

УДК 004.732-025.27

DOI: 10.31673/2412-9070.2024.020913

Л. В. ДАКОВА¹, канд. техн. наук, доцент;С. Ю. ДАКОВ², канд. техн. наук, доцент;Н. В. БЛАЖЕННИЙ¹, ст. викладач;В. О. ВОЛОШИН¹, аспірант,¹ Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ² Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ПРОТОКОЛ МАРШРУТИЗАЦІЇ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ

Розглянуто питання використання протоколу HABRP для його застосування в безпроводових сенсорних мережах. Запровадження протоколу HABRP дає можливість підвищити ефективність безпроводових сенсорних мереж, зокрема їх енергоефективність. Тому енергоефективність і простота протоколу HABRP роблять його чудовим кандидатом для використання в безпроводових сенсорних мережах.

Протокол HABRP порівняно з протоколами SEP та LEACH показав свою перевагу як у гетерогенних, так і в однорідних середовищах. HABRP поліпшує стабільну ділянку ісражії кластеризації та зменшує ймовірність відмови вузлів, збільшуючи строк служби мережі завдяки збалансованому розсіюванню енергії окремого вузла. Щоб подовжити строк служби та підвищити продуктивність мережі, маршрутизація в HABRP працює за циклами, і кожен раунд має дві фази: фазу налаштування і фазу стабільного стану.

Ключові слова: HABRP; протокол; безпроводові сенсорні мережі; енергоефективність.

Вступ

Постановка проблеми. Останнім часом набули популярності мережі самоорганізації, які відрізняються можливістю з'єднання терміналів у будь-якому місці та в будь-який час без потреби централізованої мережної інфраструктури. Мобільні самоорганізовані мережі є перспективним напрямом розвитку інформаційно-комунікаційних систем. Проте слід брати до уваги проблеми, що впливають із самої природи таких мереж: мобільні вузли призводять до збільшення динамічності топології мережі через можливість обриву зв'язку та ймовірність переміщення. Обмежений запас джерел живлення вузлів потребує ретельного керування енергоспоживанням у процесі проєктування апаратних засобів і протоколів.

Енергоощадна конструкція в самоорганізованих мережах є складнішою і важливішою, ніж в інших безпроводових мережах. Відсутність інфраструктури вимагає, щоб мобільні вузли виступали як маршрутизатори, що збільшує трафік і, отже, енергоспоживання. Також в енергозберігальному режимі слід зважати на різні критерії продуктивності мережі, зумовлені різними протоколами та обмеженнями потужності.

Аналіз останніх досліджень. З огляду на останні досягнення в технології та швидкий розвиток виробництва малих і доступних датчиків стало можливим технічно і економічно ефективно їх використовувати. Ці електронні датчики, маючи високу чутливість, здатні вимірювати параметри навколишнього середовища та перетворювати здобуті дані в електронний сигнал, котрий передаєть-

ся по безпроводовому каналу. Після оброблення цього сигналу можна отримати інформацію щодо властивостей об'єктів або подій, які відбуваються біля датчика. Застосування великої кількості таких датчиків, котрі можуть контролювати чималу територію та обмінюватися даними безпроводовим зв'язком, формує єдину безпроводову сенсорну мережу (BSM).

Протоколам маршрутизації в безпроводових сенсорних мережах присвячено безліч наукових праць. Так, в [1] розглянуто протокол кластеризації з огляду на програми для безпроводових сенсорних мереж щодо забезпечення керування QoS. У цій статті досліджується протокол LEACH-APP (новий протокол кластеризації на основі LEACH) який, беручи до уваги мережну програму, спрямовано на забезпечення кращого загального керування QoS [2]. Тут докладно описано пропозицію та надано практичне дослідження, щоб пояснити її роботу. Також оцінено продуктивність з погляду двох важливих показників QoS: пропускну здатності та затримки і порівняно з продуктивністю оригінального протоколу. Експерименти показують, що LEACH-APP збільшує пропускну здатність приблизно на 250% і зменшує затримку майже на 80%, загалом забезпечуючи більш гнучке та потужне керування QoS. І це вкотре показує, що завжди є можливість працювати над удосконаленням уже наявних протоколів чи створення нових.

Постановка задачі. Дослідити протокол HABRP (Hierarchical Adaptive Balanced energy efficient Routing Protocol) як можливий протокол для

використання в безпроводових сенсорних мережах для підвищення їх енергоефективності.

