

УДК 681.518.54 : 621.313.13

А. Ю. ЖУРАВЛЬОВ – асистент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, anton.zhuravlev@gmail.com

О. Ю. ЛЕБЕДЕВ – аспірант, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, lebedev\_a.y@ua.fm

С. А. РАЗГОНОВ – к. т. н., Академія митної служби, Razgonov@i.ua

## СИСТЕМА БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ZIGBEE В ПРОЦЕСІ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВІДДАЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАЛІЗНИЧНОЇ АВТОМАТИКИ

*Статтю представив д. т. н., проф. А. П. Разгонов*

### Вступ

На сьогодні з використанням бездротових технологій вирішується досить широке коло завдань моніторингу, збору даних і управління. Бездротові рішення значно спрощують і здешевлюють процес розробки систем, тому що витрати на лінії зв'язку та проектування кабеленесучих систем зводяться до мінімуму. При вирішенні даних завдань застосовують різні бездротові технології, однією з яких є ZigBee, що дозволяє в короткі терміни розгорнути сенсорні мережі комірчастої топології, використовуючи при цьому відносно недорогі малопотужні передавачі [1].

ZigBee – специфікація мережевих протоколів верхнього рівня (рівня додатків API і мережевого рівня NWK), що використовують сервіси нижніх рівнів – рівня управління доступом до середовища MAC і фізичного рівня PHY, регламентованих стандартом IEEE 802.15.4. ZigBee і IEEE 802.15.4 [2] описують бездротові персональні обчислювальні мережі (WPAN). Специфікація ZigBee орієнтована на додатки, що вимагають гарантованої безпечної передачі даних при відносно невеликих швидкостях і можливості тривалої роботи мережевих пристроїв від автономних джерел живлення.

Здатність до самоорганізації та самовідтворення, mesh-топологія, захищеність, ви-

сока завадостійкість, низьке енергоспоживання і відсутність необхідності отримання частотного дозволу роблять мережу ZigBee відповідною основою для бездротової інфраструктури систем позиціонування в режимі реального часу (RTLS).

Так як ZigBee може активуватися (тобто переходити від сплячого режиму до активного) за 15 мілісекунд або менше, затримка відгуку пристрою може бути дуже низькою, особливо в порівнянні з Bluetooth, для якого затримка зазвичай досягає трьох секунд [3, 4]. Оскільки ZigBee більшу частину часу перебуває в сплячому режимі, рівень споживання енергії може бути дуже низьким, завдяки чому досягається тривала робота від батарей.

### Мета роботи

Метою роботи є аналіз існуючих мереж бездротової передачі даних та вибір оптимальних мережевих параметрів і конфігурації радіопередавачів для роботи в якості кінцевих сплячих вузлів в системах технічної діагностики залізничної автоматики.

### Особливості технології ZigBee

Основна особливість технології ZigBee полягає в тому, що вона підтримує не тільки прості топології мережі («точка-точка», «дерево» і «зірка»), а й самоорганізує і са-

мовідновлює комірчасту топологію з ре-трансляцією і маршрутизацією повідомлень. Крім того, специфікація ZigBee містить можливість вибору алгоритму маршрутизації, механізму стандартизації додатків – їх профілів, бібліотек стандартних кластерів, кінцевих точок, гнучкого механізму безпеки, а також забезпечує простоту розгортання, обслуговування і модернізації. Застосування мереж ZigBee в частотному діапазоні 2,405-2,485 ГГц не вимагає отримання частотних дозволів і додаткових погоджень [3, 5, 6].

Типові області застосування програми:

- раціональне освітлення, просунутий температурний контроль, охорона і безпека та ін;
- датчики води та енергії, моніторинг енергії, датчики задимлення і пожежі;
- мобільні служби – мобільні оплата, моніторинг і контроль об'єктів і контроль доступу, охорона здоров'я та теледопомога;
- комерційне будівництво – моніторинг HVAC, світла, контроль доступу;
- промислове устаткування – контроль процесів, промислових пристроїв та ін.

