

Модель энергопотребления узлов беспроводной сети датчиков для увеличения времени автономной работы сети*

М. Н. Мохсен, И. В. Богуславский

Предлагаемая новая модель беспроводной сети датчиков может быть применена для оптимизации энергопотребления сети. Этому способствует оптимизация структуры связей между узлами, учитывающая ёмкость источника питания узла, объём собираемой и передаваемой узлом информации, а также энергетическую возможность связи между узлами и её количественную оценку. Использование данной модели позволит оптимизировать структуру энергопотребления в беспроводной сети с целью повышения времени её автономной работы. (Речь идёт о времени до первого отказа узла сети из-за исчерпания ресурса источника питания.) Представленная модель приводится в терминах теории графов. Обосновывается актуальность исследования. Описывается подход к решению поставленной задачи, основанный на решении соответствующей задачи линейного программирования. Рассматривается одна из реализаций решения в виде программы для ЭВМ. Описываются результаты компьютерного моделирования. Приводятся выводы, касающиеся применимости таких технологий на практике.

Ключевые слова: беспроводные сети датчиков, беспроводные сенсорные сети (БСС), оптимизация энергопотребления, энергетическая балансировка.

Введение. Исследователи во всём мире проявляют активный интерес к беспроводным сетям датчиков, или беспроводным сенсорным сетям (БСС). Это обусловлено их универсальностью и удобством использования. Среди проблем, наиболее остро стоящих в связи с их использованием [1], можно отметить вопросы энергоэффективности и отказоустойчивости.

Одним из основных преимуществ БСС и одновременно существенной проблемой является автономное питание, требующее регулярной замены элементов. Отчасти эта проблема решается с помощью подхода *Energy Harvesting*, предполагающего преобразование энергии побочных механических, тепловых или электромагнитных воздействий в электрический ток для питания устройства. Широкое применение методов *Energy Harvesting* является отличительной чертой устройств, разрабатываемых под товарным знаком *EnOcean*.

В контексте разработки систем для мониторинга промышленных объектов автономное питание узлов сенсорной сети, с одной стороны, является серьёзной проблемой, так как множество специальных датчиков (например, некоторые газоанализаторы) отличаются высоким энергопотреблением. С другой стороны, *Energy Harvesting* в производственных условиях потенциально может применяться с большим успехом, учитывая высокий уровень электромагнитных и тепловых шумов, вибраций, производимых промышленным оборудованием. Возможность использования преобразователей вибрации в электрический ток для питания узла сенсорной сети показана, например, в [2].

Стоит отметить, что вопрос энергобезопасности сети требует наблюдения за текущим состоянием питания всех узлов с обязательным учётом их физического расположения (все узлы сети должны быть постоянно доступны) и маршрутов прохождения данных [3, 4].

Задача энергетической балансировки. Одной из практических задач, непосредственно связанных с проблемами энергоэффективности и устойчивости БСС, является увеличение времени автономной работы сети. Технологически этого можно достичь следующими способами:

- 1) совершенствование автономных источников питания;
- 2) применение подхода *Energy Harvesting*;

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

3) оптимизация энергопотребления сети.

Остановимся на последнем. Энергопотребление в БСС зависит от следующих факторов:

- расстояние и наличие препятствий между различными узлами (т. е. их расположение в пространстве относительно друг друга);
 - объём передаваемой информации и частота её передачи;
 - энергопотребление используемых микросхем, датчиков и других электронных компонентов;
 - логическая структура сети, включающая маршруты передачи информации от узла к узлу.

При изменении любого параметра структура энергопотребления в сети и энергопотребление каждого отдельного узла будут меняться. Оптимизацию энергопотребления в таком случае называют *энергетической балансировкой*. Актуальный обзор подходов к решению данной проблемы приводится в [5].

Конечной целью оптимизации энергопотребления является увеличение времени автономной работы сети. Заранее условимся, как именно будем понимать данный показатель. Имея в виду практическое применение, наиболее логичным представляется определение времени автономной работы сети как времени до первого отказа любого из её узлов по причине исчерпания заряда источника питания. Такой подход активно применяется при исследовании проблемы энергетической балансировки [5–8].

