

УДК 621.391

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТА МОБИЛЬНОГО СТОКА В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ



[Л.И. МЕЛЬНИКОВА](#), [Е.В. ЛИННИК](#), [Н.В. КРИВОШАПКА](#), [В.А. БАРСУК](#)  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

**Abstract** – The article describes the introduction of a mobile drain as one of the promising methods of energy balancing in wireless sensor networks. In order to reduce the data transfer delay time during the polling of routers, the article states and solves the problem of optimizing the mobile drain route, presented in the form of the traveling salesman problem. To assess the efficiency and effectiveness of the method for solving the problem, an experimental study was conducted using the Matlab package. The traveling salesman problem was solved for uniform and normal distribution of distances between network routers. The values of the sample average length of the optimal mobile drain route and the length of the route without optimization on a sample of 500 experiments were obtained. The reliability of the simulation results is confirmed by recursive estimates of the length of the route. It is shown that the use of optimization when choosing a mobile drain route in wireless sensor networks makes it possible, on average, to reduce the length of a bypass path of a mobile drain by 30–40% compared with a random bypass depending on the law of the distribution of distances between nodes. Minimizing the length of the mobile drain route reduces the polling time of routers in the sensor network and ensures a decrease in the delay of data transmission in the network with an increase in the network lifetime.

**Анотація** – У статті сформульована і вирішена задача по виборі маршруту мобільного стоку в безпроводовій сенсорній мережі. З метою зменшення часу затримки передачі даних при опитуванні маршрутизаторів в статті сформульована і розв’язана задача оптимізації маршруту мобільного стоку, подана у формі задачі комівояжера, яка була вирішена для рівномірного і нормального розподілу відстаней між маршрутизаторами мережі. Показано, що використання оптимізації при виборі маршруту мобільного стоку в безпроводових сенсорних мережах дозволяє в середньому зменшити довжину контуру обходу мобільного стоку на 30–40% у порівнянні з випадковим обходом в залежності від закону розподілу відстаней між вузлами.

**Аннотация** – В статье сформулирована и решена задача по выбору маршрута мобильного стока в беспроводной сенсорной сети. С целью уменьшения времени задержки передачи данных при опросе маршрутизаторов в статье поставлена и решена задача оптимизации маршрута мобильного стока, представленная в форме задачи коммивояжера, которая была решена для равномерного и нормального распределения расстояний между маршрутизаторами сети. Показано, что использование оптимизации при выборе маршрута мобильного стока в беспроводных сенсорных сетях позволяет в среднем уменьшить длину контура обхода мобильного стока на 30–40% по сравнению со случайным обходом в зависимости от закона распределения расстояний между узлами.

### Введение

Изначально возникнув в качестве обобщенной концепции умной пыли (Smart Dust), беспроводные сенсорные сети (БСС) постепенно обретали конкретные очертания и на сегодняшний день являются достаточно хорошо стандартизованными. Анализ стандартов показывает, что сенсорные сети по базовым алгоритмам работы идентичны другим цифровым беспроводным сетям с разделяемым доступом к среде передачи. В то же время БСС рассчитаны на передачу небольших объемов данных с малой частотой, что позволяет переводить устройства в режим низкого энергопотребления для увеличения времени их автономной работы. Поэтому актуальной задачей является исследование и разработка моделей, описывающих сеть с точки зрения мощности, потребляемой устройствами [1].

К наиболее простым методам увеличения времени жизни БСС относятся улучшение аппаратных характеристик устройств: уменьшение энергопотребления отдельных компонентов, оптимизация их размещения на кристалле или печатной

плате или увеличение емкости батарей. Последние исследования в области миниатюрных преобразователей альтернативной энергии (МЕН, Micro Energy Harvesters) открыли ряд возможностей для создания полностью автономных узлов сенсорной сети при сохранении их небольших размеров. Известен ряд готовых решений для подключения сенсорных узлов к миниатюрным солнечным батареям, преобразователям вибрационной энергии и термогенераторам на основе элемента Пелетье [2]. Однако на сегодняшний день ни одно из решений по сбору и преобразованию альтернативной энергии еще не нашло массового применения в реальных сетях сбора данных, состоящих из сотен узлов, прежде всего, из-за высокой стоимости, включающей в себя затраты на регулярное обслуживание [3].

