

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В МЕРЕЖАХ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ

Анотація. Розвиток технологій передачі даних привів до широкого застосування бездротових сенсорних мереж для організації інформаційного обміну. Однією з областей застосування бездротових сенсорних мереж є енергомоніторинг комунальних об'єктів. Достовірний облік споживаної електроенергії є актуальним завданням в рамках підвищення енергоефективності як у промисловості, так і житлово-комунальному господарстві. Метою даної роботи є побудова математичної моделі процесу бездротової передачі даних в автоматизованій системі енергомоніторингу.

Ключові слова: математична модель, бездротова передача, сенсорна мережа, енергомоніторинг, вузел.

**Постановка проблеми.** Бездротові мережі займають міцне і далеко не останнє місце в житті людської спільноти, зокрема вони є невід'ємним елементом будь-якого бізнес процесу, управлінської та освітньої діяльності, організації дозвілля. Бездротові сенсорні мережі (БСМ) використовуються в таких додатках, де неможливо, важко або дорого експлуатувати провідні датчики. БСМ складаються з невеликих незалежних пристроїв, що володіють здатністю вимірювання будь-яких показників (температури, звуку, вібрації, тиску, руху). Однією з областей застосування бездротових сенсорних мереж є енергомоніторинг комунальних об'єктів. Основними достоїнствами БСМ є низька вартість, швидка установка, тривалий час функціонування, низька вартість обслуговування. Серед основних проблем, що виникають при роботі БСМ можна виділити: нестабільність радіоканалу, відмови вузлів мережі через витрати енергії, атаки на мережу. У разі стаціонарної БСМ, що обслуговує фіксовану кількість об'єктів, вузли мережі «прив'язані» до об'єктів. Структура мережі зумовлюється в процесі планування, але вона може змінитися при відмові вузлів мережі. На сьогоднішній день вузли БСМ забезпечують тривалий час функціонування мережі - кілька років. Основною причиною втрати функціональності є втрата

зв'язності мережі, яка призводить до зменшення її часу життя. Саме тому створення моделі бездротової мережі, що дозволяє оцінювати час її життя за енергетичними параметрами, є актуальною та необхідною задачею.

**Аналіз останніх досліджень.** Час життя мережі і його розрахунок зводиться як правило до двох основних підзадач:

- Визначення часу життя кожного пристрою мережі.
- Визначення часу життя мережі в цілому.

Для вирівнювання споживаної потужності всіх вузлів мережі використовують різні методи енергетичного балансування (energy balancing). Побудова гомогенної мережі передбачає використання ряду можливостей:

1. Індивідуальний підбір ємності батареї в залежності від положення пристроїв в структурі мережі і виконуваних ними функцій [1]. Даний підхід є одним з найбільш простих, але водночас призводить до низької масштабованості мережі та її поганої адаптації до зміни умов функціонування.

2. Різна щільність розміщення вузлів мережі в залежності від передбачуваної інтенсивності трафіку в конкретній зоні [2]. Це рішення спрямоване на забезпечення надмірності в структурі мережі і дублювання функцій окремих вузлів. Так при виході з ладу чергового маршрутизатора його функції будуть перекладені на сусідній елемент, до цього моменту ніяк що не використовується.

Автори [3-5] проаналізували час життя бездротових сенсорних мереж. У роботах [4, 5] було введено поняття енергетичної цінності вузла, яка визначається як відношення повної споживаної енергії до вихідної початкової енергії батареї. Цінність вузла тим вище, чим менше відношення енергії, що витрачається вузлом при роботі в мережі, до його початкової енергії. Відповідно до цієї моделі загальна енергія споживання, включає в себе енергію, яка витрачається на передачу і прийом пакетів, режим сну і зондування. Однак, автори не врахували додаткові джерела енергетичних витрат, такі як управління пакетами в режимі GTS і повторними передачами, викликаними перешкодами в мережі. Останнє є визначальним, оскільки при інтенсивному трафіку повторна передача «невдалих» пакетів веде до суттєвих додаткових витрат енергії, що призводить до скорочення часу життя мережі. Модель, запропонована в [4], усуває цей недолік, але не пропонує аналітичного методу обчислення ймовірності невдалої передачі. В роботі [6] аналізується режим доступу до середовища CSMA / CA і визначається затримка передачі відповідно до довжини кадру.

