

ЛЕКЦІЯ № 6

з навчальної дисципліни

Тема лекції: ОСОБЛИВОСТІ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

Питання лекції

1. Типові архітектури та топології БСС
2. Режими роботи БСС
3. Протоколи маршрутизації в БСС
4. Сполучення БСС з мережами загального користування
5. Проблеми реалізації БСС
6. Електроживлення вузлів БСС від зовнішнього середовища
7. БСС та Інтернет речей

1 Типові архітектури та топології БСС

Виділяють два типи архітектури бездротових сенсорних мереж: однорідні (однорангові) і ієрархічні (кластерні). Однорідність мережі має на увазі, що всі вузли виконують однакові функції при зборі, обробці та передачі інформації. Цей підхід дозволяє домогтися оптимальної маршрутизації. Пересилання даних відбувається по найефективнішим за деякими критеріями маршрутами, що дозволяє домогтися економії таких важливих ресурсів, як енергія (передача іде по маршруту з найвищим запасом енергії) і час (передача відбувається по найкоротшому маршруту). Для критично важливих даних може бути організована передача по найбільш надійному шляху.

Агрегування даних, якщо необхідно, відбувається у міру проходження повідомлень до координатора. Однак при такій організації мережі формування зв'язків між вузлами відбувається спонтанно, що веде до зіткнень пакетів і виникнення затримок, пов'язаних з виходом із сплячого режиму вузлів, що знаходяться на обраному шляху передачі.

Альтернативним підходом є ієрархічна (деревоподібна) маршрутизація. Вона заснована на поділі мережі на області, які називаються кластерами. кластер утворюють маршрутизатор і кінцеві вузли, у яких він запитує сенсорні дані (рис. 1).

Усередині кожного кластера маршрутизатор відповідає за збір інформації з усього кластера, її обробку і подальшу передачу. Решта вузли кластера здійснюють тільки збір даних і передачу їх маршрутизатора. Таким чином, вузли в ієрархічній мережі не рівноправні. По-перше, агрегування даних відбувається на маршрутизаторах, і, по-друге, пересилання агрегованих даних далі може проводитися тільки маршрутизаторами. Таким

чином, мінімізуються затримки передачі, оскільки маршрутизатори доступні завжди. Зіткнення пакетів виключені завдяки централізованому методу створення посилань. Однак така маршрутизація не надає оптимальних шляхів передачі даних. До того ж сенсорний вузол, що виконує функції маршрутизатора, витрачає значно більше енергії, що призводить до швидкого виснаження його батарей. Існують архітектури, які передбачають використання в якості маршрутизаторів фізично виділених сенсорів, що володіють великими запасами енергії і обчислювальними потужностями, однак цей підхід застосовується лише для вузького ряду додатків. Маршрутизатор кластерів ретранслюють дані один одному і, в кінцевому рахунку, дані передаються координаторові. Координатор зазвичай має зв'язок з IP-мережею, куди і прямують дані для остаточної обробки. У кожній мережі повинно бути, щонайменше, одне повнофункціональний пристрій FFD для роботи в якості координатора.

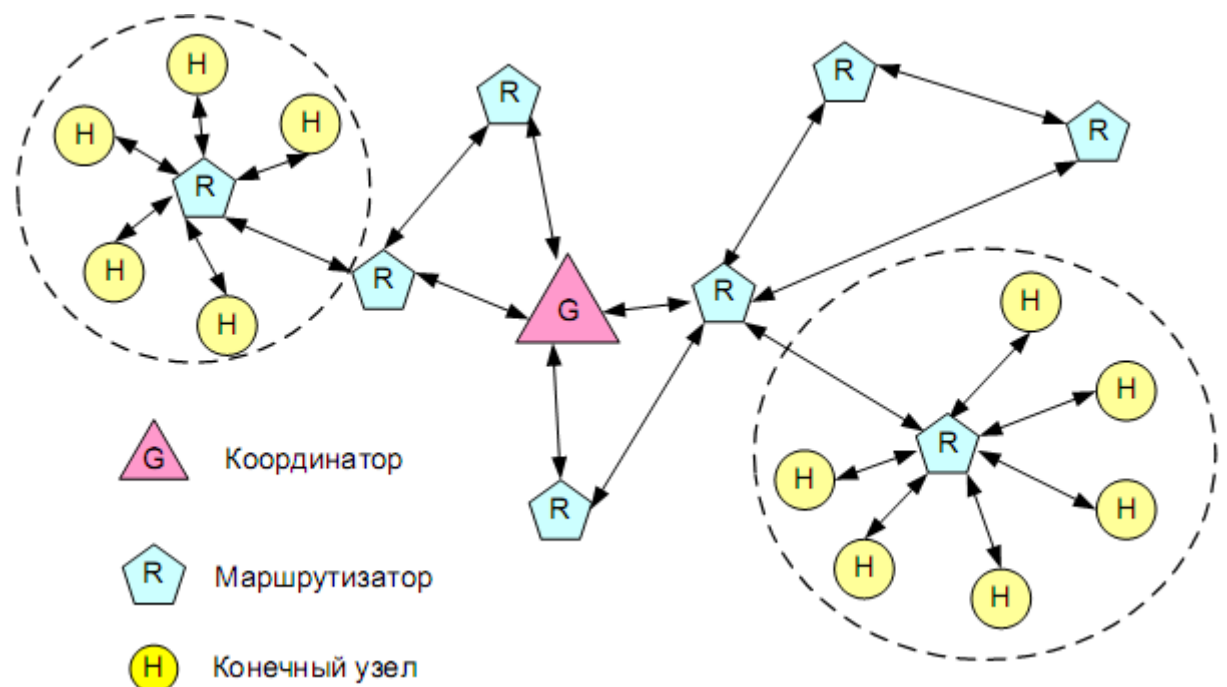


Рис. 1 - Кластерна структура БСС

Можливо також побудова тимчасових **пористих мереж** (рис. 2). У таких мережах функціональні можливості кожного сенсорного вузла однакові. Можливість самоорганізації і самовідновлення мереж комірчастої топології дозволяє в разі виходу частини сенсорів з ладу спонтанно формувати нову структуру мережі. Правда, в будь-якому випадку потрібен центральний функціональний вузол-координатор, який приймає і обробляє всі дані, або шлюз для передачі даних на обробку зовнішньому вузлу.

Спонтанно створювані мережі часто називають латинським терміном Ad Hoc, що означає «для конкретного випадку».