Сенсорные сети главным образом предназначены для сбора данных. Это означает, что существует один или несколько выделенных узлов, к которым стекается информация со всей сети. Данные узлы (стоки), как правило, имеют постоянный источник питания, интерфейсы сопряжения с локальными, глобальными сетями или с более мощными вычислительными устройствами. Таким образом, в сенсорной сети есть преимущественное направление движения полезного трафика, приводящее к тому, что через узлы маршрутизации, находящиеся рядом со стоком(-ами), проходит на порядок больший объем трафика. Чем больше данных проходит через узел беспроводной сети, тем больше его потребляемая мощность. Известно, что в событийно-ориентированных сенсорных сетях, работающих по алгоритму асинхронного доступа к среде передачи, маршрутизаторы являются узким местом с точки зрения времени жизни сети. Это объясняется тем, что для своевременной доставки информации о возникающих событиях маршрутизатор все время должен находиться в режиме с включенным приемопередатчиком [3]. Как следствие, в сети возникает проблема дисбаланса энергопотребления [4], приводящая к тому, что автономные элементы, располагающиеся рядом с центральным узлом (узлами) сбора данных, раньше других выходят из строя из-за разряда собственных аккумуляторов, и, как следствие, уменьшается время автономной работы сенсорной сети. Для выравнивания потребляемой мощности всех узлов сети используют различные методы энергетической балансировки (energy balancing).

Перспективным методом балансировки считается использование мобильности отдельных компонентов сети. В ряде работ [2-6] показано, что потенциально мобильность стока может обеспечить наибольшее преимущество с точки зрения увеличения продолжительности автономной работы сети. При неподвижном стоке очевидно то, что в некоторых областях узлы почти не расходуют энергию и при выходе сети из строя имеют больше 90% своей начальной энергии. Уже случайное движение стока дает заметное улучшение картины распределения остаточной энергии. По сравнению с неподвижным узлом сбора данных наблюдается более равномерный расход энергии. В литературе [6] приведены следующие соотношения: средняя мощность маршрутизатора в режиме передачи составляет 42 мВт, средняя мощность маршрутизатора в режиме приема составляет 52 мВт, средняя мощность маршрутизатора в режиме обработки составляет 20 мВт, а мощность маршрутизатора в режи-

ме ожидания составляет 0,03 мВт. Введение мобильного стока существенно уменьшает энергопотребление маршрутизатора, так как уменьшает время работы на транзитные передачи. Однако, изменение конфигурации сети при сборе информации приводит к увеличению времени задержки в сети. В случае, если набор задач, выполняемый узлом, не критичен, то можно говорить о падении качества обслуживания сети.

Целью данной статьи является решение задачи оптимизации маршрута мобильного стока в БСС, которая позволит обеспечить требуемое качество обслуживания сети при заданной функциональности.

## I. Математическая постановка задачи коммивояжера

Мобильный сток должен опросить все маршрутизаторы сети только один раз и вернуться в исходный пункт. Его маршрут должен минимизировать суммарную стоимость пройденного пути. Такая задача может быть сформулирована как задача коммивояжера [7].

