

УДК 004.021

Ш. Ш. Бхушан<sup>1</sup>,С. Г. Антошук<sup>2</sup>, д-р техн. наук, доц.<sup>1</sup>Національний відкритий університет ім. Індіри Ганді  
hushan05@gmail.com<sup>2</sup>Одеський національний політехнічний університет  
asg@opu.ua

## Комбінована метаевристична кластеризація для енергоефективних протоколів маршрутизації гетерогенних бездротових сенсорних мереж

*Розглянуто доцільність застосування метаевристичної кластеризації для підвищення ефективності протоколів маршрутизації гетерогенних бездротових сенсорних мереж. Виконано симуляцію мережі та проведено дослідження щодо визначення тривалості життя. Доведена ефективність запропонованого підходу.*

**Ключові слова:** бездротова сенсорна мережа, метаевристична кластеризація, протоколи маршрутизації.

DOI: 10.31474/1996-1588-2018-1-26-3-7

### Вступ

Однією з характерних особливостей двадцять першого сторіччя є поява технологій «Інтернету Речей» – в рамках якої пристрої, їх програмна, апаратна та комунікаційна інфраструктура беруть участь в процесі обміну даними, створюють технологічну екосистему IoT (Internet of Things). Технологічною базою для реалізації концепції Інтернету Речей є гетерогенні бездротові сенсорні мережі (ГБСМ), які складаються з розподілених в просторі неоднорідних бездротових сенсорних вузлів, які призначені для моніторингу характеристик навколишнього середовища або об'єктів. ГБСМ застосовується для збору даних з пристроїв, що оснащені сенсорами: датчиками вологості, температури, освітленості та ін. Завдяки своїй організації ГБСМ відносяться до мереж, які самоорганізуються, тобто до мереж, що складаються з випадкового, змінного числа вузлів і зв'язків між вузлами, які повинні адаптивно підлаштовуватися для виконання своїх функцій. Ресурси сенсорних вузлів в ГБСМ обмежені з точки зору можливості обробки інформації, пропускної спроможності, обсягу пам'яті, обчислювальних можливостей, що суттєво відрізняє бездротові сенсорні мережі від інших мереж [1]. Сенсорні вузли ГБСМ досить часто можуть функціонувати в умовах, коли відсутня можливість гарантованого електроживлення або навіть заміни батареї сенсорного вузла. Тому найважливішою характеристикою ГБСМ є залишкова енергія. Крім того, гетерогенні сенсорні мережі можуть містити два, три або більше типів вузлів, відповідно з різними енергетичними та функціональними можливостями. Проведений аналіз споживаної потужності у різних режимах роботи ГБСМ показав, що найбільш енерговитратною є операція збору даних (прийому та передачі). Тому розробка енергоефективних протоколів маршрутизації гетерогенних бездротових сенсорних мереж з метою зменшення їх енергоспоживання, та тим самим підвищення

залишкової енергії і підвищення часу експлуатації до заміни джерел живлення є актуальним науково-практичним завданням, яке вирішувалось в рамках проведених досліджень.

Слід зазначити, що протоколи маршрутизації для ГБСМ значно відрізняються від традиційних. Це пояснюється низкою особливостей, серед яких можна відзначити такі: будь-яке застосування сенсорних мереж вимагає потоку даних, отриманих від декількох джерел; сенсорні вузли в бездротових мережах можуть переміщатися, що призводить до непередбачуваних топологічних змін. Ці особливості обумовили при реалізації енергоефективних комунікаційних протоколів застосування кластерної топології, при якій вся мережа може розбиватися на сегменти [2].

Ідею кластерної топології втілено в низку сучасних ієрархічних алгоритмів маршрутизації, в яких вузли самоорганізуються в кластери та головний вузол - СН (Cluster Head) вибирається для кожного кластера. Головні вузли здійснюють збір даних з вузлів - членів кластера, які здійснюють їх обробку та передачу інформації на шлюз або базову станцію. Таке агрегування даних у головних вузлах значно зменшує енергоспоживання в мережі та збільшує тривалість життєвого циклу. До протоколів маршрутизації на основі кластерної топології можна віднести такі як LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy) [3], SEP (Stable Election Protocol) [4], HEED (Hybrid Energy-Efficient Distributed pro-ocol) [5], IHCR (Intelligent Hierarchical Cluster-based Routing) [6], ERP (Evolutionary Based Routing Protocol) [7] та інші.

