

УДК 621.396

DOI: 10.17223/19988605/52/10

**И.М. Никольский****ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ФАЗЫ СНА  
НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ЦЕПОЧКИ СЕНСОРОВ**

Беспроводные сенсорные сети (БСС) являются эффективным средством мониторинга, который находит применение в различных сферах деятельности человека. Из-за жестких ограничений на расход энергии в основу построения БСС должен быть положен принцип экономии энергии. Это касается в том числе и механизма маршрутизации. В данной работе рассматривается БСС с цепочечной маршрутизацией на основе протокола PEGASIS. Учитывается наличие фазы сна. Исследуются такие показатели, как расход энергии и скорость сбора информации. Полученные результаты вычислительных экспериментов помогают оценить разницу значений этих параметров при различных соотношениях фазы сна и фазы активности узла.

**Ключевые слова:** беспроводные сенсорные сети; маршрутизация; PEGASIS; энергоэффективность.

Беспроводные сенсорные сети (БСС) представляют собой совокупность устройств, способных производить измерения каких-либо физических величин (температура, давление и т.д.) и передавать информацию по радиоканалу. БСС представляют собой удобный инструмент для мониторинга различных объектов (товарные склады [1, 2], водопроводы [3, 4], шоссе [5]). Подобного рода мониторинг позволяет более рационально расходовать ресурсы (такие как вода, электричество и т.д.), регулировать плотность движения на дорогах, осуществлять своевременный ремонт построек [6]. Таким образом, БСС является необходимой составляющей интернета вещей, проектов типа «умный город» и цифровой экономики в целом.

Рынок сенсорных сетей растет (ожидается, что к 2022 г. он достигнет 2 млрд долл. США [7]), на нем работает большое количество производителей. Этому способствуют отсутствие унификации (доминирующих протоколов и аппаратных концепций), удешевление за счет успехов технологий, рост популярности из-за созвучия с идеей цифровой экономики.

Сенсорные сети значительно отличаются от привычных нам компьютерных сетей [8]. Перечислим основные особенности БСС:

- 1) необходимость учета интерференции и помех (коммуникации происходят по радиоканалу с помощью маломощных радиомодулей);
- 2) невозможность постоянного администрирования, поскольку узлы зачастую расположены в труднодоступных местах;
- 3) отсутствие доминирующих протоколов и аппаратных концепций (БСС проектируются под конкретные задачи);
- 4) ограниченность энергии (узлы питаются, как правило, от батареек).

Таким образом, сенсорные сети представляют собой достаточно сложные объекты, которые требуют весьма тщательного предварительного проектирования.

Одним из ключевых показателей работы БСС является энергоэффективность. Узлы питаются от батареек, частая замена которых проблематична. Поэтому необходимо насколько возможно сократить расход энергии. Это можно сделать в том числе за счет построения механизма маршрутизации, который минимизировал бы количество передаваемых сообщений, устранял коммуникации на дальние расстояния и т.д.

Существует целый ряд протоколов маршрутизации, в основу которых положен принцип минимизации расхода энергии, – такие как LEACH [9], PEGASIS [10] и их модификации.

В данной работе рассматривается маршрутизация на основе энергоэффективного протокола PEGASIS, разработанного в компании Aerospacе (Лос-Анджелес). Его основной идеей является объединение узлов сети в цепочку. Каждый узел взаимодействует только с ближайшими соседями по цепочке, что позволяет исключить энергозатратные передачи информации на дальние расстояния.

Разумеется, у этого подхода есть и недостатки. Если в цикл функционирования узлов сети входит фаза сна (когда потребление энергии минимально, но в то же время невозможны прием и передача сообщений), скорость сбора информации с узлов сети может упасть, поскольку засыпание узла равносильно возникновению разрыва в цепочке.

В данной работе исследуется влияние продолжительности фазы сна на энергоэффективность сети и скорость сбора информации. Основная часть статьи структурирована следующим образом. В п. 1 дается формальная постановка задачи. Пункт 2 посвящен описанию имитационной модели сети. Результаты вычислительных экспериментов приведены в п. 3

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим БСС, в которой сенсоры расположены вдоль прямой с равными интервалами. Подобные сети могут использоваться для мониторинга шоссе или газопроводов.