Пристрої ZigBee повинні бути сумісні зі стандартом IEEE 802.15.4-2003 [7, 8] бездротових персональних мереж (виключаючи профіль 2.0 «раціонального використання енергії»). Стандарт визначає нижні шари протоколу – фізичний шар (PHY), та контроль доступу MAC – частина посилення на шар даних (DLL чи API). Цей стандарт визначає роботу на частотах 2,4 ГГц (у світі, не ліцензована частота. На частоті 2,4 ГГц є 16 каналів ZigBee, кожен канал вимагає ширини діапазону в 5 МГц. Основна частота для кожного каналу може бути розрахована як  $FC=(2405+5*(ch-11))$  МГц, де  $ch=11, 12, \dots, 26$ .

Радіо використовують широкосмугову модуляцію з прямим розширенням спектру,

яка управляється цифровим потоком в модуляторі. Двійкова фазова маніпуляція використовується на смугах в 868 і 915 МГц, а офсетна квадратурна фазова маніпуляція яка передається по 2 біта в символі використовується на смузі 2,4 ГГц. У чистому вигляді, при передачі через повітря, швидкість передачі даних складає 250 кбіт/с для кожного каналу в діапазоні 2,4 ГГц, 40 кбіт/с для кожного каналу в діапазоні 915 МГц і 20 кбіт/с в діапазоні 868 МГц. Відстань передачі від 10 до 75 метрів і понад 1500 метрів для ZigBee pro, хоча вона сильно залежить від окремого обладнання.

Хоча радіопередавачі самі по собі недорогі, процес кваліфікації ZigBee включає в себе повну перевірку вимог на фізичному рівні. Таке детальне доведення фізичного рівня має численні переваги, так як всі радіо, отримані з цього набору напівпровідникових елементів, будуть володіти тими ж RF-характеристиками. З іншого боку, якщо фізичний рівень буде не сертифікований, неправильне функціонування може зменшити тривалість роботи батарей в інших пристроях, включених в мережу ZigBee. Там де інші протоколи можуть приховувати погану чутливість, що проявляється в створенні зменшеної реакції, ZigBee радіо мають жорсткі інженерні обмеження, що стосуються як енергоживлення так і широти діапазону. Таким чином, радіо проходять випробування на стандарт ISO 17025 з вказівками пункту 6 з 802.15.4-2006 стандарту [10].

Існують три різних типи пристроїв ZigBee:

- **Координатор (ZC)** – найбільш відповідальний пристрій, формує шлях древа мережі і може зв'язуватися з іншими мережами. Він і запускає мережу від початку, може зберігати інформацію про мережі, включаючи сховище секретних паролів виробництва компанії Trust Centre.

– **Маршрутизатор (ZR)** – може виступати в якості проміжного маршрутизатора, передаючи дані з інших пристроїв. Він також може запускати функцію додатка.

– **Кінцевий пристрій (ZED)** – його функціональна завантаженість дозволяє обмінюватися інформацією з материнським вузлом (або координатором, або з маршрутизатором), він не може передавати дані з інших пристроїв. Таке ставлення дозволяє вузлу більшість часу перебувати в сплячому стані. ZED потребує мінімальну кількість пам'яті, і тому може бути дешевше у виробництві, ніж ZR або ZC.

Закінчені модулі ZigBee не потребують для своєї роботи додаткових зовнішніх компонентів і випускаються з уже завантаженим стеком ZigBee Pro і управляються за допомогою AT-команд або API-інтерфейсів, що відсилаються по фізичному інтерфейсу (COM, USB, SPI або UART). Модулі можуть працювати як під, так і без управління мікроконтролером – як автономний модуль. Алгоритм роботи, в автономному режимі, задається установкою відповідної конфігурації модуля, яка зберігається в енергонезалежній пам'яті модуля. Така конфігурація може включати, наприклад, автоматичне вимірювання аналогового сиг-

налу (розрядність залежить від конфігурації закладеного АЦП) і періодичне відсилення цих значень на один або декілька вузлів ZigBee-мережі. Інтервал відсилення встановлюється користувачем і може варіюватися від сотень мілісекунд до декількох секунд, годин, тижнів. Подібний алгоритм використовується в інших аналогічних бездротових мережах.

