в межах зони покриття мережі Wi-Fi за допомогою пристроїв, оснащених клієнтськими приймачами Wi-Fi, й отримувати доступ до інтернету. Структуру звичайної мережі Wi-Fi з доступом до інтернету подано на рис. 3 [9].

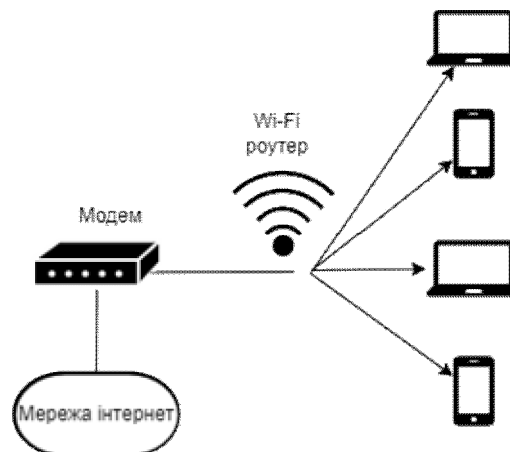


Рис. 3. Структурна схема типової мережі Wi-Fi

Як правило, схема мережі Wi-Fi містить принаймні одну точку доступу і може бути легко масштабована. Також можливе підключення двох клієнтів у режимі точка-точка (Ad-hoc), коли точка доступу не використовується, а клієнти підключаються безпосередньо за допомогою мережевих адаптерів.

Технологія Wi-Fi Direct є продовженням цієї тенденції. Wi-Fi Direct дозволяє комп'ютерам і портативним гаджетам зв'язуватися один з одним безпосередньо через наявний протокол Wi-Fi без використання роутерів і точок доступу. Тобто з'єднання встановлюється так само легко, як і через Bluetooth. Важливим моментом є те, що для встановлення прямого з'єднання достатньо, щоб тільки один із пристроїв відповідав стандарту Wi-Fi Direct. Інакше кажучи, до сертифікованого обладнання можна підключити будь-який сучасний Wi-Fi-пристрій. Максимальна відстань передавання даних досягає 100 м.

Підводячи підсумок, сформулюємо основні переваги та недоліки використання технології Wi-Fi у сфері “розумних будинків”.

Переваги:

- поширеність Wi-Fi пристроїв на ринку. Гарантована сумісність з усіма пристроями, які мають відповідний адаптер;
- можливість роботи пристроїв у режимі Ad-hoc та за прямим стандартом Wi-Fi, що не потребує наявності роутера та модема;
- високий рівень стандартизації; сумісність між пристроями різних виробників.

Недоліки:

- вище енергоспоживання порівняно з такими технологіями, неможливість налаштувати mesh-топологію без додаткових інструментів, для цього потрібні спеціальні дорогі ретранслятори;
- порівняно висока вартість;
- надмірна швидкість передавання даних для потреб “розумного будинку”;
- радіус дії та швидкість передавання залежать лише від потужності роутера або клієнтського адаптера.

6. Особливості протоколу Bluetooth

Bluetooth [10] – це технологія бездротового зв'язку, створена в 1998 р. групою компаній: Ericsson, IBM, Intel, Nokia та Toshiba. У “розумному будинку” ця технологія використовується рідше, ніж Wi-Fi і ZigBee, але має переваги: низьку вартість, зручну топологію мережі та високу швидкість передавання даних. Нині розробленням Bluetooth займається Bluetooth SIG (Special Interest Group), до якої також входять Lucent, Microsoft та інші компанії, діяльність яких пов'язана з мережевими технологіями. Основне призначення Bluetooth – забезпечення енергоефективного (з погляду споживання струму) і дешевого радіозв'язку між різними типами електронних пристроїв, таких як мобільні телефони та аксесуари до них, ноутбуки і настільні комп'ютери, принтери тощо.