В такой сети естественно применять цепочечную маршрутизацию. Будем использовать энергоэффективный цепочечно-ориентированный (chain-based) протокол маршрутизации PEGASIS. Сбор информации в данном протоколе разбит на циклы (раунды). В начале каждого раунда узел-аккумулятор информации (обычно именуемый стоком) рассылает в правую и левую подцепочки сообщения с информацией о своем местоположении. В ответ остальные узлы сети передают замеры отслеживаемой физической величины – температуры, давления и т.д. Раунд заканчивается, когда сток получает информацию со всех узлов.

В работе [10] предполагалось, что сенсоры постоянно активны. Однако на практике в цикле работы сенсоров присутствует фаза сна. Расход энергии во время сна минимален, однако прием и передача сообщений невозможны. Таким образом, скорость сбора информации в цепочке может снизиться (т.е. продолжительность раунда возрастет).

Основной задачей данной работы является изучение зависимости длины раунда и величины расхода энергии от параметров фазы сна. Исследования проводятся с помощью имитационного моделирования. Используемая модель цепочки сенсоров разработана автором. В ней учитывается наличие в работе сенсоров активной и пассивной фазы. Присутствует блок, описывающий работу батареи питания сенсора. Более подробно модель описана в следующем пункте.

## 2. Имитационная модель

В разработанной модели сенсорной цепочки время является дискретным. Узел может находиться либо в активном состоянии, либо в состоянии сна. График засыпания-пробуждения сенсора подчиняется предположениям модели Чиассерини–Гаретто [11].

В течение одного шага модели активный узел может принять либо передать одно сообщение. Маршрутизация сообщений в сети реализуется с помощью протокола PEGASIS.

Поскольку перед нами стоит задача изучения динамики расхода энергии, в нашу модель включен блок, описывающий диссипацию энергии в сети.

Основными параметрами модели являются:  $N$  – количество сенсоров,  $p$  – параметр распределения длины активной фазы сенсора,  $q$  – параметр распределения длины фазы сна. Ниже даны более подробные описания основных деталей построенной модели.

### 2.1. Протокол PEGASIS

Протокол маршрутизации PEGASIS (power-efficient gathering in sensor information systems) был предложен в работе [10]. В нем используется идея логической цепочки сенсоров. Каждый узел взаи-

действует только с ближайшими соседями по цепочке. За счет этого удается избежать передач на длинное расстояние, на которые всегда тратится много энергии

Информация с узлов БСС собирается на некоторый выделенный узел сети, который называется стоком (sink). Сток выбирается случайным образом и выполняет функцию аккумулятора данных в течение некоторого временного промежутка, который называется *раундом*. Выбор стока происходит в соответствии с некоторым алгоритмом в начале каждого раунда.

После того как сток определен, он передает правому и левому соседям служебное сообщение (назовем его *маркером*) с информацией об идентификаторе узла-стока. Это сообщение дает указание другим узлам, куда отправлять измеренные данные.

Получив маркер от одного из своих соседей, узел передает его другому соседу. Таким образом, маркер движется по направлению к концу цепочки. Когда крайний сенсор получает маркер, он отправляет в ответ сообщение со сгенерированными данными (замеры наблюдаемой величины).

Сообщение с данными начинает движение в сторону стока. Каждый узел, получив такое сообщение, добавляет в него свои данные и передает его дальше по цепочке. Раунд заканчивается, когда сток получает данные от подцепочек справа и слева от себя. После этого происходит выбор нового стока и начинается очередной раунд.

## 2.2. Фаза сна

Функционирование отдельного сенсора подчиняется модели Чиассерини–Гаретто[11]. Это одна из самых известных аналитических моделей БСС. В рамках модели Чиассерини–Гаретто предполагается, что длина активной фазы и фазы сна распределена по геометрическому закону, каждая со своим параметром ( $p$  и  $q$  соответственно).