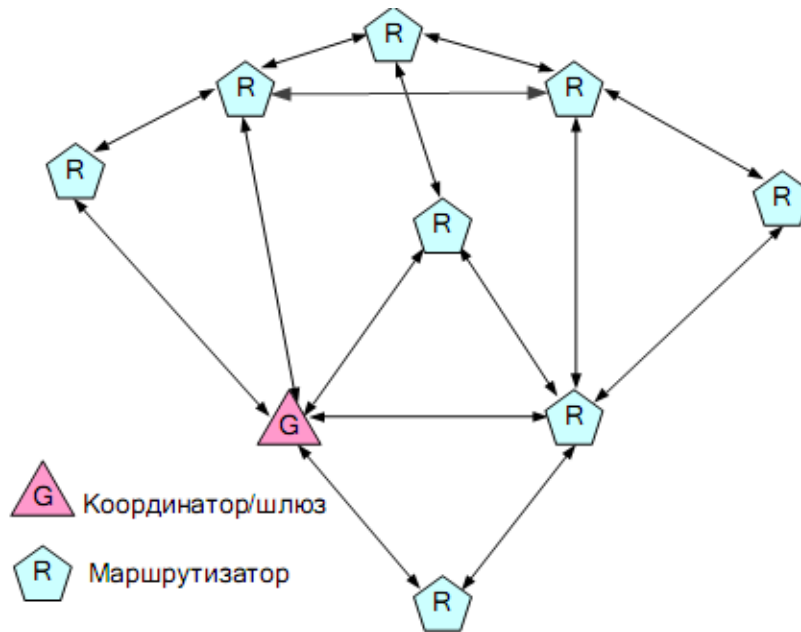


Рис. 2 - Ніздрювата структура БСС

Можливі топології сенсорної мережі наведені на рис. 3. Однорангові мережі можуть формувати довільні топологічні структури (точка-точка, зірка), обмежені тільки дистанцією між кожною парою вузлів. Mesh-мережі (Mesh Topology) - базова повнозв'язна топологія, в якій кожен маршрутизатор мережі з'єднується з декількома іншими маршрутизаторами цієї ж мережі. Характеризується високою стійкістю до відмов, але і більш складною настроюванням.

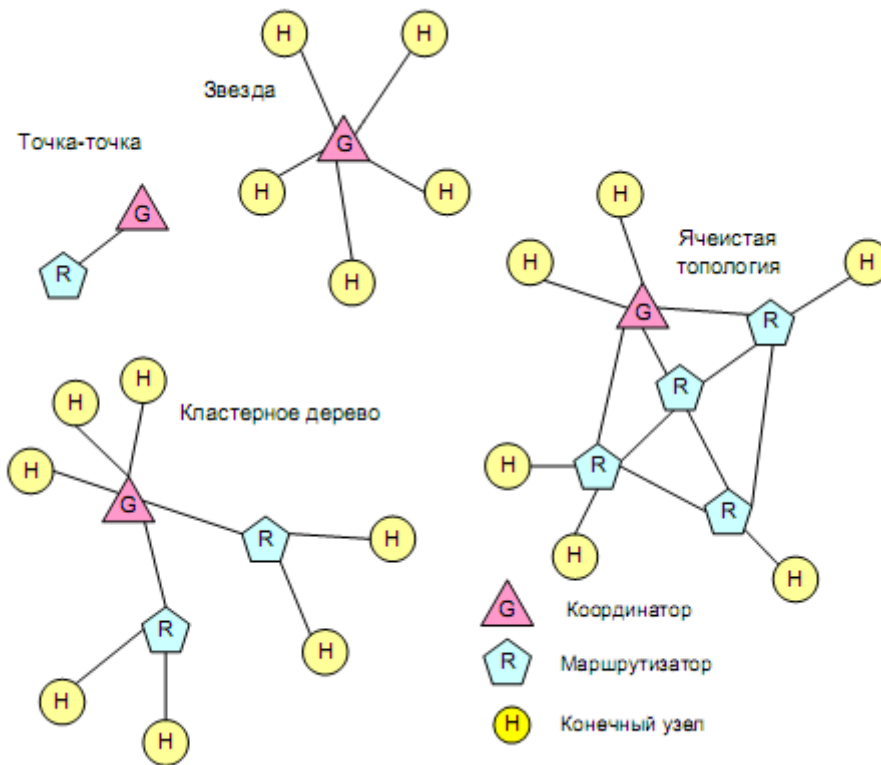


Рис. 3 - Можливі топології сенсорної мережі

Прикладом тимчасової або пирингової мережі (від англ. Peer-to-peer, P2P - рівний до рівного) є кластерне дерево. Мережа типу кластерне дерево є приватним випадком мережі P2P, в якій більшість пристроїв є FFD. Пристрої RFD підключаються до кластеру в якості кінцевих вузлів. Для приєднання до мережі віддалених від координатора нових мережевих пристроїв можуть використовуватися вже під'єднані до мережі FFD в режимі координатора. В цьому режимі вони, як і спочатку координатор PAN, «зазивають» маяками в мережу нові мережеві пристрої. В результаті формується кластер з мережевих пристроїв, які «чують» свого координатора. Проте, вся інформація про кластер доступна координатору PAN. Подібним чином можуть формуватися мультікластери з мережевих пристроїв.

2 Режими роботи БСС

Самою енерговитратній операцією для сенсорних вузлів є передача даних в бездротове оточення. Тому енергозберігаючі форми передачі є ключовим фактором для продовження терміну служби сенсорів, так як він практично цілком залежить від терміну служби батарей.

Збір даних бездротової сенсорної мережею може здійснюватися різними способами в залежності від цільового призначення конкретної мережі. Приймаючи до уваги різні способи використання мережевих ресурсів, бездротові сенсорні мережі можна розділити на класи в залежності від виду їх функціонування і типу цільового додатки:

1. Проактивні мережі. Вузли такої мережі періодично включають свої сенсори і передавачі, знімають показання і передають їх на базову станцію. Таким чином, вони роблять "моментальну фотографію" свого оточення з певною періодичністю і використовуються зазвичай для додатків, що вимагають регулярного моніторингу деяких значень.

2. Реактивні мережі. Вузли реактивних мереж з певною періодичністю знімають показання, однак залишають поза передачею їх, якщо отримані дані потрапляють в певну область нормальних показань. У той же час відомості про несподівані і різкі зміни в показаннях датчиків або їх виході за діапазон нормальних значень негайно передаються на базову станцію. Цей вид мережі призначений для роботи з додатками реального часу.

3. Гібридні мережі. Це комбінація двох перерахованих вище типів, де сенсорні вузли не тільки періодично відправляють зняті дані, але і реагують на різкі зміни в значеннях.

