

СТВОРЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ В ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ ОБЛІКУ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

М.І. Ільїнський¹, В.М. Руденко¹

¹ Automation of Industrial Processes Department, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine

E-mail: fomenkomihail00@gmail.com

Отримано 14.12.2024

Прийнято до публікації 18.12.2024

Опубліковано 31.12.2024

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена комплексному дослідженню можливостей застосування бездротових сенсорних мереж для обліку енергоспоживання в житлових комплексах. Проведено аналіз існуючих рішень, розроблено відповідні математичні моделі та проведено симуляційний експеримент для оцінки ефективності запропонованих алгоритмів маршрутизації та самоорганізації мережі. Проаналізовано залежність тривалості функціонування, стабільності та пропускну здатності бездротової сенсорної мережі від співвідношення радіусів покриття та зв'язку. Знайдено спосіб для підвищення точності контролю системи енергоспоживання мікрорайону шляхом дослідження та розробки інформаційної системи обліку споживання електричної енергії.

Розглянуто технічні вимоги мережевої організації до системи і компонентів АСКОЕ мікрорайону, наведені рекомендації по монтажу основних компонентів і їх налаштування, а також представлені схеми по установці. Удосконалено алгоритм кластеризації для безпроводних сенсорних мереж, що відрізняється комплексним застосуванням відомих раніше комбінованого критерію прогнозування та значення придатності сенсорного вузла для виконання ролі головного, який за рахунок комплексного використання зазначених вище величин забезпечує більше значення тривалості життєвого циклу та збільшення тривалості періоду стабільності порівняно з відомими алгоритмами.

Виконано дослідження БСМ 5-ти поверхової будівлі центральних шлюзів будинку з вибором головного шлюзу (вузла) та головних шлюзів домівок мікрорайону. Для отримання позитивного результату застосовується метод кластеризації мережі із застосуванням шару Коханена і нейронних мереж. Дана робота здійснена для збільшення періоду життєвого циклу БСМ, що доказано при теоретичних дослідженнях.

Ключові слова: автоматизація, мережа, контроль витрат, керування, бездротові сенсорні мережі, кластеризація сенсорів.

ВСТУП

Відсутність ефективної системи обліку енергоспоживання в умовах енергетичної кризи може призвести до неефективного використання енергоресурсів, збільшення втрат та ускладнення управління енергосистемою, в тому числі теплоносії, електромережі, системи водопостачання та ін. Впровадження сенсорних мереж може дозволити уникнути цих проблем та забезпечити стабільну роботу життєво важливих структур для населення.

Міста, як центри високої концентрації населення та промисловості, є значними споживачами енергії. Для забезпечення ефективного управління енергоресурсами в містах необхідні масштабні системи контролю, що охоплюють усіх споживачів, від домогосподарств до великих підприємств. Ефективний контроль за споживанням енергії в містах є ключовим фактором для забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку держави. Сучасні міста потребують інтегрованих систем моніторингу, таких як БСМ (Бездротова сенсорна мережа), та управління енергоспоживанням всіх наявних ресурсів, що охоплюють усіх споживачів.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На протязі довго часу певний перелік вчених займався вирішенням даної проблеми: Koucheryanu A. [1], Heinzelman W. [5], Cohen B. [9], Caragliu A. [10]. Деякі вчені розглядали методи застосування бездротових сенсорних мереж для безпроводного збору та передачі даних, а саме: Ben Alla S. [7], Kang T. [8].

Для ефективного збору даних про споживання енергії та створення розумних систем обліку використовується широкий спектр сенсорів. Обираючи тип сенсора, необхідно враховувати конкретні завдання, які має вирішувати система, та особливості об'єкта, що підлягає моніторингу.

Основні типи сенсорів, які використовуються в системах обліку енергії:

- *електричні лічильники*: індукційні, електронні, "розумні" лічильники обладнані додатковими функціями, такими як здатність до двостороннього обміну даними, дистанційного зчитування показів та управління навантаженням;
- *датчики струму та напруги*: використовуються для безпосереднього вимірювання електричних параметрів у мережі;
- *датчики температури*: вимірюють температуру різних середовищ (повітря, води, поверхні), що

дозволяє оцінити ефективність роботи опалювальних систем, кондиціонерів та іншого обладнання;

- *датчики тиску*: використовуються для вимірювання тиску в системах водопостачання, опалення та газу;
- *датчики витрати*: вимірюють об'єм рідини або газу, що протікає через трубу.
- *датчики якості енергії*: Фіксують такі параметри, як гармоніки, перенапруги, перепади напруги та інші, що дозволяють оцінювати якість електроенергії;
- *датчики вологості*: використовуються для контролю рівня вологості в приміщеннях.
- *датчики освітленості*: вимірюють рівень освітленості в приміщеннях для автоматичного керування освітленням.