В разработанной нами модели смена активной фазы и фазы сна каждого узла реализована следующим образом. Изначально все сенсоры активны. Для каждого сенсора вычисляется время бодрствования, измеряемое в шагах модели. Это время является реализацией геометрического распределения с параметром  $p$ . Будучи в состоянии активности, сенсор может принять или передать сообщение соседнему узлу. Прием / передача занимает один шаг модели. При выходе из активной фазы вычисляется время сна, которое является реализацией геометрического распределения с параметром  $q$ .

## 2.3. Диссипация энергии в сети

В рамках данной работы предполагается, что расход энергии узлами сети происходит в соответствии с моделью В. Хайнцельман [9], которая часто используется в литературе по БСС.

Эта модель постулирует, что расход энергии на передачу сообщения длиной  $l_{msg}$  бит на расстояние  $d$  метров составляет  $E_{tx}$  единиц энергии, где

$$E_{tx} = E_{elec} l_{msg} + e_{amp} l_{msg} d^2.$$

Энергия, расходуемая на прием одного сообщения, вычисляется по формуле

$$E_{rx} = E_{elec} l_{msg}.$$

В качестве единицы измерения энергии примем наноджоуль. Вслед за [9] будем использовать следующие значения констант:

$$l_{msg} = 2\,000 \text{ бит}; E_{elec} = 50 \text{ нДж/бит}; e_{amp} = 100 \text{ пДж/бит/м}^2 = 0,1 \text{ нДж/бит/м}^2.$$

Передача сообщений происходит только между соседними узлами, расстояние между которыми будем считать одинаковым во всей сети и равным 5 м. Таким образом,  $d = 5$ . Кроме того, считаем, что начальная энергия каждого узла равна 0,5 Дж, обработка информации требует 5нДж на один бит.

## 2.4. Программная реализация

Описанная имитационная модель была реализована на языке C++. Кратко опишем алгоритм функционирования модели.

1. Инициализация модели. Все сенсоры активны. Для каждого сенсора реализована переменная-таймер, каждая из них равна реализации случайной величины с геометрическим распределением с параметром  $p$ .

2. Шаг модели (п. 2.1–2.2 выполняются только для активных сенсоров):

2.1. Принять / передать сообщение.

2.2. Увеличить счетчик расхода энергии.

2.3. Уменьшить значение таймера на единицу.

3. Если значение таймера после п. 2 становится равным нулю, сенсор меняет свое состояние на состояние сна, если был активен, и наоборот, становится активен, если он спал. После этого значение таймера становится равным реализации случайной величины с геометрическим распределением (с параметром  $p$ , если сенсор проснулся, и с параметром  $q$ , если он заснул).

4. Пункты 2–3 повторяются заданное количество раз.

### 3. Вычислительные эксперименты

С помощью симуляций на ЭВМ была смоделирована цепочка из  $N = 100$  сенсоров. Для каждого сочетания трех параметров ( $p$ ,  $q$  и положение стока  $s$ ) проводилась серия из 50 экспериментов. Каждый эксперимент представлял собой один раунд протокола PEGASIS. Вычислялось две метрики: длина раунда  $l_r$  и средний расход энергии по всем узлам цепочки  $e$ . Метрики усреднялись по всей серии экспериментов. Соответствующие средние значения обозначим  $L_r$  и  $E$ .

Рассматривались следующие значения варьируемых параметров:

– положение стока  $s$ : 16, 25, 50;

– параметр распределения активной фазы  $p$ : 0,1 и 0,00001;

– параметр распределения фазы сна  $q$ : от 0,6 до 0,95 с шагом 0,05.

Результаты проведенных экспериментов отражены на графиках. Графики зависимости длины раунда от  $q$  для каждого положения стока представлены на рис. 1, 3, 5. Графики зависимости разряда батарейки при тех же самых значениях параметров даны на рис. 2, 4, 6. Жирная линия отвечает значению  $p = 0,1$ , тонкая –  $p = 0,00001$ . Поскольку математическое ожидание геометрического распределения с параметром  $p$  равно  $1/p$ , можно считать, что тонкая линия отвечает случаю постоянно активных сенсоров (сенсор не успевает заснуть до конца раунда, т.е. фаза сна практически отсутствует).