Інтерфейс Bluetooth дає змогу передавати як голос (зі швидкістю 64 Кбіт/с), так і дані. Для передавання даних можуть використовуватися асиметричний (721 Кбіт/с в один бік і 57,6 Кбіт/с в інший) і симетричний (432,6 Кбіт/с в обидва боки) способи. Працюючи на частоті 2,4 ГГц, трансивер (чип Bluetooth 26) дає змогу встановлювати зв'язок у межах 10 або 100 м. Різниця у відстанях, безумовно, велика, але з'єднання в межах 10 м забезпечує низьке енергоспоживання, компактні розміри і доволі низьку вартість компонентів. Наприклад, малопотужний передавач споживає всього 0,3 мА в режимі очікування і в середньому 30 мА під час обміну інформацією.

Технологія Bluetooth працює за принципом FHSS (Frequency-hopping spread spectrum). Коротко це можна пояснити так: передавач розділяє дані на пакети і передає їх відповідно до псевдовипадкового алгоритму стрибкоподібної зміни частоти (1600 разів за секунду), або шаблону, що складається з 79 підчастот. “Розуміти” один одного можуть тільки ті пристрої, які налаштовані на той самий шаблон передавання – для сторонніх пристроїв передана інформація буде просто шумом. Основним структурним елементом мережі Bluetooth є так званий “піконет” – набір двох – восьми пристроїв, що працюють за однією схемою. Загальну схему мережі показано на рис. 4.

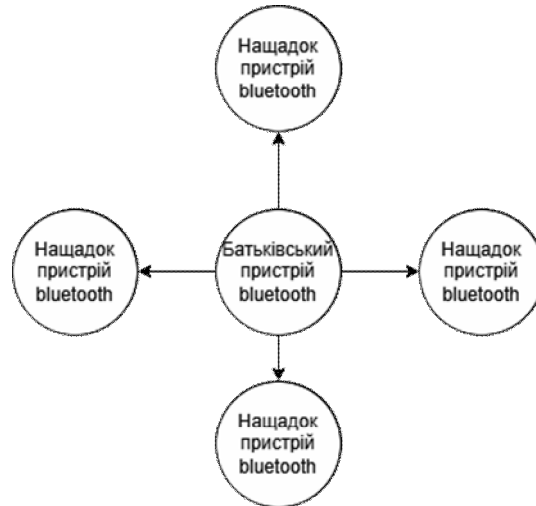


Рис. 4. Мережа Bluetooth Piconet

У кожній Piconet один пристрій працює як активний (батьківський), а інші – як пасивні (нащадки). Активний пристрій визначає шаблон, за яким працюватимуть всі пасивні пристрої цієї піконети, і синхронізує їх роботу. Стандарт Bluetooth передбачає об'єднання незалежних і навіть несинхронізованих однорангових мереж (до десяти) у так званий “scatternet”. Загальну схему мережі “scatternet” наведено на рис. 5.

Ініціалізацією Bluetooth зазвичай називають процес встановлення зв'язку. Його можна розділити на три етапи:

- генерація ключа Kinit;
- генерація ключа зв'язку (його називають ключем зв'язку);
- аутентифікація.