3 Протоколи маршрутизації в БСС

Для визначення маршруту передачі інформації в БСС від кінцевого вузла до вузла-координатора, а також між кінцевими вузлами, використовуються спеціальні протоколи маршрутизації. Протоколи маршрутизації в БСС вирішують наступні завдання:

1. Самоорганізація вузлів мережі (самоконфігурування, самовідновлення та оптимізація).
2. Маршрутизація пакетів даних і адресація вузлів.
3. Мінімізація енергоспоживання вузлів мережі і збільшення загального часу життя всієї мережі.
4. Збір і агрегація даних.
5. Регулювання швидкості передачі і обробки даних в мережі.
6. Максимізація зони покриття мережі.
7. Забезпечення заданої якості обслуговування (QoS).
8. Захист від несанкціонованого доступу.

При виборі шляху передачі інформації в мережі в якості метрик в них можуть бути використані наступні параметри:

- довжина шляху (кількість ділянок переприйому інформації);
- надійність;
- затримка;
- пропускна здатність;
- завантаження;
- вартість передачі трафіку і ін.

Протоколи маршрутизації БСС відповідають за підтримку маршрутів в мережі і повинні гарантувати надійний зв'язок навіть в жорстких несприятливих умовах. Багато протоколи маршрутизації, управління електроживленням, поширення даних, були спеціально розроблені для БСС, де енергозбереження є суттєвою проблемою, на вирішення якої спрямовано протокол. Інші ж були розроблені для загального застосування в бездротових мережах, але знайшли своє застосування і в БСС.



Рис. 4 - Класифікація протоколів маршрутизації БСС

Існує велика кількість протоколів маршрутизації для БСС, класифікувати їх можна за різними ознаками (рис. 4). Залежно від використовуваного режиму роботи мережі, що обумовлює необхідність передачі інформації від вузлів, всі протоколи маршрутизації можна розділити на проактивні (всі

шляхи визначаються заздалегідь, до того як вони будуть потрібні), реактивні (шляху визначаються на вимогу) та гібридні (комбінація перших двох).

Протоколи, що враховують структури мережі, діляться на:

1) протоколи однорівневої (плоскої) (flat-based) маршрутизації - всі вузли БСС мають однакову функціональність, приклади: SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation), Direct Diffusion, Rumor Routing;

2) протоколи ієрархічної (hierarchical-based) маршрутизації - вузли мережі виконують різні функції, вони можуть бути і фізично різними, приклади: LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems), TEEN і APTEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocols), SOP (Self-Organization Protocol);

3) протоколи маршрутизації на основі інформація про місцезнаходження вузла (location-based), приклади протоколів: GAF (Geographic Adaptive Fidelity), GEAR (Geographic and Energy Aware Routing).

Робота протоколу маршрутизації може ґрунтуватися на різних принципах:

1) протоколи маршрутизації з багатьма маршрутами (multipath routing) - використовуються кілька маршрутів від джерела до точки призначення, що підвищує надійність з'єднання, але збільшує накладні витрати і енерговитрати;

2) протоколи маршрутизації «на замовлення» (query-based) - вузол посилає запит на дані в мережу і інший вузол, який має запитувані дані, відповідає на запит;

3) протоколи маршрутизації, засновані на «переговорах» (negotiation routing) між вузлами;

4) протоколи, які враховують якість обслуговування (QoS-based), що дозволяє забезпечити певний рівень послуг в мережі.

У протоколах, спрямованих на агрегацію даних, проміжні вузли, що розташовуються між джерелами інформації та базовою станцією (БС), можуть здійснювати агрегацію даних і посилати БС вже зведені дані. Цей процес дозволяє сенсорним вузлів економити енергію.

Всі протоколи маршрутизації також можна розділити на два види - в одних ініціатором з'єднання є джерело інформації, а в інших - одержувач.

Класифікація протоколів маршрутизації БСС на основі типів вузлів показана на рис. 5.

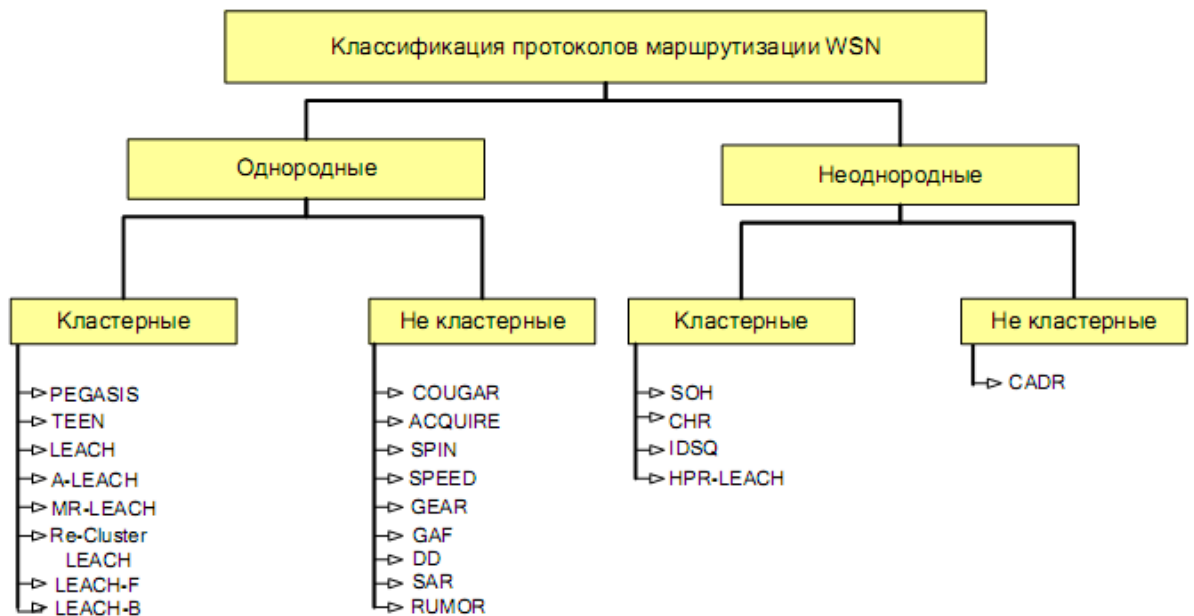


Рис. 5 - Класифікація протоколів маршрутизації БСС

В останні роки активно впроваджуються бездротові децентралізовані, що самоорганізуються мережі, що складаються з мобільних пристроїв MANET (Mobile Ad hoc NETwork). Кожен пристрій такої мережі може незалежно пересуватися в будь-яких напрямках, і, як наслідок, часто розривати і встановлювати з'єднання с сусідами.