**Метою даної роботи** є створення моделі бездротової мережі, що дозволяє оцінювати час її життя за енергетичними параметрами.

**Викладення основного матеріалу.** Фактично, час життя мережі залежить від програми і режиму роботи мережі. Це означає, що час життя мережі повинна розглядатися з точки зору її функціональних станів:

- Час до вичерпання енергії будь-якого одного вузла мережі.
- Час до вичерпання енергії в декількох вузлах, що викликає втрату зв'язку на одному або більше ділянках мережі.
- Час, протягом якого до 50% вузлів вийде з ладу.

У всіх цих випадках час життя сильно залежить від залишкової енергії. Відповідно, фокусування уваги на споживанні енергії вузлами для оцінки тривалості їх життя і, отже, тривалості життя мережі є визначальним при розробці аналітичної моделі. В аналітичній моделі прогнозування тривалості життя мережі враховується енергоспоживання польових пристроїв з урахуванням стартових екранів, прослуховування, управління пакетами в режимі GTS і повторними передачами, викликаними перешкодами в мережі. Загальна енергія, споживана в одиницю часу, включає в себе енергію, яка витрачається на передачу і прийом пакетів даних, при передачі і прийомі керуючих пакетів при прослуховуванні каналу і при прийомі пакетів сусідів.

У мережах, заснованих на CSMA / CA, передача пакетів може завершитися невдачею через декілька факторів, таких як зіткнення пакетів, помилки каналу і т.д. Стандарт IEEE 802.15.4 визначає максимальну повторну передачу, після чого у відповідність з протоколом спроби передачі завершуються і видається повідомлення про помилку зв'язку [7]. На додаток до енергії, що витрачається на передачу і прийом пакетів даних, вузол датчика споживає енергію, надсилаючи та приймаючи керуючі пакети, такі як маяки і командні кадри. Подальші дії виходять із припущення, що всі повідомлення мають однаковий розмір і, отже, однаковий час прийому-передачі. Відповідно до стандарту IEEE 802.15.4, підрівень MAC вимагає час для обробки даних, отриманих на фізичному рівні. Відповідно, два послідовних кадри, що передаються з вузла, повинні бути розділені, щонайменше, одним періодом IFS. Довжина періоду IFS залежить від розміру переданого кадру. Крім того, згідно зі стандартом CSMA / CA (множинний доступ з підтримкою несучої із запобіганням колізій) має деякі параметри, встановлені MIB (MAC Information Base). Кожен вузол підтримує ці параметри для кожної спроби передачі.

Згаданий вище механізм CSMA / CA працює за принципом прослуховування частот протягом певного часу і виявлення вільної частоти для передачі даних. Якщо канал зайнятий, то вузол «відсторонюється» і чекає певну кількість часу, перш ніж знову почати спробу відправки пакета. Уникнення колізій використовується для того, щоб поліпшити продуктивність CSMA. Поліпшення продуктивності досягається за рахунок зниження ймовірності колізій і повторних спроб передачі.

Оскільки різні вузли відчувають різні втрати, для досягнення максимальної енергоефективності їм доводиться адаптувати свою потужність передачі. Щоб визначити оптимальні за енергією порогові значення для перемикання між рівнями потужності передачі, загальна енергія кожного переданого біта обчислюється для повного діапазону втрат в тракті. У відповідність стандарту, якщо стався збій передачі в даному суперфреймі, додаток буде повторювати передачу в наступному суперфреймі.

У стандарті 802.15.4 для частот в діапазоні 2,4 ГГц визначена максимальна швидкість передачі 250 Кбіт/с. У стандарті визначено алгоритм доступу до середовища передачі даних CSMA / CA. При передачі даних пристрій чекає випадковий проміжок часу з діапазону, після чого визначає зайнятість каналу. Якщо канал вільний, пристрій передає дані, якщо канал зайнятий, то він чекає випадковий проміжок часу.

Перед відправкою підтвердження стандартом визначена затримка в 192 мкс, пов'язана з тим, що пристрій має перейти з режиму прийому в режим передачі. Крім того, в стандарті визначені мінімальні затримки, які слідує після кадру підтвердження:

- для кадрів довжиною до 18 байт - 18 символних періодів.
- для кадрів довжиною понад 18 байт - 40 символних періодів.

Часові витрати на передачу даних за стандартом 802.15.4 подано в табл.1.

