

УДК 004.057.4

КНЯЗЕВА Н. А., д.т.н., проф.,

КАЗАК Ю. С., аспирант (Одесская академия пищевых технологий)

## Производительность протоколов многопутевой маршрутизации в беспроводных Ad-hoc сетях

*Многопутевая маршрутизация позволяет создавать и использовать несколько путей между парой «источник-получатель». За последние 15 лет разработано множество новых протоколов для Ad-hoc сетей, предназначенных для различных сценариев организации маршрутизации. Среди существующих сценариев одними из наиболее широко применяемых являются сценарии, обеспечивающие высокую производительность сети. Целью данного исследования является анализ и сравнение многопутевых протоколов маршрутизации, используемых в Ad-hoc сетях, для выбора протоколов, обеспечивающих наиболее высокую производительность сети.*

**Ключевые слова:** многопутевая маршрутизация, Ad-hoc сети, протоколы маршрутизации, производительность сети, показатели производительности.

### Введение

В настоящее время интенсивно развивается научное направление в области построения телекоммуникационных сетей с переменной топологией, получившее название «Ad-hoc сети». Сети Ad-hoc – это беспроводные сети с динамической топологией, состоящие из мобильных узлов и не имеющие фиксированной инфраструктуры [1]. Данный тип сетей удобен в использовании, так как не требуется дорогостоящая инфраструктура, в отличие от традиционных беспроводных сетей. Каждый из узлов в беспроводных Ad-hoc сетях многофункционален, являясь одновременно маршрутизатором и хостом, при этом передача данных между узлами осуществляется без какого-либо централизованного управления. За счет мобильности узлов топология сети постоянно изменяется. Для осуществления многопутевой маршрутизации между узлами требуются эффективные протоколы маршрутизации.

Многопутевая маршрутизация [2] – это метод маршрутизации использования нескольких альтернативных путей через сеть, что обеспечивает повышение отказоустойчивости, безопасности пропускной способности и т.д., поскольку вычисленные множественные пути могут не пересекаться друг с другом, быть независимыми. Таким образом, протоколы многопутевой маршрутизации позволяют повысить эффективность маршрутизации, то есть обеспечивают повышение производительности сети [3]. В данной работе проведен анализ протоколов многопутевой маршрутизации, используемых в Ad-hoc сетях, с целью определения протокола, обеспечивающего наиболее высокую производительность сети.

© Н. А. Князева, Ю. С. Казак, 2017

### Анализ последних исследований и публикаций

В работе [1] предложен протокол AODV-BR для вычисления альтернативных путей таким образом, что при возникновении сбоя связи промежуточный узел ищет альтернативный путь, чтобы обойти нарушенную связь. Однако этот протокол имеет ряд ограничений. Во-первых, предполагается, что все узлы находятся в пределах дальности передачи друг относительно друга. Во-вторых, не учитывается постоянная мобильность узлов. Протокол предполагает, что узел, который предлагает альтернативный маршрут, не покидает пределы диапазона двух узлов, между которыми нарушена связь.

Существуют другие протоколы маршрутизации, такие как DSR и TORA, которые имеют встроенные средства поддержки многопутевой маршрутизации [3, 4]. DSR кэширует несколько маршрутов, полученных во время процесса обнаружения маршрута, основываясь на подсчете переходов каждого маршрута. В случае сбоя маршрута по основному пути узел-источник начинает передачу данных по альтернативному пути, выбранному из кэша маршрута. Такой подход неэффективен в условиях высокой мобильности, когда альтернативные пути очень часто устаревают. Распределенный протокол маршрутизации TORA требует надежной доставки контрольных сообщений. Тем не менее, TORA не имеет каких-либо механизмов для оценки качества путей, и это приводит к его низкой производительности. В работе [5] предложен протокол SMR, который расширяет DSR таким образом, что получатель может обнаружить два пути для каждого маршрута, в котором один является самым коротким, а другой – максимально непересекающимся с другими путями. В работе [6] предложен протокол многоканальной маршрутизации с энергосбережением (EMPR). Протокол эффективно

использует сетевые ресурсы путем обмена информацией между физическим уровнем, подуровнем MAC и сетевым уровнем. Для этого процесса учитываются энергия и ширина канала связи. В работе [7] представлен протокол широкополосной маршрутизации (BMR) с пропускной способностью для выбора многопутевого распространения на основе доступной пропускной способности узла.

