

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**Моделирование беспроводной сети ZigBee сетью массового
обслуживания**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы
направления 09.04.01 – Информатика и вычислительная техника
факультета компьютерных наук и информационных технологий
Храмова Дмитрия Эдуардовича

Научный руководитель

доцент, к. ф.-м. н.

Зав. кафедрой,

к.ф.-м.н., доцент

Е.С. Рогачко

И.Е. Тананко

Саратов 2021

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Рассматриваемые в данной работе беспроводные сенсорные сети в настоящее время находят широкое применение для предсказания отказа оборудования в аэрокосмических системах, автоматизации зданий (системы "умный дом"), систем промышленного мониторинга и управления, а также в бытовой электронике и «периферии» персональных компьютеров.

Анализ производительности сети позволяет оценить эффективность и отметить уязвимые места беспроводной сенсорной сети. Эта оценка позволяет избежать проблем при построении сети, а также предотвратить лишние траты ресурсов.

Одним из основных методов системного анализа является аналитическое моделирование. При данном методе исследование процессов или объектов заменяется построением их математических моделей и исследованием этих моделей. В основу метода положены идентичность формы уравнений и однозначность соотношений между переменными в уравнениях, описывающих оригинал и модель [1].

Цель магистерской работы - построение модели беспроводной сети ZigBee в виде сети массового обслуживания и разработка метода ее анализа.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

- изучить литературу по беспроводным сетям и технологии ZigBee;
- изучить основы теории массового обслуживания и ее применение для исследования беспроводных сенсорных сетях;
- описать модель сети ZigBee в виде сети массового обслуживания;
- разработать имитационную модель сети;
- разработать алгоритм метода анализа модели беспроводной сети;
- выполнить программную реализацию алгоритма;
- на примере фрагмента реальной беспроводной сети выполнить анализ производительности сети с использованием разработанных моделей.

Методологические основы магистерской работы представлены в работах [2–4]. В работах [5–10] описывается применение теории массового обслуживания для решения различных задач из области исследования и проектирования БСС.

Теоретическая и практическая значимость магистерской работы. В магистерской работе была построена математическая модель фрагмента беспроводной сети в виде открытой сети массового обслуживания с одноприборными системами обслуживания, с несколькими классами требований и приоритетным обслуживанием. Был разработан метод анализа, позволяющий вычислить характеристики данной сети.

Была разработана программа, реализующая метод анализа математической модели беспроводной сенсорной сети. Была построена имитационная ЖМТ-модель рассматриваемой сети. Данные модели можно применять для анализа характеристик производительности реальных БСС или их фрагментов.

Структура и объем работы. Магистерская работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы – 61 страница, из них 50 страниц – основное содержание, включая 15 рисунков, 1 таблицу и список использованных источников информации из 54 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Беспроводные сети и технология ZigBee» приводятся основные понятия из теории БСС. В подразделе 1.1 «Особенности функционирования беспроводной сенсорной сети ZigBee» рассмотрены особенности функционирования беспроводной сенсорной сети ZigBee [1].

Упрощенная модель беспроводной сенсорной сети представлена на рисунке 1.

Требования генерируются с помощью одного или нескольких источников и представляют собой пакеты ZigBee, которые передаются от конечных узлов до координатора.

Конечные узлы представляют собой устройства БСС с наименьшей функциональностью. Они собирают данные из окружающей среды, генерируют пакеты данных ZigBee и отправляют их к следующему узлу.

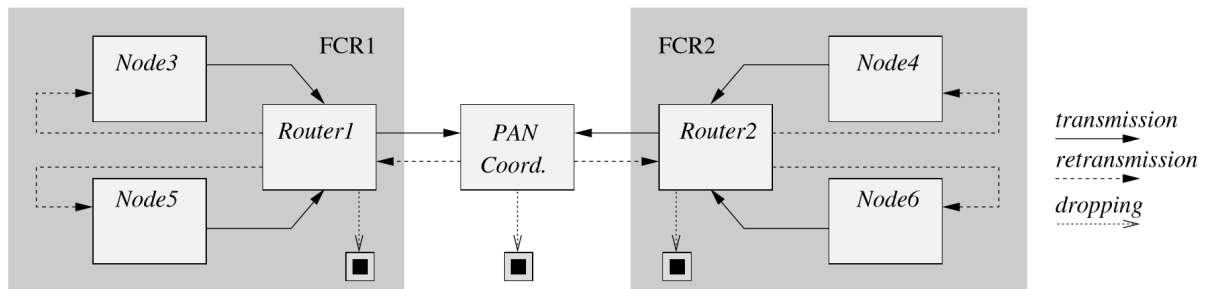


Рисунок 1 — Упрощенная модель беспроводной сети (transmission – передача, retransmission – повторная передача, dropping – потеря)