Крім того, в системах обліку енергії можуть використовуватися:

- *Бездротові сенсорні мережі*: Для збору даних з великої кількості датчиків, розташованих в різних точках об'єкта.
- *Системи GPS*: Для визначення географічного розташування об'єктів та аналізу їх маршрутів.

Таким чином, проблема полягає у опрацюванні методики побудови автоматизованої системи контролю споживання енергоресурсів житловим комплексом на основі бездротової сенсорної мережі, із застосуванням апарату виводу нечіткої логіки для кластеризації сенсорів мережі, із впровадженням системи дистанційного обліку на етапі передачі даних у компанію енергопостачання. Тим самим мережеві компанії можуть зменшити технологічні втрати та підвищити ефективність своєї діяльності, а споживачі отримують точні рахунки за отримані послуги та зможуть контролювати свої витрати за споживання енергії, що суттєво вплине на вартість комунальних послуг, в цілому. Збутові компанії, також, отримають більш точні дані про обсяги реалізованої енергії завдяки підвищенню контролю втрат та точності обліку енергоресурсів за допомогою бездротових сенсорних мереж WSN (Wireless sensor networks) [1].

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення мети дослідження застосовані методи структурного та порівняльного аналізу, що дозволили всебічно оцінити існуючі технології та рішення для створення систем моніторингу та аналізу споживання електроенергії в домогосподарствах на основі IoT-технологій та системи Wireless sensor networks.

Структурний аналіз сприяв визначенню основних компонентів системи, їх функціональних вимог та взаємодії між ними.

Порівняльний аналіз дозволив оцінити переваги і недоліки існуючих рішень, зокрема таких, як метод нечіткої логіки та кластерний аналіз з використання діаграм Вороного й подібних систем, що застосовуються для моніторингу енергоспоживання.

Методи інформаційного та аналітичного підходу були використані для збору та систематизації інформації, що дозволило досконаліше здійснити вивчення наукової літератури, сучасних технологій IoT, а також доступних онлайн-ресурсів, що стосуються розробки інтелектуальних систем управління енергоспоживанням. Вивчення наявних рішень, таких як платформи Power BI для візуалізації даних, забезпечило формулювання основних вимог до функціональності та зручності користування системами моніторингу енергоспоживання.

Для перевірки ефективності теоретичних положень та запропонованих технічних рішень використані експериментальні методи, зокрема тестування апаратної частини, побудованої на основі плати ESP32-CAM, для збору даних з «розумних» електролічильників.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

АСКОЕ мікрорайону призначена для моніторингу різних параметрів навколишнього середовища та об'єктів. Система складається з мережі бездротових датчиків, які збирають дані та передають їх на централізований сервер для подальшого аналізу та використання цієї інформації. Сукупність автономних датчиків АСКОЕ забезпечує безперервний збір даних, незалежно від зовнішніх умов.

Варіант структури АСКОЕ житлового комплексу наведено на Рис. 1.