Следует отметить, что в указанных работах [2-7] предложено множество подходов к формализации и решению задач многопутевой маршрутизации, основанных на использовании различных математических моделей и алгоритмов решения в зависимости от выбранного критерия, представлены возможности протоколов с точки зрения формирования альтернативных маршрутов, однако отсутствует характеристика производительности протоколов, одного из важнейших показателей, обеспечивающих эффективность функционирования Ad-hoc сетей. В данной работе выполнена классификация протоколов многопутевой маршрутизации с точки зрения их

производительности, что представляет, безусловно, актуальную задачу.

**Основная часть исследования**

Как было отмечено, повысить производительность Ad-hoc сетей можно за счет использования алгоритмов многопутевой маршрутизации, которые, в отличие от алгоритмов маршрутизации кратчайшего маршрута, позволяют балансировать загруженность сети, увеличивая ее производительность в 1,5 – 2 раза [2]. Дополнительно обеспечивается отказоустойчивость сети. Недостаток многопутевой маршрутизации в том, что таблицы маршрутизации занимают больший объем, чем при использовании однопутевой маршрутизации, а сами алгоритмы становятся сложнее.

В соответствии с существующей классификацией протоколов маршрутизации в Ad-hoc сетях [8] в данной работе протоколы многопутевой маршрутизации разделены на три основные группы на основе стратегии маршрутизации (рис. 1).

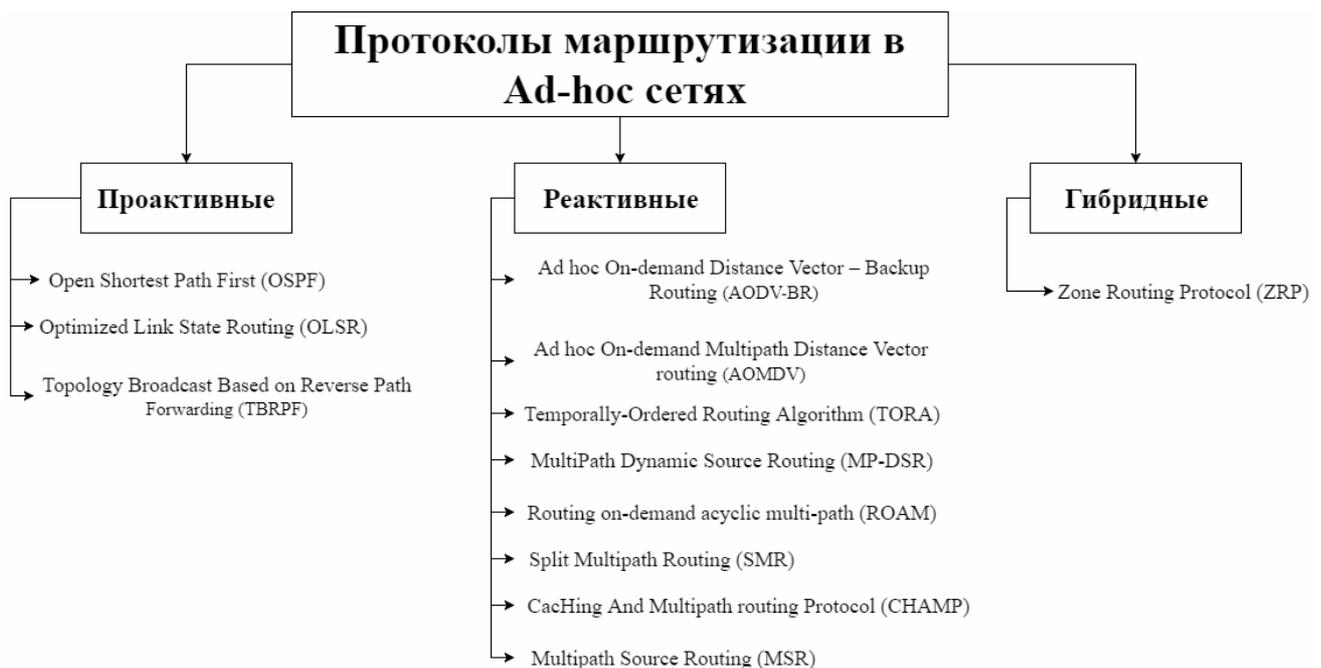


Рис. 1. Классификация протоколов многопутевой маршрутизации для сетей Ad-hoc

В проактивных протоколах маршрутизации каждый узел поддерживает последнюю информацию о маршрутизации для каждого узла сети. Обновление информации о маршрутизации осуществляется в таблицах маршрутизации, а количество таблиц маршрутизации отличается для каждого из этих протоколов (табл. 1).

