

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ  
AUTOMATION AND CONTROL

УДК 004.896

DOI: 10.18413/2518-1092-2023-8-3-0-3

Аль-Обайди А.М.Ж.

О ПЛАНИРОВАНИИ АКТИВНОСТИ СЕНСОРНЫХ УЗЛОВ  
В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Компания zuhoor Al\_Ameer general contracting, Джадрия, Багдад 10070, Ирак

*e-mail: 1229004@bsu.edu.ru*

**Аннотация**

В данной статье представлен новый алгоритм для оптимизации планирования активности сенсорных узлов в беспроводных сенсорных сетях. Алгоритм основан на использовании обучаемого автомата, который позволяет определить оптимальное количество активных сенсорных узлов, необходимых для обеспечения контроля над всеми объектами в заданной области. Обучение автомата производится с использованием модели беспроводной сенсорной сети, которая позволяет учесть различные параметры сети, такие как плотность распределения узлов и объектов, размер зоны покрытия и другие факторы.

Эффективность предложенного алгоритма оценивается путем сравнения его результатов с результатами других алгоритмов, используемых для планирования активности узлов. Результаты показывают, что предложенный алгоритм позволяет существенно снизить энергопотребление сенсорной сети за счет уменьшения числа активных узлов, что в свою очередь позволяет увеличить время автономной работы сети и улучшить ее производительность.

Таким образом, данный алгоритм может быть использован для оптимизации работы беспроводных сенсорных сетей и повышения их эффективности в условиях изменяющихся параметров окружающей среды и требований к контролю объектов.

**Ключевые слова:** сенсорные сети; самоорганизующиеся сети; обучающийся автомат; машинное обучение; энергоэффективность

**Для цитирования:** Аль-Обайди А.М.Ж. О планировании активности сенсорных узлов в беспроводной сенсорной сети // Научный результат. Информационные технологии. – Т.8, №3, 2023. – С. 19-26. DOI: 10.18413/2518-1092-2023-8-3-0-3

Al-Obaidi A.M.Zh.

ABOUT PLANNING THE ACTIVITY OF SENSOR NODES  
IN A WIRELESS SENSOR NETWORK

zuhoor Al\_Ameer general contracting company, Jadriyah, Baghdad 10070, Iraq

*e-mail: 1229004@bsu.edu.ru*

**Abstract**

This article presents a new algorithm for optimizing the activity planning of sensor nodes in wireless sensor networks. The algorithm is based on the use of a trainable automaton, which allows you to determine the optimal number of active sensor nodes necessary to ensure control over all objects in a given area. The machine is trained using a wireless sensor network model, which allows you to take into account various network parameters, such as the density of distribution of nodes and objects, the size of the coverage area and other factors.

The effectiveness of the proposed algorithm is evaluated by comparing its results with the results of other algorithms used for node activity planning. The results show that the proposed algorithm can significantly reduce the power consumption of the sensor network by reducing the number of active nodes, which in turn allows you to increase the battery life of the network and improve its performance.

Thus, this algorithm can be used to optimize the operation of wireless sensor networks and increase their efficiency in conditions of changing environmental parameters and requirements for monitoring objects.

**Keywords:** sensor networks; self-organizing networks; learning automaton; machine learning; energy efficiency

**For citation:** Al-Obaidi A.M.Zh. About planning the activity of sensor nodes in a wireless sensor network // Research result. Information technologies. – Т. 8, №3, 2023. – P. 19-26. DOI: 10.18413/2518-1092-2023-8-3-0-3

### **ВВЕДЕНИЕ**

Беспроводные сенсорные сети (БСС) являются одним из перспективных направлений развития цифровых технологий в XXI веке. Одной из сфер применения БСС является автоматический сбор информации об окружающей среде и управляемых объектах. Особенно БСС полезны там, где присутствие человека из-за внешних факторов невозможно, либо сбор информации необходимо производить продолжительное время.

Использование подобных сетей ориентировано на применение в таких сферах, как информационная инфраструктура, цифровая трансформация промышленности, системы управления, государственное управление, «умный город» и цифровое здравоохранение.