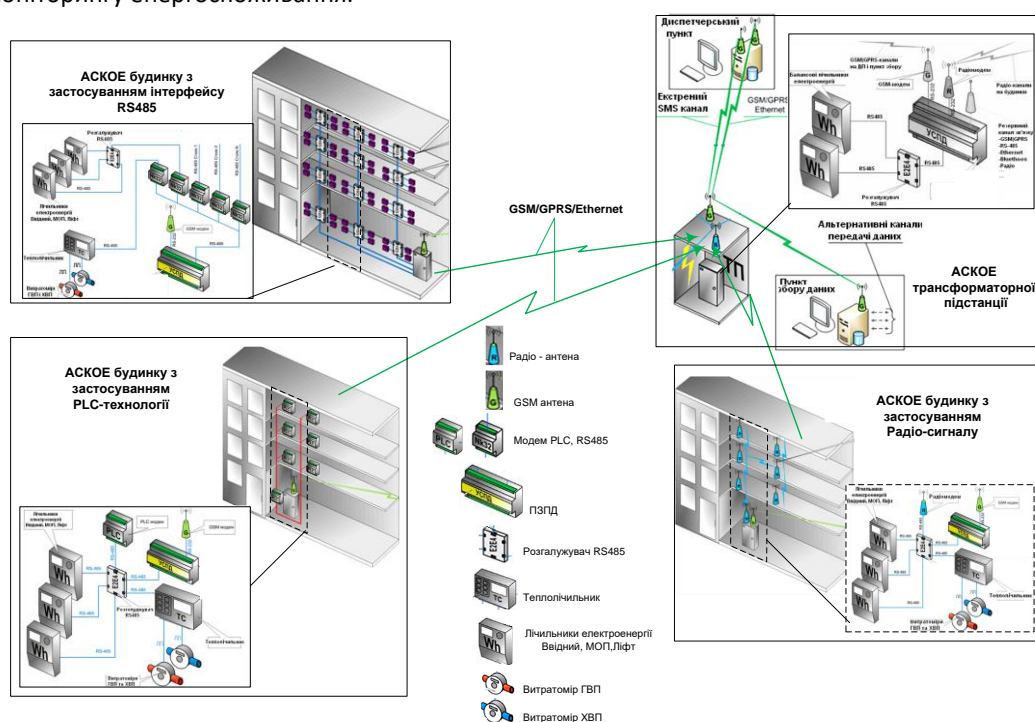


Рис. 1. Структурна схема АСКОЕ мікрорайону

Моделювання БСМ помешкання здійснено з урахуванням задачі кластеризації сенсорів нейронних мереж та шару Коханена [2]. За допомогою нейронної мережі було створено математичну модель із шаром Коханена. Під час розрахунків використовувалось програмне забезпечення MATLAB з функцією newsc. Проміжок між різними сенсорами надано у вигляді масивів і співвідношень, що рахується у відносних одиницях

$$x_o = X_k / X_{pl} \quad (1)$$

$$y_o = Y_k / Y_{pl}, \quad (2)$$

де X_k , Y_k – представлені координати (декартові) сенсорів в будівлі; X_{pl} , Y_{pl} – декартові координати, наприкінці розрахунку у будинку.

На завершальному етапі нашого моделювання можна буде отримати центри кластерів [3]. Варіант моделювання наведено на Рис. 2. Аналіз результатів

моделювання дозволяє виявити центри розміщення кластеру при просторовому розташуванні датчиків виміру витрат, мешканцями багатоповерхової будівлі та з урахуванням енергетичних параметрів.

Експериментальне дослідження основних шлюзів будинків району з застосуванням нейронних мереж з шаром Коханена дозволяє отримати рішення задачі кластеризації сенсорів [4]. Проміжки між центральними вузлами у масивах баз даних, для більшої наглядної форми, взяті з коефіцієнтом 0,1.

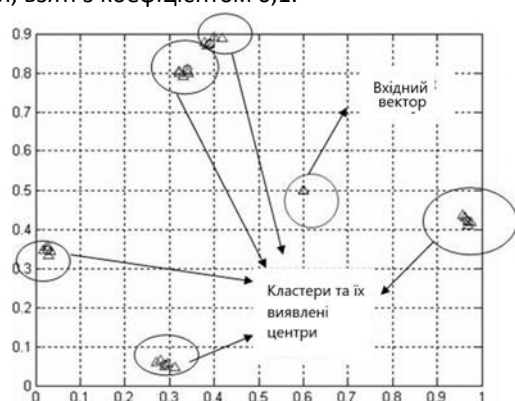


Рис. 2. Центри кластерів сенсорів у будинках

Розташування центрів кластерів груп будівель, при моделюванні в середовищі MATLAB, здійснювалось з урахуванням геоданих стільникового зв'язку (Рис. 3).

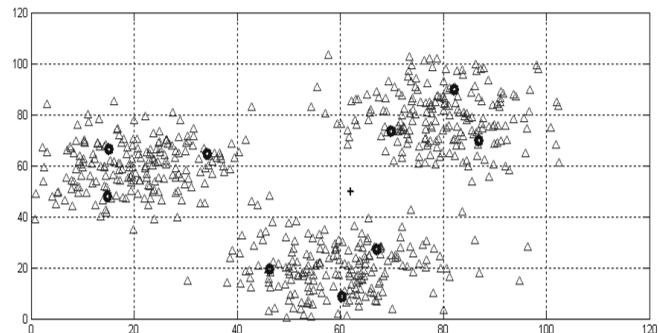


Рис. 3. Загальна схема виявлених кластерів

Після проведення процедури кластеризації постає необхідність у визначенні головного кластеру.