В табл. 1 - 3 представлены основные показатели производительности Ad-hoc сетей, которые представляют собой наихудший сценарий каждого протокола маршрутизации. В указанных таблицах использованы следующие обозначения:

– ССНС – сложность связи в наихудшем случае, т.е. количество сообщений, необходимых для выполнения операции обновления;

– BCXC – временная сложность худшего случая, то есть количество шагов, необходимых для выполнения операции обновления;  
 – CM – структура маршрутизации: П – плоская; И – иерархическая;  
 – HELLO – hello-сообщения;  
 – N – количество узлов в сети;  
 – D – диаметр сети;  
 – NM – несколько маршрутов;  
 – ПМ – периодические маячки;  
 – A – количество узлов участников процесса маршрутизации;  
 – Z – диаметр направленного пути, в котором проходит RREP или RERR-пакет;

– Y – общее количество узлов, образующих направленный путь, в котором проходит RREP или RERR-пакет;  
 – \* – маяки с точки зрения сообщений hello;  
 – # – маяки, определяющие отправление периодических пробных пакетов вдоль активных маршрутов;  
 – G – максимальная степень маршрутизатора;  
 – |E| – количество ребер в сети;  
 – r – количество узлов в пути ответа маршрута;  
 – n – количество узлов в зоне, кластере или дереве;  
 – d – диаметр зоны, кластера или дерева;  
 – MPR – многопутевое реле.

Таблица 1

**Показатели производительности проактивных протоколов многопутевой маршрутизации**

Протоколы маршрутизации	CCNC	BCXC	CM	HELLO	Критические узлы	Частота обновлений	Количество таблиц	Преимущества	Недостатки
<b>OLSR</b>	O(N)	O(D)	П	Да	Нет	Периодически	3 (таблицы маршрутизации, соседей и топологии)	MPR уменьшает контроль главного узла	Требуется знание соседей на 2 хопа
<b>OSPF</b>	O(N)	O(D)	И	Да	Нет	Периодически, отправляя LSA	1 (таблица маршрутизации построена из базы данных состояния канала)	Оптимизация протокола маршрутизации чистого канала связи	Используется только для интернет-сообщества
<b>TBRPF</b>	O(N)	O(D)	П	Да	Да, родительский узел	Периодически и дифференциально	1 таблица, 4 списка	Низкий BCXC при сравнении с маршрутизацией состояния канала	Увеличение объема служебных данных с изменением мобильности узлов и размера сети

Большинство проактивных протоколов маршрутизации имеет плохую масштабируемость. Это связано с тем, что процедура обновления потребляет значительную пропускную способность сети. Из рассмотренных протоколов маршрутизации протокол OLSR имеет наилучшую масштабируемость. Устойчивость протокола OLSR достигается за счет сокращения числа ретрансляций через механизм MPR, используемый для выбора нескольких соседних узлов для ретрансляции сообщения. Протоколы с иерархической структурой масштабируют большую часть потоков сообщений, поскольку они ввели структуру в сеть, которая контролирует количество служебных сообщений, передаваемых через сеть. Общим недостатком, связанным со всеми иерархическими протоколами, является необходимость управления мобильностью. Управление мобильностью вводит ненужные накладные расходы в сети (например, дополнительные служебные надбавки для формирования и обслуживания кластеров). Из-за динамических изменений в управлении мобильностью в протоколе OSPF передаются ненужные пакеты управления.

Реактивные многопутевые протоколы маршрутизации уменьшают расходы энергии, сохраняя информацию только для активных маршрутов. Это означает, что маршруты определяются и поддерживаются всякий раз, когда узлам необходимо отправлять данные в конкретный пункт назначения. Обнаружение маршрута происходит путем рассылки пакетов запроса маршрута через всю сеть. Когда запрос достиг узла назначения, он отправляет ответный пакет с маршрутом обратно в исходный узел с использованием разворота ссылок, если запрос маршрута прошел через двунаправленные линии или путем подгонки маршрута. Существует две категории реактивных многопутевых протоколов на основе стратегии маршрутизации [8]: маршрутизация источника и маршрутизация с одним переходом.