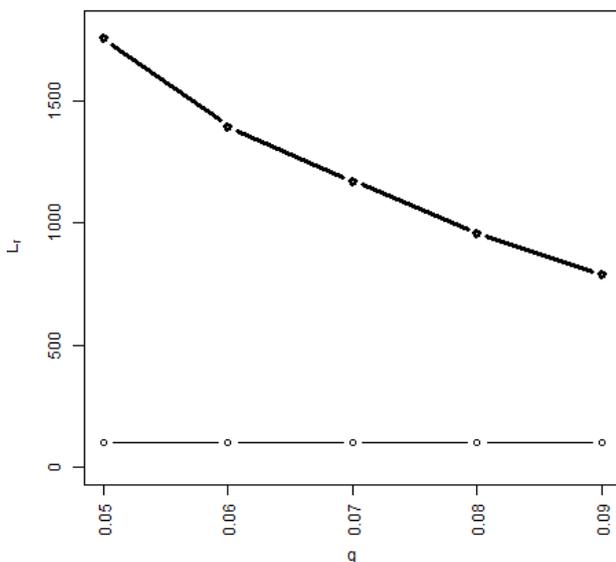


Рис. 1. Средняя длина раунда,  $s = 50$

Fig. 1. Average round length,  $s = 50$

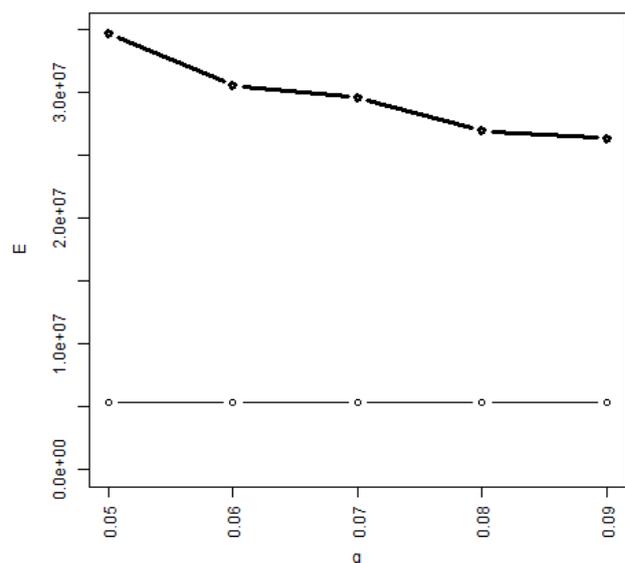


Рис. 2. Средний расход энергии,  $s = 50$

Fig. 2. Average energy drain,  $s = 50$

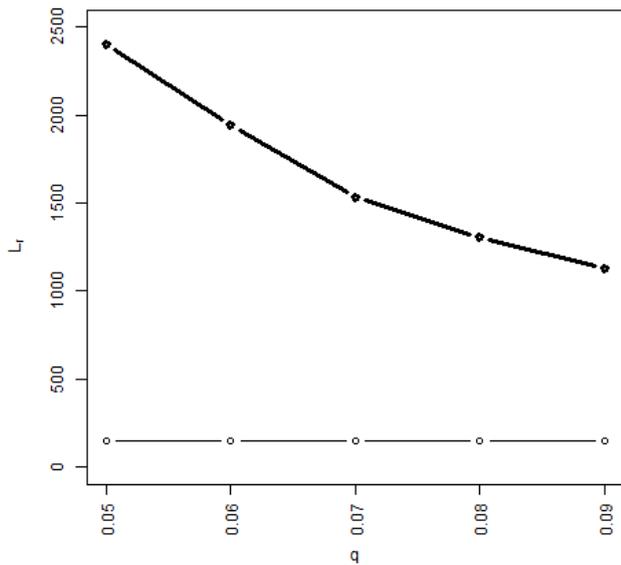


Рис. 3. Средняя длина раунда,  $s = 25$   
Fig. 3. Average round length,  $s = 25$