Каждый источник генерирует пакеты данных в соответствии с заданным распределением длительностей интервалов между пакетами. Регулярный трафик может иметь постоянное или экспоненциальное распределение, в то время как сигнальный трафик является пульсирующим.

Маяки используются для определения периодов активности/неактивности сети. Интенсивность поступления кадров-маяков, сгенерированных источником маяков, является постоянной и обратной к величине маячкового интервала.

Вероятности повторных передач пакетов (p_r) и потери пакетов (p_d) считаются заданными. Вероятность непотери пакетов (p_f) полагается равной $1 - p_d - p_r$.

Основными характеристиками производительности БСС являются: время отклика, пропускная способность, доля потерянных данных.

В подразделе 1.2 «Обзор моделей теории массового обслуживания, применяемых для исследования беспроводных сенсорных сетей» проводится обзор моделей теории массового обслуживания, применяемых для исследования беспроводных сенсорных сетей на примере основных проблем при построении данных сетей [5–10].

Во втором разделе «Модели беспроводной сенсорной сети ZigBee» описывается моделирование сети ZigBee в виде сети массового обслуживания, предлагаются метод анализа таких моделей.

В подразделе 2.1 «Описание модели сети ZigBee в виде сети массового обслуживания» рассматривается математическая модель БСС в виде сети массового обслуживания.

Рассматривается фрагмент БСС, представленный на рисунке 2.

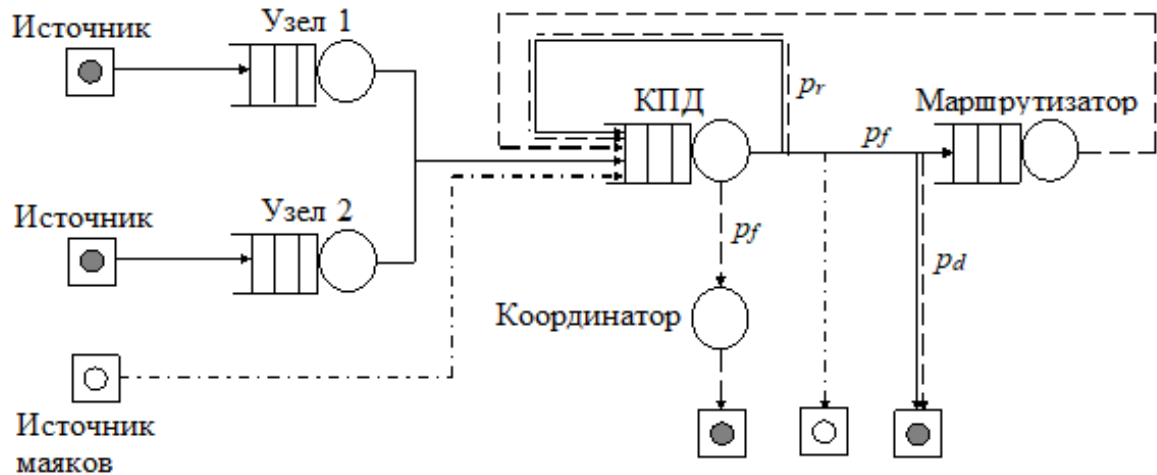


Рисунок 2 — Фрагмент БСС, состоящий из двух конечных узлов, маршрутизатора, координатора и беспроводного канала передачи данных (КПД).

Моделью БСС является открытая сеть массового обслуживания с тремя классами требований. Класс 1 требований соответствует маякам, класс 2 требований соответствует пакетам данных, передаваемых конечными узлами, класс 3 требований соответствует пакетам данных, передаваемых маршрутизатором. Класс 1 требований имеет абсолютный приоритет в обслуживании. Сеть массового обслуживания состоит из пяти систем массового обслуживания (СМО) следующего типа (соответствуют компонентам БСС).