Формализуем задачу в терминах теории графов. Если нет определенных требований к топологии сети, то множество маршрутизаторов  $N, |N| = n$ , где  $n$  – количество маршрутизаторов, можно рассматривать как множество вершин полносвязного неориентированного графа  $G(N, E, C)$  размерности  $n$ . Дугой графа  $(i, j) \in E, |E| = n^2$ , назовем звено маршрута мобильного стока между  $i$ -м и  $j$ -м маршрутизаторами. Пусть известна матрица  $C = \|c_{ij}\|$  весов дуг  $(i, j)$ ,  $(i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, i \neq j)$ , которую назовем матрицей стоимостей звена маршрута. В зависимости от функциональности сети и требований, предъявляемых к качеству обслуживания, стоимость звена маршрута может быть различной. В статье решается задача минимизации длины пути, пройденного мобильным стоком, и в качестве стоимости звена маршрута используется расстояние между маршрутизаторами. В качестве переменной задачи коммивояжера используется булева переменная  $x_{ij}$ , которая принимает значение 1, если дуга  $(i, j)$  входит в замкнутый маршрут коммивояжера, и принимает значение 0, если дуга  $(i, j)$  не входит в замкнутый маршрут коммивояжера.

Модель задачи о коммивояжере будет иметь вид [7]:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad i, j = 2, \dots, n, i \neq j, \quad (4)$$

$$u_i \geq 0, \quad i \in N, \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Ограничения (2)-(5) и создают так называемый гамильтоновский контур [8]. Ограничения (2) и (3) отражают тот факт, что коммивояжер должен побывать в каждом пункте только один раз. Поскольку граф неориентированный, то необходимо два таких ограничения. Ограничение (2) отражает тот факт, что каждая вершина имеет только одну входную дугу, а учет ограничения (3) гарантирует, что каждая вершина имеет только одну выходную дугу. Маршрут коммивояжера должен состоять из одного цикла. Это требование обеспечивается введением условий (4), (5), где  $u_i$  – номер шага, на котором посещается  $i$ -й пункт.

## II. Решение задачи оптимизации маршрута мобильного стока и анализ результатов

Как пример решения задачи оптимизации маршрута мобильного стока в БСС, в статье была рассмотрена гипотетическая сенсорная сеть на одном из участков леса на Закарпатье. Размещение датчиков в такой сети целесообразно производить возле торфяных почв, прилегающих к болоту (датчики температуры), так как при длительной засухе возможно их возгорание; в местах с большим количеством высоких деревьев (датчики температуры), так как есть вероятность во время грозы удара в них молнии, что может привести к возникновению пожара; на открытых территориях возле мест, где часто любят отдыхать люди (датчики тепла, датчики движения), так как они могут оставить предметы с покрытием, способным фокусировать солнечный свет.

В связи с малодоступностью местности целесообразным решением было бы проектирование БСС для обеспечения быстрого реагирования МЧС и пожарных служб в случае возникновения лесного пожара на выбранном участке леса. На рис. 1 предложена схема расположения маршрутизаторов возле опасных участков леса (цифрами указаны номера маршрутизаторов), и показан оптимальный маршрут мобильного стока.

Задача коммивояжера была решена методом ветвей и границ в пакете Matlab с использованием функции `bintprog` для сети из 10 и 30 узлов. В качестве стоимости соединения между маршрутизаторами сети было выбрано расстояние между ними, которое моделировалось равномерным распределением в диапазоне 1-10 км и нормальным распределением с математическим ожиданием, равном 5 км, и дисперсией, равной 1 км<sup>2</sup>. В качестве оптимального маршрута мобильного стока рассматривался маршрут минимальной длины. Один из оптимальных маршрутов показан на рис. 1. В качестве результата эксперимента рассматривалось выборочное среднее длины оптимального маршрута при 500 экспериментах. Маршрут без оптимизации

рассматривался на множестве всех перестановок узлов сети. Значения выборочного среднего оптимальной длины маршрута и длины маршрута мобильного стока без оптимизации при различных условиях моделирования приведены в табл. 1.