Как правило, узлом сети является сенсор, содержащий набор датчиков, процессор с внутренней памятью, приемо-передатчик и автономный элемент питания. Сенсорный узел сети потребляет электроэнергию необходимую для сбора, обработки и передачи информации, также, в зависимости от топологии, электроэнергия расходуется и на маршрутизацию пакетов, получаемых от других узлов. Время работы сенсорного узла БСС напрямую зависит от ресурса элемента питания.

Элемент питания имеет ограниченный энергоресурс, при исчерпании которого узел сети прекращает функционировать, что может крайне негативно сказаться на работе БСС в целом. В результате большая часть исследований по увеличению срока работы узла сети связана с уменьшением энергопотребления.

Выбор энергоэффективных методов и алгоритмов сбора и передачи информации между является одной из основных актуальных научных проблем при проектировании БСС.

В рамках данной работы рассмотрен алгоритм адаптивного планирования работы узлов БСС на основе обучающихся автоматов.

### **ОБУЧАЮЩИЕСЯ АВТОМАТЫ**

Обучающиеся автоматы – это модель машинного обучения. Эта модель является абстрактной моделью, которая выбирает подходящее действие из конечного набора действий и выполняет его в случайной среде [2]. Затем с помощью сигнала подкрепления окружающая среда оценивает выбранное действие и реагирует на автоматы. Чтобы выбрать следующее действие, автоматы сначала обновляют свое внутреннее состояние на основе выбранного действия, и сигнал принимается. Таким образом, следуя определенному правилу, автоматы находят наилучшее выходное решение, и для этого автомат непрерывно взаимодействует с окружающей средой, чтобы принять соответствующее решение для соответствующего действия.

### **ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ БСС**

В настоящее время наблюдается стремительный прогресс в области беспроводной связи. Эта беспроводная сенсорная сеть включает в себя сенсорные устройства, которые оснащены одним или несколькими датчиками, одним или несколькими приемопередатчиками, ресурсами хранения данных для обработки и возможными исполнительными механизмами. Это устройство собирает, хранит и обрабатывает информацию об окружающей среде, в которой оно развернуто. Таким образом, сенсорная сеть плотно связана с ограниченными ресурсами и динамической топологией. Проблема нехватки электроэнергии заключается в ограничении размера и веса датчиков. Энергопотребление сенсорной сети напрямую связано с увеличением срока службы и

эксплуатационными характеристиками сенсорной сети. Таким образом, необходимо оптимизировать потребление энергии при работе сенсорной сети. В последнее время было проведено много исследовательских работ в области оптимизации энергопотребления беспроводных сенсорных сетей [3].

Чтобы сделать сенсорную сеть энергоэффективной, управление питанием сенсорных узлов может осуществляться следующим образом:

1. Планирование узлов с использованием активного и спящего режимов.
2. Управление дальностью передачи между беспроводными узлами.
3. Использование энергоэффективных методов маршрутизации и сбора данных.

В данной работе основное внимание было уделено методу планирования активности узла для решения проблемы мониторинга контролируемых объектов. Этот метод обеспечивает эффективный результат при случайном размещении датчиков, которые отслеживают фиксированный список контролируемых объектов (целей). Существуют некоторые требования к производительности, такие как подключение к маршрутизации, покрытие сети, требования к резервированию и т.д. которые используются для планирования работы узлов. Что касается проблемы обслуживания целей, то здесь было сделано предположение о том, что каждый узел радиодиапазона способен поддерживать свой маршрут. Таким образом, каждая цель в сети обслуживается более чем одним сенсорным узлом, где избыточные узлы переводятся в спящий режим, не влияя на покрытие.

В данной работе предлагается использовать подход на основе обучающихся автоматов (ОА) для планирования активности сенсорных узлов. Данный метод позволяет найти минимальный набор активных сенсорных узлов, которые отслеживают максимальное количество контролируемых объектов (КО) в любой момент времени.

Данный алгоритм является итерационным. При этом в качестве исходных данных на каждом сенсорном узле задается вероятность выбора ОА начального состояния узла, «активное», либо «сон» со значением 0,5. От куда следует, что оба состояния равновероятны.

Все сенсорные узлы имеют фиксированную дальность действия  $R$ . Количество контролируемых объектов задается значением  $M$ , а количество сенсорных узлов значением  $N$ . При этом  $1 \leq j \leq M$ ,  $1 \leq i \leq N$ .