1) Система S_1 соответствует конечному Узлу 1. Система S_1 является СМО типа М/М/1: пуассоновский входящий поток требований класса 2 с интенсивностью $\lambda_{0,12}$, длительности обслуживания требований класса 2 имеют экспоненциальное распределение с параметром μ_{12} .

2) Система S_2 соответствует конечному Узлу 2. Система S_2 является СМО типа М/М/1: пуассоновский входящий поток требований класса

2 с интенсивностью $\lambda_{0,22}$, длительности обслуживания требований класса 2 имеют экспоненциальное распределение с параметром μ_{22} .

3) Система S_3 соответствует КПД. Система S_3 является СМО типа $\bullet/D/1/FCFS-PRS$, т. е. одноприборной СМО с абсолютными приоритетами с тремя классами требований. Дисциплина выбора из очереди требований одного приоритета – FCFS; число мест для ожидания в очереди неограниченно. Входящий поток требований класса 1 с наивысшим приоритетом является регулярным с интенсивностью $\lambda_{0,31}$. Длительности обслуживания требований класса 1 являются детерминированными величинами, интенсивность обслуживания – μ_{31} . Требования классов 2, 3 не различаются приоритетом в обслуживании. Суммарный входящий поток требований классов 2, 3 является произвольным с интенсивностью $\lambda_{32} + \lambda_{33}$. Длительности обслуживания требований классов 2, 3 являются детерминированными величинами, интенсивности обслуживания $\mu_{32} = \mu_{33}$.

4) Система S_4 соответствует маршрутизатору. Система S_4 является СМО типа $\bullet/M/1$: произвольный входящий поток требований с интенсивностью λ_{43} , длительности обслуживания требований имеют экспоненциальное распределение с параметром μ_{43} .

5) Система S_5 (фиктивная) соответствует координатору. Система S_5 является СМО типа $\bullet/M/1$: произвольный входящий поток требований с интенсивностью λ_{53} , длительности обслуживания требований имеют экспоненциальное распределение с параметром $\mu_{53} = \infty$.

Обозначим S_0 – источник требований классов 1,2,3.

Маршрутная матрица $\Theta = (\theta_{ik,jl}), i, j = 0, 1, \dots, 5, k, l = 1, 2, 3$, сети массового обслуживания имеет следующие ненулевые элементы ($\theta_{ik,jl}$ – вероятность того, что требование класса k после обслуживания в системе S_i поступает в систему S_j и изменяет свой класс на l -й):

$$\begin{aligned}\theta_{02,12} &= \lambda_{0,12}/(\lambda_{0,12} + \lambda_{0,22} + \lambda_{0,31}), \theta_{02,22} = \lambda_{0,22}/(\lambda_{0,12} + \lambda_{0,22} + \lambda_{0,31}), \\ \theta_{01,31} &= \lambda_{0,31}/(\lambda_{0,12} + \lambda_{0,22} + \lambda_{0,31}), \\ \theta_{12,32} &= 1, \theta_{22,32} = 1, \\ \theta_{32,32} &= p_r, \theta_{32,02} = p_d, \theta_{32,43} = p_f, \\ \theta_{33,33} &= p_r, \theta_{33,03} = p_d, \theta_{33,53} = p_f,\end{aligned}$$

$$\theta_{31,01} = 1, \theta_{42,33} = 1, \theta_{53,03} = 1.$$

В подразделе 2.2 «Аналитическая модель сети ZigBee» описывается аналитическая модель сети, а также метод анализа, позволяющий вычислить характеристики данной сети.

Предлагаемый алгоритм состоит из следующих шагов:

- переход от открытой сети массового обслуживания к замкнутой при заданном значении количества требований в сети K ,
- вычисление относительных интенсивностей потоков требований,
- вычисление $\lambda_r, r = 1, 2, 3$ - пропускной способности сети для требований класса r ,
- вычисление математического ожидания длительности реакции сети τ и пропускной способности сети Λ .

Переход от открытой сети массового обслуживания к замкнутой происходит с помощью замены источника требований на систему массового обслуживания $\bullet/G/1$ так, что:

- интенсивность обслуживания новой системы равна интенсивности поступления требований в открытую сеть,
- коэффициент вариации длительности обслуживания в новой системе равен коэффициенту вариации длительности интервала времени между поступлениями требований в открытую сеть,
- вероятности маршрутизации назначаются так, что источник требований заменяется новой системой.