Основна частина

Методи маршрутизації є найважливішою проблемою для мереж з обмеженими ресурсами. Зростання обчислювальної потужності технології БСМ [3] потребує, щоб ці сенсорні вузли були оснащені переважно для виконання більш складних функцій.

Безпроводова сенсорна мережа — це розподілена система, яка здатна витримувати відмову окремих компонентів. Водночас кількість елементів може коливатися від сотень до десятків тисяч сенсорних вузлів. Сенсорні вузли взаємодіють не лише між собою, а й з базовою станцією, що дає змогу їм передавати зібрані дані для віддаленого оброблення, аналізу та зберігання. Крім того, можлива функція ретрансляції повідомлень між різними складовими мережі, що розширює зону покриття до кількох кілометрів. Отже, узагальнену структурну схему безпроводової сенсорної мережі можна подати як дві групи давачів, котрі контролюють різні ділянки простору та підімкнені до інтернету через базові станції.

Можливості сенсорних вузлів у безпроводових сенсорних мережах значно різняться. Наприклад, прості давачі вимірюють лише один фізичний параметр, тоді як більш складні давачі здатні використовувати різні методи зондування (наприклад, акустичні, оптичні, магнітні). Їхні можливості передавання даних також можуть варіюватися, застосовуючи ультразвук, інфрачервоні або радіочастотні технології з різною швидкістю передавання та затримкою. Коли прості давачі лише збирають та передають інформацію, більш потужні пристрої з вищими обчислювальними та енергетичними ресурсами можуть самостійно обробляти та агрегувати дані. Це дає їм змогу реалізовувати додаткові функції, зокрема утворення першочергових шляхів зв'язку для з'єднання обмежених ресурсів сенсорних вузлів з базовою станцією. Однак додаткові функції можуть призводити до зайвої витрати енергії та скорочення часу життя мережі. У разі вичерпання джерела живлення всі елементи вимикаються для збереження енергії.

Кожен давач переважно обмежений рівнем енергії, потужністю оброблення та здатністю сприйняття. Тобто, мережа цих давачів створює більш надійну і точну мережу. Було проведено багато досліджень БСМ, які показують, що ця технологія постійно знаходить нове застосування в різних сферах, наприклад у секторах охорони здоров'я, де пацієнти можуть носити невеликі давачі для реєстрації фізіологічних даних, а також у розгортанні в зонах, схильних до стихійних лих, для моніторингу навколишнього середовища. Сто-

совно підтримання надійного доставляння інформації агрегація даних і злиття інформації потрібні для ефективного зв'язку між цими сенсорними вузлами. До приймачів має надходити лише оброблена та стисла інформація, щоб зменшити енергію зв'язку, подовживши ефективний строк служби мережі з оптимальним доставлянням даних.

Подовження строку служби мережі залежить від ефективного керування енергетичним ресурсом сенсорного вузла. Тому енергоспоживання є одним із найважливіших питань проектування БСМ. Протоколи ієрархічної маршрутизації більш відомі з погляду енергоефективності. Використовуючи техніку кластеризації, протоколи ієрархічної маршрутизації значно мінімізують споживання енергії на збір і розповсюдження даних. Застосування протоколу ієрархічної адаптивної збалансованої енергоефективної маршрутизації дає змогу подовжити період стабільності і збільшити строк служби БСМ. У БСМ деякі високоенергетичні вузли, які називають вузлами NCG (*Normal node/Cluster Head/Gateway* — звичайний вузол/голова кластера/шлюз), вибираються «головами кластера» для агрегування даних своїх членів кластера та передання їх вибраним шлюзам, які потребують мінімальної енергії зв'язку для зниження енергоспоживання голови кластера та зменшення ймовірності відмови вузлів, а також належним чином збалансовують розсіювання енергії. HAVRP [4] є більш ефективним у подовженні строку служби мережі та періоду стабільності порівняно з LEACH (*Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy*) [5] і SEP (*Stable Election Protocol*) [6].