Проведений аналіз довів, що підвищення ефективності існуючих протоколів маршрутизації ГБСМ може відбуватися за рахунок удосконалення методів кластеризації. Саме цьому присвячена стаття.

### Опис комбінованої метаевристичної кластеризації

Для кластеризації застосовується низка рішень – ієрархічні алгоритми, алгоритм k-середніх,

алгоритми нечіткої кластеризації, нейромережеві алгоритми, метаевристичні алгоритми. Останні найбільш часто використовуються для кластеризації ГБСМ завдяки тому, що вони надають близьке до оптимального рішення, вимагаючи невеликі ресурси (час та обчислювальну складність). Практично усі сучасні метаевристичні алгоритми імітують найкращі риси природи, особливо біологічні системи, які еволюціонують на основі природного відбору на протязі багатьох років. Такі алгоритми розробляються з урахуванням двох важливих характеристик: інтенсифікації (пошук найкращого рішення) та диверсифікації (ефективна робота у пошуковому просторі). У статті обговорено такі метаевристичні алгоритми:

- генетичні алгоритми. Особливістю генетичного алгоритму є базовість на операторі «схрещення», що передбачає рекомбінацію рішень-кандидатів, їх мутацію та відбір по аналогії з живою природою [8, 9];

- мурашиний алгоритм. Суть підходу полягає в аналізі та використанні моделі поведінки мурах, що шукають шляхи від колонії до джерела живлення та являє собою метаевристичну оптимізацію [10];

- біогеографія [12]. Алгоритм оснований на теорії острівної біогеографії - наукової дисципліни на стику біології та географії, що вивчає закономірності географічного розподілу флори, фауни та мікроорганізмів в біосфері.

Не зважаючи на те, що зовні метаевристичні алгоритми сильно відрізняються один від одного, але всі вони можуть бути описані схожим правилом – на кожному кроці алгоритм обчислює чергове рішення  $x^{t+1}$  згідно з правилом:

$$x^{t+1} = A(x^t, p(t)),$$

де  $A$  – деяке відображення;  $x^t$  - рішення на кроці  $t$ ;  $p(t)$  - параметри, що залежать від конкретного алгоритму, які також можуть залежати від номера кроку  $t$ . Параметри  $p(t)$  у тому чи іншому вигляді можуть містити інформацію про рішення, які отримані на попередніх кроках [1, t-1].

Аналіз існуючих метаевристичних алгоритмів довів, що основними їх недоліками є такі:

- випадковість ініціалізації початкової популяції, що, як правило, не враховує початкову топологію вузлів датчиків. Від вибору початкової популяції залежить швидкість збіжності алгоритму, тому випадкова ініціалізація неефективна.

- залежність роботи алгоритмів від раціонального вибору фітнес-функції.

Для усунення першого недоліку запропоновано комбінований метод, що поєднує переваги метаевристичних алгоритмів, що виконуються за загальноприйнятою схемою, і метод  $k$ -середніх. Для усунення другого досліджено та обґрунтовано вибір фітнес-функції.

Запропоновано удосконалення протоколу маршрутизації LEACH, який традиційно

складаються з двох етапів: ініціалізації та прийому та передачі, шляхом застосування комбінованої метаевристичної кластеризації. На етапі ініціалізації вузли сенсорів розбиваються на кластери згідно з протоколом LEACH та відбувається вибір головного вузла кластера СН (Cluster Head), тобто проходить узагальнення даних. При дослідженні авторами для кластеризації застосовані удосконалені метаевристичні алгоритми. На другому етапі відбувається передача даних між сенсорами та головним вузлом їх кластера даних з урахуванням розкладу TDMA, та передача від СН на базову станцію (BS).