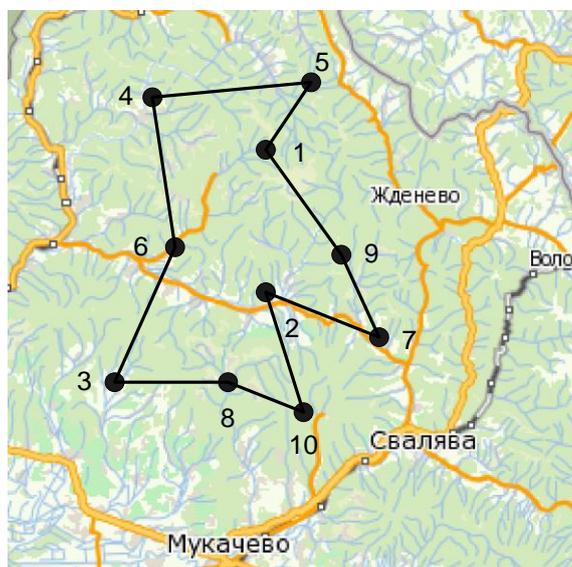


Рис. 1. Схема расположения узлов БСС

Для подтверждения достоверности выборочных средних с помощью процедуры Роббинса-Монро [9] были получены рекурсивные оценки длины маршрута мобильного стока. Рекурсивные оценки длины маршрута с использованием оптимизации и без оптимизации приведены на рис. 2-5. Здесь  $L1$  – длина оптимального маршрута мобильного стока в каждом из экспериментов,  $L2$  – длина маршрута мобильного стока при случайном выборе маршрутизаторов в каждом из экспериментов,  $m1$  – рекурсивная оценка условного математического ожидания длины оптимального маршрута мобильного стока,  $m2$  – рекурсивная оценка условного математического ожидания длины маршрута мобильного стока при случайном выборе маршрутизаторов.

Таблица 1. Значения выборочных средних длины маршрута мобильного стока

Выборочные средние длины маршрута, км,	Равномерный закон распределения расстояний между маршрутизаторами		Нормальный закон распределения расстояний между маршрутизаторами	
	Количество маршрутизаторов			
	$n=10$	$n=30$	$n=10$	$n=30$
С применением оптимизации	33,5	121,2	44,7	74,9
Без оптимизации	49,4	160,1	62,3	96,7

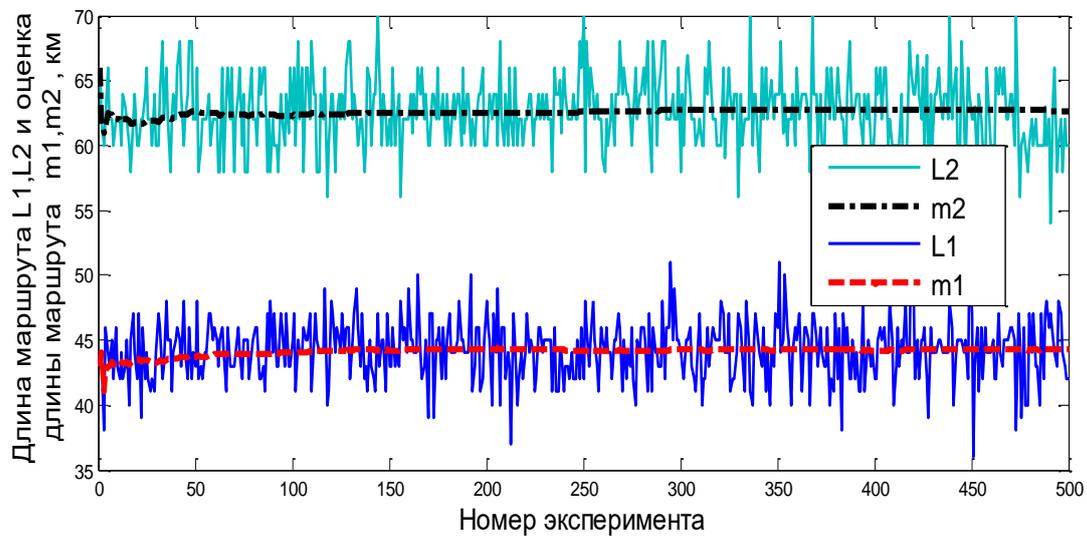


Рис. 2. Рекурсивная оценка длины маршрута мобильного стока при нормальном законе распределения расстояний между узлами,  $n = 10$