Правильний вибір параметрів модуля дозволить створювати автономні пристрої здатні працювати від автономного джерела живлення до 10 років. Однак, перш ніж переходити до вибору оптимальних налаштувань, необхідно продумати загальну конфігурацію бездротової мережі – розташування кінцевих пристроїв і число підтримуваних роутерів.

### Використання в технічній діагностиці

Враховуючи всі переваги мережі ZigBee, її доцільно використовувати в системах дистанційної діагностики пристроїв залізничної автоматики [9]. Розглянемо роботу пристрою для діагностики стану електродвигунів стрілочних електроприводів (рис. 1), які віддалені від поста електричної централізації на деяку відстань.

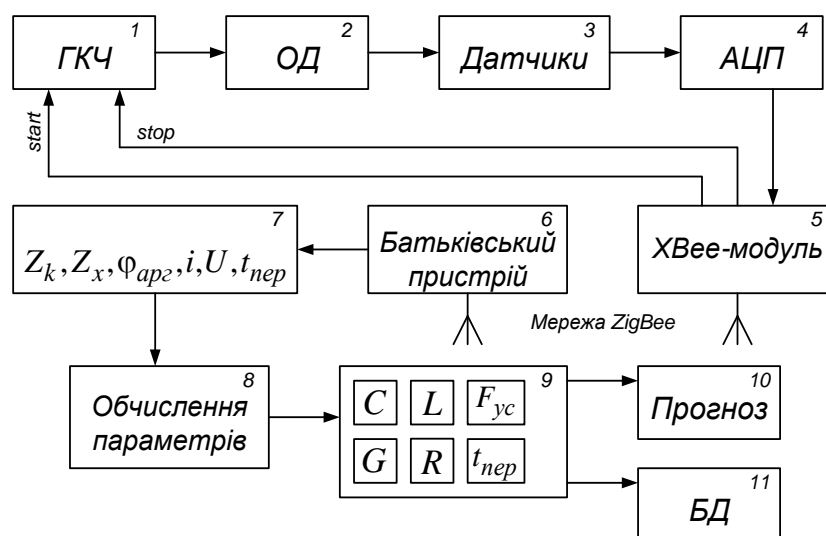


Рис. 1. Структурна схема датчика контролю технічного стану стрілочного електродвигуна

Робота такого пристрою полягає в наступному. В момент переводу стрілки батьківський пристрій 6 подає команду на XВee модуль 5. В результаті чого останній виходить із стану сну і вмикає генератор качаючих частот (ГКЧ) 1, який подає на об'єкт дослідження (ОД) 2 (двигун) електричний струм різних частот в зазначеному діапазоні з заданим шагом. За допомогою датчиків 3 АЦП 4 вимірює сигнали на виході електродвигуна. Після чого всі виміряні данні за допомогою мережі ZigBee передаються на батьківський пристрій від XВee-модуля, який після передачі вимикає ГКЧ. Отримані з батьківського пристрою данні декодуються блоком 7. Який визначає екстремуми функції залежності вхідного опору від частоти, а також час, напругу і струм переводу стрілки і передає ці данні до блоку обчислення параметрів 8. Після обчислення всіх необхідних параметрів вони відображаються на екрані монітора 9 АРМа електромеханіка разом з прогнозованим часом безвідомної роботи 10 відповідного стрілочного двигуна, а також записуються до бази даних. Таке прогнозування дає можливість заздалегідь планувати час проведення ремонтно-профілактичних робіт і уникати затримки поїздів, а значить і фінансових витрат, а гнучке налаштування пристроїв бездротової мережі – значний час їх роботи від автономних джерел живлення.

### **Організація сплячого режиму вузлів ZigBee бездротової мережі**

Кінцеві пристрої в бездротовій мережі мають свої особливості та обмеження. Для підключення до мережі кожний такий пристрій має мати в зоні своєї радіовидимості хоча б один роутер, маршрутизатор або координатор – майбутній батьківський пристрій.