### Модель бездротової сенсорної мережі

При удосконаленні протоколів маршрутизації ГБСМ були прийняті наступні припущення:

- сенсори випадковим чином розгорнуті по всій зоні;

- вузли сенсорів неоднорідні за початковою енергією. ГБСМ містить вузли трьох типів: з нормальною енергією (Normal Node), з підвищеною енергією – розширені вузли (Advanced Node) та “померлі” вузли, тобто вузли з вичерпаною енергією (Sink);

- енергоспоживання датчика під час передачі даних залежить від відстані між відправником і отримувачем, а також від розміру даних;

- як розрахунок відстані використовується Евклідова метрика;

- вузли передають інформацію базової станції через відповідні головні вузли кластерів;

- співвідношення числа сенсорів з більшою енергією до загального числа сенсорів задається коефіцієнтом гетерогенності  $M$ ;

- вузли стаціонарні.

Для дослідження протоколів маршрутизації в ГБСМ використано 2D модель (рис. 1). Моделювання здійснюється для мережі з 100 сенсорних вузлів розміщується в зоні розміром  $100 \times 100$  м<sup>2</sup>. Розміщення сенсорних вузлів з координатами  $(x, y)$  проводиться випадковим чином відповідно до рівномірним розподілом.

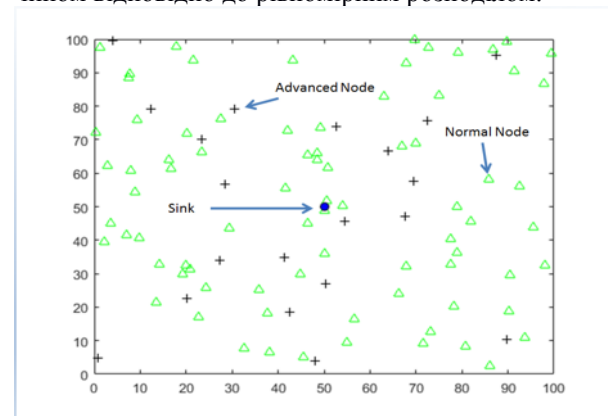


Рисунок 1 - Елементи ГБСМ

Перелік і значення параметрів є типовими і застосовувалися для оцінки ефективності алгоритмів. Базова станція (BS) - шлюз знаходиться

у центрі поля (таблиця 1). Для моделювання радіопередачі використано просту модель [5]. Необхідна енергія ( $E_{tx}$ ) для передачі даних передатчиком розраховується згідно виразу:

$$E_{tx}(l,d)=E_{elec} * l + \epsilon_{fc} * l * d^2, \quad d \leq d_0$$

$$E_{tx}(l,d)=E_{elec} * l + \epsilon_{fc} * l * d^4, \quad d > d_0$$

де  $l$  – довжина даних, які передаються;  $E_{elec}$  – енергія, яка споживається передатчиком;  $d$  – відстань між передаючим та приймаючим вузлами.

$d_0$  обчислюється як:  $d_0=(\epsilon_{fc}/\epsilon_{mp})$ ,

де  $\epsilon_{fc}$  і  $\epsilon_{mp}$  – коефіцієнти підсилювача потужності при  $d_{BS} \leq d_0$  і  $d_{BS} > d_0$  відповідно.

Необхідна енергія для прийому даних передатчиком визначається згідно виразу:

$$E_{rx}(l,d)=E_{elec} * l,$$

де  $l$  – довжина даних;  $E_{elec}$  – енергія, яка споживається при прийомі.

Таким чином, для зниження електроспоживання мережі потрібно мінімізувати відстані між вузлами, які беруть участь в комунікації.

Параметри симуляції мережі наведені у таблиці 1. При симуляції автоматизовані процеси генерування випадкових даних, визначаються координати розташування вузлів і енергетичні параметри [12,13].