Модель функционирования беспроводной сети датчиков. Для оптимизации энергопотребления сети сначала необходимо принять модель её функционирования. Существует ряд достаточно сложных моделей, например [9], учитывающих особенности конкретных протоколов взаимодействия между узлами сенсорной сети, их уязвимости. Однако для целей оптимизации энергопотребления стационарной сети достаточно рассмотреть более простую модель, описанную ниже.

К каждому узлу сети могут быть подключены различные датчики — соответственно, для измерения различных параметров окружающей среды и функционирования промышленных объектов. Будем считать, что в штатном режиме узел передаёт информацию о результатах измерений через определённые равные промежутки времени T_c (период передачи информации). При этом продолжительность передачи информации t_c при каждом сеансе связи постоянна (она характеризует объём передаваемой информации). Модель представлена на рис. 1. Серым цветом отмечены моменты времени, в которые осуществляется передача информации.

Рис. 1. Модель передачи информации узлом сети в течение времени $t = 30$ с при $T_c = 10$ с, $t_c = 2$ с

При использовании такой модели время, в течение которого узел осуществляет передачу данных за некоторый промежуток времени t определяется по формуле

$$t_{\text{rep}} = \lceil (t - t_c)/T_c \rceil + 1 \cdot t_c$$

(квадратные скобки означают операцию извлечения целой части числа).

В целях данной статьи будем рассматривать следующую упрощённую оценку:

$$t_{\text{pen(ycp)}} = t_c \cdot t / T_c.$$

Для окончательной характеристики узла введём одну величину — коэффициент продолжительности передачи $k_{\text{пер}}$ (т. е. доля времени, затрачиваемая на передачу информации узлом):

$$k_{f\text{rep}} = t_c / T_c.$$

Очевидно, энергозатраты узла при передаче данных зависят от мощности, на которой работает передатчик, и продолжительности его работы, о которой говорилось выше. Современные передатчики регулируют мощность для обеспечения надёжной передачи данных узлу при мини-

мальных энергозатратах. Итак, при определённой мощности передатчика передающего узла $P_{\text{пер}}$ между двумя узлами осуществляется связь, которая характеризуется данной мощностью.

Этот показатель, в свою очередь, зависит от различных факторов, ключевой из которых — уровень сигнала на принимающем узле. Непосредственное влияние на него оказывает взаимное расположение узлов.

Узел также характеризуется энергетической ёмкостью C_p автономного источника питания (в $\text{Вт} \times \text{с} = \text{Дж}$).

Совокупность узлов измерения и беспроводной передачи данных, описываемую указанными выше параметрами, можно представить в виде следующего графа (рис. 2). Каждому узлу в нём соответствует пара значений ($K_{f\text{пер}}$, C_p), а каждому ребру — значение $P_{\text{пер}}$. На практике иногда встречаются случаи, когда $P_{\text{пер}}$ для передачи информации в двух разных направлениях могут отличаться, но в данной статье они не рассматриваются.

