

Проведено аналіз протоколів маршрутизації, що використовуються у бездротових сенсорно-актуаторних мережах (БСАМ). Розглянуто процес вибору ефективного протоколу маршрутизації для застосування в польових сенсорних мережах з локалізацією елементів методом аналізу ієрархій. Виявлено енергоефективний протокол маршрутизації на основі місця розташування вузлів БСАМ

Ключові слова: сенсорна мережа, маршрутизація, критерії вибору, енергоефективність, метод аналізу ієрархій, експерт

Проведен анализ протоколов маршрутизации, используемых в беспроводных сенсорно-актуаторных сетях (БСАС). Рассмотрен процесс выбора эффективного протокола маршрутизации для применения в полевых сенсорных сетях с локализацией элементов методом анализа иерархий. В результате сравнительного анализа выбран энергоэффективный протокол маршрутизации на основе местоположения узлов БСАС

Ключевые слова: сенсорная сеть, маршрутизация, критерии выбора, энергоэффективность, метод анализа иерархий, эксперт

УДК 621.398
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60605

ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНЫХ ПРОТОКОЛОВ МАРШРУТИЗАЦИИ УЗЛОВ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНО- АКТУАТОРНОЙ СЕТИ

В. М. Безрук

Доктор технических наук, академик академии связи Украины, профессор, заведующий кафедры*

E-mail: valeriy_bezruk@ukr.net

А. Н. Зеленин

Кандидат технических наук, профессор*

В. А. Власова

Кандидат технических наук, старший преподаватель*

E-mail: zlata_ne@bk.ru

Ю. В. Скорик

Кандидат технических наук, ассистент*

E-mail: Skorik_Y@list.ru

Ю. Н. Колтун

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: u.koltun@rambler.ru

*Кафедра «Сети связи»

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

В настоящее время активное развитие получили беспроводные сенсорно-актуаторные сети (БСАС), которые эффективно используются для решения прикладных задач распределенного сбора информации о контролируемом параметре в сетях мониторинга и контроля. Такие сети являются гомогенными, самоорганизующимися, одноранговыми, с ячеистой топологией, узлы которых способны к ретрансляции информации. Автономные источники питания узлов в этих сетях накладывают жесткие ограничения по энергоэффективности на протоколы маршрутизации. Поэтому для БСАС важными являются задачи маршрутизации [1, 2], в частности, поиска оптимальных с точки зрения энергоэффективности маршрутов и поиска маршрутов, обеспечивающих максимальное время жизни сети. Поэтому появилось большое число разных протоколов маршрутизации. Это определяет актуальность выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации для конкретной реализа-

ции. Среди других методов для выбора предпочтительного варианта маршрутизации особый интерес представляет использование метода анализа иерархий [3, 4].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Использование для маршрутизации информации в беспроводных сенсорных сетях алгоритмов и протоколов, которые используются в других беспроводных сетях, зачастую не является возможным и обоснованным. Во-первых, число узлов сенсорной сети может достигать нескольких тысяч, что не позволяет использовать уникальный идентификатор для каждого из них. Поэтому чаще всего используется MAC (Medium Access Control) адрес или координаты узла, тем более, что эти данные уже составляют часть полезной нагрузки сообщений. Во-вторых, структура сети постоянно изменяется, что требует от протоко-

лов реактивности. В-третьих, в силу автономности источников питания узлов всегда актуальна задача обеспечения энергетической эффективности любого алгоритма и протокола [2].

При анализе рассматривались протоколы, которые в той или иной степени отвечают требованиям БСАС. Для поиска предпочтительного варианта протокола маршрутизации из некоторого множества существующих рассматривались такие: иерархические [5–7], географические протоколы [6, 8–11], с многопутевой маршрутизацией [11], протоколы управления [12], основанные на согласовании [5, 6], на запросах [5, 12], на качестве обслуживания [5, 13] и последовательные протоколы [14]. Однако во всех работах, посвященных обзору протоколов маршрутизации БСАС, в том числе [2], отмечалось, что выбор одного из них – это отдельная нерешенная задача. На основе [15] для применения в полевых БСАС наиболее подходящими выбраны протоколы маршрутизации, рассмотренные ниже в разделе 4. 1.