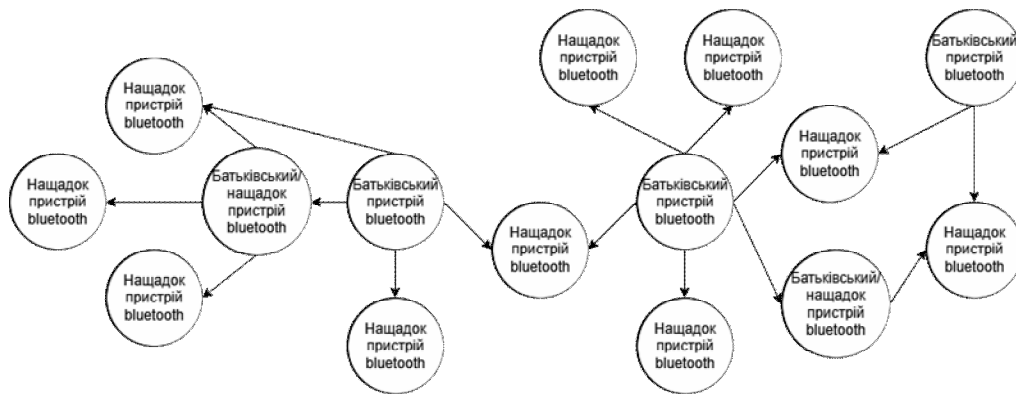


Рис. 5. Мережа Bluetooth Scatternet

Перші два кроки є частиною так званої процедури сполучення. Спарювання – це процес з'єднання двох (або більше) пристроїв для створення єдиного секретного значення Kinit. Згодом до даних, що передаються, застосовують симетричне 128-бітове AES-шифрування з використанням цього ключа.

Підводячи підсумок, сформулюємо основні переваги та недоліки технології Bluetooth.

Переваги

- високий рівень стандартизації;
- надійна система захисту даних за замовчуванням;

- широкий вибір Bluetooth-модулів для різних завдань;
- низька вартість
- наявність адаптерів у більшості гаджетів;
- масштабована архітектура за принципом “скатертини”.

Недоліки:

- порівняно високе енергоспоживання;
- невеликий радіус дії;
- відсутність комірчастої топології.

7. Економне енергоспоживання на основі протоколу Bluetooth

Low-power Bluetooth або Bluetooth smart – це цифрова технологія бездротового передавання даних із наднизьким енергоспоживанням, основана на недорогих мікросхемах у передавальних пристроях. У сфері “розумних будинків” її почали використовувати лише кілька років тому, а в 2017 р. вона стала одним з найперспективніших напрямів розвитку IoT і “розумного будинку”.

Споживаючи менше енергії, малопотужна технологія Bluetooth забезпечує тривале з’єднання і з’єднує невеликі пристрої, такі як датчики і мобільні пристрої, у межах персональних мереж (PAN).

Специфікація Bluetooth 4.0 (і пізніших версій) визначає дві бездротові технології: BR/EDR (класичний Bluetooth, який розвивається з часів першої версії стандарту) і BLE (Bluetooth Low Energy). Пристрої, що використовують BLE, можуть бути як дворежимними BR/EDR/BLE (так звані Bluetooth Smart Ready), сумісними з класичними Bluetooth-пристроями, так і однорежимними BLE (Bluetooth Smart) [10, 11]. Особливості структури цих протоколів вказано на рис. 6 [10].

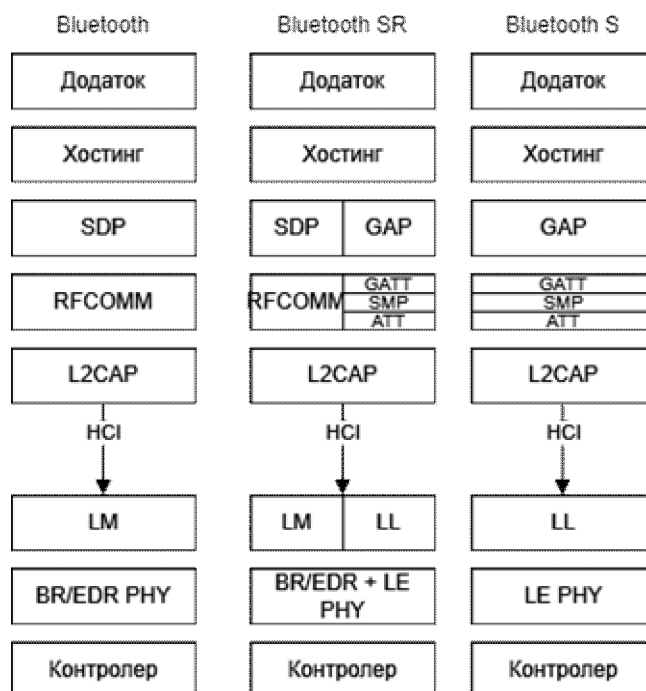


Рис. 6. Схема стандартів Bluetooth

Основні блоки Bluetooth-пристроїв такі:

- додаток – реалізує логіку роботи, корисну для кінцевого користувача;
- основний пристрій, хост – забезпечує роботу верхніх рівнів стека протоколів Bluetooth. Він містить такі протоколи:
- GAP (Generic Access Profile) – загальний профіль доступу;

- GATT (Generic Attribute Profile) – профіль загальних атрибутів;
- L2CAP (Logical Link Control and Adaptation Protocol) – протокол управління логічним з'єднанням і адаптацією;

- ATT (Attribute Protocol) – протокол атрибутів;
- SM (Security Manager) – менеджер безпеки;
- HCI (Host Controller Interface) – інтерфейс хост-контролер, частина на стороні хоста;
- контролер – займається нижніми рівнями Bluetooth.

