

# ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

УДК 004.73

## КУДР Латиф

аспирант кафедры “Автоматизированные системы управления”  
Донецкого национального технического университета.

**Научные интересы:** беспроводные сенсорные сети, эволюционные вычисления.

## СКОБЦОВ Юрий Александрович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Автоматизированные системы управления”  
Донецкого национального технического университета, ведущий научный сотрудник  
института прикладной математики и механики НАНУ.

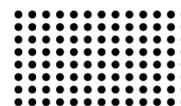
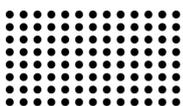
**Научные интересы:** техническая и медицинская диагностика, искусственный интеллект,  
интеллектуальные САПР, обработка и распознавание медицинских изображений, нейронные сети,  
эволюционные вычисления и их применение.

## ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — это распределённая, самоорганизующаяся сеть множества датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, объединённых между собой посредством радиоканала. Причём область покрытия подобной сети может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счёт способности ретрансляции сообщений от одного элемента к другому. Объединённые в беспроводную сенсорную сеть датчики образуют территориально-распределённую самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации. Основной областью применения является контроль и мониторинг измеряемых параметров физических сред и объектов [1-3].

БСС состоит из случайно (или эвристически) размещённых датчиков, которые воспринимают физические или экологические события и отправляют собранные данные на базовую станцию. Большое количество недорогих, небольших и автономных датчиков могут быть поставлены даже в отдалённых районах. Следует отметить, что узлы датчиков в БСС ограничены в ёмкости, вычислительной мощности, пропускной способности и питании [1-3].

Эффективность функционирования БСС зависит от используемого протокола маршрутизации пакетов. Протоколы маршрутизации в БСС, как правило, направлены на снижение потребления энергии и, таким образом, продлить срок службы сети. В настоящее время исследователями предложены различные схемы маршрутизации для статических задач. Достаточно широко применяются методы искусственного интеллекта, в частности генетические [4], муравьиные и роевые алгоритмы [5-7]. Это обусловлено тем, что в случае изменения топологии БСС, например, из-за отказа узла в случае использования классических методов оптимизации необходимо рассматривать сеть с новой топологией. В то время как в случае ГА некоторая полезная информация хранится в памяти из прошлой популяции (множества потенциальных решений) и её можно использовать. Это позволяет эволюционным методам маршрутизации адаптироваться к изменяющимся условиям. Таким образом, такой подход позволяет разрабатывать алгоритмы маршрутизации, которые продолжать работать, даже когда изменяется топология БСС и тем самым избежать рестарта, который является достаточно трудоёмким. Таким образом генетические алгоритмы могут значительно повысить производительность функционирования БСС.



### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Энергоэффективная маршрутизация в беспроводных сенсорных сетях привлекла внимание многих исследователей в последние годы. В работах [8,9] приведен краткий обзор последних результатов исследований в области энергоэффективной маршрутизации данных в сенсорных сетях. Для увеличения срока службы сети, построение эффективного протокола маршрутизации является очень важным. В [10] освещен подход и выполнен анализ производительности этих схем, который ориентирован на использование существующих схем маршрутизации с учетом типов пересылаемых данных. Эволюционные алгоритмы могут быть эффективно использованы для поиска энергоэффективных путей пересылки данных в беспроводных сенсорных сетях [11]. Простой подход к минимизации средней длины пути предлагается в [12], где используется генетический алгоритм и информация о пространственном распределении узлов БСС. Следует отметить, что каждый из узлов состоит из относительно простого приемника/передатчика (антенна, приемник и передатчик). Цель оптимизации, как правило, заключается в минимизации средней длины пути от источника к месту назначения таким образом, чтобы минимизировать передаваемую мощность. Кроме того, метод, предложенный в [13] использовал протокол маршрутизации для многих путей для повышения надежности БСС. Эта методика использует много путей в сети и отправляет через них те же субпакеты. Это увеличивает сетевой трафик (конечно, не энергетический), но надежность сети при этом увеличивается. К сожалению это может сократить срок службы сенсорной сети. Учет энергии при маршрутизации многих путей рассматривается в [14,15] с учетом максимизации срока службы сети. Этот протокол использует идею маршрутизации пакетов через пути, где узлы имеют максимальную остаточную энергию. Путь изменяется всякий раз, когда найден лучший путь.

### МОДИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМА МАРШРУТИЗАЦИИ

В настоящее время СТР является базовым протоколом для большинства сенсорных сетей, которые реализуются с использованием TinyOS. Беспроводные сенсорные сети под управление данного протокола

образуют древовидную структуру, в которой шлюзы являются корнями, а сенсорные узлы - листьями [1-3]. Здесь для генерации маршрутов узлы используют градиент маршрутизации - ETX. Корень имеет значение ETX равное 0. Параметр ETX узла рассчитывается как сумма ETX его родительского узла и ETX связи с ним. При выборе родительского узла предпочтение отдается тому, где значение ETX меньше. Несмотря на то, что СТР является базовым протоколом в технологии беспроводных сенсорных сетей, он имеет существенные недостатки. Один из таких недостатков - это то, что протокол не учитывает загруженность узлов при ретрансляции пакетов. Таким образом, в сети возникает постоянная перегрузка некоторых узлов, что приводит к их быстрому выходу из строя, тем самым уменьшая время функционирования сети. Несмотря на то, что вопросам оптимизации протоколов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях посвящается множество работ зарубежных авторов [2,3], задача является актуальной. Наш подход на основе генетического алгоритма имеет преимущества, так как в нем при выборе узла ретрансляции учитывается загруженность узлов.

Эволюционные вычисления [4] достаточно широко применяются в САПР компьютерных систем и сетей, в частности для оптимизации протоколов маршрутизации [5-7]. Напомним [4], что для решения некоторой задачи с помощью генетических алгоритмов (ГА) необходимо: 1) выбрать или разработать схему кодирования хромосомы - потенциального решения; 2) соответственно схеме разработать (или выбрать) генетические операторы кроссинговера и мутации; 3) для каждой особи определить фитнес-функцию, которая позволяет оценить качество решения. Кроме этого, необходимо задать параметров ГА такие как мощность популяции, значения вероятностей кроссинговера и мутации и т.п. Далее приведено решение этих этапов для задачи маршрутизации БСС.

### СХЕМА КОДИРОВАНИЯ ХРОМОСОМЫ

В данном случае потенциальное решение (хромосома) можно представить массивом целых чисел, где каждый ген соответствует узлу схемы. Поэтому длина массива равна числу узлов в схеме. Например, для схемы рис.1а на том же рис.1.б показано потенциальное решение - схема маршрутизации этой схемы.

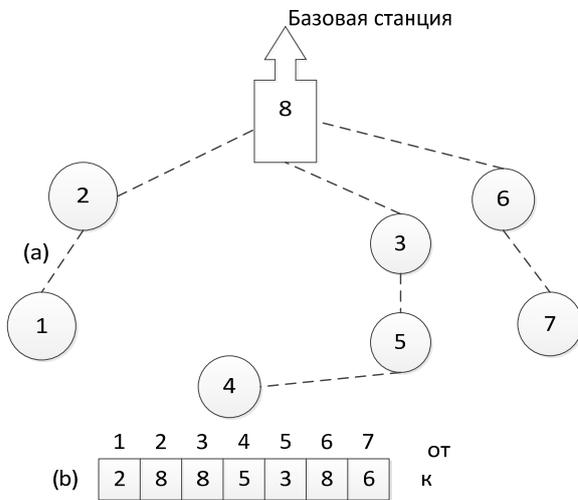


Рисунок 1 – Представление хромосомы для графа схемы

В этом примере значение гена в позиции 1 равно 2 указывает, что узел 1 передает информацию в узел 2. Аналогично, значение гена 8 в позиции 3, означает, что узел 3 передает в узел 8 (базовой станции).

Каждая хромосома представляет правильный маршрут. Таким образом, строится маршрутизация на основе соответствующих положений узлов в сети. Базовая станция создает список  $N_i, 1 \leq i \leq n$ , который содержит все ближайшие соседи маршрута  $j$  из  $i$ , такие, что связь  $i \rightarrow j, j \in N_i$  может быть использована для маршрутизации данных от узла  $i$  к базе станции через узел  $j$ . Например, узел 1 рисунка 1, имеет  $N_1 = \{2, 4\}$  (где  $i = 1$ ), которые являются ближайшими соседями соседей узла 1.