Мережі, що самоорганізуються, MANET мають наступні переваги над бездротовими мережами традиційної архітектури:

можливість передачі даних на великі відстані без збільшення потужності передавача;

стійкість до змін в інфраструктурі мережі;

можливість швидкої реконфігурації в умовах несприятливої завадової обстановки;

простота і висока швидкість розгортання мережі.

Однак мобільність вузлів веде до додаткового підвищення динамічності топології мережі і, отже, до можливості обриву зв'язку через перешкоди або включення/вимикання вузла додається ймовірність його переміщення.

Для маршрутизації на мережевому рівні в MANET використовуються спеціальні протоколи, орієнтовані на динамічні мережі (наприклад, підтримувати маршрут, якщо поїхав проміжний вузол, і маршрут зруйнувався):

1) реактивні - знаходять маршрут в тому випадку, коли потрібно передати пакет і для нього немає відомого шляху і намагаються змінити цей шлях, якщо сталася помилка, приклади:

спеціалізований протокол вектора відстані за запитом AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), протокол динамічної маршрутизації джерела DSR (Dynamic Source Routing) і ін.;

2) проактивні (превентивні) - знаходять маршрут заздалегідь для всіх можливих пар джерело-приймач і періодично оновлюють інформацію про маршрутизацію для підтримки шляхів, приклади: протокол оптимізованої маршрутизації стану з'єднання OLSR (Optimized Link-State Routing) і ін.

Перевагу одному або іншому виду протоколів може бути віддано тільки з урахуванням обстановки і швидкостей руху абонентів. Наприклад, для автомобільної версії MANET має сенс використовувати реактивні протоколи.

Мережі MANET включають Ad hoc мережі для транспортних засобів VANET (Vehicular Ad hoc Network), в яких кожен бере участь автомобіль перетворюється в бездротової маршрутизатор або вузол, що дозволяє автомобілям підключатися один до одного на відстані і створювати мобільну мережу. Стандарт для мереж VANET розробляється в рамках робочої групи IEEE 802.11р. Технічні засоби стандарту IEEE 802.11р повинні функціонувати на швидкості до 200 км/год і на відстані до 1 км. Фізичний рівень і MAC підрівень базуються на стандарті IEEE 802.11a. Частотний діапазон для США включає спектр від 5,859 до 5,925 ГГц, для Європи рекомендується використання двох піддіапазонів шириною по 10 МГц кожен: 5,865 - 5,875 ГГц і 5,885 - 5,895 ГГц.

Можливості по взаємодії транспортних засобів між собою і з мережею зв'язку загального користування в найближчі роки можуть привести до утворення нового, дуже масштабного сегмента Інтернету речей. Уже зараз сучасний автомобіль інтегрує в себе GPS / GLONASS приймач, різні сенсори, бортовий комп'ютер. Однак завдання, яке ставиться при створенні VANET, дещо інше. Архітектура мережі VANET передбачає взаємодію автомобіля, як з іншими автомобілями, так і з придорожньої мережею. При цьому виділяється три групи послуг:

1. Забезпечення безпеки - допомога водію (навігація, запобігання зіткнень і зміна смуг), інформування (про обмеження швидкості або про зону ремонтних робіт), попередження (післяаварійні, про перешкоди або стані дороги).

2. Підвищення ефективності управління автомобільним трафіком - скорочення тривалості поїздки, споживання палива.

3. Підвищення рівня комфорту пасажирів і водіїв - інформація про місцезнаходження автомобіля, про поточний трафіку на дорогах, про погоду, можливість здійснення P2P з'єднань, в тому числі з власним будинком через придорожню мережу, а також інформація від придорожньої мережі про готелі, станціях заправки, меню в ресторанах і так далі.

4 Сполучення БСС з мережами загального користування

В даний час для сполучення БСС з мережами зв'язку загального користування (ССОП) зазвичай використовується протокол бездротових персональних мереж на базі мережевого протоколу IPv6 з низьким енергоспоживанням 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks), запропонований IETF, який дозволяє інтегрувати сенсорні мережі

в існуюче сімейство мереж стека протоколів TCP / IP. Даний протокол дозволяє передавати IP-пакети по верхньому стандарту IEEE 802.15.4 способом, що задовольняє відкритим стандартам (протокол IPv6). При цьому забезпечує взаємодію з іншими IP-каналами і пристроями. Протокол 6LoWPAN створений для малопотужних бездротових персональних мереж (LoWPANs) і описаний в документах RFC4919 і RFC4944. В архітектурі мережі 6LoWPAN (рис. 6) визначені три типи логічних пристроїв (крайовий вузол, маршрутизатор і шлюз), а також три види мереж: «Проста LoWPAN», «Розширена LoWPAN» і «Ad hoc LoWPAN». Як видно з малюнка, «Ad hoc LoWPAN» не підключена до ССОП, «Проста LoWPAN» підключена до ССОП через один шлюз, а «Розширена LoWPAN» включає в себе кілька шлюзів, пов'язаних з ССОП і один з одним за допомогою магістральної лінії зв'язку.