Таблица 1

Часові витрати на передачу даних

Дія	Час (в мс)
CSMA / CA	2,4 мс
передача кадру	4,1 мс
Затримка після передачі	0,19 мс
передача підтвердження	0,35 мс
Загальний час (ТΣ)	7,04 мс

Найбільш значущими є втрати енергії на прослуховування і повторні передачі. Прослуховування в режимі очікування полягає в тому, що приймач активний, коли не приймаються вхідні пакети, і існує необхідність повторної передачі пакета. Якщо одночасно передається велика кількість кадрів, відбуваються зіткнення, а потім повторна передача. Це веде до збільшення потужності споживання і завантаження мережі. У випадках з великим трафіком і поганим механізмом планування це може стати серйозною проблемою, що ускладнює характеристики всієї системи.

Інша причина енергетичних втрат - підслуховування, тобто прийом пакетів, які призначені для інших вузлів. Для уникнення переповнення вхідних пакетів необхідно ввести механізм адресації, який вказує всі вузли призначення наступної передачі. Це досягається шляхом передачі пакетів управління, але вони призводять до додаткових енергетичних втрат через витрати на керуючі пакети. Очевидно, що з метою енергозбереження протокол MAC повинен використовувати мінімальну кількість пакетів управління.

Розглянемо більш детально питання часу життя вузлів БСМ. Цікавим з практичного боку є метод енергетичної балансування, тобто чергування ближньої і далекої передачі. У ближньому режимі вузол передає інформацію своєму найближчому сусіду, в далекому - координатору мережі без ретрансляції. Вважається, що кожен вузол вибирає свій режим незалежно від інших. Координатор мережі, що має постійне зовнішнє живлення, представляє собою спеціальний тип ідеального вузла, для якого початкова енергія необмежена, а характеристики споживаної потужності не є важливими.

Останнім важливим елементом моделі є зміна конфігурацій, обумовлених виходом з ладу окремих вузлів, що призводить до зміни маршруту доставки повідомлень в мережі. Дана модель може бути застосована для мереж зі стійким характером функціонування вузлів, вираженим в незмінній споживаній потужності в кожній з можливих конфігурацій. Споживана потужність безпосередньо залежить від трафіку, що генерується і ретранслюється вузлом. цілomu зрозуміло, що вузли бездротової мережі збору даних можна вважати найманими працівниками, оскільки вони можуть зчитувати показання з датчиків і передавати дані в мережу. При розробці мережі важливо заздалегідь оцінити приблизний час роботи кожного вузла до моменту, коли буде необхідна заміна його батарей. Для цього важливо розуміти, які фактори впливають на тривалість часу його автономної роботи.

Відомо, що енергоспоживання окремих елементів мережі залежить від наступних факторів, які необхідно брати до уваги при моделюванні БСМ:

- Характеристики апаратних засобів (ємність батарей, споживана потужність мікроконтролера і приймача).
- Частота збору і передачі даних.
- Протоколи фізичного і канального рівнів, що визначають, перш за все, механізми контролю доступу до середовища.
- Топологія мережі, яка визначає обсяг інформації, що проходить через кожен елемент (з урахуванням ретрансляції повідомлень).
- Використовуваний протокол маршрутизації, який додає в мережу додатковий службовий трафік.

Формалізуємо наведені вище твердження у вигляді методики розрахунку часу життя. У розробленій бездротовій мережі моніторингу застосовуються два типи вузлів - маршрутизатори (ретранслятори) і координатор. Координатори не уявляють інтерес з точки зору часу автономної роботи, оскільки вони підключені до джерел живлення, які мають на порядок більшу ємність. Розглянемо більш докладно методику розрахунку часу життя кінцевих пристроїв і ретрансляторів. Вона ґрунтується на наступних припущеннях:

- Алгоритм роботи пристрою є строго детермінованим, а для зовнішніх чинників, які є випадковими величинами, відомо математичне очікування.
- Відсутній ефект відновлення батареї. Тоді знаючи початкову енергію батареї  $E_0$  і потужність  $P$ , споживану пристроєм, можна приблизно оцінити час його життя  $T$  по формулі:

$$T = E_0/P \quad (1)$$

Беручи до уваги, що процес зчитування показань з датчиків є одним з ключових параметрів, що визначають час життя пристрою збору і передачі даних, залежить виключно від технічних характеристик використовуваного мікроконтролера, його внесок в загальне енергоспоживання є прогнозованим. На практиці передача по бездротовому каналу завжди пов'язана з втратами як при передачі кадру з корисним навантаженням, так і при відправці підтвердження. В результаті пристрій змушений ініціювати одну або кілька повторних передач, що затримують перехід в сплячий режим.