Таблиця 1– Параметри симуляції мережі

Параметри	Позначення	Значення
Розмір мережі	M x M	100 x 100 m <sup>2</sup>
Координати базової станції	BS	(50, 50)
Кількість вузлів (датчиків)	n	100
Початкова енергія вузлів	E <sub>0</sub>	0.5 J
Коефіцієнт гетерогенності	m <sub>0</sub>	0.1
Енергія при передачі біт-біт	E <sub>elec</sub>	50 nJ/bit
Підсилювач потужності при $d_{BS} \leq d_0$	$\epsilon_{fs}$	10pJ/bit/ m <sup>2</sup>
Підсилювач потужності при $d_{BS} > d_0$	$\epsilon_{mp}$	0.0013pJ/bit/ m <sup>4</sup>
Розмір пакета даних		4000 bits

Таким чином, перевірка працездатності удосконаленого протоколу маршрутизації складалась з таких етапів:

Етап 1. Ініціалізація параметрів ГБСМ:

– задаються параметри симуляції мережі згідно таблиці 1 та проводиться її симуляція;

– задається ймовірність того, що окремих вузол стане головним вузлом кластера СН та максимальна кількість раундів R<sub>max</sub>.

Етап 2. Виконується комбінована метаевристична кластеризація

1. Для ініціалізації початкової популяції обраного метаевристичного алгоритму застосовується алгоритм k-середніх:

Нехай ГБСМ S містить N сенсорних вузлів  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ , які потрібно згрупувати в K неперекриваючих кластерів  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$ , таких, що

$$C_i \neq \emptyset \text{ для усіх } i,$$

$$C_i \cap C_j \text{ якщо } i \neq j \text{ та}$$

$$C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_K = S$$

**Алгоритм.**

а. Для кожного (N – K) сенсорних вузлів

призначити вузол  $x_i, i = 1 \dots N$  для кластера  $C_j, j \in \{1, 2, \dots, K\}$ , якщо  $|x_i - C_j| < |x_i - C_p|, p = 1 \dots K$  та  $i \neq p$

б. Розрахувати нові центри кластерів  $C_1^*, C_2^*, \dots, C_K^*$ .

в. Якщо для усіх центрів виконується  $C_i^* = C_i$

алгоритм завершується, інакше до п. а).

2. Проходить уточнення результатів з застосуванням обраного метаевристичного алгоритму та вибір головного вузла кожного кластера СН на кожному раунді. Доведено, що фітнес-функція повинна базуватися на критерії якості що враховує як внутрішню кластерну (міру компактності) так і міжкластерну відстань (міру роздільності).

3. Проводиться трансляція повідомлення всім вузлам, що залишилися, за допомогою СНs.

Етап 3. Виконується передача даних між вузлами сенсора та їх каналами зв'язку згідно з їх графіком TDMA. Після отримання даних, СНs збирає дані та передає їх до ГБСМ.

### Результати та аналіз

Для підтвердження результативності такого підходу при розробці енергоефективних протоколів маршрутизації в гетерогенних бездротових сенсорних мережах проведено аналіз тривалості життя мережі. При дослідженні фіксувався відповідний раунд роботи мережі для різного проценту померлих вузлів при коефіцієнті гетерогенності  $M=0,2$ .

Проведено порівняння протоколів маршрутизації SEP та ERP з розробленими авторами на базі комбінованої метаевристичної кластеризації. Дослідження проводилось для наступних протоколів маршрутизації: KGA (на основі генетичного алгоритму), KBBO (на основі біогеографії) та KPSO (на основі мурашиного алгоритму).

У кожному з сценаріїв розроблені протоколи показують кращу продуктивність, ніж інші. У таблиці 2 наведені результати досліджень

тривалості життя. З таблиці 2 можна спостерігати, що в SEP, ERP вузли гинуть набагато раніше, ніж у розроблених протоколах. Так, у запропонованому алгоритмі KPSO 10% вузлів вмирають у 7567-му раунді, а в протоколах SEP, ERP вузли гинуть на 1185-му і 1190-му раундах відповідно.