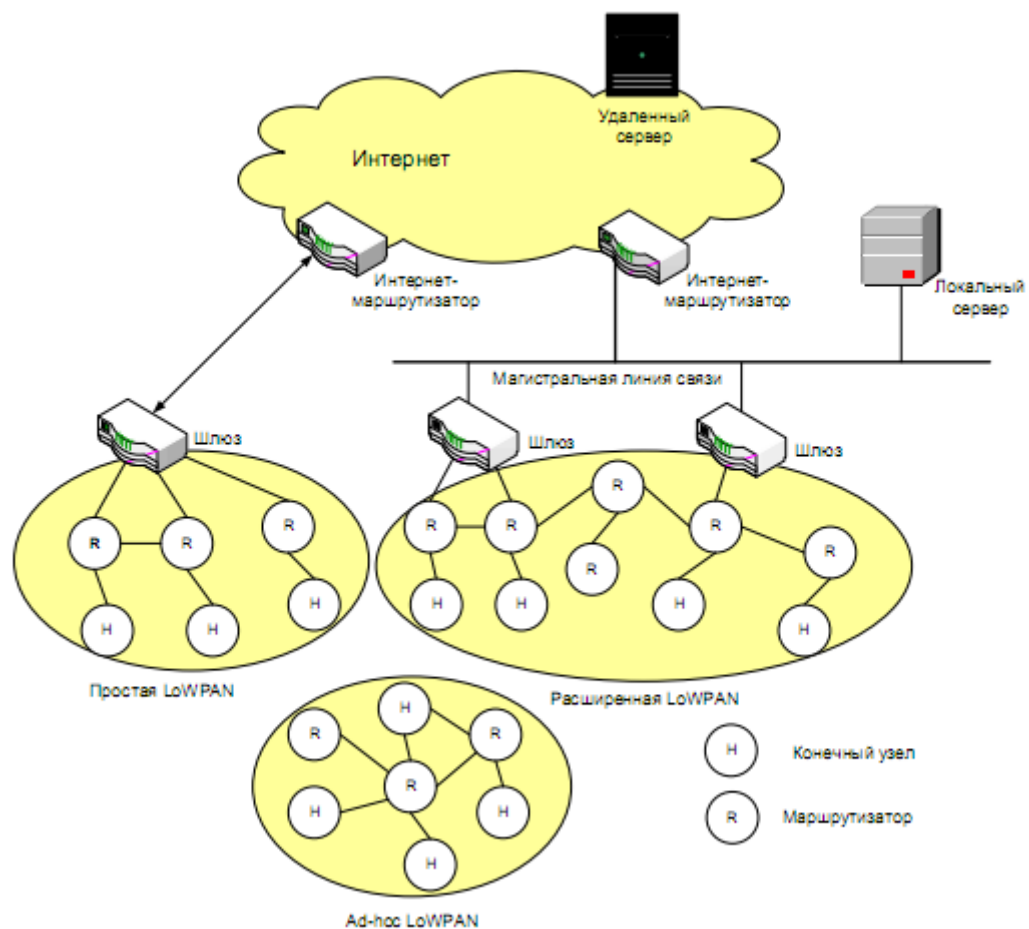


Рис. 6 - Архітектура мережі 6LoWPAN

5 Проблеми реалізації БСС

При практичній реалізації бездротових сенсорних мереж існує ряд проблем:

1. Проблема енергоспоживання.

Обмеження по енергоспоживанню пов'язаний з тим, що сенсори працюють від джерела живлення з обмеженим лімітом енергії (зазвичай батарея). Чим рідше вони будуть замінюватися або заряджатися, тим нижчу вартість буде мати їх обслуговування. Також енергоспоживання є важливим обмеженням при використанні сенсорів, доступ до яких ускладнений, отже, джерело живлення не може бути замінений або заряджаючи. Для зменшення енергоспоживання зазвичай передбачається відключення передавачів сенсорних вузлів, коли немає необхідності передачі інформації.

На мережевому рівні використовуються оптимальні шляхи передачі інформації від сенсорного вузла до координатора (базової станції), з огляду на число проміжних вузлів, необхідну енергію і доступну енергію. Крім мережевого протоколу на споживання енергії впливає конструкція вузлів (наприклад, маленький розмір пам'яті, ефективність перемикань між завданнями), програмне забезпечення, механізми захисту і навіть робочі додатки.

2. Проблема самоврядування.

Сенсорні мережі часто повинні працювати у віддалених областях і в жорстких умовах, без можливості їх обслуговування і ремонту. Тому, сенсорні вузли повинні конфігуруватися самостійно, взаємодіяти з іншими вузлами, адаптуватися до полумок змін навколишнього середовища без втручання людини.

3. Проблема бездротового з'єднання.

Вибір бездротового з'єднання накладає ряд обмежень на реалізацію сенсорних мереж. Наприклад, загасання сигналу обмежує відстань передачі інформації. Так зв'язок між потужностями сигналів переданої і прийнятої інформацією описується законом зворотного квадрата відстані:

$$P_{\text{пр}} \sim P_{\text{прд}} / D^2,$$

де $P_{\text{пр}}$ - потужність прийнятого сигналу;

$P_{\text{прд}}$ - потужність переданого сигналу;

D - відстань між передавачем і приймачем.

Отже, збільшення відстані між сенсорним вузлом і маршрутизатором/координатором призводить до збільшення потужності сигналу, що передається.

Тому більш ефективно, з точки зору витрат енергії, розділити великі відстані передачі інформації в сенсорних мережах на кілька невеликих.

4. Проблема децентралізованого управління.

Алгоритми побудови багатьох сенсорних мереж будуються з централізованого принципом. При децентралізованому управлінні сенсорні вузли повинні обмінюватися інформацією з сусідніми вузлами, щоб згенерувати рішення про комутації вузлів, без глобальної інформації про всю мережі. Внаслідок цього децентралізовані алгоритми можуть бути неоптимальними, але більш ефективними щодо енергії, ніж централізовані.

Наприклад, при централізованому управлінні базова станція може опитувати всі сенсорні вузли, приймати від них інформацію, повідомляти кожному вузлу свій маршрут передачі інформації. При частій зміні мережі втрати будуть значні.

Децентралізований підхід дозволяє кожному вузлу робити власне рішення при наявності невеликої інформації (список сусідніх пристроїв, що включає інформацію про відстані до базової станції). В даному випадку втрати на управління будуть значно зменшені.

5. Проблема конструкції.

Головною метою бездротових сенсорних мереж є створення маленьких, дешевих і ефективних пристроїв. Через вимоги до низького споживання енергії типовий сенсорний вузол має невеликі швидкості виконання операцій і обсяги інформації, що зберігається. Також через це небажано використання деяких пристроїв, таких як GPS-приймачі. Обмеження за розмірами впливає на структуру протоколів і алгоритмів, реалізованих в бездротових сенсорних мережах. Наприклад, таблиця всіх маршрутів в мережі може бути слушком великий і не поміститися в пам'яті вузла. Тому тільки невелика частина інформації (наприклад, список сусідніх вузлів) може зберігатися в пам'яті вузла.

6. Проблема безпеки.

Віддалене розташування сенсорів і їх автоматична робота збільшує їх незахищеність до стороннім вторгненням і атакам. При бездротовому з'єднанні досить легко для порушника перехопити пакети, що передаються сенсорним вузлом. Наприклад, найбільш велика загроза здійснення атаки «відмови в обслуговуванні» (denial-of-service), мета даної атаки порушити коректне функціонування сенсорної мережі. Це може бути досягнуто за допомогою різних способів, наприклад, при подачі потужного сигналу, який заважає сенсорним вузлів обмінюватися інформацією («білий шум» або jamming attack). Є різні варіанти захисту систем від зловмисників, але для багатьох з них необхідні високі вимоги до апаратних ресурсів, що важкодосяжно на жорстко обмежених по багатьом вимогам сенсорних вузлах.

Отже, сенсорні бездротові мережі вимагають нових рішень для створення ключів, їх поширення, ідентифікації та захисту вузлів.