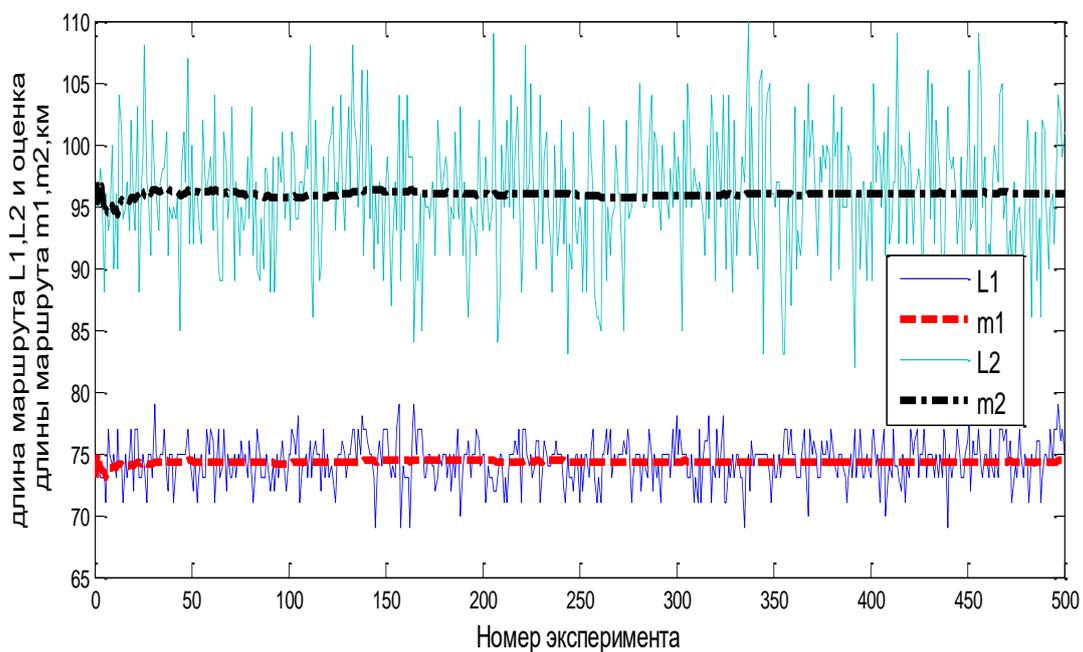


Рис. 3. Рекурсивная оценка длины маршрута мобильного стока при нормальном законе распределения расстояний между узлами,  $n = 30$

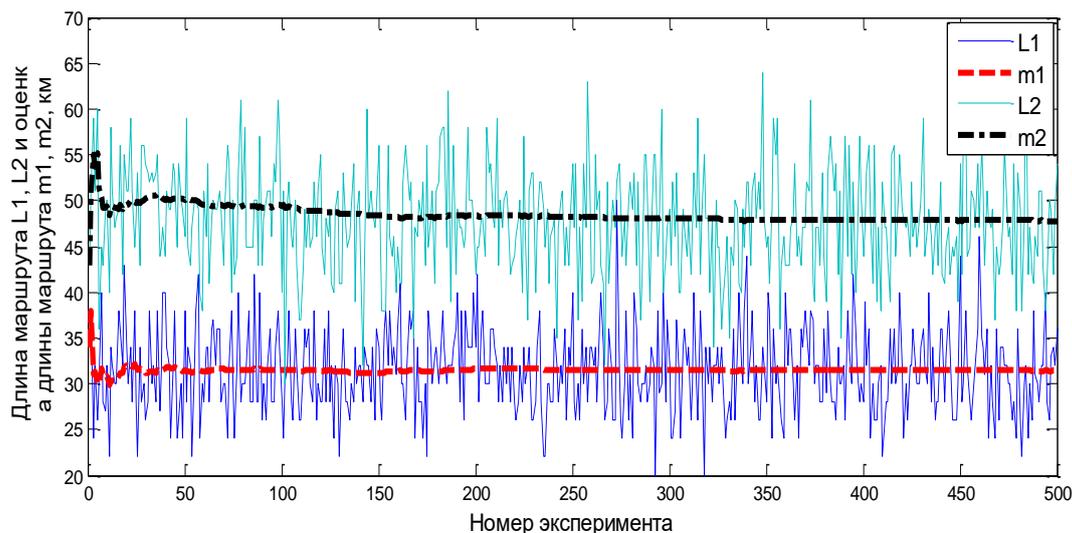


Рис. 4. Рекурсивная оценка длины маршрута мобильного стока при равномерном законе распределения расстояний между узлами,  $n = 10$