Алгоритм вибору головного кластера з використанням нечіткої логіки застосовує кілька параметрів для вибору головного вузла у бездротовій сенсорній мережі: центральність за діаграмами Вороного та залишкова енергія сенсорно вузла [5]. Сам датчик нечіткої логіки FLC (Fuzzy Logic Controller) має у складі такі компоненти (Рис. 4): блоків виведення та дефазифікації, бази правил, блоку фазифікації.



Рис. 4. Контролер (датчик) нечіткої логіки (FLC)

значення змінних, за допомогою застосування функцій приналежності [6].

В Табл. 1 вказані параметри, граничні значення параметрів та терм-множини для нечіткого виведення. Наприкінці у FLC представлено вибір головного вузла у відсотках та отримана функція приналежності за підрахунками MATLAB (Рис. 4).

МОДЕЛЮВАННЯ

Перший рівень моделювання. Фазифікація – процес переходу від вхідних чітких значень змінних до нечіткого

Табл. 1. Система нечіткого виводу

x	x ₁	Назви параметрів	Залишкова енергія
		Терм-множини	{ мала, середня, висока }
	Межа значення	[0-0,1] Дж	
	x ₂	Назви параметрів	Центральність за діаграмами Вороного
Терм-множини		{ далека, середня, близька }	
y		Межа значення	[0-100]%
		Назви параметрів	Вірогідність вибору головного вузла
		Терм-множини	{ дуже мала, мала, більше малої, менше середньої, середня, більше середньої, невелика, велика, дуже велика }
		Межа значення	[0-100]%

Для кожної лінгвістичної змінної обрано трикутну функцію приналежності для визначення ступеня належності елементів до нечітких множин. Далі, на основі цих функцій та вхідних даних, необхідно побудувати базу правил [7].

Другий рівень моделювання. База правил включає в себе множину нечітких правил $R^k, k = 1, \dots, N$ вигляду:

$$R^k : \text{ЯКЩО} (x_1 \text{ це } B_1^k \text{ ТА } x_2 \text{ це } B_2^k \dots \text{ ТА } x_n \text{ це } B_n^k),$$

$$\text{ТОДІ} (y_1 \text{ це } C_1^k \text{ ТА } y_2 \text{ це } C_2^k \dots \text{ ТА } y_n \text{ це } C_n^k), \quad (3)$$

де n — чисельність нечітких правил; B_k — самі нечіткі множини $B_i^k \subseteq X_i \subset R, i = 1, \dots, n$ (див. Рис. 5).