Используя эту информацию, жадный подход используется для создания маршрутов для исходной популяции, путем случайного подбора соседнего узла  $j \in N_i$  для каждого исходящего узла  $i$ . Очевидно, что при этом пространство поиска решений проблемы огромно. Если каждый узел имеет  $d$  ближайших действительных соседей, то число путей/маршрутов для схемы с  $n$  узлами определяется  $O(d^n)$ . Для того чтобы выбрать оптимальный маршрут, из большого количества возможных допустимых решений, в пределах ограниченного количества времени, предлагается использовать генетический алгоритм.

Отбор родительских особей используется при генерации новых особей (потенциальных решений). В

данной работе используется турнирный метод отбора родительских особей [4]. В этом случае все особи популяции разбиваются на подгруппы размера  $m$  с последующим выбором в каждой из них особи с лучшим значением фитнес-функции. Параметром этой процедуры является размер тура  $m$ , который принимает значения из диапазона  $2 \leq m < N$ . Используются два способа выбора: детерминированный и случайный. При детерминированном способе выбор выполняется с вероятностью, равной 1; детерминированном способе выбор выполняется с вероятностью, равной 1. При случайном методе выбор осуществляется с вероятностью  $P_t$  меньше 1. Чаще всего популяция разбивается на подгруппы по 2-3 особи в каждой ( $m=2,3$ ).

**Оператор кроссинговера** используется для построения новой особи – потомка родительских особей и направлен на улучшение качества решения, поскольку в качестве родителей выступают лучшие в некотором смысле особи. Практически любой оператор кроссинговера сводится к обмену генетического материала родителей. Это можно сделать по-разному. В данном случае используется 2-точечный оператор кроссинговера, где в каждом из родителей случайно выбираются 2 точки кроссинговера, которые выделяют фрагменты генов, которыми затем обмениваются родители. Рассмотрим, например, два родителя (4 2 3 1 5) и (5 1 3 2 4), для которых обмен генов производится в позициях 2 и 4. В результате этого кроссинговера производится два потомка (4 1 3 2 5) и (5 2 3 1 4). Повторяющиеся гены при этом удаляются. Кроссинговер выполняется с вероятностью кроссинговера  $P_c (0 < P_c < 1)$ .

**Оператор мутации** используется для поддержания разнообразия в популяции и во избежание попадания в локальный оптимум. Здесь операция мутации изменяет значение гена в случайно выбранной позиции на случайное число от 1 до  $N$ , с небольшой вероятностью  $P_m$ .

**Фитнес-функция** определяет качество потенциальной особи. В данном случае фитнес-функцию логично определить на основе критериев, предложенных в [16]. Качество протокола маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях должно учитывать следующие факторы. Во-первых – это среднее количество ретрансляций пакетов. Очевидно, что чем меньше количество ретрансляций, тем меньше расход энергии

в целом по сети. Однако среднее не учитывает то, насколько сильно значения индивидуальных узлов могут отличаться от среднего значения для этих узлов. Поэтому критерий должен учитывать разброс, мерой которого может выступить, например дисперсия. В противном случае может оказаться так, что нагрузка на какой-нибудь отдельный узел может оказаться непредсказуемо высокой и этот узел откажет гораздо раньше, чем остальные узлы. Это может привести к потере связности сети и таким образом часть сети может оказаться неработоспособной. Поэтому мы предлагаем использовать наряду со средним значением, еще и меру разброса. В простейшем случае величину разброса значений загруженности индивидуальных узлов можно оценивать по дисперсии. Однако дисперсия не дает представление о перегруженных узлах. Отклонения в обе стороны от среднего значения трактуются одинаково. Однако в нашем случае необходимо стремиться к тому, что в сети не будет узлов, нагрузка на которые превышает среднее значение. Незагруженные узлы не должны учитываться критерием. Для того, чтобы иметь возможность анализировать дальнейшую

работу модифицированного протокола STP и сравнивать с работой стандартного протокола STP введем параметр оценки качества распределения числа ретрансляций. В данном случае, подходящим параметром оценки качества распределения является средне-квадратичное отклонение от среднего числа ретрансляций. При оценке качества необходимые данные получают из объектно-ориентированной модели БСС [17] с использованием соответствующего программного обеспечения [18].

### СТРУКТУРА ПО ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ БСС

В целом подсистема оптимизации беспроводных сенсорных сетей состоит из отдельных элементов, которые взаимодействуют между собой как показано на рис. 2. Каждый компонент подсистемы выполняет установленный для него список задач. Компонентная структура подсистемы значительно упрощает работу подсистемы, ее проектирование, модификацию и т.д.