Розглянемо характеристику модуля XВee (див. рис. 2) [3, 4, 6].

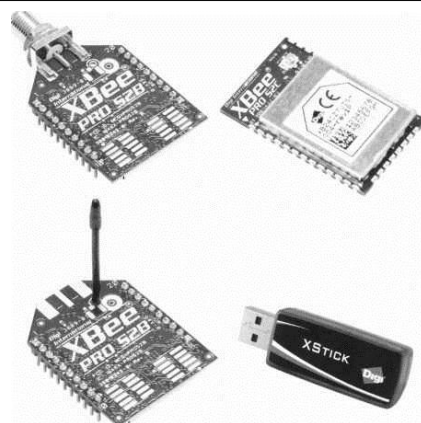


Рис. 2. Різновид модулів XВee для побудови мережі ZigBee

Процес підключення припускає стандартну для будь-якого ZigBee-пристрою послідовність дій – сканування сітки частотних каналів відповідно до використовуваного стандарту (обмежених маскою SC), зіставлення параметрів доступної мережі із заданими значеннями ID, ZS та отримання мережевої адреси від батьківського пристрою або ж ідентифікації закладеної адреси. Після успішного підключення кінцевий пристрій може обмінюватися даними з іншими пристроями в мережі, однак він не може ретранслювати чужі пакети або дозволяти приєднання іншим пристроям. Кінцевий пристрій у своїй роботі покладається на батьківський пристрій, через яке передаються і приймаються всі повідомлення.

Тільки кінцеві пристрої можуть переходити в сплячий режим – основний режим їх роботи. Під час сну кінцевий пристрій відключає всі свої внутрішні вузли (окрім таймеру), що дозволяє знизити струм споживання до рівня 1 мкА.

В цей час кінцевий пристрій зберігає встановлені рівні на своїх цифрових виходах, однак не може приймати радіопакети і вести обмін даними через послідовний порт. Проте, повідомлення, що відправляється йому по ефіру, не загубиться – воно буде зберігатися на батьківському пристрої до закінчення періоду сну.

Через обмежений обсяг оперативної пам'яті для зберігання повідомлень, що пере-

силаються, кожен роутер може виступати «батьком» для обмеженої кількості кінцевих пристроїв. В модулях XBee серії S2C (SMD-виконання, прошивка 4.0.1.6 ) один роутер може підключити до 20 кінцевих пристроїв і зберігати не більше 1 повідомлення для кожного пристрою. Роутер XBee серії ZB (Firmware 2x6x) може підключити 12 кінцевих пристроїв. При створенні мережі з великою кількістю кінцевих пристроїв, наприклад для груп електричних приводів стрілок, необхідно подбати про достатню кількість роутерів. Команда NC дозволяє отримати інформацію про кількість кінцевих пристроїв, яку ще здатний підключити роутер.

На далеких відстанях і при ретрансляції замість кінцевого пристрою використовується роутер, маршрутизатор.

Кінцевий пристрій обмінюється даними тільки зі своїм батьківським пристроєм, за виставленими раніше ознаками, при цьому батьківський пристрій бере на себе всі функції по маршрутизації даних віддаленого вузла в ZigBee-мережі (прокладку маршруту по найбільш короткому шляху передачі даних). Ініціатором радіообміну між кінцевим і батьківським пристроєм завжди є кінцевий пристрій. Перебуваючи в активному режимі (не в режимі сну) кінцевий пристрій постійно запитує батьківський пристрій на наявність даних, відсилаючи запити Poll Request (див. рис. 3). Період повтору запитів задається параметром PO (100 мс за замовчуванням). У відповідь на кожен запит від «батька » приходять відповідь-підтвердження Ack, який, по-перше, інформує про наявність двостороннього зв'язку, по-друге, містить інформацію – чи є у «батька» будь-яке повідомлення, що очікує. Якщо повідомлення є – кінцевий пристрій не переходить негайно в режим сну, а посилає наступний Poll Request, у відповідь на який отримує повідомлення, що зберігається у «батька». Далі кінцевий пристрій продовжує відсилати запити Poll Request доти, поки не пройде час ST після остан-