В случае рассматриваемой модели, представленной на рисунке 2, переход от открытой сети массового обслуживания к замкнутой происходит при $K = 5000$ [4].

Рассматривается открытая сеть массового обслуживания с тремя классами требований ($R = 3$).

Источник требований заменяется соответствующей системой массового обслуживания S_0 , для которой интенсивности обслуживания $\mu_{01} = \lambda_{0,31}, \mu_{02} = \lambda_{0,12} + \lambda_{0,22}$.

Введем обозначения:

— R - количество классов требований в сети (в нашем случае данный параметр равен 3),

— N - число систем массового обслуживания в сети (без учета системы, заменяющей источник требований),

— k_{ir} - количество требований класса r в i -ой системе, для замкнутой СеМО выполняется: $\sum_{i=0}^N \sum_{r=1}^R k_{ir} = K$,

— K_r - количество требований класса r в сети. В замкнутой СеМО: $\sum_{i=0}^N k_{ir} = K_r$,

— $\mathbf{K}$ - количество требований различных классов в сети, ($\mathbf{K} = (K_1, \dots, K_R)$),

— St_i - состояние i -ой системы ($St_i = (k_{i1}, \dots, k_{iR})$): $\sum_{i=0}^N St_i = \mathbf{K}$,

— St - состояние сети с несколькими классами требований ($St = (St_0, \dots, St_N)$),

— μ_{ir} - интенсивность обслуживания в i -ой системе для требований класса r ,

— $\theta_{ir,js}$ - вероятность того, что требование класса r после обслуживания в системе S_i поступает в систему S_j и изменяет свой класс на s -й

— λ_{ir} - интенсивность поступления требований класса r в i -ую систему: $\lambda_{ir} = \sum_{j=0}^N \sum_{s=1}^R \lambda_{js} \cdot \theta_{js,ir}$.

Относительные интенсивности потоков требований e_{ir} в i -ой системе вычисляются как решение следующей системы уравнений:

$$e_{ir} = \sum_{j=0}^N \sum_{s=1}^R e_{js} \theta_{js,ir}, i = 0, \dots, N, r = 1, \dots, R.$$

Предполагается, что $e_{0r} = 1$ при $r = 1, \dots, R$.

Таким образом имеем систему уравнений с $(N + 1) \cdot R$ неизвестными. В случае, когда используется вариант с заданием $e_{0r} = 1$ при $r = 1, \dots, R$ рассмотренный выше, то число неизвестных в системе будет равным $N \cdot R$.

Уравнения могут быть переписаны в следующем виде:

$$e_{ir} - \sum_{j=0}^N \sum_{s=1}^R e_{js} \theta_{js,ir} = 0, i = 0, \dots, N, r = 1, \dots, R.$$

Заметим, что в рассматриваемой модели: $R = 3$, $N = 5$, 0 - это система S_0 , которая является заменой источника требований.

Вычисление относительных интенсивностей потоков требований e_{ir} представляет собой решение системы линейных уравнений. В нашем случае имеется 18 неизвестных. Предположим, что $e_{01} = e_{02} = e_{03} = 1$. Таким образом в системе уравнений количество неизвестных сокращается до 15.

Рассматривая полученную систему уравнений после подстановки значений из маршрутной матрицы, можно заметить, что некоторые неизвестные будут равняться нулю, а именно $e_{11}, e_{13}, e_{21}, e_{23}, e_{33}, e_{41}, e_{42}, e_{51}, e_{52}$ равны нулю.

Используется метод SUM [4] для сети массового обслуживания с несколькими классами требований и приоритетным обслуживанием.