Существуют разные методы выбора единственного предпочтительного проектного варианта: на основе теории размытых множеств, функции ценности, лексикографических соотношений, экспертного оценивания, метод анализа иерархий. В работе [16] проведен сравнительный анализ этих методов и определен наиболее эффективный – метод анализа иерархий. Поэтому для решения сформулированной актуальной задачи выбора предпочтительного варианта маршрутизации в БСАС предложено использовать именно этот метод.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования был выбор предпочтительного варианта протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорно-актуаторных сетях.

Задачи исследования:

- обзор и сравнение характеристик существующих протоколов маршрутизации в БСАС;
- выбор предпочтительного протокола маршрутизации на основе полученных характеристик и субъективных оценок экспертов с использованием метода анализа иерархий.

4. Анализ алгоритмов маршрутизации и методов выбора предпочтительного варианта среди них

4. 1. Обзор протоколов маршрутизации в БСАС

Высоким спросом для приложений БСАС используются 3 вида алгоритмов:

- централизованные алгоритмы: основаны на том, что один узел обладает знаниями обо всей сети. Эти алгоритмы используются крайне редко из-за значительных энергозатрат на передачу «главному узлу» информации о состоянии всей сети;
- распределенные алгоритмы: в отличие от предыдущего алгоритма, связь поддерживается за счет обмена информацией между узлами;
- алгоритмы, основанные на местоположении: узлы используют информацию об ограниченной области вокруг них и используют эту информацию для локальной маршрутизации.

Парадигма алгоритма маршрутизации является важным фактором для выбора протокола маршрутизации для использования в конкретной сети. Если использовать алгоритмы, предназначенные для работы с ограниченной областью, то необходимо оптимизировать связи между соседними узлами. С другой стороны, для централизованных алгоритмов множество сообщений, передаваемых только на центральный узел, является преимуществом. Использование распределенных алгоритмов требует надежной и эффективной связи между любыми парами узлов. В свою очередь, алгоритмы на основе местоположения, эффективность которых обеспечивается знанием географических координат, например, с помощью GPS, делают решение более дорогим.

Sensor Protocols for Information via Negotiation (SPIN) [5, 7] является адаптивным протоколом, который позволяет строить маршруты передачи информации с высокой энергетической эффективностью. Сети, использующие протокол SPIN, работают с высокоуровневыми дескрипторами данных – мета-данными. Для того чтобы исключить передачу избыточной информации, в сети используются согласование мета-данных и знания о доступных ресурсах. Это позволяет узлам эффективно распределять информацию между ретрансляторами с ограниченным источником питания.

Directed Diffusion [5] – протокол, ориентированный на данные (data-centric). В сетях, использующих данный протокол для маршрутизации, сенсорные узлы используют связку «атрибут-значение». Для получения данных узел генерирует запрос по определенной схеме, подобно работе базы данных, где узлы выступают в роле ячеек данных. Обычно источником таких запросов является базовая станция (БС). Узлы хранят предыдущие запросы, а при получении нового обновляют кэш запросов, что позволяет определять скорость передачи данных. Когда узел получает сообщение-запрос, он активизирует датчик сбора данных и устанавливает соединение с узлом-отправителем. Такая связь называется градиентом и характеризуется скоростью передачи данных, продолжительностью и временем окончания сеанса связи. При получении запроса узел старается установить как можно больше градиентов в направлении к БС. Для поиска оптимального используются положительные и отрицательные подкрепления. Также алгоритм подразумевает работу с двумя видами градиентов: «разведывательный» и градиент данных. Первый предназначен для настройки маршрута, а второй – для отправки данных.

Rumor Routing [5]. Этот алгоритм подразумевает использование запросов от БС, которые распространяются по всей сети узлам, которые наблюдали события, отраженные в запросе. Для этого узел, который фиксирует изменение контролируемого параметра, передает пакет – агент. Агенты распространяются по сети, агрегируя данные от других узлов с событиями, в направлении БС. Для избегания образования петель, агенты хранят список посещенных узлов. Помимо доставки информации, агенты позволяют поддерживать актуальные знания о сети каждым узлом, обновляя информацию из агента. Тем не менее, некоторые узлы могут не получать эту информацию, т.к. агент распространяется между некоторыми соседними узлами случайным образом.

Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy (LEACH) [5–7]. В алгоритме LEACH роль главы кластера периодически выполняют разные узлы сети для равномерного использования энергии. Преимущество LEACH в использовании циклов. В каждом цикле заново выбирается глава кластера из числа узлов, которые не были главами кластеров, и для обеспечения процента глав кластеров относительно общего числа узлов сети. Затем глава кластера рассылает расписание для доступа с временным разделением (TDMA) внутри кластера. Это позволяет узлам включать передачу только тогда, когда глава кластера свободен. Также глава кластера отвечает за агрегацию данных, полученных от узлов своего кластера, для устранения избыточности.

Threshold Sensitive Energy Efficient Sensor Network Protocol (TEEN) [5] в отличие от иерархических протоколов используется для реактивных сетей, которые немедленно реагируют на изменение различных параметров. В этом протоколе глава кластера рассылает пороговые значения (*hard* и *soft*), при достижении которых узел передает информацию. Если параметр из набора атрибутов достигает жесткого порогового значения, узел включает передатчик и передает данные. Затем другие узлы передают данные в соответствующем временном промежутке при выполнении следующих условий: текущее значение атрибутов больше *hard* порога и текущее значение атрибута отличается от заданного значения на величину, равную или большую, чем *soft* порог. Обе стратегии направлены на уменьшение затрат энергии на передачу сообщений.

Основным недостатком этого алгоритма является то, что если контролируемое значение не достигнет порогового уровня, то узлы не будут связываться между собой, пользователь не получит никакой информации и не будет осведомлен о работоспособности сети. Таким образом, данный алгоритм не применим для приложений, где передача информации должна быть регулярна.

Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems (PEGASIS) [5] считается улучшением алгоритма LEACH. Вместо распределения узлов в кластеры он предусматривает формирование цепочек сенсорных узлов. На основе этой структуры каждый узел передает и принимает информацию только от одного ближайшего соседнего узла. Это позволяет регулировать мощность передачи. Узел выполняет агрегацию данных, пересылает их по цепочке до базовой станции. В каждом цикле только один узел из цепочки взаимодействует с базовой станцией. Цепочка строится с максимальной эффективностью по энергозатратам.

Self-Organizing Protocol (SOP) [12, 14] протокол маршрутизации и самоорганизации используется в гетерогенных сенсорных сетях с поддержкой как стационарных, так и мобильных узлов. Оконечные датчики, которые собирают информацию об атрибутах окружающей среды, передают данные определенному числу узлов, которые выполняют роль маршрутизаторов. Они являются стационарными и образуют основную сеть коммуникации. Собранные данные передаются маршрутизаторами на более мощные базовые станции. Каждый конечный

узел должен иметь возможность связаться хотя бы с одним маршрутизатором, чтобы быть частью данной сенсорной сети. Оконечные узлы могут быть идентифицированы посредством адреса маршрутизатора, которому они передают информацию. Таким образом, формируется иерархическая архитектура, где группы узлов формируются и объединяются по необходимости.

Geographic Adaptive Fidelity (GAF) [5, 10] – протокол, направленный на оптимизацию производительности БСАС за счет поиска эквивалентных узлов, с точки зрения передачи информации. Эквивалентными считаются такие узлы, которые могут поддерживать связь одним и тем же множеством соседних узлов. Для определения эквивалентных узлов необходимо знать глобальное (или, по крайней мере, локальное) местоположение узлов сети. Формируется виртуальная сетка с таким размером ячеек, чтобы все узлы ячейки могли взаимодействовать с узлами соседней и наоборот. Таким образом, узлы в одной ячейке – эквивалентные. Для обеспечения энергоэффективности только один из узлов в ячейке будет обеспечивать связь, в то время как остальные будут резервными.

Geographic and Energy and Aware Routing (GEAR) [8] алгоритм маршрутизации, который также основан на знании местоположения узлов. Локализация происходит с помощью систем глобального позиционирования или других систем. Выбор узла-ретранслятора для построения маршрута основывается на эвристическом выборе из множества соседних узлов. Маршруты, построенные с использованием протокола GEAR, образуются за счет рекурсивной географической передачи пакета внутри сенсорного поля. Таким образом, достигается высокая энергоэффективность при использовании в одноранговых сетях.