ньої порції відправлених або отриманих даних. Якщо при пробудженні кінцевого пристрою у відповідь на перший Poll Request «батько» відповідає, що у нього немає даних для передачі, то кінцевий пристрій переходить в режим сну негайно, не чекаючи закінчення часу ST. Цей мінімальний цикл активності має тривалість приблизно 10 мс, споживання струму (не більше 40 мА) при тому, що протягом цього часу включається передавач або приймач. Коли йде відлік часу ST, то на проміжок часу між відсиланням Poll Request модуль відключає радіопередавачу частину, тому середній струм споживання менше 40 мА – модуль більшу частину часу перебуває в режимі Idle, споживаючи струм 15 мА.

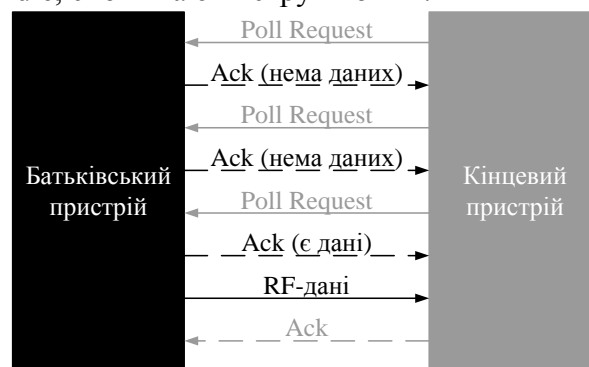


Рис. 3. Принцип передачі даних в мережі ZigBee

Таким чином, навіть без обміну корисними даними, несплячий кінцевий пристрій займає ефір запитом Poll Request і відповідями «батька», затруднюючи обмін інформацією між іншими пристроями в ZigBee-мережі. Дану обставину слід приймати до уваги лише при великій кількості кінцевих пристроїв, сконцентрованих в одному місці (більше декількох десятків). Для зниження навантаження на мережу слід мінімізувати час знаходження кінцевих пристроїв в активному режимі, або збільшувати час PO між сусідніми запитом (Poll Request). Однак це збільшить затримку в отриманні даних. На максимальну швидкість обміну даними це впливати не повинно, тому що в останню версію прошивок введений алгоритм адаптивного опитування Adaptive

Polling, який полягає в наступному – незалежно від установки PO, при отриманні даних подальші запити Poll Request відправляються зі збільшеною частотою, виходячи з припущення, що передача даних буде продовжуватися. Якщо даних більше немає, частота опитування знижується до встановленого значення PO. Механізм Adaptive Polling збільшує пропускну здатність каналу зв'язку з кінцевим пристроєм. Механізм адаптивного протоколу застосовний і в інших бездротових мережах.

### Налаштування параметрів сну вузлів в мережі ZigBee

Основний спосіб збереження енергії батарей – максимально довге знаходження кінцевого пристрою в режимі сну (визначається параметрами SP і SN), цей час може досягати трьох тижнів. Однак роутер може зберігати повідомлення максимум 28 с, тому сплячий довше цього часу кінцевий пристрій не може гарантовано отримувати дані, відправлені йому в довільний момент часу. Це обмеження можна подолати, якщо використовувати спеціальний алгоритм роботи. Сплячий більше 28 с кінцевий пристрій після пробудження відсилає пакет даних, що інформує про його готовність отримувати інформацію, так званий маркер готовності. Після цього воно може прийняти вхідні дані протягом часу, що визначається параметром ST.