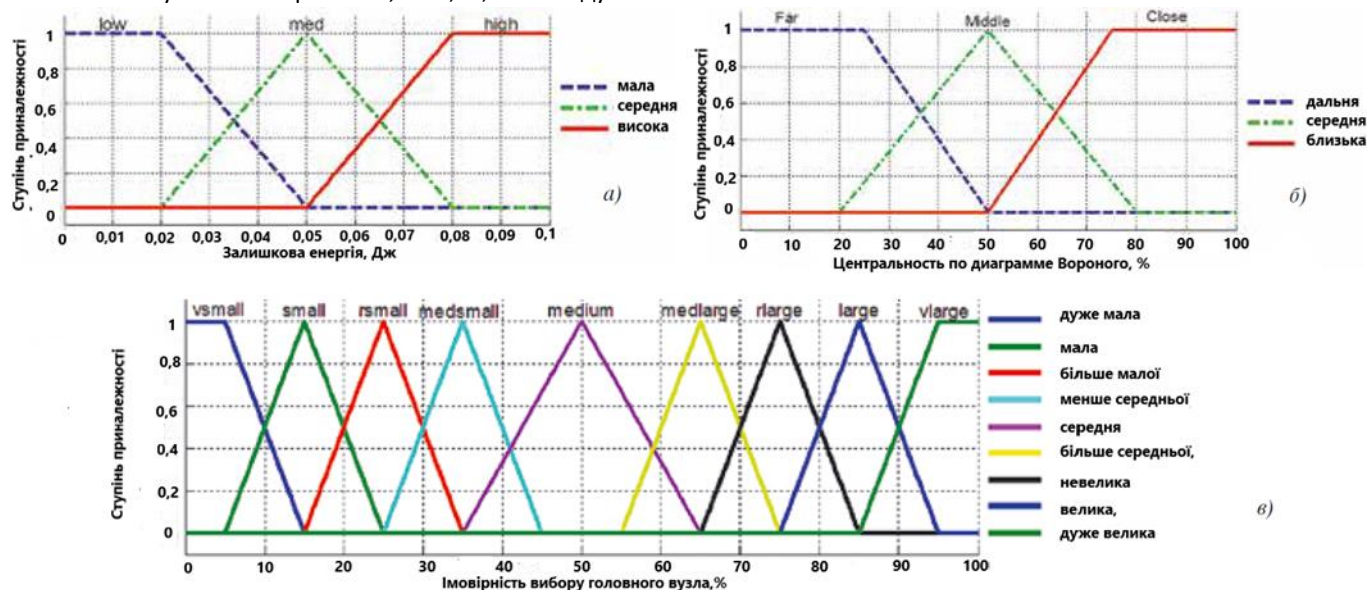


Рис. 5. Функції належності для вхідних даних

а – залишкова енергія; б – центральності за діаграмами Вороного; в – вірогідність вибору головного вузла

Третій рівень моделювання. У якості алгоритму нечіткого виводу використано правило Мамдані:

$$\mu_C(y) = \max_{k=1-N} \left\{ \min \left[\mu_{B_1^k}(\bar{x}_1), \mu_{B_2^k}(\bar{x}_2), \mu_{C_1^k}(y) \right] \right\}, \quad (4)$$

де \bar{x}_1 та \bar{x}_2 – початкові параметри (залишкова енергія вузла сенсорів та центральності за діаграмами Вороного); B_1^k та B_2^k - відповідаючи їм нечіткі множини, $k = 1, \dots, N$; N – чисельність правил нечіткого виводу ($N=3^2=9$); y – параметр на виході (вірогідність вибору головного вузла); C_1^k – множина вихідного параметру.

Застосувавши апарат нечіткої логіки до бази правил, отримали лінгвістичну змінну, яка характеризує ступінь вірогідності вибору головного вузла [8].

Четвертий рівень моделювання. Вірогідність обрання головного вузла обрахована шляхом способу дефазифікації нечіткої множини на виході, за допомогою методу центру тяжкості, за формулами:

$$y = \left(\sum_{k=1}^N a_k \int_y \mu_{C^k}(y) dy \right) / \left(\sum_{k=1}^N a_k \int_y \mu_{C^k}(y) dy \right), \quad (5)$$

де μ_{C^k} - функція, яка визначає ступінь, з якою вихідне значення k -го правила відповідає нечіткій множині, $k = 1,$

..., N ; a_k – це точка, де функція приналежності дорівнює 1 [9].

Побудований алгоритм ефективно використовується при виборі головного вузла кластера у бездротовій сенсорній мережі (Рис. 6).

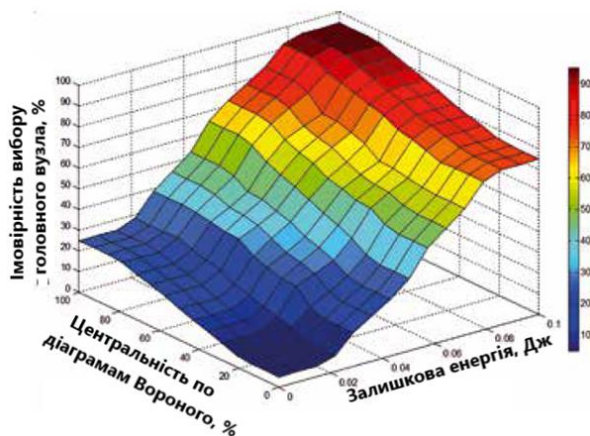


Рис. 6. Залежності вірогідного вибору головного вузла від залишкової енергії та центральності за діаграмою Вороного

За основу взято модель мережі зі ста вузлів, розташованих довільним способом на площадці 100x100 метрів.

Після розподілення вузлів, здійснюємо перехід до створення кластеру із застосуванням діаграми Вороного.

Використання діаграм Вороного для визначення центральності вузлів у поєднанні з нечіткою логікою для прийняття рішень забезпечило більш розумне управління енергоресурсами мережі (Рис.7).