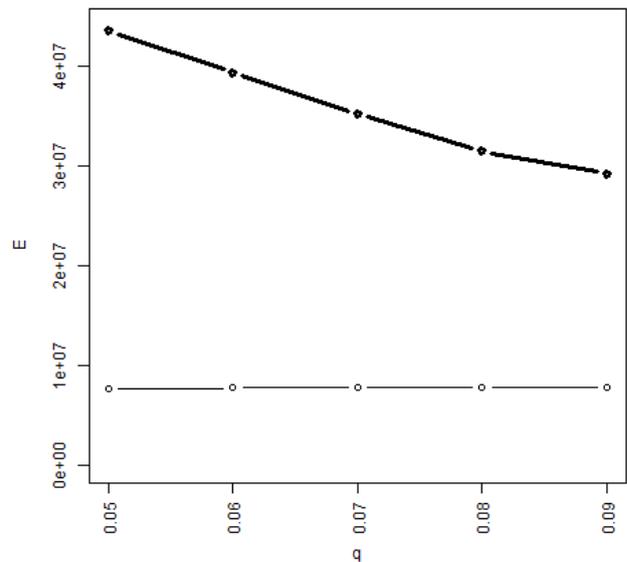


Рис. 4. Средний расход энергии,  $s = 25$   
Fig. 4. Average energy drain,  $s = 25$

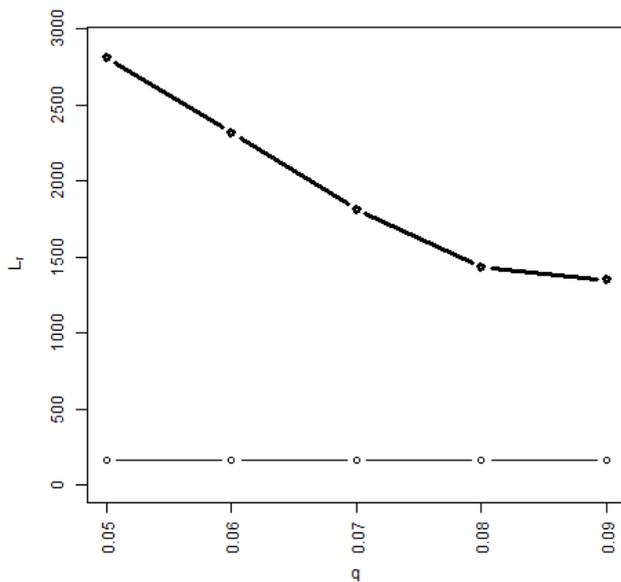


Рис. 5. Средняя длина раунда,  $s = 16$   
Fig. 5. Average round length,  $s = 16$

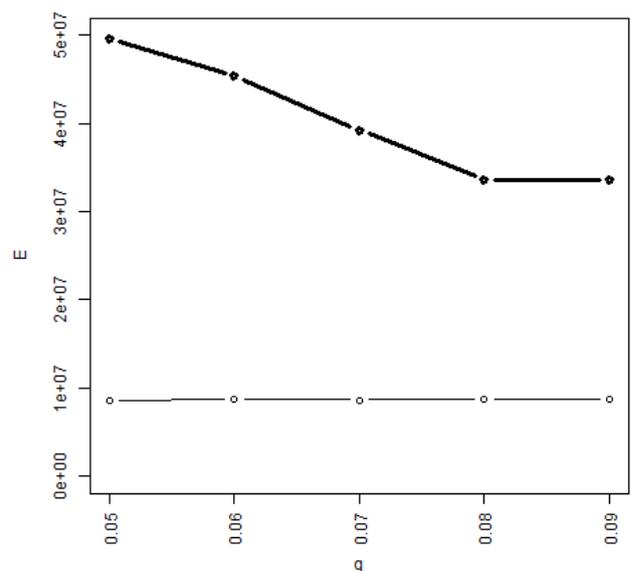


Рис. 6. Средний расход энергии,  $s = 16$   
Fig. 6. Average energy drain,  $s = 16$

На графиках видно, что при всех значениях  $q$  жирная линия лежит значительно выше тонкой. Самая большая разница наблюдается при параметре распределения фазы сна  $q = 0,05$ : расход энергии в случае постоянно активных сенсоров примерно в 6 раз меньше, а длина раунда — в 16 раз меньше.