Sequential Assignment Routing (SAR) [5] один из первых протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях, который обеспечивает понятие *Quality Of Service* (QoS – качество услуг) критериев маршрутизации. Он базируется на выставлении атрибутов уровня приоритета каждого пакета. Кроме того, связи и маршруты имеют метрику, характеризующую их возможность обеспечить качество обслуживания. Эта метрика определяется задержками и энергозатратами. На основе алгоритма создается дерево маршрутов с корнем в одном *hop* от базовой станции. Для этого учитываются несколько параметров, таких как приоритет пакетов, энергетические ресурсы, показатели QoS. Также протокол периодически актуализирует маршруты, чтобы реагировать на выход из строя одного из активных узлов.

A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks (SPEED) [13] – протокол, также обеспечивающий QoS. Для его работы требуется, чтобы каждый узел сохранял информацию о своих соседях и использовал данные об их географическом положении для поиска путей. Кроме того, протокол стремится обеспечить определенную скорость доставки каждого пакета. Таким образом, можно заранее оценить задержку прохождения пакета от отправителя к получателю, разделив расстояние на скорость пакета. Также SPEED позволяет находить обходные маршруты в случае перегрузок сети. Модуль маршрутизации

в протоколе SPEED называется Stateless Geographic Non-Deterministic Forwarding (SNFG) и работает с четырьмя другими модулями на сетевом уровне. Оценка задержки на каждом узле основывается на определении времени, которое прошло после запроса подтверждения получения переданного пакета данных. Исходя из значения задержки, SNFG выбирает узел, который отвечает требованиям по скорости обработки. Если такового нет, рассматриваются соседние узлы.

В табл. 1 представлены характеристики выборки протоколов маршрутизации.

Приведенные в табл. 1 данные использованы при сравнении протоколов маршрутизации методом анализа иерархий, в частности, при формировании матриц парных сравнений протоколов с учетом мнений экспертов.

4. 2. Метод анализа иерархий и метод экспертного оценивания для выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации БСАС

Метод анализа иерархий (МАИ) состоит в декомпозиции проблемы выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации на простые составляющие части и получении суждений экспертов по парным сравнениям элементов проблемы выбора [3, 4], которые представляются в виде матрицы

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} \dots a_{1j} \dots a_{1n} \\ a_{21} \dots a_{2j} \dots a_{2n} \\ \dots a_{ij} \dots \\ a_{n1} \dots a_{nj} \dots a_{nn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где a_{ij} – оценки парных сравнений элементов.

Оценки парных сравнений элементов a_{ij} находят с использованием субъективных суждений экспертов, численно определяемых по шкале относительной важности элементов [3, 4]. В качестве меры согласованности суждений эксперта рассматривают отношение согласованности (ОС). Если величина $ОС \leq 0,15$, то степень согласованности суждений экспертов следует считать приемлемой. В противном случае экспертам рекомендуется пересмотреть свои суждения.

В результате обработки полученных матрицы (1) получают компоненты собственного вектора V_j и глобального вектора приоритетов P_j

$$P_j = \frac{V_j}{S}, \quad V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad S = \sum_{j=1}^n V_j, \quad (2)$$

где n – число сравниваемых вариантов протоколов маршрутизации.

Таблица 1

Обобщенные характеристики рассмотренных протоколов маршрутизации

№	Протоколы маршрутизации	Мобильность	Потребляемая мощность	Согласованность	Агрегация данных	Локализация	QoS	Сложность структуры	Масштабируемость	Множественность путей
N1	SPIN	Возможна	Ограничена	Да	Да	Нет	Нет	Низкая	Ограничена	Да
N2	Directed Diffusion	Ограничена	Ограничена	Да	Да	Нет	Нет	Низкая	Ограничена	Да
N3	Rumor Routing	Очень ограничена	Не определена	Нет	Да	Нет	Нет	Низкая	Хорошая	Нет
N4	LEACH	Фиксированные БС	Максимальна	Нет	Да	Да	Нет	Главные узлы кластера	Хорошая	Нет
N5	TEEN	Фиксированные БС	Минимальна	Нет	Да	Нет	Нет	Главные узлы кластера	Хорошая	Нет
N6	PEGASIS	Фиксированные БС	Максимальна	Нет	Нет	Да	Нет	Низкая	Хорошая	Нет
N7	SOP	Нет	Не определена	Нет	Нет	Нет	Нет	Низкая	Низкая	Нет
N8	GAF	Ограничена	Ограничена	Нет	Нет	Да	Нет	Низкая	Хорошая	Нет
N9	GEAR	Ограничена	Ограничена	Нет	Нет	Да	Нет	Низкая	Ограничена	Нет
N10	SAR	Нет	Не определена	Да	Да	Нет	Да	Средняя	Ограничена	Нет
N11	SPEED	Нет	Не определена	Нет	Нет	Да	Да	Средняя	Ограничена	Да

По максимальному значению компонент глобального вектора приоритетов выбирается единственный предпочтительный вариант протокола маршрутизации.