На этапе обучения сенсорный узел выбирается случайным образом. Используя ОА, каждый сенсорный узел выбирает свое состояние. Затем он передает пакет сообщения, включая всю необходимую информацию, остальным сенсорным узлам.

Вектор вероятности состояния автомата в узле  $i$  в момент времени  $t$  равен

$$P_i(t) = [p_{(i,1)}(t), p_{(i,2)}(t)] \quad (1)$$

Функция обратной связи – это двоичная функция, которая выдает вознаграждение всякий раз, когда зона покрытия сети улучшается. Проще говоря, если совокупное состояние сенсорных узлов, выбранных командой из  $N$  обучающихся автоматов, приводит к улучшению зоны покрытия сети, тогда увеличивается вероятность состояний ОА, которые сформировали такое решение [6].

Пусть  $J = \{j_1(t), j_2(t), \dots, j_N(t)\}$  обозначает действие команды ОА. При этом  $J^* = \{j_1^*(t), j_2^*(t), \dots, j_N^*(t)\}$  - лучшее совокупное действие команды ОА на данный момент, которое обеспечивает наибольшее покрытие. Таким образом, основная идея заключается в использовании обучения с подкреплением, то есть наградить ОА, совокупное действие которых обеспечивает получение максимально возможного результата на данный момент, т.е. до момента времени  $t$ .

Обновление ОА в узле  $i$  задается соотношением:

$$p_{(i,j)}(t+1) = (1 - \lambda)\delta_{(i,j)} + \lambda p_{(i,j)}(t) \quad (2)$$

где

$$\delta_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & \text{если } j = j_i^*(t) \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (3)$$

$\lambda$  – является параметром обновления и не зависит от времени.

Если  $j \neq j_i^*(t)$ , то  $p_{(i,j)}(t + 1)$  уменьшается путем умножения на  $\lambda$ ,  $\lambda < 1$ .

$$p_{(i,j)}(t + 1) = \lambda p_{(i,j)}(t) \quad (4)$$

Если  $j = j_i^*(t)$ , тогда  $p_{(i,j)}(t + 1)$  увеличивается на

$$p_{(i,j)}(t + 1) - p_{(i,j)}(t) = [(1 - \lambda) + \lambda p_{(i,j)}(t)] - p_{(i,j)}(t) \quad (5)$$

$$p_{(i,j)}(t + 1) - p_{(i,j)}(t) = (1 - \lambda) + p_{(i,j)}(t)(\lambda - 1) \quad (6)$$

$$p_{(i,j)}(t + 1) - p_{(i,j)}(t) = (1 - \lambda)(1 - p_{(i,j)}(t)) \geq 0 \quad (7)$$

### **СЛОВЕСНОЕ ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ СЕНСОРНЫХ УЗЛОВ**

Предлагаемый алгоритмом в данной работе применяется для планирования работы сенсорных узлов. Этот алгоритм помогает в поиске наилучшего набора активных датчиков, которые отслеживают максимальное количество контролируемых объектов. Процесс работы алгоритма разделен на три фазы, которые включают в себя начальную стадию, фазу обучения и фазу мониторинга контролируемых объектов. Начальный этап начинается с широковещательной передачи сообщения, содержащего информацию о сенсорном узле, его соседям. Этот этап заканчивается получением ответной информации от соседей и информацией об отслеживаемых контролируемых объектов. Затем фаза обучения начинается с выбора состояния узла с помощью обучающих автоматов и заканчивается предоставлением соответствующего значения вектора вероятности для выбора соответствующего состояния. Заключительным этапом является фаза мониторинга контролируемых объектов — она заключается в выборе наилучшего состояния датчика с использованием обучающихся автоматов

### **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ**

Оценка предлагаемого алгоритма адаптивного планирования (ААП) производится путем проведения компьютерного моделирования сети с сенсорными узлами и объектами контроля, размещенными случайным образом в пространстве размером  $600 \times 600$  метров.

Для всех экспериментов используются следующие параметры:

- N – количество сенсорных узлов, развернутых случайным образом. Его значение изменяется в интервале от 4 до 90;
- M – количество случайно развернутых целей. Его значение изменяется в интервале от 3 до 60;
- R – дальность работы датчика. Его значение изменяется в интервале от 50 м до 600 м.
- Параметр обучения;
  - Лямбда( $\lambda$ ), его значение изменяется в интервале 0,0001 и 0,4;
  - Эпсилон( $\epsilon$ ), его значение остается постоянным, которое составляет 0,01 для всех экспериментов.

