

Гибридный метод динамической маршрутизации пакетов в беспроводной сенсорной сети

А.Я. Номерчук¹, В.Е. Самчинский², В.В. Соловьев¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²ООО «Агрометеолаб», Таганрог

Аннотация: В работе предложен гибридный метод маршрутизации пакетов в беспроводной сенсорной сети на основе генетического алгоритма, позволяющий построить таблицу маршрутизации с учетом ограничений на предельное количество передач через каждый узел сети и, как следствие, повысить ее энергетическую эффективность. Представлены результаты экспериментальных исследований на беспроводной сенсорной сети со случайной конфигурацией узлов в пространстве и показано, снижение загруженности узлов-ретрансляторов пакетов данных на 30-40% при увеличении суммарной длины маршрутов на 10%.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, сенсорный узел, узел-координатор, структура сети, маршрутизация пакетов, энергетическая эффективность беспроводной сети, модель сети.

1. Введение

Беспроводные сенсорные сети (БСС) находят все более широкое применение в медицине [1], промышленности [2], сельском хозяйстве [3] и экологии [4]. В отличие от традиционных сетей связи, беспроводные сенсорные сети поддерживают самоорганизацию на уровне графа сети, протоколов маршрутизации и характера передаваемого трафика.

Важной задачей при проектировании БСС является обеспечение энергетической эффективности сети на протяжении наиболее продолжительного времени [5], в условиях, когда структура сети может изменяться и данные могут передаваться через промежуточные узлы, выступающие в роли ретрансляторов. Одним из способов решения указанной задачи является совершенствование методов маршрутизации пакетов данных между узлами сети.

Методам маршрутизации в БСС посвящены многочисленные зарубежные [6, 7] и отечественные [8, 9] публикации. Авторы отмечают группы протоколов с проактивной, реактивной и гибридной маршрутизацией, а также протоколы с использованием информации о

положении узлов в пространстве. В проактивных протоколах таблицы маршрутизации содержатся на каждом узле и периодически обновляются. В реактивных протоколах каждый узел сети ищет маршрут по мере необходимости в передаче данных. Гибридные протоколы являются более современными и сочетают подходы из первых двух групп, но отличаются повышенной сложностью реализации.

В данной работе авторы предлагают гибридный метод маршрутизации пакетов данных между узлами, основанный на генетическом поиске оптимальных маршрутов и ориентированный на повышение энергетической эффективности БСС.

2. Метод маршрутизации пакетов в БСС

Рассмотрим БСС, включающую сенсорные узлы, узлы-актуаторы и узел-координатор. В качестве основного вычислительного узла будем рассматривать узел-координатор. Требуется учитывать предельную дальность d^* передачи информации между узлами и организовать маршруты таким образом, чтобы повысить общую энергетическую эффективность сети.

Маршрутом в графе БСС будем называть последовательность вершин и ребер:

$$v_0, e_1, v_1, \dots, v_{n-1}, e_n, v_n, \quad (1)$$

где v_0 – стартовая вершина (узел приемник или передатчик); v_n – конечная вершина (узел передатчик или приемник).

Для каждого i -го сенсорного узла сети можно найти массив r_i маршрутов передачи данных на узел-координатор с учетом предельной дальности d^* . Очевидно, что множество самых коротких маршрутов между сенсорными узлами и узлом-координатором обеспечивают оптимальную энергетическую эффективность БСС только в случае размещения всех узлов на расстоянии, меньшем d^* от узла-координатора. В этом случае, в БСС реализуется топология звезда. Если данное условие не выполняется, то

некоторые сенсорные узлы будут использоваться как ретрансляторы к узлу-координатору и, следовательно, самые короткие маршруты не будут обеспечивать оптимальную энергетическую эффективность БСС.

Допустим, сформированы массивы r_i маршрутов передачи данных на узел-координатор для всех узлов БСС. В этом случае, нужно выбрать такой набор маршрутов для каждого узла, чтобы обеспечить наилучшую энергетическую эффективность БСС, определяющую максимальную «живучесть» сети. В качестве критерия энергетической эффективности, можно предложить выражение:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{p}_i \cdot n_i}{m} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где E – энергетические затраты на передачу данных в БСС; n_i – количество ретрансляций пакетов данных через i -й узел от других узлов; \bar{p}_i – средняя потребляемая мощность в единицу времени.