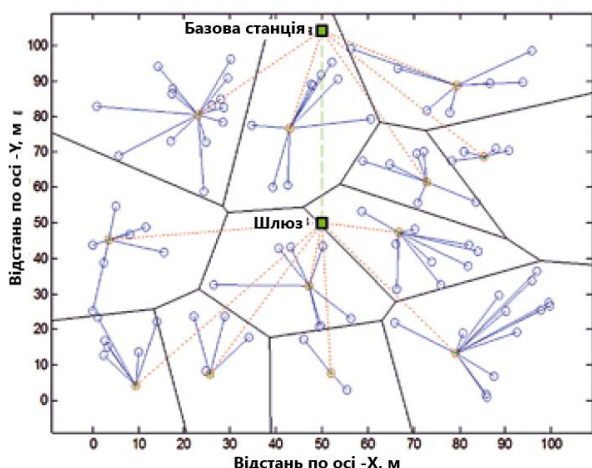


Рис. 7. Використання діаграм Вороного для визначення головного вузла в кластері за допомогою нечітких правил

Для порівняння ефективності запропонованого алгоритму з відомими алгоритмами LEACH та Fuzzy C-Means використовувались стандартні метрики: залишкова енергія вузлів мережі та загальний термін її функціонування [10]. Результати наведено на Рис. 8.

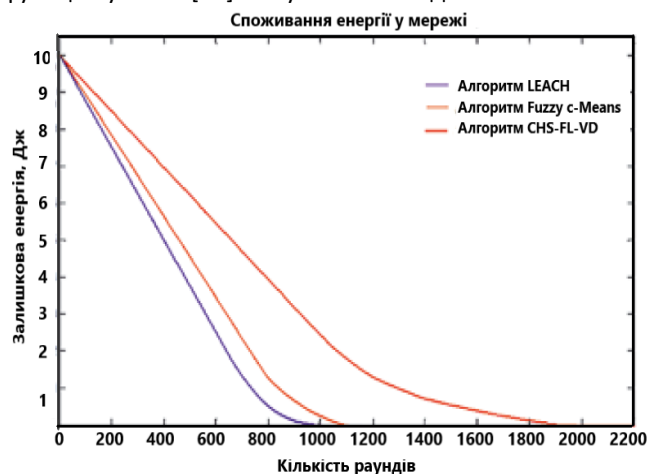


Рис. 8. Зміна залишкової енергії в залежності від числа раундів

ВИСНОВКИ

Результат проведеного моделювання, на основі аналізу відношення радіусу покриття та радіусу зв'язку, свідчить про високу ефективність запропонованого алгоритму кластеризації сенсорів, заснованого на нейронних мережах та нечіткій логіці. Використання шару Коханена та діаграм Вороного забезпечило точну ідентифікацію головних вузлів у мережі, що дозволило оптимізувати розподіл енергетичних ресурсів. Впровадження нечіткої логіки для прийняття рішень надало алгоритму гнучкості та адаптивності до змінних умов роботи мережі. Порівняльний аналіз з відомими алгоритмами LEACH та Fuzzy C-Means підтвердив переваги запропонованого підходу в плані енергоефективності та загального терміну життя мережі, продовжуючи життєвий цикл сенсорної мережі на 89% та 70% відповідно.

Отримані результати відкривають перспективи для подальших досліджень у напрямку розробки більш інтелектуальних систем управління бездротовими сенсорними мережами (Sense, Enbala Powertracks, GE Predix, Siemens MindSphere), що дозволить підвищити їх надійність та ефективність у різних областях застосування.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] D. Lupton, "You are Your Data: Self-Tracking Practices and Concepts of Data BT. - - Lifelogging: Digital self-tracking and Lifelogging - between disruptive technology and cultural transformation," S. Selke, Ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, pp. 61–79.
- [2] Teuber A., Eissfeller B. WLAN indoor positioning based on Euclidean distances and fuzzy logic// Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06), Hannover, Germany, 2006. 168 p.
- [3] A. Koucheryavy, "State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models," in Proceedings of ICACT'2014, Phoenix Park, Korea, Feb. 16-19, 2014.
- [4] О. Разживін, А. Люта, О. Марков, Д. Картамишев, В. Мирошниченко, і М. Ільїнський, "Моделювання та удосконалення сенсорної мережі системи обліку споживання енергетичних ресурсів у мікрорайоні," Технічні науки та технології, vol. 1, no. 31, pp. 138–145, 2023. [Онлайн]. URL: <http://surl.li/tlcfgv>. Дата звернення: 02.12.2024. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-1(31)-138-145.
- [5] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 530–539, Oct. 2002.
- [6] A. Salim and A. Koucheryavy, "Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks," in Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT 2009), Phoenix Park, Korea, Feb. 2009, vol. 3, pp. 1562–1587.
- [7] S. Ben Alla, A. Ezzati, and A. Mohsen, "Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic in heterogeneous wireless sensor networks," in Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), May 2012, pp. 761–766.
- [8] T. Kang, "South Korea's experience with smart infrastructure services," 2020, 36 p.
- [9] B. Cohen, "What exactly is a smart city?", Fast Company, vol. 7, no. 4, pp. 62–74, 2012..
- [10] A. Caragliu, "Smart cities in Europe," Journal of Urban Technology, vol. 18, no. 2, pp. 65–82, 2011.