5. Результаты выбора протокола маршрутизации БСАС методом анализа иерархий и их обсуждение

Рассмотрим особенности применения метода анализа иерархий для выбора единственного предпочтительного протокола маршрутизации БСАС с учетом совокупности показателей качества. Было взято 11 протоколов маршрутизации (табл. 1). В табл. 2 приведена матрица парных сравнений этих протоколов маршрутизации эксперта №1 по табл. 1 согласно (1), затем вычислены собственный вектор и вектор приоритетов согласно (2). Отношение согласованности для всех матриц в норме. Аналогично построены матрицы парных сравнений экспертами №2 – №10.

В табл. 2 показаны результаты обработки оценки матриц парных сравнений десяти экспертов и вектор приоритетов согласно (2) и затем вычислен средний вектор приоритетов (3). Представлен выбор предпочтительного варианта протокола маршрутизации с учетом мнения экспертов на основе МАИ.

Из табл. 3 видно, что согласно МАИ предпочтительным вариантом маршрутизации является протокол маршрутизации N9 – GEAR, который соответствует максимальной компоненты вектора приоритетов.

Достоинством использования метода анализа иерархий для выбора предпочтительного варианта протокола маршрутизации является учет суждений экспертов и последующая формализованная процедура обработки полученных данных для решения такой задачи выбора. Этот метод может быть применен при проектировании беспроводных сенсорно-актуаторных сетей. После соответствующей доработки этот метод также может быть использован при сравнении и выборе других средств телекоммуникаций.

Таблица 2

Матрица парных сравнений протоколов маршрутизации эксперта № 1

№1	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	V _j	P _j
N1	1	1/3	1/2	1/5	1/6	3	2	1/7	1/9	4	5	0,661	0,038
N2	3	1	2	1/2	1/4	4	3	1/5	1/6	6	7	1,258	0,073
N3	2	1/2	1	1/3	1/4	5	3	1/6	1/7	5	6	0,988	0,057
N4	5	2	3	1	1/2	5	4	1/3	1/4	6	7	1,88	0,109
N5	6	4	4	2	1	6	5	1/2	1/3	5	6	2,543	0,148
N6	1/3	1/4	1/5	1/5	1/6	1	1/2	1/5	1/8	2	3	0,399	0,023
N7	1/2	1/3	1/3	1/4	1/5	2	1	1/6	1/7	3	4	0,555	0,031
N8	7	5	6	3	2	5	6	1	1/2	7	8	3,529	0,205
N9	9	6	7	4	3	8	7	2	1	8	9	4,87	0,283
N10	1/4	1/6	1/5	1/6	1/5	1/2	1/3	1/7	1/8	1	2	0,297	0,018
N11	1/5	1/7	1/6	1/7	1/6	1/3	1/4	1/8	1/9	1/2	1	0,222	0,0129

Таблица 3

Выбор предпочтительного протокола маршрутизации БСАС методом экспертного оценивания

Протоколы	Оценки парных сравнений 10 экспертов (P _j)										Средняя оценка вектора приоритетов 10 экспертов
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9	№ 10	
N1	0,03	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,05	0,0442
N2	0,07	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,05	0,09	0,08	0,077
N3	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,06	0,04	0,0589
N4	0,10	0,10	0,13	0,05	0,11	0,1	0,1	0,11	0,14	0,10	0,1103
N5	0,14	0,16	0,09	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10	0,15	0,1426
N6	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,0237
N7	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,03	0,0299
N8	0,20	0,19	0,23	0,2	0,19	0,19	0,22	0,2	0,19	0,20	0,2076
N9	0,28	0,27	0,25	0,29	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,2721
N10	0,01	0,01	0,02	0,02	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,023
N11	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0145

6. Выводы

Проведен сравнительный анализ характеристик 11 протоколов маршрутизации в БСАС. Рассмотрены практические особенности применения метода анализа иерархий для выбора предпочтительного вари-

анта протокола маршрутизации в БСАС. В результате применения МАИ выбран предпочтительный вариант протокола маршрутизации – GEAR (протокол маршрутизации, основанный на знании каждым узлом своего местоположения узлов) для применения в полевых БСАС с локализацией элементов.