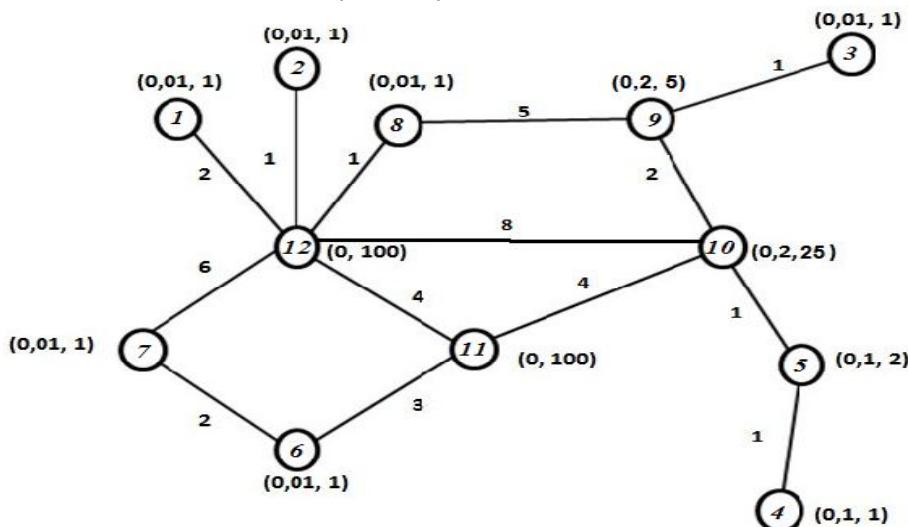


Рис. 2. Пример графа беспроводной сети датчиков

В случае, если через узел передают данные другие узлы, к его показателю $K_{f\text{пер}}$ прибавляются соответствующие показатели узлов-передатчиков. Получившуюся величину обозначим $K_{f\text{пер общ}}$.

Средняя потреблённая узлом энергия $e_{\text{ср}}$ (Дж) за время t равна

$$e_{\text{ср}} = P_{\text{пер}} \cdot K_{f\text{пер общ}} \cdot t.$$

Если считать, что ёмкость источника питания у всех узлов совпадает, задача сводится к построению сети таким образом, чтобы $K_{f\text{пер общ}}$ каждого узла как можно меньше отличался от среднего по сети. Однако такая постановка задачи не вполне соответствует практике и здравому смыслу: узлы-ретрансляторы заведомо следует оснащать более ёмкими батареями для передачи большего объёма информации.

Поэтому в модели требуется учитывать также ёмкость автономного источника питания каждого узла. Естественно, при практическом использовании модели придётся вводить поправки, связанные с энергозатратами, отличными от передачи информации.

Предполагается, что в рабочей конфигурации сети узел может принимать данные от нескольких других узлов, но передавать — только одному (т. е. сеть является деревом). В данной модели сток один, и он является корнем дерева.

В этом случае среднее время автономной работы узла можно определить, приравняв $e_{\text{ср}}$ и C_p :

$$C_p = P_{\text{пер}} \cdot Kt_{\text{пер}} \cdot t_{\text{авт}},$$

$$t_{\text{авт}} = C_p / (P_{\text{пер}} \cdot k t_{\text{пер}}).$$

Тогда задача сводится к тому, чтобы найти на графике связей узлов сети такое дерево, что минимальное $t_{\text{авт}}$ среди всех узлов будет наибольшим из возможных. При этом должно выполняться условие $k t_{\text{пер общ}} \leq 1$ для каждого узла.

Такая задача может быть решена на ЭВМ.

Решение поставленной задачи с помощью полного перебора. Рассмотрим все возможные варианты оствовов. Будем использовать следующий алгоритм для их нахождения.

Строим случайное оствовое дерево G' с помощью любого алгоритма обхода графа G .

Выбираем случайное ребро e в дереве G' .

Удаляем ребро e из дерева G' . Тем самым оно распадается на два дерева: G''_1 и G''_2 .

Из всех рёбер графа G , не вошедших в дерево G' , выбираем те, которые соединяют деревья G''_1 и G''_2 . В результате для каждого из них будет сформировано новое оствовое дерево.

Повторяем шаги 3, 4 для следующего ребра e и дерева G' пока не будут рассмотрены все рёбра.

Данный алгоритм иллюстрирует рис. 3.