Среди различных реактивных протоколов многопутевой маршрутизации (табл. 2) протоколы маршрутизации с одним переходом являются более используемыми в Ad-hoc сетях, чем протоколы маршрутизации от источника.

## Показатели производительности реактивных протоколов многопутевой маршрутизации

Протоколы маршрутизации	ССНС (обнаружение маршрута)	ССНС (обслуживание маршрута)	ВСХС (обнаружение маршрута)	ВСХС (обслуживание маршрута)	СМ	ПМ	НМ	Преимущества	Недостатки
AODV-BR	O(2N)	O(2N)	O(2D)	O(2D)	П	Да*	Да	Каждый узел поддерживает резервные маршруты в своей альтернативной таблице маршрутов	Требует периодических сообщений HELLO
AOMDV	O(2N)	O(2N)	O(2D)	O(2D)	П	Да*	Да	Многоканальная маршрутизация непересекающихся маршрутов	Требует периодических сообщений HELLO
TORA	O(2N)	O(2A)	O(2D)	O(2D)	П	Нет	Да	Локализованное обслуживание маршрута	Требует надежную и своевременную доставку пакетов управления маршрутом; временные петли маршрутизации
MP-DSR	O(2N)	O(2N)	O(2D)	O(2D)	П	Нет	Да	Промежуточные узлы не хранят информацию о маршруте; может предоставлять несколько путей	Проблемы с эстафетным шлейфом могут возникать в больших и очень динамичных сетях MANET; дополнительные накладные расходы из-за маршрутизации от источника
ROAM	O( E )	O(6GA)	O(D)	O(A)	П	Нет	Да	Устранение проблемы поиска	Большие контрольные издержки в высокодинамичных мобильных средах
SMR	O(2N)	O(2N)	O(2D)	O(2D)	П	Нет	Да	Промежуточные узлы не хранят информацию о маршруте; может предоставлять несколько путей	Проблемы с эстафетным шлейфом могут возникать в крупных и высокоподвижных MANET; дополнительные издержки на связь из-за маршрутизации от источника
CHAMP	O(N+Y)	O(N+Y)	O(D+Z)	O(D+Z)	П	Нет	Да	Потери пакетов снижаются с помощью временного кэширования; трафик распределяется между несколькими путями в круглом режиме	Требуются кеш маршрута для отправки пакетов
MSR	O(2N)	O(2N)	O(2D)	O(2D)	П	Да#	Да	Многоканальная маршрутизация и балансировка нагрузки	Требует периодических пробных пакетов для сбора информации

В маршрутизации с одним переходом протокол AODV-BR предоставляет только резервные/альтернативные маршруты, где пересекаются несколько маршрутов. Протокол AOMDV является лучшим в маршрутизации с одним переходом. В маршрутизации от источника протокол CHAMP является лучшим по сравнению с MSR, SMR и ROAM, поскольку он уменьшает потери пакетов с использованием временного кэширования, а балансирование нагрузки достигается путем распределения трафика между несколькими путями в циклическом режиме.

Гибридные протоколы маршрутизации являются протоколами нового поколения. Эти протоколы маршрутизации имеют как реактивные, так и

проактивные свойства, сохраняя внутризональную информацию (проактивные свойства) и межзональную информацию (реактивные свойства). Эти протоколы предназначены для повышения масштабируемости, позволяя узлам, расположенным близко друг к другу, работать вместе, чтобы сформировать какую-то основу для сокращения расходов энергии на обнаружение маршрута. Это достигается за счет проактивного поддержания маршрута рядом с узлами и определения маршрутов к дальним узлам, используя стратегии реактивной маршрутизации.

Большинство гибридных протоколов, предлагаемых на сегодняшний день, основаны на формировании зон (узлы разделяются в зоны) или кластеров, что означает, что узлы группируются в

деревья или кластеры. К зонному классу относится называемый зонным протоколом маршрутизации гибридный протокол многопутевой маршрутизации, (ZRP) (табл. 3).

Таблица 3

**Показатели производительности гибридного протокола многопутевой маршрутизации**

Протоколы маршрутизации	ССНС (обнаружение маршрута)	ССНС (обслуживание маршрута)	ВСХС (обнаружение маршрута)	ВСХС (обслуживание маршрута)	СМ	ПМ	НМ	Преимущества	Недостатки
ZRP	$O(N+r)$ или $O(n)$	$O(N+r)$ или $O(n)$	$O(2D)$ или $O(d)$	$O(2D)$ или $O(d)$	П	Да*	Да	Снижение связи по сравнению с проактивными алгоритмами маршрутизации; более быстрое обнаружение маршрута в зоне, чем в любом протоколе реактивной маршрутизации	Для больших значений зоны маршрутизации он может вести себя как протокол реактивной маршрутизации; перекрывающиеся зоны

В табл. 4 показано общее сравнение всех групп многопутевой маршрутизации. Рассматривая показатели производительности и характеристики всех категорий протоколов маршрутизации, можно сделать следующие выводы.