Оптимизационную задачу с целевой функцией (2) можно решить с применением генетического алгоритма. Для упрощения выкладок ограничимся сенсорными узлами БСС, т.к. для узлов-актуаторов задача будет решаться аналогично. В данном случае, генетический алгоритм позволяет найти комбинацию маршрутов от узлов-сенсоров к узлу-координатору обеспечивающий минимум критерия (2) с использованием генетического поиска. Рассмотрим этапы генетического алгоритма применительно к маршрутизации в БСС.

Определение предельного количества маршрутов в БСС. Для каждого сенсорного узла возможен один путь к узлу-координатору, т.к. в противном случае узел не будет взаимодействовать с остальными узлами БСС. Максимальное количество маршрутов r_{imax} для i -го сенсорного узла определяется всевозможными путями к узлу-координатору с учетом предельной дальности d^* передачи информации между узлами. Таким

образом, предельное количество маршрутов в БСС для i -го узла определяется интервалом $[1, r_{imax}]$.

Генерация начальной популяции. Начальная популяция в генетическом алгоритме маршрутизации будет представлять собой вектор случайных маршрутов $r = [r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0m-1}]$, удовлетворяющих условию: $r_{0i} \in [1, r_{imax}]$.

Оценка индивидов. Для поиска маршрута необходимо сравнивать получающиеся решения между собой. В зависимости от сравнения индивиды делятся на слабо приспособленные и хорошо приспособленные. В случае маршрутизации БСС индивидом является совокупность маршрутов от всех сенсорных узлов к узлу-координатору. Степень приспособленности в данном случае оценивается целевой функцией (2).

Операторы выбора родителей и селекции. На основе выбранных родителей осуществляется генерация потомков, а на основе селекции выполняется исключение индивидов из популяции. В качестве родителей выбираются индивиды, которые могут дать более приспособленных потомков, а в результате селекции отбираются индивиды, которые замедляют развитие популяции и, как следствие, сходимости к оптимальному решению. В основе операторов выбора родителей и селекции будем использовать оценки вероятности.

Оператор скрещивания. Данный оператор позволяет создавать потомков в популяции на основе выбранных родителей. В нашем случае, оператор скрещивания создает новые совокупности маршрутов в БСС. Функцией данного оператора является создание потомков, которые бы превосходили своих родителей и показывали лучшую степень приспособленности.

Оператор мутации. Функцией оператора мутации является коррекция генов потомков с целью обновления популяции. Данный оператор расширяет

область поиска, по сравнению только с операторами выбора родителей и селекции. Данный оператор работает на основе вероятностного метода изменения генов. Слабый оператор мутации приводит к уменьшению разнообразия в популяции, а слишком сильный наоборот может снизить эффективность операторов родителей и селекции. Очевидно, что оператор мутации может приводить к ухудшению потомков, но при этом поддерживать или увеличивать разнообразие в популяции.

Остановка генетического поиска. При поиске решения необходимо определить критерии остановки, при которых поиск останавливается и решение считается оптимальным. Можно выделить следующие условия остановки генетического поиска:

- достигнута требуемая точность решения;
- снижение (остановка) изменений в популяции;
- достижение лимита поколений;
- достижение лимита отведенного времени.

В случае поиска маршрутов в БСС используем всю совокупность условий остановки генетического поиска.

На основании изложенного выше предлагается следующий метод маршрутизации в БСС:

Этап 1. Передача информации с каждого узла на узел координатор информации о связях с соседними узлами сети.

Этап 2. В вычислителе узла-координатора для каждого узла БСС формируется массив r_i маршрутов передачи данных на узел-координатор с учетом предельной дальности d^* в виде последовательностей:

$$v_0, e_1, v_1, \dots, v_{n-1}, e_n, v_n,$$

Этап 3. Определяется предельное количество маршрутов в БСС для каждого узла в виде интервала: $[1, r_{imax}]$.