У бездротових мережах, що працюють за алгоритмом асинхронного доступу до середовища передачі, маршрутизатори є вузьким місцем з точки зору енергоспоживання, яке залежить від використовуваного протоколу маршрутизації, що визначає службовий трафік, що генерується для створення і

підтримки таблиць маршрутизації. При передачі кожного кадру пристрій проходить чотири різних стадії - пасивного очікування (WAIT), прослуховування каналу (CCA), передачі кадру (DATA) і прийому підтвердження (ACK). Слід зазначити, що дана послідовність характерна для всіх стандартів, що використовують механізм CSMA / CA. Середня потужність пристрою протягом всієї процедури передачі даних, буде дорівнювати:

$$P_f = \frac{P_a t_{wait} + P_{rx} t_{CCA} + P_{tx} t_{data} + P_{rx} t_{ACK}}{t_f} \quad (2)$$

**Висновки.** Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що ефективна передача використовує не менше 50% від загальної енергії. Механізм виявлення використовує 15% енергії, головним чином через необхідність активації приймача під час очікування підтвердження. 20% енергії витрачається на прослуховування маяків. Ґрунтуючись на енергетичному балансі трансивера, можна побачити кілька ключових способів підвищення загальної енергоефективності бездротових мереж. Конкретні методи включають в себе скорочення часу переходу між станами та створення масштабується приймача на фізичному рівні пристрою, що вимагає зміни фірмової прошивки стандартного приймача-передавача. При цьому, скорочення часу переходу між станами в два рази призведе до зменшення загальної середньої потужності на 12%. З огляду на енергоємність процесу передачі даних, саме управління розмірами повідомлень є основним резервом збільшення терміну життя пристроїв і системи в цілому.

#### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Balen J., Zagar D., Martinovic G. Quality of service in wireless sensor networks: a survey and related patents // Recent Patents on Computer Science. 2011. V.4. P. 188–202.
2. Ramassamy C., Fouchal H., Hunel P. Impact of application layers over wireless sensor networks // Lecture Notes in Informatics. Bonn, Germany. 2012.
3. Zhang H., Shen H. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks // IEEE Trans. Parallel Distrib.Syst. 2009. Vol. 20, no. 10. P. 1526–1539.
4. Gun M., Kosar R., Ersoy C. Lifetime optimization using variable battery capacities and nonuniform density deployment in wireless sensor networks //Computer and information sciences, 2007. iscis 2007. 22nd international symposium on. 2007. P. 1–6.

5. Halder S., Ghosal A., Chaudhuri A., DasBit S. A probability density function for energy-balanced lifetime-enhancing node deployment in WSN // Proceedings of the 2011 international conference on Computational science and its applications - Volume Part IV. ICCSA'11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 472–487.
6. Kwon H., Seo H., Kim S., Lee B. G. Generalized CSMA/CA for OFDMA systems: protocol design, throughput analysis, and implementation issues // Wireless Communications, IEEE Transactions on. 2009. Vol. 8, no. 8. P.p.4176–4187.
7. IEEE 802.15.4d-2009 standard [Электронный ресурс] / Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2009. Доступ: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf> (дата обращения: 10.2010).
8. Bouabdallah F., Bouabdallah N. The Tradeoff Between Maximizing the Sensor Network Lifetime and the Fastest Way to Report Reliably an Event Using Reporting Nodes' Selection. Computer Communications Journal (Elsevier), Vol. 31, Issue 9, pp. 1763 – 1776, June 2008.
9. Eduardo Casilari, Jose M. Cano-García, Gonzalo Campos-Garrido. Modeling of Current Consumption in 802.15.4/ZigBee Sensor Motes. Sensors 2010, 10, 5443-5468; doi:10.3390/s100605443.