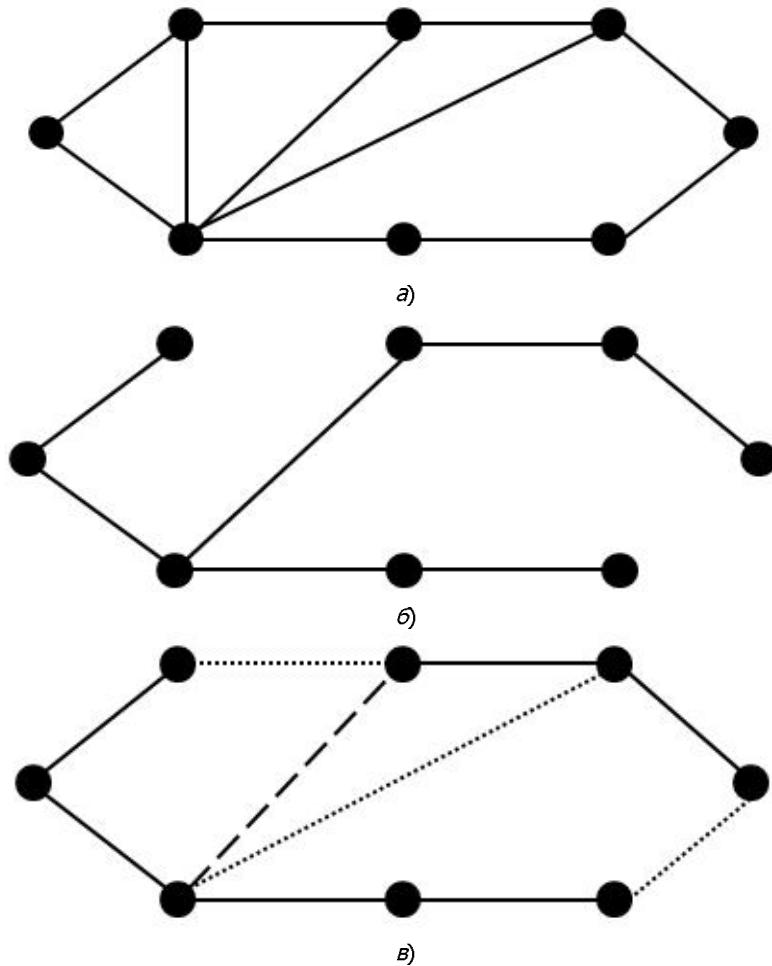


Рис. 3. Иллюстрация алгоритма перебора возможных оствовых деревьев: исходная сеть (а); некоторый оствов (б); если убрать ребро оства b (штриховая линия), то восстановить связность можно будет одним из других рёбер исходной сети (пунктирная линия) (в)

Каждый оствов нужно оценить по наименьшему времени автономной работы узла. Для того чтобы определить это время, нужно знать направление движения информации по сети. В сети

датчиков это направление «к стоку». Предположим, что в качестве стока будет выбран один из имеющихся в графе узлов.

Для каждого оставного дерева, получаемого с помощью данного алгоритма, определим наилучшее расположение стока в случае, когда он будет располагаться на месте одного из узлов сети. Для этого используем следующий алгоритм.

Сопоставляем каждому узлу число I , изначально равное количеству связей с другими узлами.

Для всех узлов, у которых $I = 1$, вычислим время автономной работы, после чего установим у них $I := 0$, у соседнего узла $I := I - 1$.