Этап 4. Генерация начальной популяции в виде вектора случайных маршрутов: $r = [r_{01}, r_{02}, \dots, r_{0m-1}]$, удовлетворяющих условию: $r_{0i} \in [1, r_{imax}]$.

Этап 5. Определение целевой функции в виде:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{p}_i \cdot n_i}{m} \rightarrow \min.$$

Этап 6. Запуск генетического алгоритма маршрутизации и поиск совокупности оптимальных маршрутов для энергетической эффективности сети:

$$R = [r_1^* \cup r_2^* \cup \dots \cup r_{m-1}^*].$$

Этап 7. Передача найденных маршрутов от узла-координатора в сенсорные узлы и узлы-актуаторы.

Следует отметить, что данный метод может использоваться для произвольного количества узлов в БСС, а также для разных типов узлов. В связи с этим возможны четыре сценария передачи данных в БСС:

- 1) все узлы могут передавать пакеты данных друг другу;
- 2) узлы одного типа пересылают информацию между собой и не могут передавать пакеты данных через узлы другого типа;
- 3) узлы одного типа могут объединяться в кластеры для энергетической балансировки сети;
- 4) узлы разного типа могут объединяться в кластеры для энергетической балансировки сети.

В данной работе отработаем второй сценарий передачи данных в БСС, тем более, что он позволяет выработать разные технологии передачи данных между узлами разных типов.

3. Результаты моделирования

Для проведения исследования в БСС используют различные симуляторы [10], в которых затруднительно тестировать новые методы маршрутизации. В связи с этим, авторами разработана программа на языке

Python, позволяющая моделировать разнородные сенсорные сети и исследовать методы маршрутизации пакетов данных между узлами.

При проведении экспериментальных исследований, на программной модели создавалась БСС, включающая 10 сенсорных узлов, 10 узлов-актуаторов и один узел-координатор.

Для всех узлов выставлялась начальная и текущая энергия на 100%, расход энергии - 0,04, вероятность помехи в канале связи - 0,9, вероятность выхода узла из строя - 0,98.

Среда представляла собой область размером 200 на 200 метров, с температурой воздуха - 26 градусов, температурой почвы - 18 градусов, начальной влажностью почвы 100%, предельной дистанцией связи - 100 м.

При запуске программной модели сенсорные узлы и узлы-актуаторы размещаются в среде случайным образом и нумеруются.

При запуске программной модели сенсорные узлы и узлы-актуаторы размещаются в среде случайным образом и нумеруются, например, как представлено на рис. 1.

Для модели БСС, представленной на рис. 1, найдены массивы путей между узлом-координатором и сенсорными узлами: 0-1: 145 путей, 0-2: 39 путей, 0-3: 169 путей, 0-4: 115 путей, 0-5: 88 путей, 0-6: 213 путей, 0-7: 39 путей, 0-8: 137 путей, 0-9: 77 путей, 0-10: 144 путей.

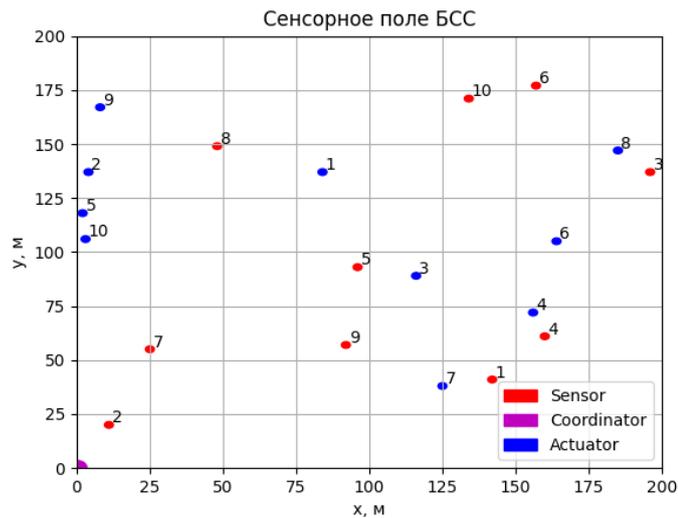


Рис. 1 – Графическое представление БСС.