Протокол LEACH є першим протоколом ієрархічної маршрутизації, який запропонував злиття даних, що має важливе значення для кластеризації протоколів маршрутизації. Багато протоколів ієрархічної маршрутизації поліпшені на основі протоколу LEACH. Протокол SEP є вдосконаленням протоколу LEACH, який використовує стратегію маршрутизації, базуючись на кластеризації на основі неоднорідності сенсорного вузла в мережах. У цьому протоколі та техніці сенсорні вузли, які мають високу енергію, називаються вдосконаленими вузлами, а ймовірність того, що такі вузли стануть головою кластера (*Cluster Head (CH)*), зростає порівняно зі звичайними вузлами, котрі мають нижчу енергію проти розширених вузлів у мережі. Стратегія SEP використовує розподілений метод для вибору CH у БСМ. У цьому протоколі взято до уваги неоднорідність і ймовірності вибору CH вузлів, що зважаються за початковою енергією кожного вузла порівняно з іншими вузлами в БСМ. Отже, протокол SEP базується переважно на двох рівнях неоднорідності вузлів: як звичайні вузли, так і розширені вузли.

Переваги протоколу SEP: немає потреби в будь-якій ідентифікації або глобальному знанні енергії сенсорного вузла в техніці SEP під час кожного раунду вибору голови кластера.

Обмеження протоколу SEP: вибір голови кластера серед вузлів давачів не є динамічним, а отже, вузли, які розташовані далеко від потужних вузлів, загинуть першими.

Як порівняти з оригінальним LEACH, то робота протоколу LEACH-APP (згадуваного раніше) складається з кількох раундів, кожен з яких розділено на дві фази: фазу налаштування та фазу стабільності. На етапі налаштування вузли окремо визначають, чи будуть вони головою кластера для цього конкретного раунду на основі ймовірного алгоритму. Якщо так, вони рекламують цю інформацію решті мережі. Вузли, що не є СН [7], отримують ці рекламні повідомлення, вирішують, до якого кластера приєднатися на основі близькості, та інформують відповідний СН. Після цього СН створює розклад TDMA (*Time Division Multiple Access*) [8] для всіх вузлів у своєму кластері та передає його назад їм. Робота фази налаштування в LEACH-APP дуже схожа на роботу оригінального LEACH. Єдина відмінність, притаманна LEACH-APP, полягає в тому, що пакет запиту JOIN [9], надісланий від вузлів до СН, має додаткове поле, яке вказує рівень пріоритету вузла, що запитує. Це дає можливість СН визначити, скільки додаткових слотів (якщо такі є) слід надати кожному конкретному вузлу в розкладі TDMA.

У цей момент починається стійка фаза. Вузли передають свої пакети лише у виділеному для них слоті розкладу TDMA і залишаються в стані сну решту часу. Рішення та дії, ужиті вузлами відповідно до їхніх ролей, ілюструє блок-схема на рис. 1. Також тут відображено повідомлення, якими обмінюються на етапах налаштування та стаціонарного режиму.

Переваги протоколу LEACH:

- стратегія протоколу LEACH повністю розподілена, вона мінімізує споживання енергії в 4-8 разів під час передавання пакетів даних із кількома стрибками;

- усі сенсорні вузли в мережі вимикаються приблизно одночасно через рівномірний розподіл роботи СН у протоколі LEACH;

- керівна інформація від базової станції не потрібна для сенсорних вузлів у протоколі LEACH;

- LEACH мінімізує в 7-8 разів загальне енергоспоживання порівняно з протоколом прямого передавання та маршрутизації з мінімальною енергією передавання (МТЕ);

- сенсорні вузли не потребують знання глобальної мережі або ідентифікації в повністю розподіленій безпроводовій сенсорній мережі.

Обмеження протоколу LEACH:

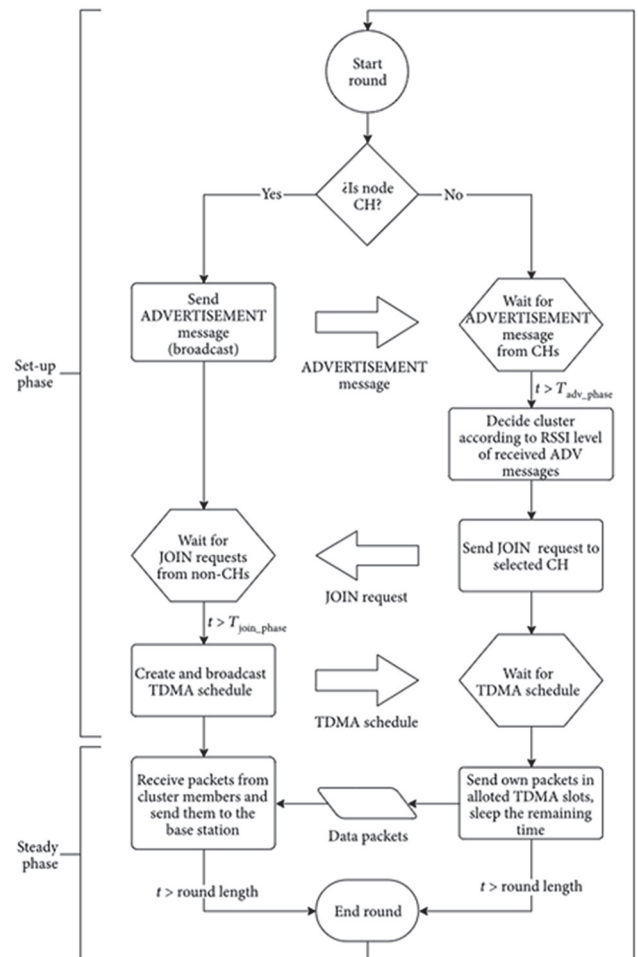


Рис. 1. Етап налаштування LEACH-APP

- вузли мають різний рівень енергії, але СН вибрано необґрунтовано [10];

- продуктивність протоколу LEACH не ідеальна для великих географічних територій.

Протокол HABRP, який є розширенням LEACH, поліпшує період стабільності ієрархії кластеризації та зменшує ймовірність відмов вузлів за допомогою характерних параметрів неоднорідності.

Маршрутизація в HABRP працює в раундах, і кожен раунд розділено на дві фази: налаштування та стійкого стану. Завдяки синхронізованому годиннику кожен давач знає, коли починається раунд. Можна вважати, що певний відсоток вузлів давачів оснащено більшою кількістю енергетичних ресурсів (розширені вузли), ніж решта вузлів (звичайні вузли). Ці потужні вузли називають NCG-вузлами (вузли, вибрані як звичайні вузли, голова кластера, шлюз). Також, для спрощення, вважається, що всі вузли рівномірно розподілені по сенсорному полю.

Базову системну модель протоколу HABRP зображено на рис. 2. Кожен сенсорний вузол надсилає отримані дані до своєї голови кластера. Голова кластера агрегує зібрані дані та передає агреговану інформацію найближчому шлюзу, який надішлетиме дані на базову станцію.

Операцію HABRP поділено на раунди. Кожен раунд починається з фази налаштування, за якою йде фаза стаціонарного стану. На стадії налаштування вибираються шлюзи та організуються кластери. Цей етап об'єднує алгоритм вибору шлюзу, алгоритм вибору кластера та алгоритм формування кластера.

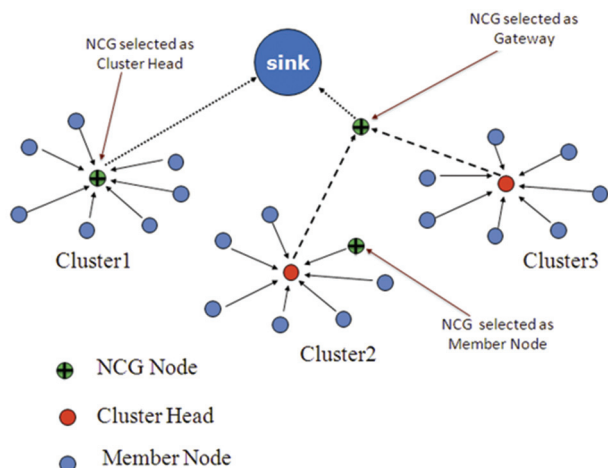


Рис. 2. Модель мережі HABRP

Після фази налаштування відбувається стаціонарна фаза, коли дані для агрегування передаються від вузлів до голови кластера і далі на базову станцію через шлюз, який потребує мінімальної енергії зв'язку. Тривалість стаціонарної фази більша за тривалість фази налаштування, щоб мінімізувати накладні витрати.

Кожен давач вибирає себе шлюзом на початку кожного раунду. Це рішення ґрунтується на запропонованому відсотку шлюзів для мережі та кількості раундів, протягом яких вузол був шлюзом до цього часу.

Основна ідея полягає в тому, щоб сенсорні вузли самостійно вибирали свої рівні енергії. Тобто, щоб мінімізувати витрати на зв'язок і максимізувати мережні ресурси для забезпечення надсилання стислої інформації до приймача. Кожен вузол передає дані до найближчої голови кластера, яка здійснює агрегацію даних. Припустимо, що ми маємо оптимальну кількість кластерів у кожному раунді. Очікується, що голова кластера буде витрачати більше енергії, ніж члени кластера. А отже, кожен вузол може стати головою кластера з певною ймовірністю.