6 Електроживлення вузлів БСС від зовнішнього середовища

Одним з основних вимог, що пред'являються до вузлів сенсорної мережі, є тривалий час їх автономної роботи. Завдання зменшення енергоспоживання може вирішуватися за рахунок оптимізації конструкції і режимів роботи аналогових і цифрових схем вузлів, а також за рахунок вилучення енергії, необхідної для роботи цих схем, з довкілля. В даний час в усьому світі ведеться активний пошук нових екологічних і необмежених ресурсів енергії, які дозволять мережевим пристроям позбутися батарей або дротів і

розробити автономні бездротові сенсорні мережі з теоретично необмеженим терміном служби.

В навколишньому середовищі існують чотири основних джерела енергії: механічна енергія (вібрації, деформації), тепла енергія (температурні перепади або зміни), енергія випромінювання (сонце, інфрачервоні промені, радіочастоти) і хімічна енергія (хімія, біохімія). Ці джерела характеризуються різною щільністю потужності (рис. 7).

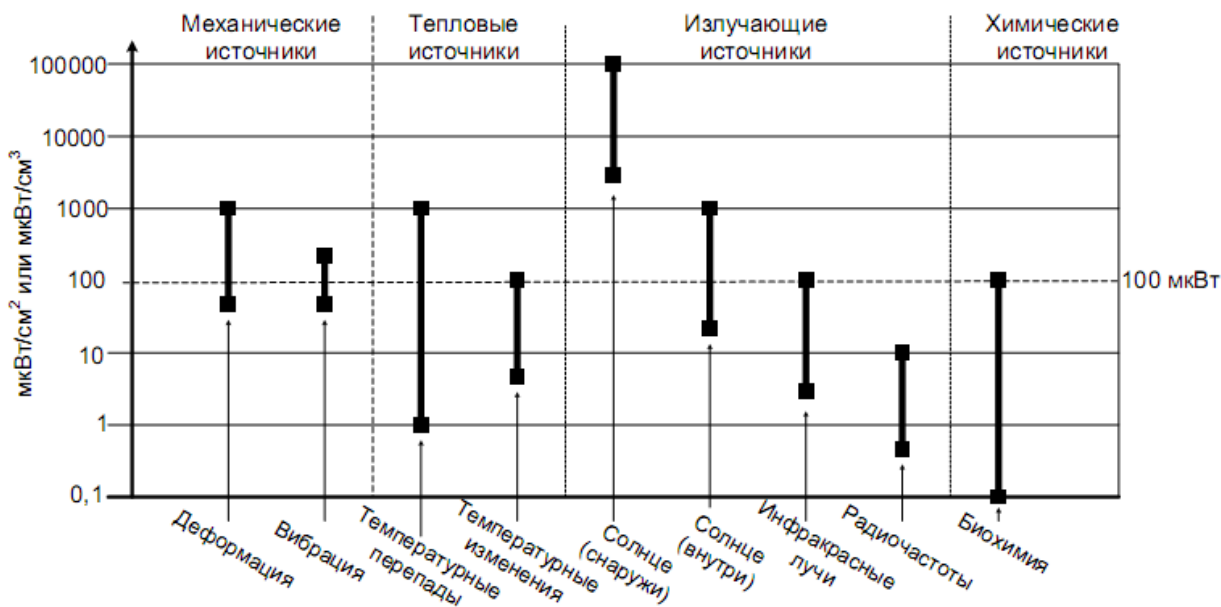


Рис. 7 - Щільність потужності (до перетворення) для різних типів джерел енергії із зовнішнього середовища

Малюнок показує, що значення вихідної потужності 10-100 мкВт є прийнятним при розмірах джерела в 1 см^2 або 1 см^3 . Отримання енергії від сонця вважається найбільш потужним (навіть якщо значення, наведені на рис. 8, повинні бути помножені на вагові коефіцієнти для перекладу ККД, рідко перевищують 20% в фотоелементах). На жаль, отримання сонячної енергії неможливо в темних ділянках (наприклад, в приміщеннях). Аналогічно неможливо отримувати енергію від температурних перепадів, якщо цих перепадів немає або від неіснуючих вібрацій. Як наслідок, джерело зовнішньої енергії повинен бути обраний відповідно до місцевим середовищем, навколишнього вузла бездротової сенсорної мережі, тобто не існує універсального джерела енергії із зовнішнього середовища.

Для живлення вузлів сенсорної мережі від навколишньої енергії необхідно знизити споживання енергії датчиками (сенсорами/актуаторами), мікроконтролером і радіо-передавачем. В останні роки значний прогрес в цьому напрямку було досягнуто виробниками мікроконтролерів і радіочастотних чипів (Atmel, Microchip, Texas Instruments і ін.) Як для робітника, так і для холостого режиму. Приклад типового споживання енергії вузлом бездротових сенсорних мереж наведено на рис. 8.