#### **Влияние количества сенсоров**

Цель первого эксперимента являлось исследование зависимости между количеством сенсорных узлов и получаемым минимальным количеством активных сенсорных узлов в сети. Для этого число сенсорных узлов берется между 20 и 30 с шагом 1. Полученные результаты приведены в таблицах. В таблице представлены результаты, полученные при размещении 10 и 15 объектов контроля, дальность обнаружения сенсорного узла составляла 300 м и 400 м.

Таблица 1

Результаты эксперимента, полученные при размещении 10 объектов контроля, дальности обнаружения сенсорного узла 300 м, количество сенсорных узлов изменялось в пределах от 20 до 30

Table 1

The experimental results obtained by placing 10 control objects, the detection range of the sensor node is 300 m, the number of sensor nodes varied from 20 to 30

Количество сенсорных узлов (N)	Среднее количество активных сенсоров
20	2,136
21	2,132
22	2,130
23	2,125
24	2,109
25	1,879
26	1,768
27	1,520
28	1,280
29	1,113
30	1,023

Таблица 2

Результаты эксперимента, полученные при размещении 15 объектов контроля, дальности обнаружения сенсорного узла 150 м, количество сенсорных узлов изменялось в пределах от 20 до 30

Table 2

The experimental results obtained by placing 15 control objects, the detection range of the sensor node is 150 m, the number of sensor nodes varied from 20 to 30

Количество сенсорных узлов (N)	Среднее количество активных сенсоров
20	7,168
21	7,120
22	6,972
23	6,832
24	6,721
25	6,287
26	6,176
27	6,143
28	6,111
29	5,835
30	5,439

На рисунке 1 показано, что при малой дальности обнаружения требуется больше сенсорных узлов для обслуживания объектов контроля. Но увеличение дальности обнаружения приводит к уменьшению количества активных сенсорных узлов, используемых для наблюдения за объектами

контроля, что показывает ту же тенденцию результатов, что и при больших значениях дальности обнаружения, показанных на рисунке 2.

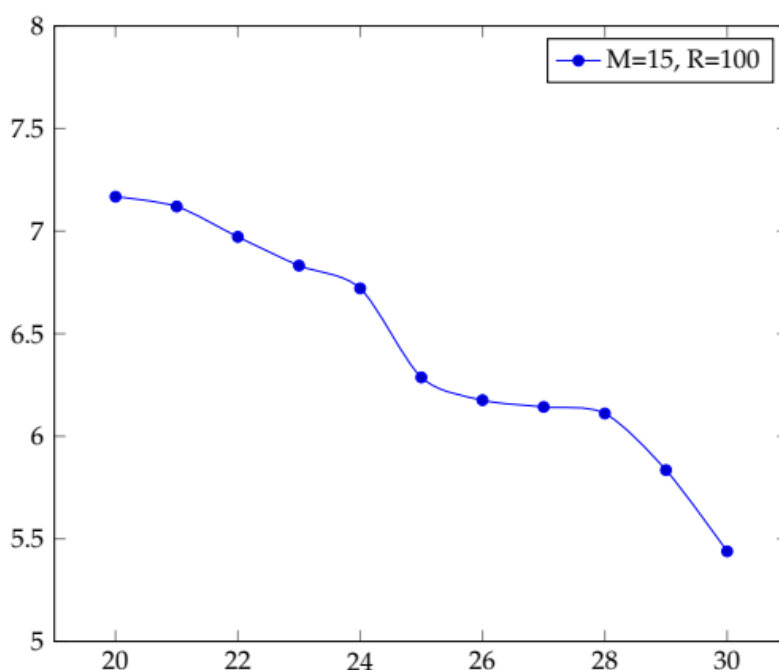


Рис. 1. График, показывающий влияние увеличения числа сенсорных узлов при обслуживании 15 объектов контроля и дальности обнаружения 100 м на среднее количество активных сенсорных узлов

Fig. 1. A graph showing the effect of increasing the number of sensor nodes when servicing 15 monitoring objects and a detection range of 100 m on the average number of active sensor nodes