HABRP — це самоорганізований, адаптивний протокол кластеризації, який використовує рандомізацію для рівномірного розподілу енергетичного навантаження між давачами в мережі. На початку кожного раунду з певною ймовірністю кожен давач може вибирати себе шлюзом. Далі ці вузли шлюзу транслюють свій статус іншим давачам у мережі за допомогою рекламного повідомлення. Вузли, які не є шлюзами, з певною ймовірністю вибирають себе головами кластера і

також інформують про свій статус решту давачів у мережі за допомогою рекламного повідомлення. Вузли, які не є головними вузлами кластера, очікують оголошення головних вузлів кластера від інших вузлів. Кожен сенсорний вузол визначає, до якого кластера він хоче належати, вибираючи голову кластера, яка потребує мінімальної енергії зв'язку, і надсилає повідомлення запити на приєднання до вибраної голови кластера, а вузли голови кластера чекають повідомлення із запитом на приєднання від інших вузлів.

Після того, як усі вузли організовано в кластери, кожна голова кластера створює розклад для вузлів у своєму кластері. Це дає змогу радіокомпонентам кожного не головного вузла кластера бути вимкненим у будь-який час, за винятком часу його передавання, у такий спосіб мінімізуючи енергію, що розсіюється в окремих давачах. Коли головний вузол кластера отримує всі дані з вузлів у своєму кластері, вузол головного кластера збирає дані і передає стислі дані до вибраного шлюзу, який потребує мінімальної енергії зв'язку, щоб скоротити енергоспоживання голови кластера та зменшити ймовірність відмови вузлів. Далі зібрані дані передаються на базову станцію за допомогою маршрутизації головної шлюзу кластера — базова станція. Також можливе безпосереднє передання цих даних на базову станцію (рис. 3).

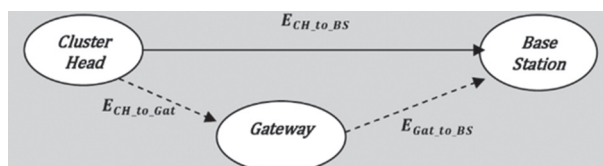


Рис. 3. Схема зв'язків між Cluster Head, Gateway та Base Station

HABRP поліпшує стабільну частину ієрархії кластеризації та зменшує ймовірність відмови вузлів і збільшує строк служби мережі завдяки збалансованому розсіюванню енергії окремого вузла через мережу. Збалансування споживання енергії, зменшення явища «швидкої смерті» голови кластера, зумовленого надмірним споживанням енергії, а також запобігання ситуації періоду нестабільності, спричиненого непрацездатністю однієї голови кластера, забезпечує нормальну роботу мережі.

Енергоефективна маршрутизація має першочергове значення для збільшення стабільності та строку служби безпроводових сенсорних мереж. Маршрутизація в сенсорних мережах є дуже складною через кілька обмежень, які відрізняють їх від традиційних комунікацій і безпроводових спеціальних мереж, зокрема, обмежене енергопостачання, обчислювальну потужність і пропускну здатність безпроводових каналів, що з'єднують сенсорні вузли. Основна відмінність між BSM і традиційною безпроводовою мережею полягає в тому, що давачі дуже чутливі до спо-

живання енергії. Упровадження кластеризації в топологію мереж має на меті зменшити кількість повідомлень, які потрібно доставити до приймача у великомасштабних БСМ.

Нарешті, НАВРР є масштабованим і забезпечує кращу продуктивність порівняно з SEP і LEACH як у гетерогенних, так і в однорідних середовищах.

Висновки

Ефективність використання енергії та просто-та впровадження роблять НАВРР привабливим і надійним протоколом для безпроводових сенсорних мереж. Для подовження строку служби та підвищення продуктивності мережі маршрутизація в НАВРР реалізується циклічно, розділяючи кожен раунд на дві фази: фазу налаштування та фазу стабільного стану. Під час фази налаштування певні високоенергетичні вузли, відомі як вузли NCG, визначаються як шлюзи, тоді як інші організуються в кластери. У фазі стабільного стану дані передаються від вузлів — членів кластера до голови кластера для агрегації та подальшого передавання на базову станцію через вибрані шлюзи. Ці шлюзи потребують мінімального енергоспоживання для зв'язку, спрямованого на зменшення енергоспоживання головою кластера та зниження ймовірності відмов вузлів.