Містить протоколи:

- HCI – інтерфейс хост-контролер на стороні контролера;
- LL (Link Layer) – рівень з'єднання;
- РНУ – фізичний рівень.

Наприкінці 2016 р. галузева група Bluetooth SIG затвердила характеристики нового стандарту Bluetooth 5. Дальність бездротового з'єднання збільшилася на цілих 400 %, а швидкість передавання даних подвоїлася порівняно з попереднім поколінням Bluetooth. Оновлений стандарт також стабільніший і має високий рівень безпеки. Головною і найочікуванішою новиною стало впровадження підтримки комерційної топології, що дасть змогу значно збільшити розмір мережі на базі Bluetooth Low Energy.

Переваги:

- високий рівень стандартизації та сумісності між різними протоколами;
- низька вартість
- наднизьке енергоспоживання;
- швидкість передавання даних понад 1 Мбіт/с;
- продуктивність модуля можна налаштувати залежно від потреб (збільшення швидкості передавання за рахунок зменшення дальності або навпаки);
- простота підключення;
- безпека зв'язку;
- наявність уніфікованих API для роботи з периферійними пристроями Bluetooth LE;
- для більшості платформ: Android, iOS, десктопні (Java, JS, Python, C++, C#, Ruby та інші).

Недоліки:

- підтримка сітчастої топології з'явилася лише в останній версії 5.0 і все ще активно розробляється.

8. Дослідження архітектури інформаційної системи

У цій статті висвітлено експериментальні результати і запропоновано міру оптимізованого інтервалу сну, яка балансує між енергоспоживанням і швидкістю передавання даних, що може бути корисною для практиків, яким потрібно вибрати радіокомпоненти і параметри для конкретної системи (рис. 7).

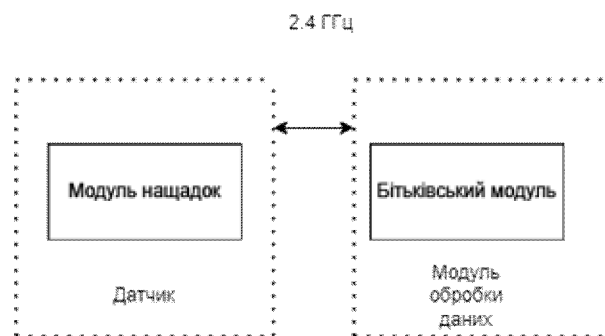


Рис. 7. Сценарій циклічного сну

Запропоновану в цій статті систему подано на рис. 8. Вона складається з різних джерел енергії, накопичувачів, електричних пристроїв, блока управління та відповідного комунікаційного обладнання. Цілком зрозуміло, що “розумний будинок” може генерувати енергію за рахунок відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові турбіни або сонячні фотоелектричні панелі, й зберігати цю енергію за допомогою акумуляторів. Підкреслимо, що методологію прогнозування відновлюваних джерел енергії тут не розглядаємо, оскільки це не є основною метою цієї статті. Однак корисно висвітлити цю важливу особливість під час проектування “розумного будинку”, що розглядається.