Таблиця 2. Тривалість життя БСМ (M=0,2)

% УС	SEP	ERP	KPSO	KBBO	KGA
10	1185	1190	7283	1204	5686
20	1219	1258	7745	1308	6626
30	1250	1312	7998	1363	7659
40	1284	1364	8352	1432	8150
50	1323	1408	8587	1494	8659
60	1368	1480	8863	1573	9312
70	1424	1572	9270	1719	10192
80	1529	1887	9747	2086	12106
90	1791	2747	15404	2938	14274
100	2236	3673	20546	4336	26239

Усі вузли ГБСМ гинуть в ERP на 3673-му раунді, забезпечуючи кращу продуктивність, ніж SEP, тоді як в KGA, KBBO, KPSO цей процес значно затримується. У KGA, KBBO, KPSO всі вузли гинуть на 26239, 4336, 20546 раунді відповідно.

### Висновки

У роботі запропоновано комбінований підхід до метаевристичної кластеризації при побудові енергоефективних протоколів маршрутизації ГБСМ. Особливістю підходу є застосування методу k-середніх до визначення навчальної популяції та врахування міри компактності і роздільності кластеру при побудові фітнес функції. Авторами досліджено доцільність такого підходу при побудові протоколів маршрутизації ГБСМ з використанням кластеризації, що основана на генетичному алгоритмі, моделі біогеографії та методі рою частинок. Одержані результати довели кращу ефективність розробленого протоколу на основі метаевристичної кластеризації порівняно з існуючими.

### Список літератури

1. David, K. 2020 Vision [Text] / K. David, D. Dixit, N. Jefferies // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2010. – Т. 5. – №. 3. – С.
2. Mahajan, S. Clustering in Wireless Sensor Networks: A Review [Text] / S. Mahajan, P. K. Dhiman // International Journal. – 2016. – Т. 7. – №. 3.
3. Heinzelman, W. B. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [Text] / W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan // IEEE Transactions on wireless communications. – 2002. – Т. 1. – №. 4. – С. 660-670.
4. Smaragdakis, G. SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [Text] / G. Smaragdakis, I. Matta, A. Bestavros – Boston University Computer Science Department, 2004.
5. Chand, S. Heterogeneous HEED protocol for wireless sensor networks [Text] / S. Chand, S. Singh, B. Kumar // Wireless personal communications. – 2014. – Т. 77. – №. 3. – С. 2117-2139.
6. Matin, A. W. Intelligent hierarchical cluster-based routing [Text] / A. W. Matin, S. Hussain // life. – 2006. – Т. 7. – С. 8.
7. Bara'a, A. A. A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks [Text] / A. A. Bara'a, E. A. Khalil // Applied Soft Computing. – 2012. – Т. 12. – №. 7. – С. 1950-1957.
8. Basagni, S. A. generalized clustering algorithm for peer-to-peer networks [Text] // Proc. Workshop on Algorithmic Aspects of Communication, July 1997. – 1997.
9. Goldberg, D. E. Genetic algorithms and machine learning [Text] / D. E. Goldberg, J. H. Holland // Machine learning. – 1988. – Т. 3. – №. 2. – С. 95-99.
10. Kennedy, J. Particle swarm optimization [Text] // Encyclopedia of machine learning. – Springer US, 2011. – С. 760-766.
11. Boussaid, I. Hybridizing biogeography-based optimization with differential evolution for optimal power allocation in wireless sensor networks [Text] // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2011. – Т. 60. – №. 5. – С. 2347-2353.
12. Bhushan S. A hybrid approach to energy efficient clustering for heterogeneous wireless sensor network [Text] / S. Bhushan, S. Antoshchuk // Технологии и конструирование в электронной аппаратуре, 2018, № 2, С.15-20. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.2.15>
13. Бхушан Ш. Кластеризация беспроводной сенсорной сети на основе генетического алгоритма [Text] / Ш. Ш. Бхушан, И. А. Шамин, С. Г. Антошук // Электротехнічні та комп'ютерні системи, 2018, № 28(104), С.193-200.

### References

1. David, K., Dixit, D., & Jefferies, N. (2010), 2020 Vision. IEEE Vehicular Technology Magazine, 5(3), 22-29.
2. Mahajan, S. and Dhiman, P. K. (2016), Clustering in Wireless Sensor Networks: A Review. International Journal, 7(3).

3. Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P. and Balakrishnan, H. (2002), An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4), pp. 660-670.
4. Smaragdakis, G., Matta, I. and Bestavros, A. (2004), SEP: A stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. Boston University Computer Science Department.
5. Chand, S., Singh, S. and Kumar, B. (2014), Heterogeneous HEED protocol for wireless sensor networks. *Wireless personal communications*, 77(3), pp. 2117-2139.
6. Matin, A. W. and Hussain, S. (2006), Intelligent hierarchical cluster-based routing. *life*, 7, p. 8.
7. Bara'a, A. A. and Khalil, E. A. (2012), A new evolutionary based routing protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks. *Applied Soft Computing*, 12(7), pp. 1950-1957.
8. Basagni, S. (1997), A generalized clustering algorithm for peer-to-peer networks. In *Proc. Workshop on Algorithmic Aspects of Communication*, July 1997.
9. Goldberg, D. E. and Holland, J. H. (1988), Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2), pp. 95-99.
10. Kennedy, J. (2011), Particle swarm optimization. In *Encyclopedia of machine learning*, Springer US, pp. 760-766.
11. Boussaid, I., Chatterjee, A., Siarry, P. and Ahmed-Nacer, M. (2011), Hybridizing biogeography-based optimization with differential evolution for optimal power allocation in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(5), pp. 2347-2353.
12. Bhushan S. A hybrid approach to energy efficient clustering for heterogeneous wireless sensor network [Text] / S. Bhushan, S. Antoshchuk // *Технологии и конструирование в электронной аппаратуре*, 2018, № 2, С.15-20. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2018.2.15>
13. Bhushan S. Klustering in wireless sensor network based on Genetic algorithm / Bhushan S., I.Shamin, S. Antoshchuk // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*, 2018, № 28(104), С.193-200.

*Надійшла до редакції 10.04.2018*

**S. BHUSHAN<sup>1</sup>, S. G. ANTOSHCHUK<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Indira Gandhi National Open University

<sup>2</sup>Odessa National Polytechnic University Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine

### **COMBINED METAHEURISTIC CLUSTERING FOR ENERGY-EFFICIENT ROUTING PROTOCOLS FOR HETEROGENEOUS WIRELESS SENSOR NETWORKS**

The aim of the article is to study, design and develop several variants of clustering protocols, including meta-heuristic techniques and K-means and information technology for the WSN to reduce energy consumption and to prolong the life time.

The expediency of using metaheuristic clusterization to improve the efficiency of routing protocols of heterogeneous wireless sensor networks is considered. Algorithms of the proposed works run through several rounds. Each round comprises two stages: Setup phase and Steady state phase. In the setup phase sensor nodes are partitioned into clusters. The setup phase of the algorithm is same as that of LEACH but based on the selected meta-heuristic algorithm(GA/BBO/PSO). In the second phase, data transmission takes place between each non-CH node and their respective CHs using its TDMA schedule which is further transmitted to the BS.

Simulation of the network was carried out and research was conducted on the determination of life expectancy.

Network lifetime can be shown by capturing the number of alive nodes at each round till every node in the network dies. In this paper the performance of the proposed protocols is analyzed against the well-known protocols: SEP and the more recently cited genetic algorithm based ERP protocol.

In each of the scenario the proposed protocols KGA (based on genetic algorithm), KBBO (biogeography based optimization), KPSO (based on particle swarm optimization) outperform other considered algorithms. The efficiency of the proposed approach is proved.

**Keywords:** *wireless sensor network, meta-heuristic clustering, routing protocols.*

**Ш. БХУШАН<sup>1</sup>, С. Г. АНТОЩУК<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Национальный открытый университет им. Индиры Ганди

<sup>2</sup>Одесский национальный политехнический университет

### **КОМБИНИРОВАННАЯ МЕТАЕВРИСТИЧЕСКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

Рассмотрена целесообразность применения метаэвристической кластеризации для повышения эффективности протоколов маршрутизации гетерогенных беспроводных сенсорных сетей. Выполнено моделирование сети и проведено исследование по определению продолжительности жизни. Доказана эффективность предложенного подхода.

**Ключевые слова:** *беспроводная сенсорная сеть, метаэвристическая кластеризация, протоколы маршрутизации.*