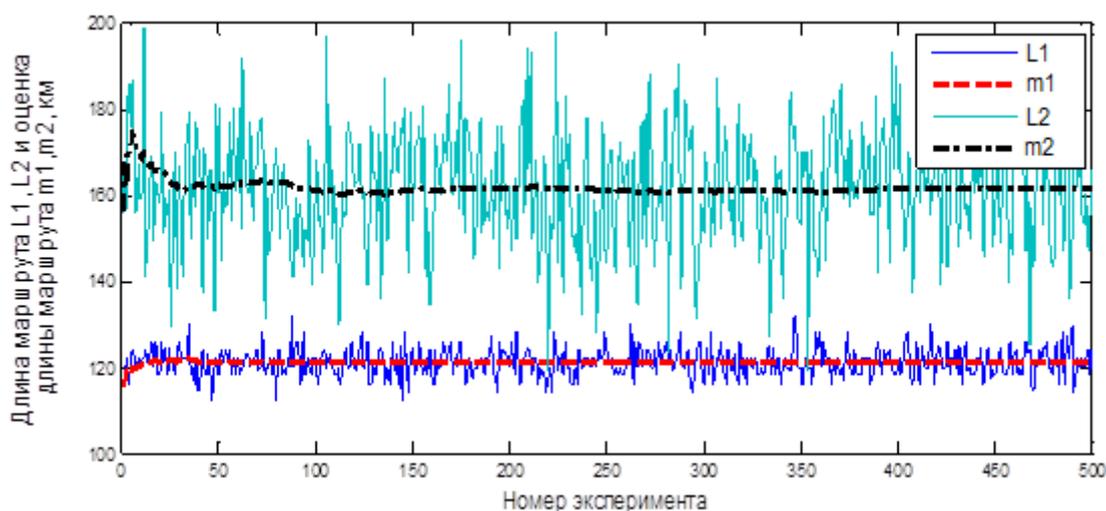


Рис. 5. Рекурсивная оценка длины маршрута мобильного стока при равномерном законе распределения расстояний между узлами,  $n = 30$

### III. Рекомендации к проведению натурального эксперимента

Для проведения натурального эксперимента можно собрать из отдельных компонентов специализированную платформу на базе одного из множества доступных беспроводных модулей, производимых такими компаниями как Texas Instruments, Atmel, NXP, Telegesis, Freescale и др. [10].

Ниже приведены основные характеристики предлагаемой аппаратной платформы:

- 32-битный микроконтроллер JN5139/48, частота работы 16/32 МГц;
- 192 кБ RAM, 128 кБ FLASH;

- 3 режима енергосбереження;
- потребляемый ток в режиме передачи – 15 мА, приема – 17 мА, с выключенным приемопередатчиком – 7 мА;
- поддержка стандарта беспроводной связи IEEE 802.15.4;
- возможность использования сменных модулей с внешней и встроенной антеннами: максимальная дальность действия на открытой местности до 4 км, в помещениях – в среднем 75÷100 м;
- скорость передачи данных в стандартном режиме 250 Кбит/с, нестандартный режим с объединением каналов – 2 Мбит/с;
- аппаратное 128-битное AES-шифрование трафика;
- напряжение питания 2,7÷3,6 В (2 батареи AA, AAA), питание от внешнего источника – 6В;
- размеры (мм): 75 × 32 × 10.