### Заключение

Проведенные эксперименты показывают, что использование фазы сна может быть источником серьезных проблем в сенсорных сетях. В случае цепочечной маршрутизации из-за периодического засыпания сенсоров неизбежно происходит замедление скорости сбора информации. Данный недостаток, вопреки ожиданиям, необязательно компенсируется снижением расхода энергии. Напротив, если продолжительности активной фазы и фазы сна несогласованы, расход энергии увеличивается. Это связано с тем, что узлам приходится ожидать заснувшего соседа, впуская расход энергии.

Эта проблема может быть решена за счет внедрения интеллекта в работу сенсора. Накапливая информацию (набирая статистику о прохождении сообщений), сенсор может выработать собственную стратегию засыпания и просыпания с помощью некоторого алгоритма машинного обучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Chen Y., Zhang L., Jia Y., Ni D., Zhou B. A warehouse monitoring system based on wireless sensor network // 2011 IEEE 3rd Int. Conf. on Communication Software and Networks. Xi'an. 2011. P. 303–306.
2. Spieker S., Rohrig C. Localization of pallets in warehouses using Wireless Sensor Networks // 16th Mediterranean Conf. on Control and Automation, Ajaccio. 2008. P. 1833–1838.
3. Sadeghioon A.M., Metje N., Chapman D.N., Anthony C.J. SmartPipes: Smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines // J. Sens. Actuator Netw. 2014. V. 3. 64–78.
4. Nnebe S. Wireless sensor networks for long distance pipeline monitoring // WASET / International Science Index. 2013. V. 7, No. 3. P. 78–82.
5. Ghosh S., Rao S., Venkiteswaran B. Sensor network design for smart highways // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans. 2012. V. 42, No. 5. P. 1291–1300.
6. Mir M.H., Ravindran D. Role of IoT in smart city applications: a Review // Int. J. of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. 2017. V. 6, is. 7. P. 1099–1104.
7. Rawat P., Singh K.D., Chaouchi H., Bonnin J.M. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies // The J. of Supercomputing. 2014. V. 68, is. 1. P. 1–48.
8. Akyildiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. A Survey on Sensor Networks // IEEE Communications Magazine. 2002. August. P. 102–114.
9. Heinzelman W.R., Chandrakasan A., Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless sensor networks // IEEE Trans. on Wireless Communications. 2002. P. 660–670.
10. Lindsey S., Raghavendra C.S. PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems // Proc. of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana. March 2002. P. 1–6.
11. Chiasserini C.F., Garetto M. Modeling the performance of wireless sensor networks // Proc. Infocom: Twenty-third Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies. 2004. V. 1. P. 231.

Поступила в редакцию 5 ноября 2019 г.

Nikolsky I.M. (2020) STUDY OF THE IMPACT OF SLEEP PHASE DURATION ON ENERGY CONSUMPTION IN SENSOR CHAIN. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika* [Tomsk State University Journal of Control and Computer Science]. 52. pp. 83–89

DOI: 10.17223/19988605/52/10

Wireless sensor networks (WSN) is a fast developing technology used in area of monitoring processes and objects. WSN differs significantly from traditional computer networks. There is no regular administration, radio interference should be taken into account, etc. Another feature of WSNs is limitation of power consumption due to the fact that the nodes are powered by batteries.