**CREATION AND APPLICATION OF A SENSOR NETWORK
IN THE INFORMATION SYSTEM OF ENERGY ACCOUNTING
OF A RESIDENTIAL COMPLEX**

Mykhailo Ilinskyi, Vladislav Rudenko

The article is devoted to a comprehensive study of the possibilities of using wireless sensor networks for energy consumption metering in residential complexes. The existing solutions are analyzed, appropriate mathematical models are developed, and a simulation experiment is conducted to evaluate the effectiveness of the proposed routing and network self-organization algorithms. The dependence of the duration of operation, stability, and throughput of a wireless sensor network on the ratio of coverage and communication radii is

analyzed. A way to improve the accuracy of monitoring the energy consumption system of a neighborhood by researching and developing an information system for accounting for electricity consumption is found.

The technical requirements of the network organization to the system and components of the neighborhood energy management system are considered, recommendations for the installation of the main components and their configuration are given, and installation diagrams are presented. The clustering algorithm for wireless sensor networks is improved, which is characterized by the integrated use of the previously known combined forecasting criterion and the value of the suitability of the sensor node to act as the master, which, due to the integrated use of the above values, provides a longer life cycle and an increase in the duration of the stability period compared to the known algorithms.

The study of the BSM of a 5-storey building of the central gateways of the building with the selection of the main gateway (node) and the main gateways of the houses of the neighborhood was carried out. To obtain a positive result, the network clustering method was applied using the Kohanen layer and neural networks. This work was carried out to increase the life cycle of the WSN, which was proved in theoretical studies.

Keywords: automation, network, cost control, management, wireless sensor networks, sensor clustering.

REFERENCES

- [1] D. Lupton, "You are Your Data: Self-Tracking Practices and Concepts of Data BT. - - Lifelogging: Digital self-tracking and Lifelogging - between disruptive technology and cultural transformation," S. Selke, Ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, pp. 61–79.
- [2] Teuber A., Eissfeller B. WLAN indoor positioning based on Euclidean distances and fuzzy logic// Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06), Hannover, Germany, 2006. 168 p.
- [3] A. Koucheryavy, "State of Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models," in Proceedings of ICACT'2014, Phoenix Park, Korea, Feb. 16-19, 2014.
- [4] Razhyvin O., Liuta A., Markov O., Kartamyshev D., Miroshnichenko V., Ilinskyi M., "Modeling and improvement of the sensor network of the energy consumption metering system in the neighborhood," Technical Sciences and Technologies, vol. 1, no. 31, pp. 138–145, 2023. [Online]. URL: <http://surl.li/tlcfgv>. Accessed: 02.12.2024. DOI: 10.25140/2411-5363-2023-1(31)-138-145.
- [5] W. R. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, no. 4, pp. 530–539, Oct. 2002.
- [6] A. Salim and A. Koucheryavy, "Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks," in Proceedings of

the 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICTACT 2009), Phoenix Park, Korea, Feb. 2009, vol. 3, pp. 1562–1587.

- [7] S. Ben Alla, A. Ezzati, and A. Mohsen, "Gateway and Cluster Head Election using Fuzzy Logic in heterogeneous wireless sensor networks," in Proceedings of the International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), May 2012, pp. 761–766.
- [8] T. Kang, "South Korea's experience with smart infrastructure services," 2020, 36 p.
- [9] B. Cohen, "What exactly is a smart city?", Fast Company, vol. 7, no. 4, pp. 62–74, 2012..
- [10] A. Caragliu, "Smart cities in Europe," Journal of Urban Technology, vol. 18, no. 2, pp. 65–82, 2011.