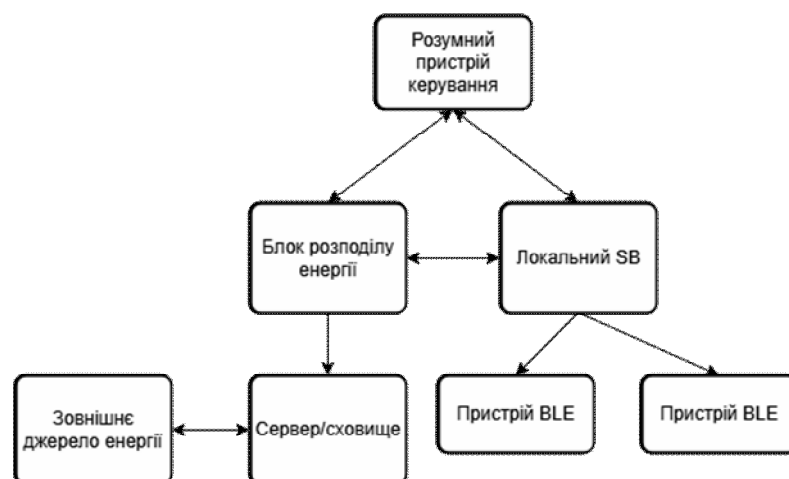


Рис. 8. Запропонована система енергоменеджменту для “розумних будинків”

Запропоноване в цій статті рішення з управління енергоефективністю домогосподарства спрямоване на зменшення витрат на споживання електроенергії в побуті, а також витрат споживачів на електроенергію за рахунок зміщення роботи електроприладів з годин пікового попиту на час нормального енергоспоживання. Цілком зрозуміло, що електроприлади, які входять у домашню систему, можуть використовуватися в різний час щодня, що залежить, здебільшого, від дня тижня.

Запропонований підхід не обмежується приладами, які працюють переважно автономно і з перервами, такими як холодильники, пральні машини тощо. Запропонований підхід є доцільним та ефективним для всіх побутових пристроїв. Наприклад, розглянемо випадок, коли система може запропонувати режим очікування через “розумну вилку”, коли користувач починає сушити волосся після душу, тоді як фен підключений і ввімкнений, щоб користувач міг відхилити будь-яку пропозицію щодо планування, оскільки у нього є нагальна потреба скористатися феном саме в цей момент; і навпаки, користувач може вирішити залишитися з мокрим волоссям (або сушити його рушником), щоб перенести цикл роботи приладу на години, коли ціни на електроенергію порівняно низькі.

9. Дослідження архітектури бездротової мережі

Bluetooth LowEnergy працює у діапазоні 9 ГГц ISM з 40 каналами, розташованими з кроком 2 МГц. Він здатний передавати зі швидкістю 1 Мбіт/с за допомогою модуляції GFSK. Як і Bluetooth Classic, використовує стрибки частоти, але застосовує адаптивну стрибкоподібну зміну частоти і має меншу швидкість.

Запропонована архітектура мережі, показана на рис. 9, складається з декількох незалежних бездротових осередків (БС), керованих головним пристроєм BLE, який також виконує функції EMU та інтегрує модуль інтелектуального лічильника. Вся мережа WN складається з усіх бездротових

комірок, у яких розміщені польові пристрої (FD), що являють собою Bluetooth LowEnergy пристрої, які або орієнтовані на конкретні завдання, або підключені до побутових приладів за допомогою розумних штепсельних вилок. Легко зробити висновок, що в запропонованій архітектурі мережі деякі бездротові комірки поведуться як бездротові сенсорні мережі (БСМ), оскільки можуть безперервно контролювати навколишнє середовище з меншими людськими зусиллями, у них низькі вартість і енергоспоживання.