Наиболее предпочтительным вариантом проведения полноценного натурального эксперимента является использование специализированных аппаратно-программных платформ для научных исследований. Одними из наиболее успешных исследовательских платформ для БСС зарекомендовали себя разработки калифорнийского университета Беркли, в настоящее время реализуемые фирмой MEMSIC. К ним относятся платформы TelosB, MicaZ и Imote2 [11].

## Выводы

Таким образом, в статье рассмотрено введение мобильного стока как одного из перспективных методов энергетической балансировки в беспроводных сенсорных сетях [2-5]. Введение мобильного стока существенно уменьшает энергопотребление маршрутизатора, так как уменьшает затраты времени на транзитные передачи. Однако введение мобильного стока изменяет конфигурацию сети, а, следовательно, и маршрутизацию в сети, что приводит к увеличению времени задержки в сети. С целью уменьшения времени задержки передачи данных при опросе маршрутизаторов в статье поставлена и решена задача оптимизации маршрута мобильного стока, представленная в форме задачи коммивояжера.

Для оценки работоспособности и эффективности метода решения поставленной задачи было проведено экспериментальное исследование с помощью пакета имитационного моделирования Matlab. Задача коммивояжера была решена для равномерного и нормального распределения расстояний между маршрутизаторами сети для 10 и 30 маршрутизаторов. Получены значения выборочного среднего длины оптимального маршрута мобильного стока и длины маршрута без оптимизации на выборке в 500 экспериментов. Достоверность результатов моделирования подтверждается рекурсивными оценками длины маршрута.

Показано, что использование оптимизации при выборе маршрута мобильного стока в БСС позволяет в среднем уменьшить длину контура обхода мобильного стока на 30-40% по сравнению со случайным обходом в зависимости от закона распределе-

ния расстояний между узлами. Таким образом, минимизация длины маршрута мобильного стока сокращает время опроса маршрутизаторов в сенсорной сети и обеспечивает уменьшение задержки передачи данных при увеличении времени жизни сети.

### Список литературы:

1. Ефименко М. С., Клымов С. И., Саткенов Р. Б. Беспроводные сенсорные сети. Молодой ученый. 2018. №51. С. 40-42. URL: <https://moluch.ru/archive/237/55115>.
2. Wenguo Y., Tiande G. The non-uniform property of energy consumption and its solution to the wireless sensor network. Education Technology and Computer Science 2010: Proceedings of the Second International Workshop. Wuhan, China, March 6-7, 2010. IEEE, 2010. P. 186-192.
3. Vullers R.J.M., Van Schaijk R., Doms I., Van Hoof C., Mertens R. Micropower energy harvesting. Solid-State Electronics. 2009. Vol. 53, No. 7. P. 684-693. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sse.2008.12.011>.
4. Zhang H., Shen H. Balancing Energy Consumption to Maximize Network Lifetime in Data-Gathering Sensor Networks. IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst. 2009. Vol. 20, № 10. P. 1526–1539. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPDS.2008.252>.
5. Галкин П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей. ScienceRise. 2014. № 2 (2). С. 55-61. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/text\\_2014\\_2\\_11](http://nbuv.gov.ua/UJRN/text_2014_2_11).
6. Комаров М. М. Разработка и исследование метода энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: 2012. 136 с.
7. Алексеева Е. В. Построение математических моделей целочисленного линейного программирования. Примеры и задачи: Учеб. пособие. Новосиб. гос. ун-т., Новосибирск, 2012. 131 с.
8. Applegate D.L., Bixby R.E., Chvatal V., Cook W.J. The traveling salesman problem: a computational study. Princeton University Press. 2007. 608 p.
9. Основи теорії телекомунікаційних систем: підручник. Під ред. Поповського В.В. Харків: ХНУРЕ. 2018. 368 с.
10. Ефремов С. Г. Разработка системы активного беспроводного сбора данных в интра-логистике. М.: 2011. 270с.
11. Решения компании MEMSIC для беспроводных сенсорных сетей. URL: <http://www.memsic.com/wireless-sensor-networks>.