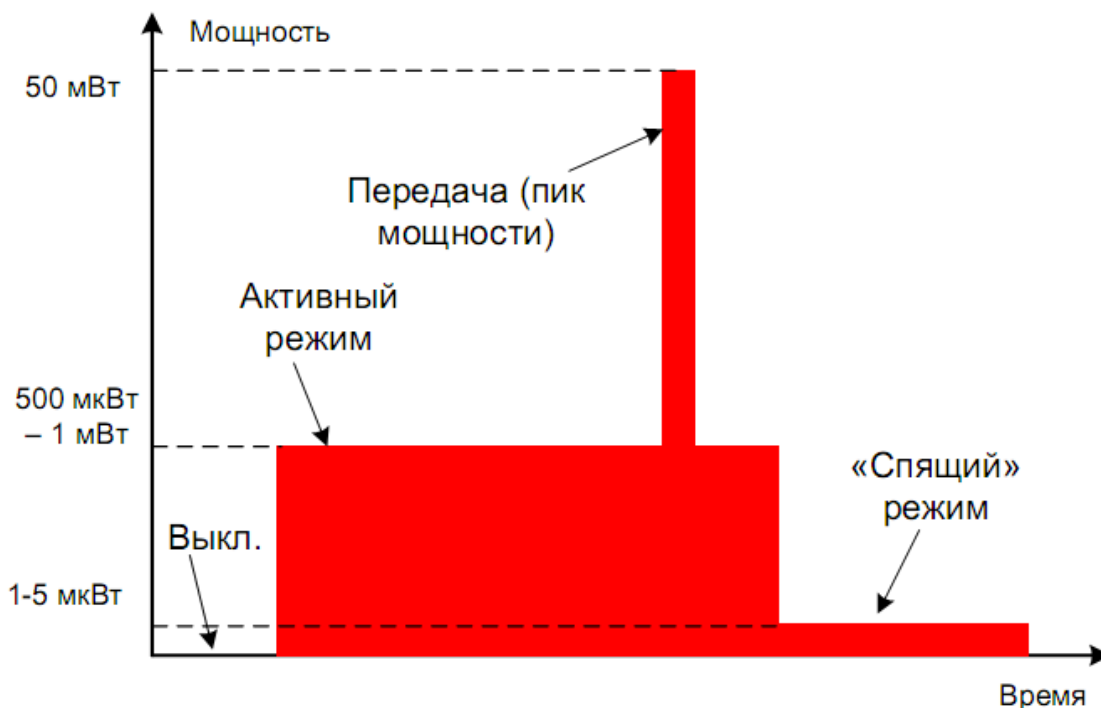


Рис. 8 - Графік споживання енергії вузлом БСС

Можна виділити три типових значення споживаної потужності:

- 1) 1-5 мкВт: споживання енергії в «сплячому» режимі;
- 2) 500 мкВт - 1 мВт: споживання енергії в активному режимі;
- 3) 50 мВт: пік передачі енергії.

Аналіз наведеної діаграми дозволяє зробити наступні висновки. По-перше, мінімальна потужність джерела енергії із зовнішнього середовища для побудови життєздатних бездротових вузлів повинна бути порядку 1-5 мкВт, що відповідає достатній величині для холостого режиму мікропроцесора і радіочастотного чіпа.

По-друге, сучасні джерела енергії із зовнішнього середовища не можуть забезпечувати бездротові сенсорні мережі енергією, достатньою для активного режиму (споживання енергії в 500 мкВт - 1 мВт проти 10-100 мкВт для вихідної потужності таких джерел). Однак, завдяки ультранизьким споживання енергії в сплячому режимі, бездротові сенсорні мережі, що живляться від зовнішнього середовища, можуть використовувати переривчастий робочий цикл, зображений на рис. 9. Енергія зберігається в буфері (а) (конденсатори, батареї) і використовується для виконання вимірювального циклу, як тільки енергії в буфері стає досить (б і в). Далі система знову повертається до сплячого режиму (г), чекаючи нового вимірювального циклу.

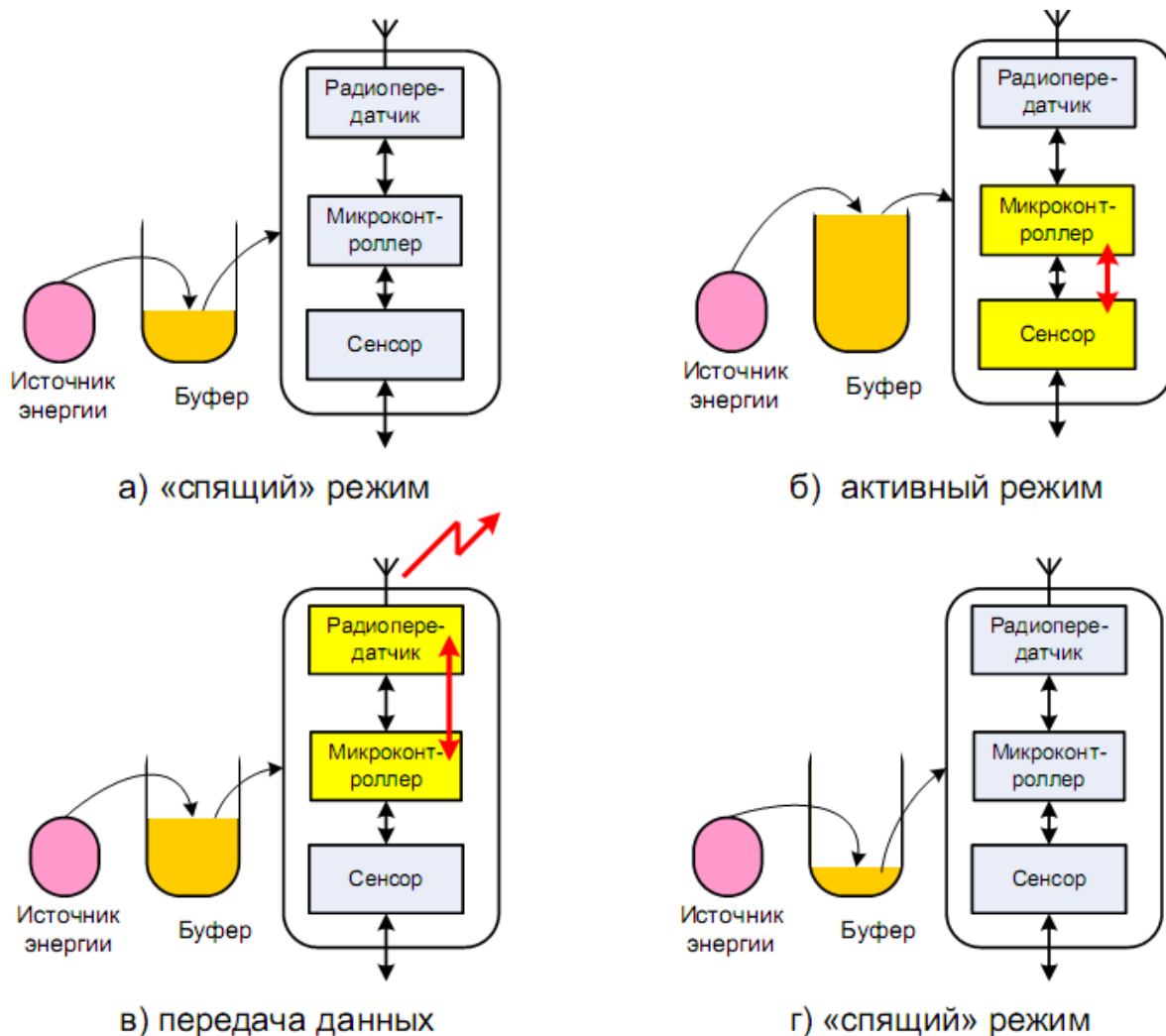


Рис. 9 - Рабочий цикл в бездротовій сенсорній мережі

Таким чином, використовуючи енергію із зовнішнього середовища можливо харчування будь-яких додатків, навіть самих неощадливих. Основною проблемою є адаптація частоти вимірювального циклу до безперервно вироблюваної енергії. Середнє енергоспоживання сенсорних вузлів (P) відповідає загальній кількості енергії, необхідної для одного вимірювального циклу (W), помноженому на частоту цієї дії (f):

$$P = W f. \quad P = W \times f.$$

Ця проста зв'язок між P , W і f проілюстрована на рис. 3.16. Використовуючи логарифмічні масштаби по осі абсцис (енергія в Джоулях) і по осі ординат (частота вимірювань), середнє енергоспоживання 100 мкВт показано прямою лінією з коефіцієнтом нахилу -1. Наприклад, виконання повного циклу роботи сенсорного вузла (вимір + перетворення + передача) вимагає 250-500 мкДж. Отже, безперервно отримуючи 100 мкВт потужності, можна виконувати повний цикл роботи вузла сенсорної мережі кожні 1-10

секунд (0,1-1 Гц). Це підходить багатьом промисловим потребам, особливо тим, де обслуговування передбачувано.