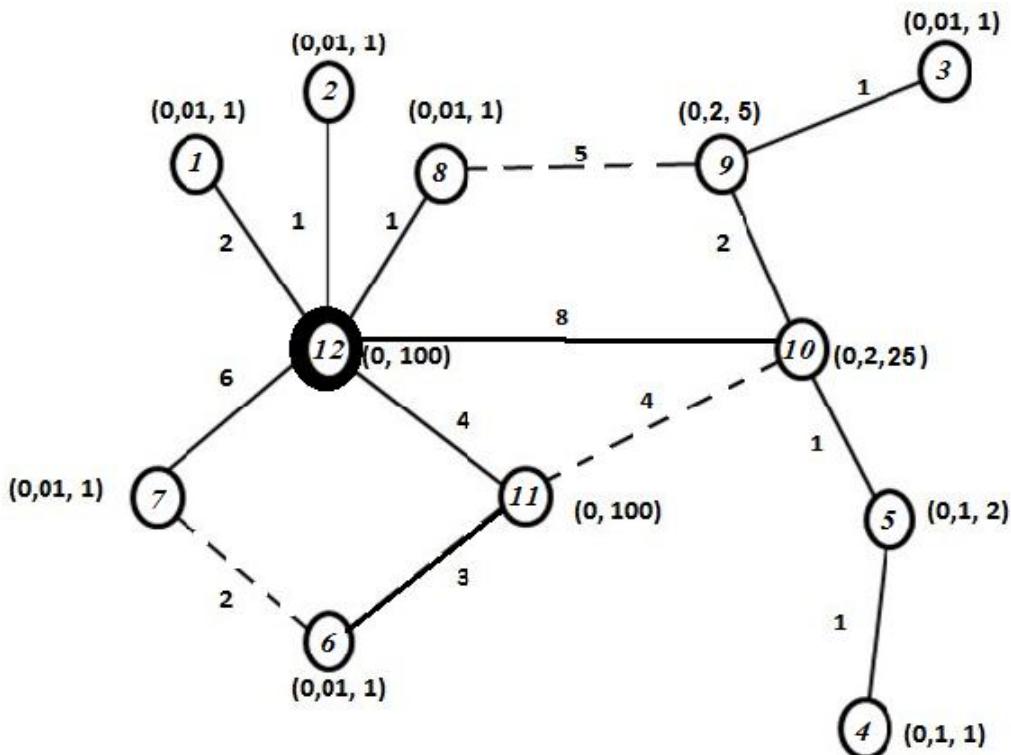
После этого у всех узлов будет $I = 0$. Последний узел, для которого время автономной работы не было вычислено, будем считать стоком.

Дальнейшая оптимизация расположения стока выполняется следующим образом. Рассматриваются узлы, примыкающие к стоку. Для каждого узла проверяем, как изменится минимальное время автономной работы среди всех узлов сети, если переместить сток в этот узел. Если время не уменьшилось, то продолжаем перемещать сток.

В результате будет определена такая структура связей узлов сети, при которой обеспечивается наибольшее минимальное время автономной работы узла сети.

Данный алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ, которая была зарегистрирована в Роспатенте (получено свидетельство [10]).

Численный эксперимент. Приведём пример работы алгоритма для некоторой структуры сети, изображённой на рис. 4.



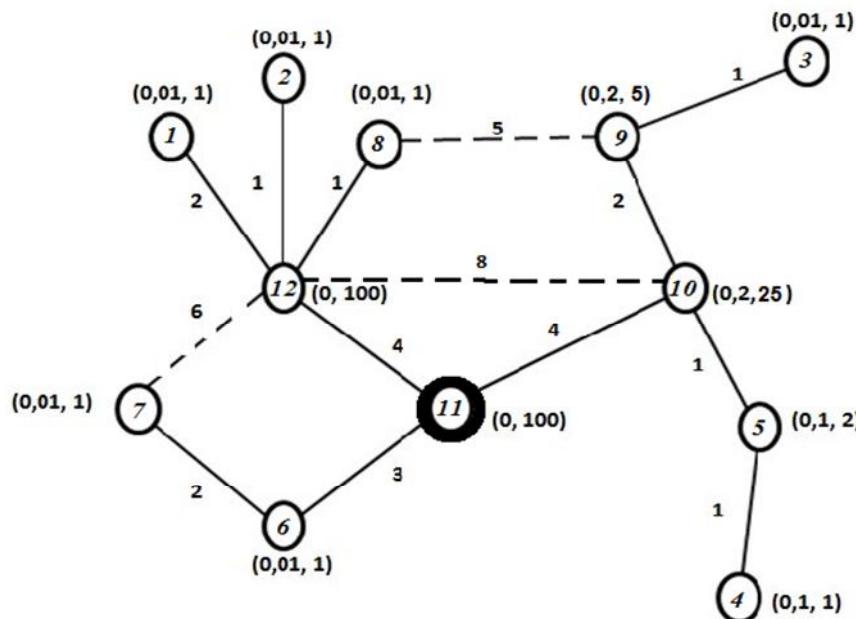


Рис. 5. Схема сети после оптимизации

В табл. 1 приведено вычисленное время автономной работы для каждого узла при структурах сети, изображённых на рис. 4 и 5. Жирным шрифтом отмечено наименьшее время автономной работы среди всех узлов. Ёмкость источника питания, мощность передатчика и время автономной работы приводятся в относительных единицах.