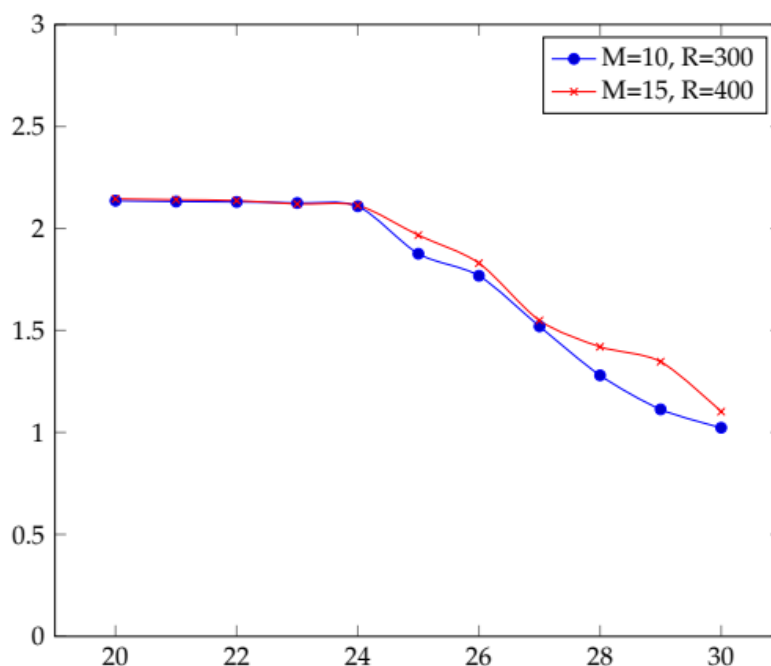


Рис. 2. График, показывающий влияние увеличения числа сенсорных узлов на среднее количество активных сенсорных узлов

Fig. 2. A graph showing the effect of increasing the number of sensor nodes on the average number of active sensor nodes

Эксперимент по сравнению разработанного алгоритма с другими алгоритмами планирования проводится для определения эффективности предложенного алгоритма обучения. Для этого взят алгоритм планирования LADSC из статьи [7] и алгоритм прямого перебора. Эти алгоритмы сравниваются на основе изменения плотности сенсорных узлов. Алгоритмы оцениваются по их свойству использовать минимальное количество активных сенсорных узлов для обслуживания всех объектов контроля.

Таблица 3

Сравнение предложенного алгоритма с алгоритмом LADSC, и проверка правильности результатов с использованием алгоритма прямого перебора при 9 объектах контроля, количество сенсорных узлов изменялось в пределах 9 до 25, дальность действия 100 м

Table 3

Comparison of the proposed algorithm with the LADSC algorithm, and verification of the correctness of the results using the direct search algorithm with 9 control objects, the number of sensor nodes varied from 9 to 25, the range of 100 m

Количество сенсорных узлов (N)	Предлагаемый алгоритм		LADSC		Прямой перебор	
	Количество во актив-ных сенсоров	Количество обслуживаемых объектов	Количество во актив-ных сенсоров	Количество обслуживаемых объектов	Количество во актив-ных сенсоров	Количество обслуживаемых объектов
10	6,0	9	7,0	9	6	9
12	5,0	9	7,0	9	5	9
14	5,0	9	6,0	8	5	9
16	5,0	9	6,0	9	5	9
18	5,0	9	4,0	7	5	9
20	5,0	9	6,0	9	4	9
22	4,0	9	5,0	9	4	9
24	4,0	9	5,0	9	4	9

Из полученных результатов можно заметить, что предложенный алгоритм планирования обеспечивает лучшие результаты по сравнению с алгоритмом LADSC для получения меньшего количества активных сенсорных узлов для мониторинга всех объектов контроля. Даже в некоторых случаях алгоритм LADSC дает эффект использования меньшего количества активных сенсорных узлов, но он не в состоянии охватить все объекты контроля. Таким образом, он менее эффективен, чем предлагаемый алгоритм. Это обеспечивает тот факт, что предлагаемый алгоритм потребляет меньшее количество энергии, чем алгоритм LANDS, и поэтому помогает максимально увеличить срок службы сенсорной сети. И получать оптимизированные результаты.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый алгоритм для экономии энергии позволяет производить настройку сенсорных узлов, что представляет собой концепцию обучения. Таким образом, они могут в автономном режиме выбрать свое состояние, быть активными или находится в ожидании. Предполагается, что в активном состоянии сенсорные узлы обслуживают доступные контролируемые объекты, затрачивая некоторое количество энергии. Предложенный алгоритм обеспечивает методологию поиска минимально количества активных сенсорных узлов, которые обслуживают все контролируемые объекты.