Рисунок 2 – Структура ПО підсистеми оптимізації БСС

Все части объединены однонаправленными или двунаправленными связями. Рассмотрим представленные компоненты и их связи: *модель топологии сети* представляет собой текстовый файл, который сохраняет информацию об узлах сети, об их связях, уровне затухания сигнала между узлами. В модели связи между узлами описываются двумя строками, так

как связи между узлами двунаправленные и имеют разные уровни затухания сигнала.

### ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ МАРШРУТИЗАЦИИ

Итак, разработан генетический алгоритм оптимизации протокола маршрутизации, псевдокод которого приведён ниже.

Генетический\_алгоритм(Размер Популяции, Число итераций)

```
{
  // подготовка начальной популяции
  Инициализация начальной популяции();
  Объектно-ориентированное моделирование БСС;
  Оценка особей (Начальная Популяция);
  Номер Популяции=0;
  While ( не_достигнут_критерий_остановки )
  {
    for( i=0 ; i<РазмерПопуляции ; i++)
    {
      Операция отбора(Родитель А, Родитель Б);
      if(rand() < Pc)
      Операция                                     Скрещива-
      ния(РодительА,РодительБ,Потомки);
      if(rand() < Pm)
      Операция Мутации (Потомок);
      Пополнение промежуточной популяции(Потомок,
      Новая Позиция);
      Новая Позиция ++;
    }
    Оценка особей(Промежуточная Популяция);
    Построение новой популя-
    ции(РазмерПопуляции);
    Номер Популяции ++;
  }
```

Здесь оценка особей выполняется на основе объектно-ориентированного моделирования, представленного выше. Операция отбора основана на использовании метода турнирного отбора особей. Функции скрещивания и мутации описывают описанные выше модифицированные генетические операторы кроссингвера и мутации.

**Объекты для экспериментальных исследований** представляют модели БСС. Для получения наиболее достоверных результатов тестирования модифицированного протокола СТР было решено использовать несколько разных сетей. Для этих целей спроектировано 2 небольших модели БСС, которые позволили анализировать полученные результаты тестирования. Третья сеть является базовой в составе TinyOS, она имеет довольно большой размер и является контрольной для

проверки работы алгоритма. Рассмотрим модели сетей более подробно.

Первая модель сети состоит из 6 узлов (рис.3), все связи между узлами одинаковые и имеют уровень затухания сигнала равный -50.

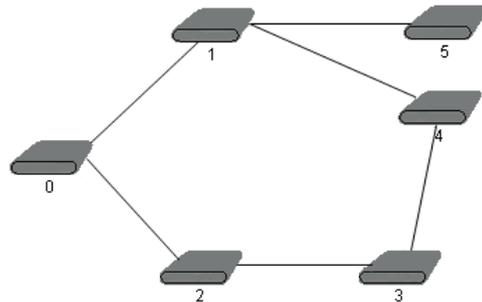


Рисунок 3 – Топология первой модели сети

Вторая модель сети состоит из 15 узлов (рис.4), все связи между узлами тоже одинаковы и имеют уровень затухания сигнала равный -50. Топологии представленных моделей сетей построены таким образом, чтобы более отдаленные узлы имели возможность выбора узла, которому необходимо передавать данные, так как это позволяет в полной мере оценить работу модифицированного СТР. Связи между узлами были установленные одинаковыми, чтобы при выборе маршрута избежать дополнительных влияний на выбор.

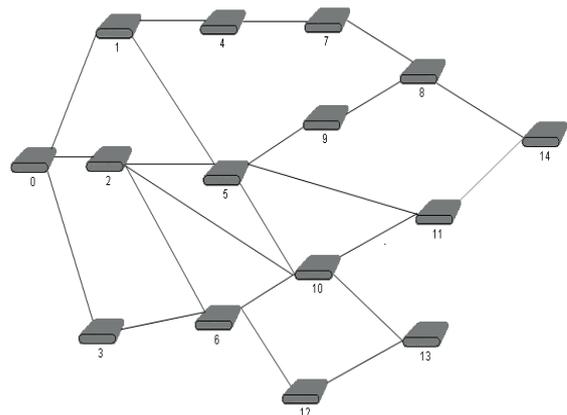
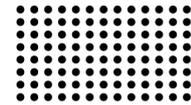
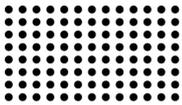


Рисунок 4 – Топология второй модели сети

Третья модель сети является базовой и поставляется вместе с TinyOS и TOSSIM. Модель состоит из 226 узлов, связи которых имеют разные уровни затухания сигнала. Данная модель сети используется в качестве контрольной, поскольку является базовой моделью.