Таблица 1
Время автономной работы узлов сети до и после оптимизации

№ узла	$k_{t\text{пер}}$	C_P	До оптимизации			После оптимизации		
			P	$k_{t\text{пер общ}}$	$t_{\text{авт р}}$	P	$k_{t\text{пер общ}}$	$t_{\text{авт р}}$
1	0,01	1	2	0,01	50	2	0,01	50
2	0,01	1	1	0,01	100	1	0,01	100
3	0,01	1	1	0,01	100	1	0,01	100
4	0,1	1	1	0,1	10	1	0,1	10
5	0,1	2	1	0,2	10	1	0,2	10
6	0,01	1	3	0,01	33,33333	3	0,02	16,66667
7	0,01	1	6	0,01	16,66667	2	0,01	50
8	0,01	1	1	0,01	100	1	0,01	100
9	0,2	5	2	0,21	11,90476	2	0,21	11,90476
10	0,2	25	8	0,61	5,122951	4	0,61	10,2459
11	0	100	4	0,01	2500	—	—	—
12	0	100	—	—	—	4	0,03	833,333

Заключение. Предложена новая модель функционирования беспроводной сети датчиков, учитывающая ёмкость источника питания узла, объём собираемой и передаваемой узлом информации, энергетическую возможность связи между узлами и её количественную оценку. Данная модель может быть использована для оптимизации структуры энергопотребления в беспроводной сети с целью повышения времени автономной работы сети (времени до первого отказа узла сети из-за исчерпания ресурса источника питания).

Библиографический список

1. Dargie, W. Fundamentals of Wireless Sensor Networks. Theory and Practice / W. Dargie, C. Poellabauer. — London ; Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2010. — 311 p.
2. Уитакер, М. Energy Harvesting. Новый этап в развитии автономных устройств / М. Уитакер, И. Бочарников // Компоненты и технологии. — 2010. — № 8. — С. 146–169.
3. Мочалов, В. А. Метод синтеза отказоустойчивой структуры сенсорной сети при наличии ограничений по размещению узлов сети в разнородном пространстве / В. А. Мочалов // Т-Comm : Телекоммуникации и транспорт. — 2012. — № 10. — С. 71–75.
4. Киреев, А. О. Распределённая система энергетического мониторинга беспроводных сенсорных сетей / А. О. Киреев // Изв. Юж. федер. ун-та. Техн. науки. — 2011. — Т. 118, № 5. — С. 60–65.
5. Ishmanov, F. Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs): a comprehensive overview / F. Ishmanov, A.-S. Malik, S.-W. Kim // European Transactions on Telecommunications. — 2011. — Т. 22. — С. 151–167.
6. Восков, Л. С. Метод энергетической балансировки беспроводной стационарной сенсорной сети с автономными источниками питания / Л. С. Восков, М. М. Комаров // Бизнес-информатика. — 2012. — № 1 (19). — С. 70–75.
7. Ефремов, С. Г. Задача увеличения времени автономной работы беспроводных сенсорных сетей в системах сбора данных и способ её решения / С. Г. Ефремов, Л. С. Восков // Датчики и системы. — 2013. — № 4. — С. 2–6.
8. Восков, Л. С. Позиционирование датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения / Л. С. Восков, М. М. Комаров // Датчики и системы. — 2012. — № 1. — С. 34–38.
9. Bouabdallah, F. On balancing energy consumption in wireless sensor networks / F. Bouabdallah, N. Bouabdallah, R. Boutaba // IEEE Transactions on Vehicular Technology. — 2009. — Vol. 58, № 6. — Pp. 2909–2924.
10. Оптимальное расположение узла-стока в беспроводной сенсорной сети : св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ 2014610877 Рос. Федерация / М. Н. Мохсен, И. В. Богуславский. — № 2013660754 ; заявл. 21.11.2013 ; опубл. 17.01.2014, бюл. № 2 (88), 2014. — 1 с.