The presence of such restrictions forces development of new routing protocols. There is a number of routing protocols built on the principles of energy efficiency. In present paper we consider PEGASIS protocol. This protocol utilizes idea of logical chain. Each node communicates with its nearest neighbours only. The work cycle of WSN is divided into rounds. On each round network randomly chooses a sink-designated node which will accumulate information. Sink notifies other nodes about its location sending a service message. This message travels along the chain in multihop manner, from node to node. When the last node receives such a message it replies with a message containing measured data. Data message moves towards the sink node. Each node adds its data to the message and passes it to the neighbour. Round ends when sink have received information from all the nodes.

In present paper we investigate impact of adding sleep phase in working cycle of nodes. Sleep phase is an important energy saving measure broadly used in real-world sensor networks. But in case of a sensor chain each sleeping node will slow down the movement of messages which implies deceleration of data acquisition. There is a conjecture that this slowdown will be compensated by more economical energy spending.

We study this issue using a simulation model of a sensor chain. Routing is based on PEGASIS protocol. Each sensor can be in one of two phases - active phase or sleep phase. Duration of each phase is a random value distributed by geometrical law (which responds to Chiasserini-Garetto model).

Our simulation results show that in case of random moments of node falling asleep and waking up energy spending under some circumstances may exceed several times compared to the case of no sleep phase. One of main reasons for this situation is idle listening. Our results demonstrate the need to coordinate sleep schedules between WSN nodes.

Keywords: wireless sensor networks; routing protocol; PEGASIS; energy efficiency.

NIKOLSKY Ilya Mikhailovich (Candidate of Physics and Mathematics, Assistant Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation).  
E-mail: oliv\_mail@mail.ru

#### REFERENCES

1. Chen, Y., Zhang, L., Jia, Y., Ni, D. & Zhou, B. (2011) A warehouse monitoring system based on wireless sensor network. *2011 IEEE 3rd Int. Conf. on Communication Software and Networks*. Xi'an. pp. 303–306. DOI: 10.1109/ICCSN.2011.6014727
2. Spieker, S. & Rohrig, C. (2008) Localization of pallets in warehouses using Wireless Sensor Networks. *16th Mediterranean Conf. on Control and Automation*. Ajaccio. pp. 1833–1838. DOI: 10.1109/MED.2008.4602031
3. Sadeghioon, A.M., Metje, N., Chapman, D.N. & Anthony, C.J. (2014) SmartPipes: Smart Wireless Sensor Networks for Leak Detection in Water Pipelines. *J. Sens. Actuator Netw.* 3. pp. 64–78. DOI: 10.3390/jsan3010064
4. Nnebe, S. (2013) Wireless Sensor Networks for Long Distance Pipeline Monitoring. *WASET/ Int. Science Index*. 7(3). pp 78–82.
5. Ghosh, S., Rao, S. & Venkateswaran, B. (2012) Sensor network design for smart highways. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans*. 42(5). pp. 1291–1300. DOI: 10.1109/COASE.2009.5234136
6. Mir, M.H. & Ravindran, D. (2017) Role of IoT in smart city applications: A Review. *Int. J. of Advanced Research in Computer Engineering & Technology*. 6(7). DOI: 10.13140/RG.2.2.25207.88482
7. Rawat, P., Singh, K.D., Chaouchi, H. & Bonnin, J.M. (2014) Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of Supercomputing*. 68(1). pp. 1–48. DOI: 10.1007/s11227-013-1021-9
8. Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E. (2002) A Survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*. 8. pp. 102–114.
9. Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A. & Balakrishnan, H. (2002) An application-specific protocol architecture for wireless sensor networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*. pp. 660–670. DOI: 10.1109/TWC.2002.804190
10. Lindsey, S. & Raghavendra, C.S. (2002) PEGASIS: Power efficient gathering in sensor information systems. *Proc. of the IEEE Aerospace Conf.* Big Sky, Montana, March.
11. Chiasserini, C.F. & Garetto, M. (2004) Modeling the Performance of Wireless Sensor Networks. *Proc. Infocom. Twenty-third Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies*. 1. p. 231. DOI: 10.1109/INFCOM.2004.1354496