Другими словами, это можно определить так: при использовании минимального количества активных сенсорных узлов используется минимальная энергия сети, и, таким образом, эта концепция помогает экономить энергию в беспроводной сенсорной сети.

Этот алгоритм применим как к малым, так и к большим беспроводным сенсорным сетям. Но при проведении экспериментов в сети такого типа следует учитывать значение параметра обучения, чтобы получить хорошие результаты. Дальность действия сенсорного узла оказывает одинаковое влияние на оба типа сетей. И если провести сравнение, при одинаковых условиях, предложенный алгоритм показывает более высокие результаты, чем выбранные для сравнения алгоритмы.

#### Список литературы

1. Butun I., Morgera S.D., Sankar R.A. Survey of Intrusion Detection Systems in Wireless Sensor Networks // IEEE communications surveys & tutorials – 2013, P. 266-282.
2. Rassam M.A, Maarof M.A., Zainal A. An Efficient Distributed Anomaly Detection Model for Wireless Sensor Networks // Knowledge-Based Systems – 2014, 60 P. 44-57.
3. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич. 2011. 312 с.
4. Najim, K., Poznyak, A.S.: Learning Automata: Theory and Applications. Pergamon Press, Oxford, 1994, 238 pages.
5. Thathachar, M.A.L., Sastry, P.S.: Networks of Learning Automata: Techniques for Online Stochastic Optimization. Kluwer Academic Publishers 2004, Springer New York, NY 288 pages.
6. Mostafaei H., Meybodi M.R.: Maximizing lifetime of target coverage in wireless sensor networks using learning automata. Wireless Personal Communications 71(2), 2013, P. 1461–1477.
7. Habib Mostafaei1, Mehdi Esnaashari, Mohammad Reza Meybodi. [Электронный ресурс] ‘A Coverage Monitoring algorithm based on Learning Automata for Wireless Sensor Networks’. In: Cornell University Library (Sept. 2014). URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1409/1409.1515.pdf>. (дата обращения: 01.06.2023)

#### References

1. Butun I., Morgera S.D., Sankar R.A. Survey of Intrusion Detection Systems in Wireless Sensor Networks // IEEE communications surveys & tutorials – 2013, P. 266-282.
2. Rassam M.A, Maarof M.A., Zainal A. An Efficient Distributed Anomaly Detection Model for Wireless Sensor Networks // Knowledge-Based Systems – 2014, 60 P. 44-57.
3. Kucheryavy A.E., Prokopyev A.V., Kucheryavy E.A. Self-organizing networks. St. Petersburg: Lyubavich. 2011. 312 p.
4. Najim, K., Poznyak, A.S.: Learning Automata: Theory and Applications. Pergamon Press, Oxford, 1994, 238 pages.
5. Thathachar, M.A.L., Sastry, P.S.: Networks of Learning Automata: Techniques for Online Stochastic Optimization. Kluwer Academic Publishers 2004, Springer New York, NY 288 pages.
6. Mostafaei H., Meybodi M.R.: Maximizing lifetime of target coverage in wireless sensor networks using learning automata. Wireless Personal Communications 71(2), 2013, P. 1461–1477.
7. Habib Mostafaei1, Mehdi Esnaashari, Mohammad Reza Meybodi. [Electronic resource] ‘A Coverage Monitoring algorithm based on Learning Automata for Wireless Sensor Networks’. In: Cornell University Library (Sept. 2014). URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1409/1409.1515.pdf>. (data access: 01.06.2023)

**Аль-Обайди Амир Мохаммед Жасим**, руководитель проектов компании Al\_Ameer general contracting company  
**Al-Obaidi Amir Mohammed Jasim**, project manager, zuhoor Al\_Ameer general contracting company