Материал поступил в редакцию 04.03.2014.

References

1. Dargie, W., Poellabauer, C. Fundamentals of Wireless Sensor Networks. Theory and Practice. London, Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2010, 311 p.
2. Whitaker, M., Bocharnikov, I. Energy Harvesting. Novyy etap v razvitiu avtonomnykh ustroystv. [Energy Harvesting. A new stage in the development of off-line units.] Components & Technologies, 2010, no. 8, pp. 146–169 (in Russian).
3. Mochalov, V. A. Metod sinteza otkazoustoychivoy struktury sensornoy seti pri nalichii ograniceniy po razmeshcheniyu uzlov seti v raznorodnom prostranstve. [Method of designing fault-tolerant structure in the presence of sensory network restrictions for placing nodes in heterogeneous space.] T-Comm : Telecommunications and Transport, 2012, no. 10, pp. 71–75 (in Russian).
4. Kireev, A. O. Raspredelennaya sistema energeticheskogo monitoringa besprovodnykh sensornykh setey. [Distributed system of energy monitoring for wireless sensor networks.] SFedU Izvestiya. Engineering Sciences. 2011, vol. 118, no. 5, pp. 60–65 (in Russian).
5. Ishmanov, F., Malik, A.-S., Kim, S.-W. Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs) : a comprehensive overview. European Transactions on Telecommunications, 2011, vol. 22, pp. 151–167.

6. Voskov, L. S., Komarov, M. M. Metod energeticheskoy balansirovki besprovodnoy statsionarnoy sensornoy seti s avtonomnymi istochnikami pitaniya. [Method of energy balancing of stationary wireless sensor network with independent power sources.] *Biznes-informatika*, 2012, no. 1 (19), pp. 70–75 (in Russian).
7. Efremov S., Voskov L. Zadacha uvelicheniya vremeni avtonomnoy raboty besprovodnykh sensornykh setey v sistemakh sbora dannykh i sposob yeye resheniya. [A method for increasing lifetime of wireless sensor networks in data acquisition systems.] *Sensors & Systems*, 2013, no. 4, pp. 2–6 (in Russian).
8. Voskov, L. S., Komarov, M. M. Pozitsionirovaniye datchikov besprovodnoy sensornoy seti kak sposob energosberezheniya. [Positioning as energy saving method.] *Sensors & Systems*, 2012, no. 1, pp. 34–38 (in Russian).
9. Bouabdallah, F., Bouabdallah, N., Boutaba, R. On balancing energy consumption in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, vol. 58, no. 6, pp. 2909–2924.
10. Mohsen, M. N., Boguslavskiy, I. V. Optimalnoye raspolozheniye uzla-stoka v besprovodnoy sensornoy seti : sv-vyo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM 2014610877 Ros. Federatsiya. [Optimal sink node location in the wireless sensor network : RF State Registration Certificate for Computer Program 2014610877.] No. 2013660754, 2014 (in Russian).

ENERGY CONSUMPTION MODEL OF WIRELESS SENSOR NET NODES AND ITS APPLICATION FOR INCREASING NETWORK OFFLINE OPERATION TIME*

M. N. Mohsen, I. V. Boguslavskiy

A proposed new model of the wireless sensor net can be applied for the network optimized energy efficiency. The optimization of the communication structure between nodes taking into account the capacity of the power supply unit, the amount of the information collected and transmitted by the node, as well as the energy connectivity between nodes and its quantitative assessment contributes to this. The application of this model will allow optimizing the structure of energy consumption in a wireless network to increase the time of its offline operation. (It is a case of life to the first node failure due to the power supply exhaustion.) The presented model is given in terms of the graph theory. The research relevance is proved. The approach to the problem solution based on the solution to the corresponding linear programming problem is described. The implementation of solutions in the form of a computer program is considered. The computer simulation results are described. The conclusions regarding the applicability of the technology in practice are provided.

Keywords: wireless sensor networks (WSNs), energy optimization, energy balancing.

* The research is done within the frame of the independent R&D.