Литература

1. Баскаков, С. С. Маршрутизация по виртуальным координатам в беспроводных сенсорных сетях [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. С. Баскаков. – Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2011. – 18 с.
2. Иваненко, В. А. Анализ протоколов передачи данных от узлов в беспроводных сенсорных сетях [Текст] / В. А. Иваненко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 2, № 10(50). – С. 9–12. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1860/1755>
3. Saaty, T. L. The Analytic Hierarchy Process [Text] / T. L. Saaty // New York: McGraw Hill, 1980. – 270 p.
4. Безрук, В. М. Применение метода анализа иерархий при выборе средств телекоммуникаций с учетом совокупности показателей качества [Текст] / В. М. Безрук, Ю. В. Скорик. – Харьков: ХНУРЭ; Радиоэлектроника и информатика, 2013. – С. 24–29.
5. Villalba, L. J. G. Routing Protocol in Wireless Sensor Networks [Text] / L. J. G. Villalba, A. L. S. Orozco, A. T. Cabrera, C. J. B. Abbas // Sensors. – 2009. – Vol. 9. – P. 8399–8421.
6. Parvin, Sh. Routing Protocols for Wireless Sensor Networks: A Comparative Study [Text] / Sh. Parvin, M. S. Rahim // International Conference on Electronics, Computer and Communication (ICECC'2008). – University of Rajshahi, Bangladesh, 2008. – P. 891–894.
7. Juneja, G. Performance Analysis of SPIN and LEACH Routing Protocol in WSN [Text] / G. Juneja, S. Juneja // International Journal Of Computational Engineering Research. – 2012. – Vol. 2, Issue. 5. – P. 1179–1185.
8. Yu, Y. Geographical and Energy-Aware Routing: A Recursive Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks [Text] / Y. Yu, D. Estrin, R. Govindan // UCLA Computer Science Department Technical Report, UCLA-CSD TR-01-0023, 2001.
9. Sánchez, J. A. Beacon-Less Geographic Routing Made Practical: Challenges, Design Guidelines and Protocols [Text] / J. A. Sánchez, P. M. Ruiz, M. Martín-Pérez // IEEE Communications Magazine. – 2009. – Vol. 47, Issue 8. – P. 85–91. doi: 10.1109/mcom.2009.5181897
10. Seada, K. Geographic Protocols in Sensor Networks [Text] / K. Seada, A. Helmy // Technical Report 04-837: Computer Science Department, University of Southern California, San Diego, CA, USA, 2008.
11. Bagci, H. Distributed and Location-Based Multicast Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks [Text] / H. Bagci, I. Korpeoglu // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2009. – Vol. 2009, Issue 1. – P. 697373. doi: 10.1155/2009/697373
12. Wan, J. A review of routing protocol in wireless sensor networks [Text] / J. Wan // IEEE Communications Magazine. – 2008. – Vol. 40, Issue 8.
13. Tian, H. SPEED: A stateless protocol for real-time communication in sensor networks [Text] / H. Tian, J. A. Stankovic, L. Chenyang, T. Abdelzaher // 23rd International Conference on Distributed Computing Systems, 2003. – P. 46–55. doi: 10.1109/icdcs.2003.1203451
14. Lin, J. SIDA: Self-organized ID Assignment in Wireless Sensor Networks [Text] / J. Lin, Y. Liu, L. M. Ni // 2007 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. – P. 1–8. doi: 10.1109/mobhoc.2007.4428604
15. Yu, X. A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture [Text] / X. Yu, P. Wu, W. Han, Z. Zhang // Journal Computer Standards & Interfaces. – 2013. – Vol. 35, Issue 1. – P. 59–64. doi: 10.1016/j.csi.2012.05.001
16. Безрук, В. М. Анализ эффективности методов многокритериального выбора предпочтительного варианта средств телекоммуникаций [Электронный ресурс] / В. М. Безрук, Н. Н. Пономаренко, Ю. В. Скорик // Проблемы телекоммуникаций. – 2015. – № 1(16). – С. 42–53. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_bezruk_analysis.pdf