Совокупность путей представляет собой цепочки переходов между узлами БСС, например, как представлено ниже:

0-1: [0, 2, 9, 1], [0, 2, 9, 4, 1], [0, 2, 9, 4, 3, 10, 8, 5, 1]...

0-2: [0, 2], [0, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 9, 2], [0, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 5, 9, 2]...

0-3: [0, 2, 9, 1, 4, 3], [0, 2, 9, 1, 4, 5, 8, 10, 3]...

0-4: [0, 2, 9, 1, 4], [0, 2, 9, 1, 5, 8, 10, 3, 4]...

0-5: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 5], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 7, 5]...

0-6: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 6], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 6]...

0-7: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 5, 7], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8, 7]...

0-8: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 8], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10, 5, 8]...

0-9: [0, 2, 9], [0, 2, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 9], [0, 2, 7, 8, 10, 3, 4, 1, 5, 9]...

0-10: [0, 2, 9, 1, 4, 3, 10], [0, 2, 9, 1, 4, 3, 6, 10].

На основе количества найденных путей сформированы ограничения для генетического алгоритма. Генетический поиск выполнялся при следующих исходных данных:

- максимальное количество итераций (max_num_iteration): 400,
- размер популяции (population_size): 200,
- вероятность мутации (mutation_probability): 0.1,

- вероятность элитизации (elit_ratio): 0.01,
- вероятность скрещивания (crossover_probability): 0.5,
- вероятность переноса родителей в следующую популяцию (parents_portion): 0.3,
- тип скрещивания (crossover_type): 'uniform'.

Генетический поиск нашел такую совокупность маршрутов передачи данных в БСС, которые обеспечивают 35 передач между узлами. По результатам генетического поиска были найдены следующие маршруты передачи пакетов данных:

0-1:[0, 7, 9, 1], 0-2:[0, 2], 0-3:[0, 7, 8, 10, 3], 0-4:[0, 2, 9, 4], 0-5:[0, 7, 5],
0-6:[0, 7, 8, 10, 6], 0-7:[0, 7], 0-8:[0, 7, 8], 0-9:[0, 2, 9], 0-10:[0, 7, 5, 10].

Несколько примеров работы генетического алгоритма представлено на рис. 2.

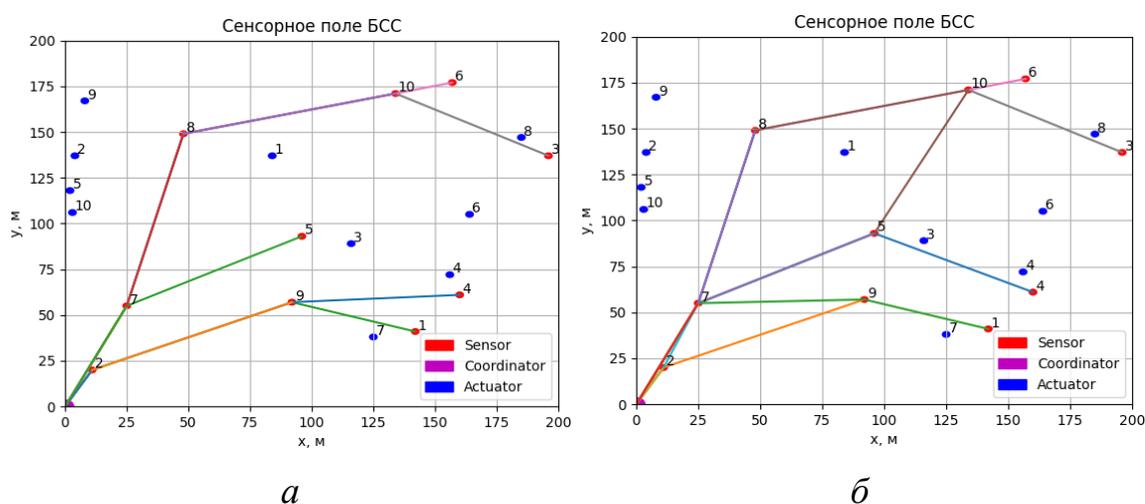


Рис. 2. – Варианты маршрутизации пакетов в БСС.