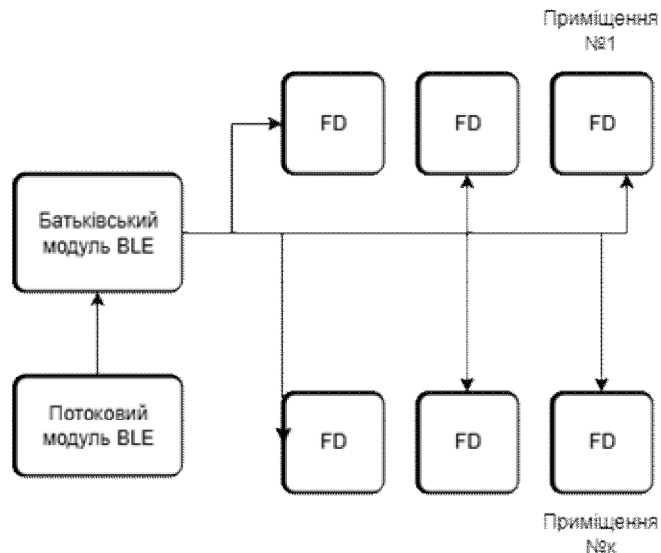


Рис. 9. Запропонована топологія бездротової мережі на основі BLE

Розглядаючи рис. 9, корисно оцінити наслідки блокування між BLE-майстром і “підлеглими пристроями” через стіни або перешкоди в приміщенні. Завдяки модифікованій модуляції BLE має приблизно на 3 дБ кращий бюджет зв’язку, ніж класичний Bluetooth. Отже, пристрій BLE може запропонувати діапазон 200–39 300 м на лінії об’єкта без необхідності додаткового підсилювача потужності.

Запропонована WN передбачає різноманітні варіанти використання, тому нижче наведено можливий перелік застосувань:

- “розумна” енергетика: керування віконними шторами, системами опалення, вентиляції та кондиціонування, центральним опаленням тощо може здійснюватися на основі інформації, зібраної кількома типами датчиків, що контролюють такі параметри, як температура, вологість, освітлення та присутність користувача; завдяки цьому можна уникнути зайвого споживання електроенергії;
- розумні лічильники: Їх можна використовувати для виявлення піків споживання та попередження побутових пристроїв, які можуть їх спричинити;
- управління освітленням: Освітлення може вмикатися у відповідь на команду з пульта дистанційного керування; воно також може вмикатися автоматично, коли датчики присутності та освітленості виявляють, що люди перебувають у недостатньо освітленому приміщенні;
- безпека: Кілька датчиків, таких як детектори диму, розбиття скла та руху, можуть бути встановлені для виявлення можливих ненормальних ситуацій, які викликають відповідну реакцію;
- дистанційне керування: Інфрачервона технологія використовується для бездротового зв’язку між пультами дистанційного керування та такими пристроями, як телевізори, Hi-Fi обладнання та системи опалення, вентиляції та кондиціонування; однак для цього потрібен як прямий, так і ближній зв’язок. Тому радіочастотна технологія на основі BLE може подолати ці обмеження і може бути інтегрована в архітектуру домашньої мережі.

10. Особливості побудови системи

Пристрій, що розробляється, призначений насамперед для контролю потоку електроенергії, що споживає сам пристрій та пристрої, до яких він підключений. Функціональні та технічні вимоги до пристрою:

- може житися від стандартної мережі (220 В, 50 Гц);
- для підключення до сервера системи в пристрої повинен бути встановлений модуль Bluetooth LE;
- повинен мати мікроконтролер, який дає змогу працювати з модулем Bluetooth LE, вимірювати аналогові значення технологічних параметрів (струм, напруга, температура) і перетворювати їх на десятирозрядний двійковий код, формуючи сигнали на увімкнення або вимкнення електричного пристрою;
- пристрій повинен мати зовнішній оптичний інтерфейс для ввімкнення або вимкнення живлення.

Із урахуванням вхідних вимог пристрій може бути реалізований за блок-схемою, наведеною на рис. 10.

Модуль Microchip BLE RN4020 [11] є одним з багатофункціональних Bluetooth Smart рішень на ринку. Ознайомившись зі специфікаціями та посібником користувача, досить легко розпочати проєкт з використанням основних сервісів/функцій Bluetooth. Щоб допомогти користувачам повніше використовувати наявний потенціал цього пристрою, розглянемо детальніше перелік розширених можливостей модуля RN4020.