В случае метода SUM для расчета пропускной способности сети λ_r для требований класса r используется следующая система уравнений:

$$\sum_{i=0}^N \overline{K_{ir}} = \sum_{i=0}^N f_{ir}(\lambda_r \cdot e_{ir}) = K_r, r = 1, \dots, R.$$

$\overline{K_{ir}}$ - математическое ожидание числа требований класса r в i -ой системе. f_{ir} - монотонная неубывающая функция от λ_r

Это уравнение преобразовывается к виду:

$$\lambda_r \sum_{i=0}^N fix_{ir}(\lambda_r \cdot e_{ir}) = K_r$$

или:

$$\lambda_r = \frac{K_r}{\sum_{i=0}^N fix_{ir}(\lambda_r \cdot e_{ir})} = f_r(\lambda_1, \dots, \lambda_R) = f_r(\lambda).$$

Для функции fix_{ir} при $i=1,2,4,5$, так как системы S_1, S_2, S_4, S_5 являются системами типа $\bullet/M/1$, имеем [4]:

$$fix_{ir} = \frac{\frac{e_{ir}}{\mu_{ir}}}{1 - \frac{K-1}{K} \cdot \rho_i}.$$

При этом используются следующие формулы:

$$\lambda_{ir} = \lambda_r e_{ir}; \rho_{ir} = \frac{\lambda_{ir}}{\mu_{ir}}; \rho_i = \sum_r \rho_{ir}.$$

В то же время системы S_0 и S_3 являются системами типа $\cdot/G/1/FCFS - PRS$ и для них имеем:

$$fix_{ir} = \frac{e_{ir}}{\mu_{ir}} + \frac{e_{ir}}{\rho_{ir}} \left[\frac{\frac{\sigma_{ir+1}}{2} \sum_{j=1}^r e_{ij} \alpha_2(B_{ij})}{(1 - \frac{K-1-a}{K-1} \sigma_{ir+1})} - \frac{\frac{\sigma_{ir}}{2} \sum_{j=1}^{r-1} e_{ij} \alpha_2(B_{ij})}{(1 - \frac{K-1-a}{K-1} \sigma_{ir})} \right].$$

Здесь:

$$\alpha_2(B_{ij}) = \frac{c_{ij}^2 + 1}{(\mu_{ij})^2}, a = \frac{c_{ir}^2 + 1}{2}, \sigma_{ir} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{r-1} \rho_{ij}, r > 1 \\ 0 \end{cases},$$

$$c_{ir}^2 = \begin{cases} 1, \text{ для экспоненциально распределенных длительностей обслуживания} \\ 0, \text{ для детерминированных длительностей обслуживания} \end{cases}.$$

Пропускная способность λ_r вычисляется итерационным методом.

Пропускная способность сети вычисляется по формуле: $\Lambda = \lambda_3 p_f$, где λ_3 - пропускная способность S_3 .

Математическое ожидание длительности реакции сети вычисляется по формуле: $\tau = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=1}^5 \bar{K}_i$, где λ_0 - пропускная способность S_0 , $\bar{K}_i$ - математическое ожидание числа требований всех классов в i -ой системе.

В подразделе 2.3 «Имитационная модель сети ZigBee» описывается имитационная модель сети. Имитационная модель разработана с помощью программного обеспечения JSIMGraph [3], входящего в состав Java Modelling Tools.

В третьем разделе «Результаты исследования беспроводной сенсорной сети ZigBee» проводится описание программы, разработанной для анализа беспроводной сенсорной сети ZigBee, и приводятся результаты моделирования фрагмента беспроводной сети.

В подразделе 3.1 «Описание программы для анализа сети ZigBee» описывается программа, написанная на языке Python. Программа реализована как консольное приложение. Программа выполняет вычисления в автоматическом режиме и не требует от пользователя никаких действий, кроме ввода необходимых параметров сети (ограничение на количество требований каждого из классов, интенсивности обслуживания в системах сети, маршрутная матрица без нулевых элементов) в файл. Выходными значениями являются математическое ожидание длительности реакции сети τ и пропускная способность сети Λ .

В подразделе 3.2 «Анализ функционирования беспроводной сети» вычисляются характеристики фрагмента реальной БСС с использованием соответствующих программных реализаций моделей и проводится

сравнение результатов из [2] с полученными в данной работе значениями аналитической и имитационной моделей.

Полученные результаты представлены в таблице 1. Математическое ожидание длительности реакции сети в имитационной модели равно 0,055, в аналитической - 0.035. Пропускная способность сети в имитационной модели равна 6.16, в аналитической - 6.859.