Как видно из результатов моделирования генетическим поиском найдены маршруты передачи пакетов через минимальное количество узлов. При этом, количество передач пакетов для каждого из сенсорных узлов представлено в таблице №1.

Таблица №1

Пример расчета количества передач пакетов через узлы БСС

	Узел-координатор	Номера сенсорных узлов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число передач	10	1	2	1	1	3	1	8	3	2	3

Как видно из таблицы, основная нагрузка приходится на 7 сенсорный узел и, следовательно, он определяет энергетическую эффективность БСС. Для более равномерного распределения нагрузки введем в целевую функцию (2) «штрафную» компоненту δ , которая будет увеличивать ее значение при повышении числа передач:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{p}_i \cdot n_i + \delta_i(\bar{n})}{m} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где \bar{n} – предельное количество передач пакетов через узел.

Результаты моделирования с модифицированной целевой функцией представлены в таблице №2, а карта маршрутизации представлена на рис. 3.

Таблица №2

Расчет количества передач пакетов через узлы БСС с модифицированной целевой функцией

	Узел-координатор	Номера сенсорных узлов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число передач	10	2	5	1	1	4	1	6	1	5	3

Согласно полученным данным количество передач через 7-й сенсорный узел уменьшилось на две передачи, но увеличилось на 2-м узле. Фактически оба узла являются «бутылочным горлышком» в БСС и генетический поиск с модифицированной целевой функцией более равномерно распределил маршруты передачи данных.

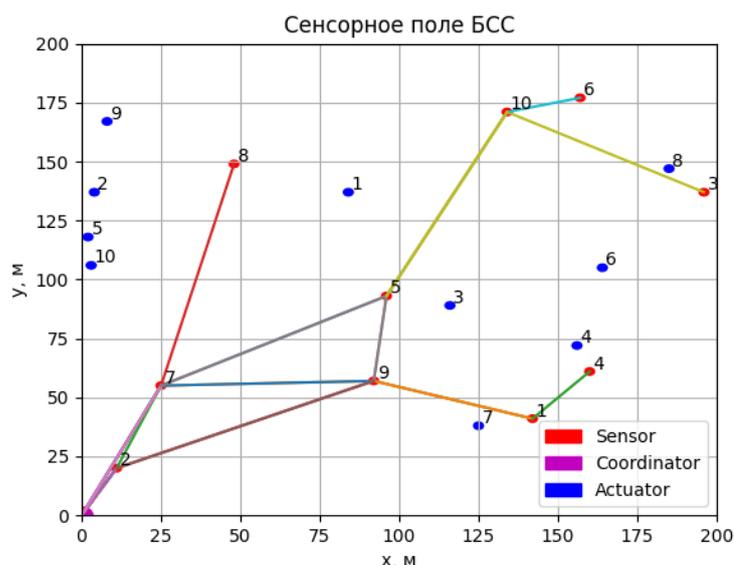


Рис. 3. – Карта маршрутизации с модифицированной целевой функцией.

В дальнейшем, количество сенсорных узлов было расширено до двадцати. При этом, в отличие от предыдущего эксперимента, обрабатывалось ограничение на максимальное количество узлов на маршруте. В таблице №3 представлены результаты моделирования с целевой функцией (2) и ограничением на предельную длину маршрута из 7 узлов.

Таблица №3

Результаты моделирования с ограничением на длину маршрута из 7 узлов для целевой функции (2).

	Узел-координатор	Номера сенсорных узлов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число передач	20	4	13	8	8	7	1	5	2	9	2
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Число передач		3	1	1	1	2	1	6	3	4	3

Исходя из результатов моделирования видно, что основная нагрузка в БСС лежит на 2-м и 9-м узлах. При этом, фиксируются 104 передачи данных в сети.

В таблице №4 представлены результаты моделирования с целевой функцией (3) и ограничением на предельную длину маршрута из 7 узлов.

Таблица №4

Результаты моделирования с ограничением на длину маршрута из 7 узлов для целевой функции (3).

	Узел-координатор	Номера сенсорных узлов									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число передач	20	7	9	7	3	8	2	10	3	6	3
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Число передач		4	3	2	1	1	1	9	5	6	4

Как видно из результатов моделирования с модифицированной целевой функцией, нагрузка на сенсорные узлы распределилась более равномерно и общее количество передач достигло 114.