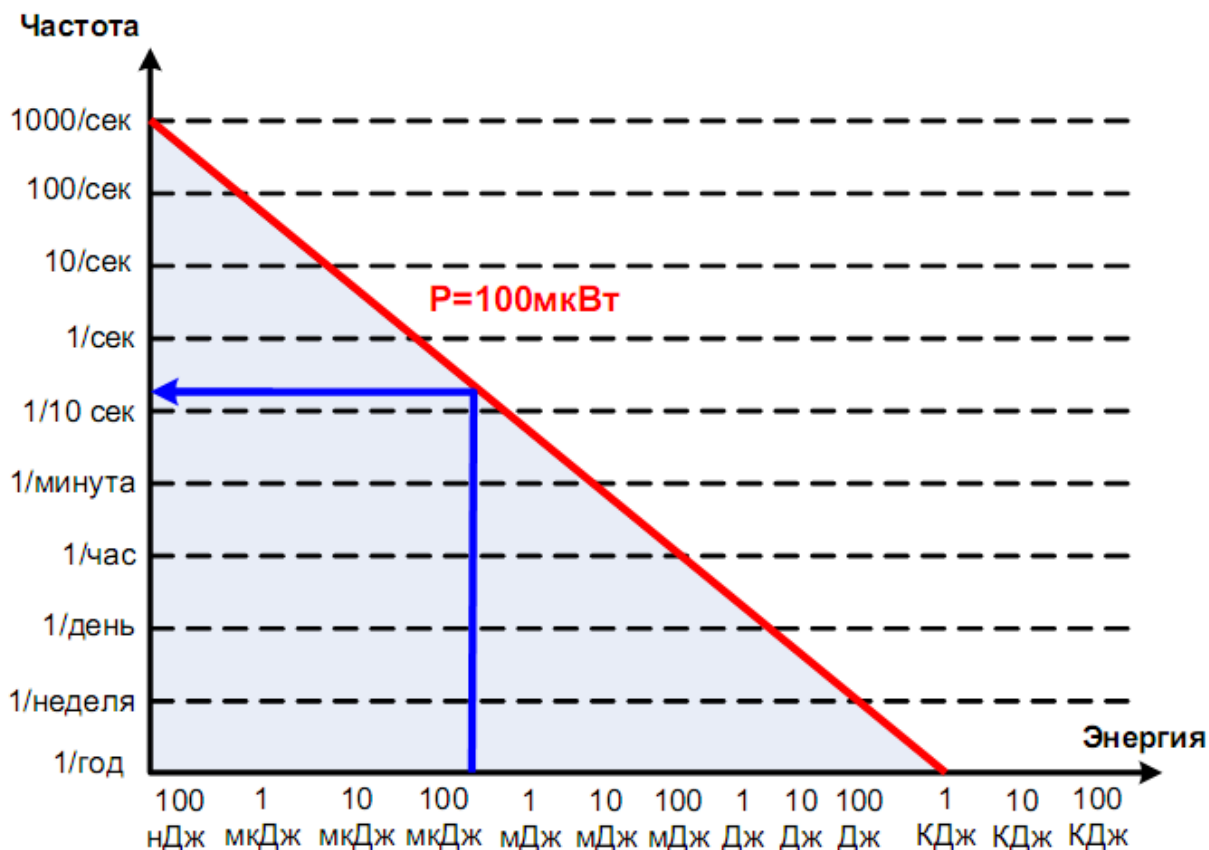


Рис. 10 - Зв'язок потужності, енергії та частоти

В цілому отримання енергії із зовнішнього середовища - за винятком фотоелемента - тільки розвивається галузь, ще не пристосована для промислового застосування. Проте, поліпшення існуючих технологій може привести в перспективі до життєздатним рішенням електроживлення автономних бездротових сенсорних мереж.

7 БСС та Інтернет речей

Завдяки таким характеристикам БСС, як мініатюрність вузлів, низьке енергоспоживання, вбудований радіоінтерфейс, достатня обчислювальна потужність, порівняно невисока вартість, стало можливим їх широке використання в багатьох сферах людської діяльності з метою автоматизації процесів збору інформації, моніторингу та контролю характеристик різноманітних технічних і природних об'єктів.

БСС доцільно застосовувати в наступних предметних областях Інтернету речей:

- моніторинг телекомунікаційної інфраструктури мереж;
- моніторинг транспортних магістралей (залізниць, метрополітену та ін.), нафто- і газопроводів, інженерних мереж енерго- і теплопостачання;

- контроль і аналіз транспортних вантажопотоків;
- екологічний, біологічний і медичний моніторинг;
- автоматизація систем життєзабезпечення в системах класу Умний дом;
- виявлення і попередження надзвичайних ситуацій (моніторинг сейсмічної активності і вулканічної діяльності, аналіз атмосфери і прогноз погоди для своєчасного попередження про настання стихійних лих) та інші.

Контрольні питання по лекції 6

1. Які типові топології використовуються в БСС? У чому їхня відмінність?
2. У яких режимах може працювати БСС?
3. Які завдання вирішують протоколи маршрутизації в БСС?
4. Поясніть принципи класифікації протоколів маршрутизації в БСС.
5. Вкажіть особливості реалізації бездротових систем, що самоорганізуються мереж мобільних пристроїв MANET.
6. Як сполучаються БСС з мережами загального користування?
7. Перерахуйте основні проблеми практичної реалізації БСС.
8. Порівняйте по щільності потужності (до перетворення) різні типи джерел енергії із зовнішнього середовища.
9. Вкажіть режими роботи вузла БСС і величини споживаної при цьому потужності.
10. Поясніть, як можна використовувати енергію із зовнішнього середовища для електроживлення вузлів БСС.
11. Наведіть приклади використання БСС для реалізації концепції Інтернету речей.