Список використаної літератури

1. Rozas A., Araujo A. *An Application-Aware Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks to Provide QoS Management* // *Journal of Sensors*. 2019. Vol. 2019. Article ID 8569326. P. 11. URL:

<https://doi.org/10.1155/2019/8569326>

2. *Quality of Service (QoS) Management for Local Area Network (LAN) Using Traffic Policy Tech-*

nique to Secure Congestion / A. Wan, H. Rosilah, A. Azana [et al.] // *Computers*. 2020. 9. 39. 10.3390/computers9020039.

3. Clyde F., McNair J., Thiago O. *What Is a Wireless Sensor Network?* // *EDIS*. 2018. 10.32473/edis-ae521-2018.

4. *Hierarchical adaptive balanced energy efficient routing protocol (HABRP) for heterogeneous wireless sensor networks* / S. Ben Alla, A. Ezzati, A. B. Hssane, M. L. Hasnaoui // *International Conference on Multimedia Computing and Systems, Ouarzazate, Morocco, 2011*. P. 1–6.

5. Sureshand B., G S. *An ENERGY EFFICIENT SECURE routing Scheme using LEACH protocol IN WSNS for IOT networks* // *Measurement: Sensors*. 2023. P. 100883. URL:

<https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100883>.

6. Smaragdakis G., Matta I., Bestavros A. *SEP: A Stable Election Protocol for Clustered Heterogeneous Wireless Sensor Networks* // *Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications (SANPA 2004)*.

7. *Cluster Head Selection Algorithm For Wireless Sensor Networks Using Machine Learning* / S. Mody, S. Mirkar, R. Ghag, P. Kotecha // *International Conference on Computational Performance Evaluation (ComPE)*, Shillong, India, 2021. P. 445–450.

8. *Next-Generation Wireless Working Group* / A. Jawwad, G. Ben, G. Jim [et al.].

9. Rahayu T. M., Lee S. G., Lee H. J. *A Secure Routing Protocol for Wireless Sensor Networks Considering Secure Data Aggregation* // *Sensors (Basel)*. 2015. Jun 26;15(7):15127-58.

10. Kumari K., Khaparkar S. *Comparison of SEP and LEACH routing protocol for WSN* // *JETIR*. 2018. Vol. 5, no. 4. P. 416–419.

L. Dakova, S. Dakov, N. Blazhenyi, V. Voloshyn

ENERGY-EFFICIENT ROUTING PROTOCOL IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Recently, self-organizing networks have gained popularity, which are distinguished by the possibility of connecting terminals anywhere and at any time without the need for a centralized network infrastructure. Mobile self-organizing networks are a promising direction for the development of information and communication systems. However, one should take into account the problems arising from the very nature of such networks: mobile nodes lead to an increase in the dynamism of the network topology due to the possibility of disconnection and the probability of movement; the limited supply of power sources of nodes requires careful management of power consumption in the design of hardware and protocols.

Energy-saving design in self-organizing networks is more complex and important than in other wireless networks. The lack of infrastructure requires mobile nodes to act as routers, which increases traffic and therefore power consumption. Also, the energy-saving mode must take into account different network performance criteria, which can be caused by different protocols and power limitations.

Thanks to the latest advances in technology and the rapid development of the production of small and affordable sensors, it has become possible to use them technically and economically effectively. These electronic sensors, which have high sensitivity, measure environmental parameters and convert the received data into an electronic signal that is transmitted over a wireless channel. After processing this signal, you can get information about the properties of objects or events that occur near the sensor. The application of a large number of such sensors, which can monitor a large area and exchange data wirelessly, forms a single wireless sensor network.

Route allocation is a key challenge for resource-constrained networks. With the growth of computing power in wireless sensor technology, these sensor nodes are required to be equipped with more and more capabilities to perform more complex tasks. Each sensor is limited by its energy level, processing power, and ability to perceive information. Thus, the network of these sensors forms a more reliable and accurate structure.

The article discusses the issue of using the HABRP protocol for its application in wireless sensor networks. The use of the HABRP protocol allows for improvement in the efficiency of wireless sensor networks, namely their energy efficiency. Therefore, the energy efficiency and simplicity of the HABRP protocol make it an excellent candidate for use in wireless sensor networks.

Keywords: HABRP; LEACH; SEP; WSN; energy efficiency; routing protocol; cluster head; gateway; base station.