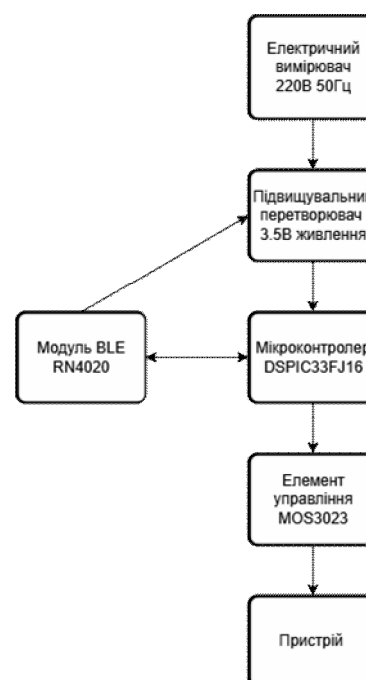


Рис. 10. Структурна схема пристрою

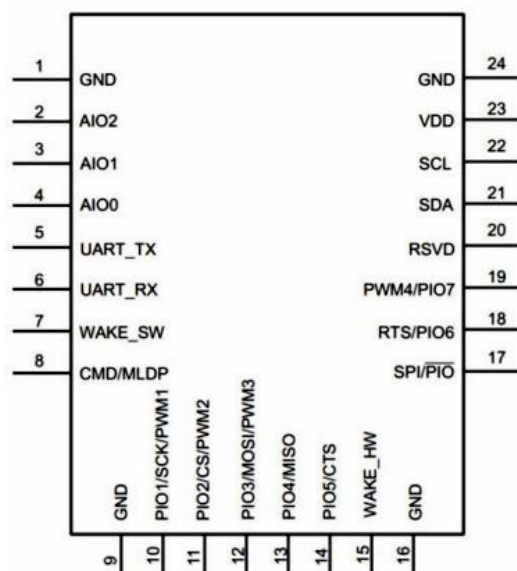


Рис. 11. Структурна схема модуля RN4020

Модуль Bluetooth із низьким енергоспоживанням RN4020 компанії Microchip – це високоінтегроване рішення для створення малопотужних рішень Bluetooth 4.1. Вдосконалений командний інтерфейс пропонує одне із найшвидших рішень для передавання даних, доступних на ринку. Модуль RN4020 сумісний зі специфікацією Bluetooth версії 4.1 та інтегрує в собі радіочастотний

модуль, контролер базового діапазону і процесор командного API, що робить його повноцінним рішенням Bluetooth LowEnergy.

Модуль низькоенергетичного радіочастотного зв'язку Bluetooth RN4020 містить базовий радіоконтролер Bluetooth 4.1, мікроконтролер, цифро-аналоговий ввід/вивід, вбудований стек і ASCII-командний інтерфейс [11].

Фрагмент модуля показано на рис. 11, а опис подано в табл. 1 і табл. 2 [11].

Таблиця 1

Основні технічні характеристики модуля RN4020

Технічні характеристики	Опис
Стандарт	Bluetooth 4.1
Діапазон частот	2,4 ~ 2,48 ГГц
Метод модуляції	GFSK
Максимальна швидкість передавання даних	1 Мбіт/с
Антенa	Друкована плата
Інтерфейс	UART, PIO, AIO, SPI
Робочий діапазон	100 м
Чутливість	92,5 дБ at 0,1 % BER
Потужність RF TX	-19,0 дБ to +7,5 дБ
Температура (робоча)	Від -30°C до +85°C
Температура (зберігання)	Від -40°C до +85°C
Вологість	10~90 % без конденсації

Таблиця 2

Споживання струму

Режим	Типовий струм за 3 В
Тихий режим	<900 нА
Глибокий сон	<5,0 мкА
Режим очікування	<1,5 мА
TX/RX активний	16 мА

Для реалізації необхідного функціоналу запропоновано мікроконтролер Microchip DSPIC33FJ16 [11], який дає змогу реалізувати пристрій в одній процесорній схемі, максимально використовуючи переваги сучасних сигнальних процесорів.

Цей контролер споживає значно менше енергії, ніж аналоги, що робить його ефективним рішенням проблеми мінімізації енергоспоживання.

Висновки

Розроблено принципи побудови та досліджено засоби мінімізації енергоспоживання для “розумного будинку” на основі технології Bluetooth Low Energy.