Якщо в процесі роботи батьківський пристрій виходить з ладу, або на ньому пропадає живлення, то кінцевий пристрій виконує цикл пошуку нового батьківського пристрою. Пошук нового «батька» починається в тому випадку, якщо кінцевий пристрій не отримав відповіді на три послідовних запити Poll Request. Під час цього процесу активність кінцевого пристрою вище, що веде до більшого споживання струму. Це необхідно враховувати при розрахунку тривалості автономної роботи сплячого

пристрою в ситуації можливого зникнення зв'язку з «батьком». За наявності іншого роутера в зоні дії перепідключення кінцевого пристрою до нового «батька» займає кілька секунд.

За допомогою параметра SO можна змінювати поведінку модуля XBee в режимі сну – включати так званий «тривалий» або «короткий» сон. Типово параметр SO=0, і модуль прокидається через час SP для відправки запиту «батьку». Коли модуль прокидається, він встановлює 1 на виводі On/Sleep і скидає в 0 лінію CTS, вказуючи зовнішньому МК на готовність вести обмін даними по UART-інтерфейсу (або іншому інтерфейсу, що використовується). Параметр SN контролює поведінку лінії On/Sleep (CTS). Типово SN=1, і при кожному розсіпї модуля On/Sleep буде встановлюватися в «1», а CTS в «0». Якщо SN>1, то лінія On/Sleep (CTS) буде задіяна, тільки якщо модуль отримує ефірні дані, або якщо пройде заданий параметром SN кількість періодів сну. Це дозволяє не будити зовнішній МК при кожному прокиданні кінцевого пристрою і, в той же час, не пропустити вхідну інформацію. За допомогою параметра SO можна перевести кінцевий пристрій в режим тривалого сну – на повний час, рівний SN\*SP (до трьох тижнів). Однак у цьому випадку ускладнена (але можлива) доставка повідомлень такому вузлу, тому що максимальний час зберігання даних на батьківському вузлі не може перевищувати 28 с.

Враховуючи можливість міграції кінцевих пристроїв у мережі, в роутерах передбачений механізм видалення даних про дочірній пристрій, якщо він протягом заданого часу не посилає запити «батьку». Даний механізм запобігає переповненню пам'яті роутера інформацією про ті кінцеві пристрої, які в силу якихось причин були видалені з мережі або знайшли собі нового «батька».

Таблиця 1

Основні команди налаштування XBee-модуля

Команда	Призначення	Тип вузла	Діапазон
SM	Режим сну XBee-модуля. При SM=0 модуль не переходять в режим сну, тобто виступає в ролі роутера. При установці SM>0, модуль відключається від мережі як роутер і підключається в якості кінцевого пристрою	RE	0 - сон заборонений (роутер) 1 - сон за сигналом на вив. 8 4 - періодичний сон 5 - комбінація режимів 1 і 4
SN	Множник періоду сну. Дозволяє не будити host - контролер тривалий час (через вив. 12 і 13), якщо тільки не отримано радіопакет. При установці S0=4 дозволяє модулю XBee засипати на тривалий час =SNxSP (до 3 тижнів)	CRE	1–0xFFFF
SP	Період сну. Визначає, як довго кінцевий пристрій буде перебувати в стані сну за один період, максимум до 28 с. На батьківському пристрої значення SP визначає час зберігання даних для дочірніх кінцевих пристроїв. Рекомендується встановлювати єдине значення SP для всіх пристроїв в мережі	CRE	0x20–0xAF0 (x 10 мс) (з дозволом 1/4 с)
ST	Час перед сном. Встановлює період часу до переходу в режиму сну. Відлік ST починається знову при обміні по UART або отриманню RF-даних. Застосовується тільки для циклічно сплячих кінцевих пристроїв	E	1–0xFFFFE (x 1мс)
S0	Варіанти сну (бітове поле). S0=0x02 – кінцевий пристрій завжди прокидається на час ST, навіть за відсутності UART або RF-обміну. S0=0x04 – кінцевий пристрій спить повний час SNxSP (до трьох тижнів)	E	0–0xFF
WH	Затримка сигналу на пробудження host-пристрою. Кінцевий пристрій після прокидання витримує паузу WH перед відправкою даних по UART або відсиланням в ефір значень портів	E	1–0xFFFF (x 1мс)
SI	Команда примусового переведення кінцевого пристрою в режим сну, не чекаючи закінчення часу ST	E	-
P0	Встановлює період опитування кінцевим пристроєм свого «батька» при очікуванні даних. Значення за замовчуванням 100 мс	E	0–0x3E8

Якщо від дочірнього пристрою не надходить запитів протягом часу 3xSPxSN, то роутер видаляє запис про нього з таблиці дочірніх пристроїв, звільняючи пам'ять для нових підключень.