Все модели описываются с помощью текстовых файлов и по сути представляют собой набор строк.

**Тестирование** выполнялось на последнем этапе с помощью системы моделирования работы протокола.

Файл testcount1\_226\_ср.txt завантажено  
Всього кореню було передано: 6330  
Відсоток відсікання від максимального числа ретрансляцій: 0

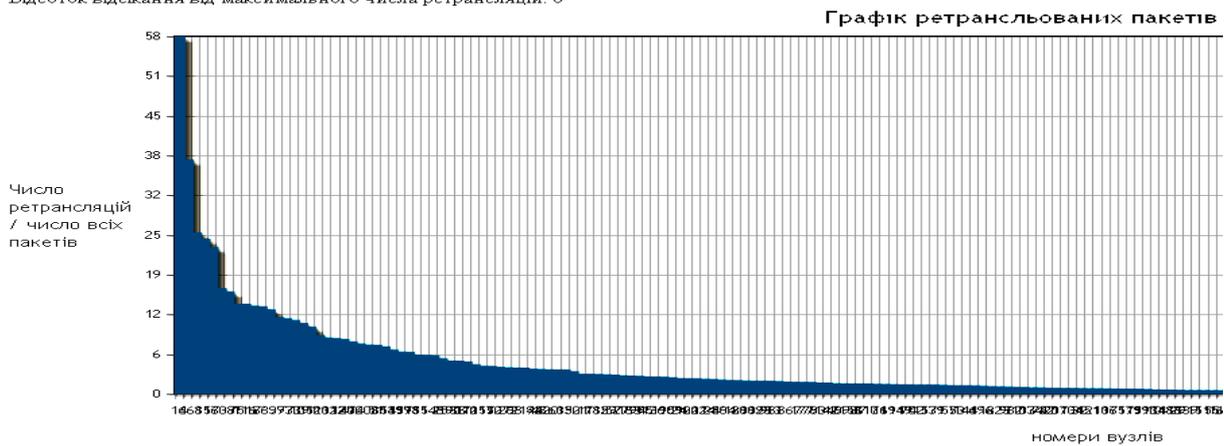


Рисунок 5 – Графік процентного соотношения числа ретранслированных пакетов в сети с 226-ю узлов под правлением СТР.

Файл testcount1\_226\_му.txt завантажено  
Всього кореню було передано: 1311  
Відсоток відсікання від максимального числа ретрансляцій: 0

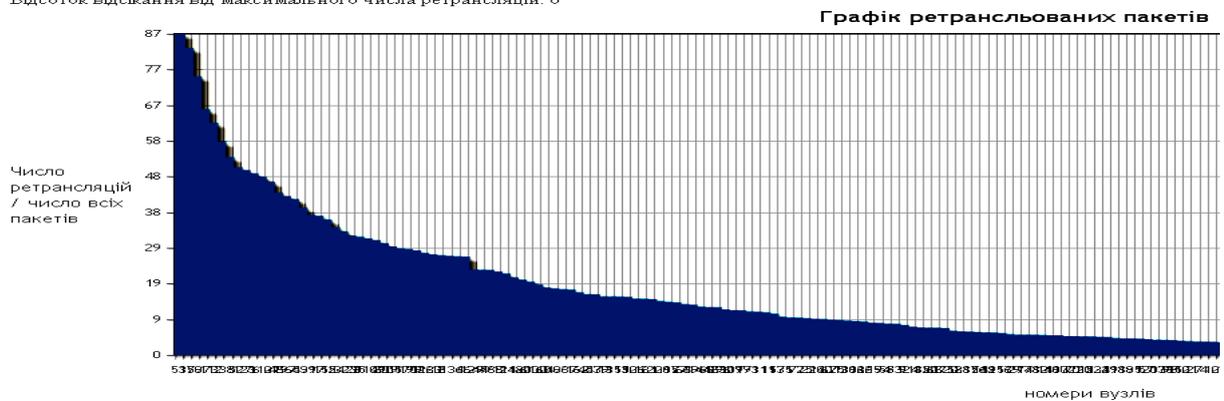


Рисунок 6 – Графік процентного соотношения числа ретранслированных пакетов в сети с 226-ю узлами под управлением модифицированного СТР

Результаты моделирования сети, которая состоит из 225 узлов, показывают, что модифицированный протокол СТР дает положительные результаты. Уровень спада числа ретрансляций на втором графике имеет пологий спуск.