Заключение

В работе предложен метод маршрутизации пакетов в БСС на основе генетического алгоритма, ориентированный на повышение энергетической эффективности сети.

Предложенный метод маршрутизации и программная модель позволяют:

- равномерно распределить нагрузку на узлы в БСС;
- использовать разные сценарии передачи данных в БСС, в зависимости от состояния узлов, путем назначения различных «штрафных» компонент в целевой функции;
- реализовать сценарий работы БСС с кластерами узлов, в котором некоторые узлы используются для сбора данных.

Работа выполнена при поддержке ФСИ в рамках проекта № 710ГССС15-L/80854 «Интеллектуальная автономная метеостанция сельскохозяйственного назначения».

Литература

1. Берebin М.А., Казимиров А.Н., Тележкин В.Ф. Интеллектуальные беспроводные сенсорные системы медицинского мониторинга электроэнцефалографических данных на основе приемо-передатчиков сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов // Психология. Психофизиология, 2016. №1. с. 44-54.
2. Ларцов С.В., Столяров В.Е., Дяченко И.А., Карюк В.М. Организация АСУ ТП распределенных объектов на основе беспроводных сенсорных сетей // Экспозиция Нефть Газ, 2013. №3 (28). с. 29-32.
3. Тарханова О.Ю. Применение беспроводных сенсорных сетей в прецизионном сельском хозяйстве // Проблемы информатики, 2017. №4 (37). с. 25-46.
4. Гармаш Д.А., Ким Д.С., Щербатов Ф.А., Соловьев В.В. Mesh-сеть интеллектуальных датчиков // Сборник трудов XI Всероссийской научной конференции и молодежного научного форума. Ростов-на-Дону - Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. с. 109-112.
5. Ясир М.Д.Я. К вопросу снижения энергопотребления беспроводных сенсорных узлов // Инженерный вестник Дона, 2023. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526.
6. Noman Sh., Syed R.H. Routing Protocols for Wireless Sensor Networks // Wireless Sensor Networks - Insights and Innovations, 2017. pp. 21-37.
7. Kumar P., Singh M.P., Triar U.S. A Review of Routing Protocols in Wireless Sensor Network // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2012. Vol. 1. pp. 1-14.
8. Метелёв А.П., Чистяков А.В., Жолобов А.Н. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2013. №3 (1). с. 75-78.



9. Махров С.С. Протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях: иерархические, основанные на мобильности, мультиориентированные и основанные на гетерогенности // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт, 2013. №5. с. 39-42.

10. Кудр Л.А. Разработка симулятора беспроводной сенсорной сети // Инженерный вестник Дона, 2013. №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1809.

References

1. Berebin M.A., Kazimirov A.N., Telezhkin V.F. Psihologija. Psihofiziologija, 2016. №1. pp. 44-54.

2. Larcov S.V., Stoljarov V.E., Djachenko I.A., Karjuk V.M. Jekspozicija Neft' Gaz, 2013. №3 (28). pp. 29-32.

3. Tarhanova O. Ju. Problemy informatiki, 2017. №4 (37). pp. 25-46.

4. Garmash D.A., Kim D.S., Shherbatov F.A., Solov'ev V.V. Sbornik trudov XI Vserossijskoj nauchnoj konferencii i molodezhnogo nauchnogo foruma. Rostov-na-Donu - Taganrog: Juzhnyj federal'nyj universitet, 2022. pp. 109-112.

5. Jasir M.D. Ja. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8526.

6. Noman Sh., Syed R.H. Wireless Sensor Networks - Insights and Innovations, 2017. pp. 21-37.

7. Kumar P., Singh M.P., Triar U.S. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2012. Vol. 1. pp. 1-14.

8. Metel'jov A.P., Chistjakov A.V., Zholobov A.N. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo, 2013. №3 (1). pp. 75-78.

9. Mahrov S.S. T-Comm – Telekommunikacii i Transport, 2013. №5. pp. 39-42.



10. Kudr L.A. Razrabotka simuljatora besprovodnoj sensornoj seti // Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1809.