Незважаючи на велику кількість параметрів, які задають режими роботи сплячого модуля XBee, на практиці в більшості випадків достатньо буде задіяти параметри SM і SP, інші можуть залишатися в значенні

нях за замовчуванням. Наприклад, якщо потрібно щоб модуль прокидався кожні 5 с, встановить SM=4 і SP=1F4.

### Висновки

В роботі було проведено аналіз існуючих мереж бездротової передачі даних В ході якого було визначено, що використання стандарту ZigBee Pro дозволяє створювати коміркові мережі, використовуючи радіопередавачі включені по топології: точка доступу – приймач, або ж як ретрансляційні приймачі з автономним живленням. Так як ZigBee переходить від сплячого режиму до активного за 15 мс, затримка відгуку пристрою може бути дуже низькою, особливо в порівнянні з Bluetooth. Оскільки ZigBee більшу частину часу перебуває в сплячому режимі, який можна детально налаштувати у відповідності з поставленими цілями, рівень споживання енергії може бути дуже низьким, завдяки чому досягається тривала робота від батарей.

Здатність до самоорганізації та самовідтворення, захищеність, висока завадостійкість, низьке енергоспоживання і відсутність необхідності отримання частотного дозволу роблять мережу ZigBee відповідною основою для бездротової інфраструктури систем позиціонування в режимі реального часу (RTLS). А пристрій для технічної діагностики, побудований з використанням такої технології, забезпечує оцінку найважливіших оперативних параметрів стрілок і, в випадках відхилення від норми, сповіщає обслуговуючий персонал.

### Бібліографічний список

1. Бараш, Л. Многообразие стандартов беспроводных технологий [Текст] / Л. Бараш // Компьютерное обозрение. – 2003. – №10. – С. 379-384.
2. [Материалы сайта] [Электронный ресурс]. – [2014]. – режимы доступа: www.grouper.ieee.org.

3. [Материалы сайта] [Электронный ресурс]. – [2014]. – режимы доступа: www.zigbee.org.
4. [Материалы сайта] [Электронный ресурс]. – [2014]. – режимы доступа: www.eetimes.com.
5. [Материалы сайта] [Электронный ресурс]. – [2014]. – режимы доступа: www.instat.com.
6. [Материалы сайта] [Электронный ресурс]. – [2014]. – режимы доступа: www.freescale.com
7. Кразит, Т. Стандарт IEEE 802.15.4 как альтернатива [Текст] / Т. Кразит // Computer-world. – 2004. – № 34. – С. 21-26.
8. Ревич, Ю. Стандарты и технологии (беспроводные системы) [Текст] / Ю. Ревич // Электронные компоненты. – 2003. – № 5. – С. 49-53.
9. Журавлев, А. Ю. Использование беспроводных систем передачи данных в диагностике железнодорожных устройств [Текст] / А. Ю. Журавлев, А. Ю. Лебедев, И. В. Киселев // Материалы международной научно-практической конференции «современные проблемы развития интеллектуальных систем транспорта». – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та железн. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2014. – С. 31-32.
10. [Материалы сайта] [Электронный ресурс]. – [2014]. – режимы доступа: www.wireless.ru.

**Ключові слова:** ZigBee, бездротова мережа, роутер, кінцевий пристрій, дистанційна діагностика.

**Ключевые слова:** ZigBee, беспроводная сеть, роутер, оконечное устройство, дистанционная диагностика.

**Keywords:** ZigBee, wireless network, router, data circuit-terminating equipment, remote diagnostics.

Надійшла до редколегії 10.10.2013