### ВЫВОДЫ

Модифицирован метод оптимизации работы протокола СТР на основе генетического алгоритма, для которого определены проблемно-ориентированные генетические операторы кроссинговера и мутации. Выполнена программная реализация модифицирован-

На рис.5-6.представлены гистограммы распределения числа ретрансляций для моделей под управлением стандартного и модифицированного протокола СТР.

ного алгоритма СТР путем интеграции новых функций, операций и переменных в уже существующий программный код протокола СТР. Проведена серия экспериментов по моделированию БСС различной сложности с помощью разработанного программного обеспечения. Полученные результаты показали достаточно высокую эффективность предложенного метода.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. Dargie W., Poellabauer C. Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. — John Wiley and Sons, 2010. — 330 p.
2. Hart J. K., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? // *Earth-Science Reviews*. — 2006. — 78. — P. 177-191.
3. Doroshenko A.E., Zhreb K.A., Shevchenko R.S. O modelirovanii sensorykh setejj sredstvami vysokogo urovnja // *Problemi programuvannja*. — 2006. — T. 2-3.
4. Skobcov Ju.A. Osnovy ehvoljucionnykh vychislenijj. Doneck: DonNTU, 2008. — 326s.
5. Marwa Sharawi, Imane Aly Saroit, Heshman El-Mandy, Eid Emary. Routing wireless sensor networks based on soft computing paradigm: survey//*International journal on soft computing. Artificial intelligence and applications(IISCAI)*, vol.2, No.4, August 2013.
6. Shiyuan Jin, Ming Zhou, Annie S. Wu/ *Sensor Network Optimization Using a Genetic Algorithm*// School of EECS University of Central Florida Orlando, FL 32816.
7. Vinay Kumar Singh, Vidushi Sharma. Hybrid genetic algorithm based approach for energy efficient routing in wireless sensor nets//*International journal of emerging technologies in computational and applied sciences (IJETCAS)*P.408-413.
8. Min R., Bhardwaj M., Cho S. H. , "Low Power Wireless Sensor Networks," *Proceedings for International. Conference on VLSI Design, Bangalore, India*, pp.221-226, 2001.
9. Akkaya K., Younis M. , "A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks," *Elsevier Ad Hoc Networks*, Vol. 3, Issue 3, pp. 325–349, 2005
10. Azni A. H., Saudi M. M., Azman A., Johari A. S., "Performance Analysis of Routing Protocol for WSN using Data Centric Approach," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Issue 53, 2009.
11. Singh Vinay. K., Sharma V., "On the Hybridization of Evolutionary Algorithms and Optimization Techniques," *Conference on Advancements in Communication, Computing & Signal Processing (COMMUNE CACCS 2011)*, 2011.
12. Johnson J. M., Samii Y. R., "Genetic Algorithm Optimization of Wireless Communication Networks," *Proceedings for Antennas and Propagation Society International Symposium, AP-S. Digest*, 1995.
13. Li Q., Aslam J. Rus D., "Hierarchical Power-Aware Routing in Sensor Networks," *Proceedings of DIMACS Workshop on Pervasive Networking*, 2011.
14. Murthy S., Garcia-Luna-Aceves J. J., "An Efficient Routing Protocol for Wireless Networks," *ACM Mobile Networks Applications*, Vol. 1, Issue 2, pp.183-197, 1996.
15. Singh S., Woo M., Mghavendra C.S., "Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, pp. 181-190, 1998.
16. Kudr Latif. Kriterijj optimal'nosti protokola marshrutizacii besprovodnykh setejj//*Tezisi II naukovu-tehniknoi konferencii studentiv, aspirantiv ta molodikh vchenikh "Informacijni upravljajuchi sistemi ta komp'juternijj monitoring (IUS KM – 2011)".-2011:Doneck.-S.230-233.*
17. Kudr Latif. Razrobotka simuljatora besprovodnoj sensornoj seti// *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universitetu. Serija: «Obchisljuval'na tehnika ta avtomatizacija».-2013.-№2 (25).-S.120-127.*
18. Kudr Latif. Razrobotka ob'ektnoj modeli besprovodnoj sensornoj seti// *Problemi informacijnikh tehnologijj*, 2013.-№1 (013).-S.90-98.