Таблица 1 — Сравнение результатов моделей

Модель	τ	Λ
Bellasi JMT	0.055	7.1
Bellasi ns-2	0.05	7.05
Имитационная модель	0.055	6.16
Аналитическая модель	0.035	6.86

Как видно из таблицы, математическое ожидание длительности реакции сети варьируются в диапазоне от 0.035 до 0.055, а пропускная способность от 6.16 до 7.1, причем аналитическая модель имеет погрешность около 2%, а имитационная - 11%. Расхождение в значениях характеристик сети можно объяснить сделанными допущениями при построении имитационной и аналитической моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В магистерской работы были изучены работы по беспроводным сенсорным сетям и их структуре и архитектуре. Также были рассмотрены основы теории массового обслуживания и ее применение в исследовании беспроводных сенсорных сетей.

Изучены основы технологии имитационного моделирования беспроводных сенсорных сетей и процесс создания модели с помощью программного обеспечения JMT.

В работе рассмотрены беспроводные сенсорные сети типа ZigBee, построена математическая модель фрагмента беспроводной сети в виде открытой сети массового обслуживания с одноприборными системами обслуживания, с несколькими классами требований и приоритетным об-

служиванием, а также разработан метод анализа, позволяющий вычислить характеристики данной сети.

Была разработана программа, реализующая метод анализа математической модели беспроводной сенсорной сети. Была построена имитационная JMT-модель рассматриваемой сети.

Как показало сравнение результатов аналитической и имитационной моделей, теория массового обслуживания является хорошим инструментом для анализа функционирования и проектирования беспроводных сенсорных сетей и может быть использована в дальнейшем для научных исследований.

Отдельные части магистерской работы были представлены на конференциях и опубликованы:

Храмов, Д.Э. Моделирование систем обслуживания с использованием Java Modelling Tools / Д.Э. Храмов // Информационные технологии в образовании : сборник. — 2020. — С. 303–305.

Доклады на конференциях:

— Модель сети ZigBee в виде сети массового обслуживания, Студенческая научная конференция факультета КНиИТ, Саратов, СГУ, 24 апреля 2020 г.

— Моделирование систем обслуживания с использованием Java Modelling Tools, XII Всероссийская научно-практическая конференция «Информационные технологии в образовании», Саратов, СГУ, 30-31 октября 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Замятина, О. М. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. Моделирование сетей : учебное пособие для магистратуры / О. М. Замятина. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — С. 159.

2 Queueing Network Models for Performance Evaluation of ZigBee-Based WSNs / P. Bellasi, A. Faisal, W. Fornaciari, G. Serazzi // *EPEW 2010: Computer Performance Engineering*. — 2010. — Vol. 6342. — Pp. 147–159.

3 JSim Home Page [Электронный ресурс]. — <https://www.physiome.org/jsim/>. — Дата обращения: 12.05.2021.

4 Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications / G. Bolch, S. Greiner, H. de Meer, K.S. Trivedi // *Hoboken: Wiley*. — 2006. — P. 878.

5 Lall, S. The Role of Queueing Theory in the Design and Analysis of Wireless Sensor Networks: An Insight / S Lall, A. S. Alfa, B. T. Maharaj // *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. — 2016. — Pp. 1191–1194.

6 Ding, W. Optimizing routing based on congestion control for wireless sensor networks / W. Ding, L. Tang, S. Ji // *Wireless Networks*. — 2015. — P. 1–11.

7 Lifetime Security Improvement in Wireless Sensor Network Using Queue-Based Techniques / F. Jiang, H. Wu, D. Huang, C. Lin // *in Proc. Int. Conf. Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*. — 2010. — P. 469–474.

8 Kabiri, C. On Power Consumption of Wireless Sensor Nodes with Min(N,T) Policy in Spectrum Sharing Systems / C. Kabiri, H. Zepernick, H. Tran // *in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring*. — 2014. — P. 1–5.

9 Almasaeid, H. M. Modeling Mobility-Assisted Data Collection in Wireless Sensor Networks / H. M. Almasaeid, A. E. Kamal // *in Proc. IEEE Global Telecommunications Conf.* — 2008. — P. 1–5.

10 Nasser, N. Dynamic Multilevel Priority Packet Scheduling Scheme for Wireless Sensor Network / N. Nasser, L. Karim, T. Taleb // *IEEE Trans. Wireless Commun.* — 2013. — Vol. 12, no. 4. — P. 1448–1459.