Сформульовано основні вимоги до системи, досліджено різні підходи до вирішення подібних завдань та визначено способи їх вдосконалення. Запропоновано архітектуру системи, яка збирає дані про стан електроприладів і на їх основі дає змогу автоматично приймати рішення про їх вмикання або вимикання для збалансування навантаження внутрішньої електромережі, запобігання несправностям та мінімізації фінансових витрат на електроенергію.

Система дешева, надійна та проста в розгортанні завдяки мінімізації кількості необхідного обладнання. Для впровадження системи потрібні спеціалізовані польові пристрої BLE та відповідне функціональне програмне забезпечення.

Список літератури

1. Botchkaryov, A., Golembo, V., Paramud, Y., Yatsyuk, V. (2019). *Cyber-physical systems: data collection technologies*, A. Melnyk (ed.), Lviv: Magnolia 2006. 176 p. (in Ukrainian). ISBN: 98-617-574-139-9.
2. *Smart dispatcher [Electronic resource]*. Available at: <https://hytera-europe.com/news/what-is-smart-dispatch>, (Accessed: 29/09/2023).
3. *Power system analysis [Electronic resource]*. Available at: https://cdn.regulation.gov.ua/12/ed/8b/5a/regulation.gov.ua_GP%20Electricity%20market.pdf (Accessed: 29/09/2023).
4. Paramud Y., Butov M., Pavych T. (2021). *Features of the implementation of smart technologies in the mine // Advances in Cyber-Physical Systems*, Vol. 6, No 2, 98–104. DOI: <https://doi.org/10.23939/acps2021.02.098>.
5. *Vulnerabilities in smart home systems [Electronic resource]*. Available at: <https://cybercalm.org/novyiny/urazlyvosti-v-systemah-rozumnogo-domu-dozvlyayut-hakeram-vas-pidsluhovuvaty/>, (Accessed: 29/09/2023).
6. Imran A., Atif S. (2018). *Comprehensive Energy Systems*, Vol. 5, 389–422. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00524-1>
7. Nataliia Pavych, Tetyana Pavych, “Method for Time Minimisation of API Requests Service From Cyber-Physical System to Cloud Database Management System“. *Advances in Cyber-Physical Systems*, 2019, Vol. 4, No. 2, 125–131. DOI: <https://doi.org/10.23939/acps2019.02.125>.
8. *ZigBee protocol [Electronic resource]* – Available at: <https://www.geeksforsgeeks.org/introduction-of-zigbee/>, (Accessed: 30/01/2023).
9. *Wi-Fi: IEEE 802.11 [Electronic resource]*. Available at: <https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/what-is-wifi.php>, (Accessed: 29/09/2023).
10. *Bluetooth [Electronic resource]*. Available at: <https://www.britannica.com/technology/Bluetooth>, (Accessed: 29/09/2023).
11. *Data Sheet Bluetooth Low Energy Module RN4020 [Electronic resource]*. Available at: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002279B.pdf>, (Accessed: 29/09/2023).

A COMPUTERIZED ENERGY MANAGEMENT SYSTEM FOR A SMART HOME

R. Ilnytskyi, R. Karpa

Lviv Polytechnic National University,
Computer Engineering Department

© Ilnytskyi R., Karpa R., 2023

This work is devoted to the study of Smart Home systems based on the development of an energy optimization system for a smart home and based on various wireless communication protocols. The paper considers the construction of a home monitoring and control system based on the latest Bluetooth Low-Energy protocol using modern technologies. A device for monitoring and controlling electrical appliances, which is an element of this system, is proposed. The proposed architecture has advantages over other existing systems: reliability, performance, ease of deployment, and management. The system is flexible due to the possibility of selecting operating modes (automatic or manual) and changing various settings that affect the operation of the optimization algorithm.

The paper presents examples of the system operation in different modes and at different values of the algorithm settings, consisting of a server deployed on a personal computer and two developed monitoring and control device prototypes.

Key words: smart home; energy consumption optimization; monitoring and control of electrical appliances; smart sockets; Bluetooth low energy.