#### REFERENCES

1. Balen J., Zagar D., Martinovic G. Quality of service in wireless sensor networks: a survey and related patents // Recent Patents on Computer Science. 2011. V.4. P. 188–202.
2. Ramassamy C., Fouchal H., Hunel P. Impact of application layers over wireless sensor networks // Lecture Notes in Informatics. Bonn, Germany. 2012.
3. Zhang H., Shen H. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks // IEEE Trans. Parallel Distrib.Syst. 2009. Vol. 20, no. 10. P. 1526–1539.
4. Gun M., Kosar R., Ersoy C. Lifetime optimization using variable battery capacities and nonuniform density deployment in wireless sensor networks //Computer and information sciences, 2007. iscis 2007. 22nd international symposium on. 2007. P. 1–6.
5. Halder S., Ghosal A., Chaudhuri A., DasBit S. A probability density function for energy-balanced lifetime-enhancing node deployment in WSN // Proceedings of the 2011 international conference on Computational science and its applications - Volume Part IV. ICCSA'11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 472–487.
6. Kwon H., Seo H., Kim S., Lee B. G. Generalized CSMA/CA for OFDMA systems: protocol design, throughput analysis, and implementation issues // Wireless Communications, IEEE Transactions on. 2009. Vol. 8, no. 8. P.p.4176–4187.



7. IEEE 802.15.4d-2009 standard [Электронный ресурс] / Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2009. Доступ: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf> (дата обращения: 10.2010).
8. Bouabdallah F., Bouabdallah N. The Tradeoff Between Maximizing the Sensor Network Lifetime and the Fastest Way to Report Reliably an Event Using Reporting Nodes' Selection. Computer Communications Journal (Elsevier), Vol. 31, Issue 9, pp. 1763 – 1776, June 2008.
9. Eduardo Casilari, Jose M. Cano-García, Gonzalo Campos-Garrido. Modeling of Current Consumption in 802.15.4/ZigBee Sensor Motes. Sensors 2010, 10, 5443-5468; doi:10.3390/s100605443.

Received 12.12.2020.

Accepted 19.12.2020.

**Математическое моделирование процесса беспроводной передачи данных  
в сетях энергомониторинга**

*Развитие технологий передачи данных привело к широкому применению беспроводных сенсорных сетей для организации информационного обмена. Одной из областей применения беспроводных сенсорных сетей является энергомониторинг коммунальных объектов. Достоверный учет потребляемой электроэнергии является актуальной задачей в рамках повышения энергоэффективности как в промышленности, так и жилищно-коммунальном хозяйстве. Целью данной работы является построение математической модели процесса беспроводной передачи данных в автоматизированной системе энергомониторинга.*

**Mathematical modeling of the wireless data transmission process  
in energy monitoring networks**

*Reliable accounting of electricity consumption is an urgent task in terms of improving energy efficiency in both industry and housing and communal services. The main advantages of wireless sensor networks (WSN) are low cost, fast installation, long operation time, low maintenance cost. Among the main problems that arise during the operation of the WSN can be identified: the instability of the radio channel, the failure of network nodes due to energy consumption, attacks on the network. In the case of a stationary WSN operating in a limited area and serving a fixed number of objects, the network nodes are "tied" to the objects. The structure of the network is determined in the planning process, but it can change when the network nodes fail. To date, WSN nodes provide a long time of network operation - several years. However, when planning a network for a long period, it is impossible to be absolutely sure that its structure will not change in the future. The main reason for the loss of functionality is the loss of network connectivity, which leads to a reduction in its lifetime. The paper proposes a mathematical model of the process of wireless data transmission in an automated energy monitoring system. It is proved that, given the energy intensity of the data transmission process, it is the control of message sizes that is the main reserve for increasing the life of devices and the system as a whole.*

*The analysis allows us to conclude that efficient transmission uses at least 50% of total energy. The detection mechanism uses 15% of energy, mainly due to the need to activate the receiver while waiting for confirmation. 20% of energy is spent on listening to beacons. Based on the energy balance of the transceiver, you can see several key ways to increase the overall energy efficiency of wireless networks. Specific methods include reducing the transition time between states and creating a scalable receiver at the physical level of the device, which requires a change in the firmware of the standard transceiver. At the same time, halving the transition time between states will reduce the total average power by 12%. Given the energy consumption of the data transmission process, it is the management of message sizes is the main reserve for increasing the life of devices and the system as a whole.*

**Ковальова Юлія Вікторівна** – асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро).

**Ковальова Юлия Викторовна** – асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (г. Днепр).

**Kovalova Yuliia** – assistant of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Ukraine.