Таблица 4

**Общее сравнение всех групп многопутевой маршрутизации**

Параметры	Проактивные протоколы	Реактивные протоколы	Гибридные протоколы
<b>Структура маршрутизации</b>	Как плоские, так и иерархические	Обычно плоские	Обычно иерархические
<b>Доступность маршрутов</b>	Всегда доступны для достижимых узлов	Определяются, когда это необходимо. Иногда альтернативные маршруты хранятся в течение ограниченного времени (например, в MP-DSR)	Всегда доступны, когда источник и получатель находятся в пределах той же зоны/кластера/дерева
<b>Объем управляющего трафика</b>	Обычно высокий объем, но иногда предпринимается сокращение	Обычно ниже, чем в проактивной маршрутизации	Значительно ниже чем в проактивных и реактивных протоколах маршрутизации
<b>Требования к хранению</b>	Достаточно высокие	Зависят от количества сохраненных или требуемых маршрутов. Обычно более низкие, чем для проактивных протоколов	Более низкие, чем для проактивных и реактивных протоколов маршрутизации, при условии правильного определения размера зон / кластеров / деревьев в больших сетях
<b>Задержка для обнаружения маршрута</b>	Определяется, когда маршруты малы	Выше, чем для проактивных протоколов маршрутизации	Задержка такая же как у проактивных протоколов маршрутизации, если источник и получатель находятся в одной и той же зоне/кластере/дереве. В противном случае задержка выше, чем у проактивных протоколов, но ниже, чем у реактивных
<b>Поддержка мобильности</b>	Поддержка низкой или умеренной мобильности. Для иерархической структурированной маршрутизации обычно требуется мобильность групп	Может поддерживать более высокую мобильность, чем проактивные протоколы маршрутизации	Обычно поддерживает более низкий уровень мобильности, чем протоколы реактивной маршрутизации, поскольку структура маршрутизации в основном является иерархической
<b>Масштабируемость</b>	Обычно до 100 узлов. В OSPF и OLSR могут увеличиваться	Протокол маршрутизации источника плохо масштабируется (обычно до нескольких сотен узлов)	1000 или более

В проактивній маршрутизації адресація може бути простою в реалізації, однак вона може не дуже добре масштабуватися для великих мереж [10]. Однак найбільшою проблемою проактивних протоколів є управління місцезнаходженням.

Реактивні протоколи маршрутизації мають проблеми з масштабованістю. Щоб підвищити масштабованість, необхідно контролювати виявлення маршруту та обслуговування маршруту. Це може бути досягнуто шляхом локалізації розповсюдження управляючого повідомлення в певному сегменті, де знаходиться пункт призначення.

Протокол маршрутизації ZRP є гібридним протоколом маршрутизації, який призначений для підвищення масштабованості Ad-hoc мереж. Перевагою цього протоколу є те, що він підтримує сильну мережеву зв'язність (проактивно) в зонах маршрутизації при визначенні віддаленого маршруту (за межами зони маршрутизації) швидше, ніж інші. Ще однією перевагою ZRP є те, що він може взаємодіяти з іншими протоколами маршрутизації для підвищення його продуктивності.

### Заключення

Маршрутизація в Ad-hoc мережах значно складніше, ніж в проводних мережах, через динамічну топологію Ad-hoc мереж. У статті обговорюються три категорії протоколів багатопутової маршрутизації – проактивних, реактивних та гібридних протоколів.

Для кожної категорії протоколів виконано аналіз продуктивності. Показано, що серед проактивних протоколів найкращу масштабованість та стійкість має протокол OLSR. Серед реактивних протоколів багатопутової маршрутизації найбільш використовуваним в Ad-hoc мережах є протокол з одним переходом – AOMDV. Гібридні протоколи дозволяють підвищити масштабованість, що призводить до скорочення витрат енергії на пошук маршрутів (протокол ZRP).

Складена таблиця, в якій наведено характеристики протоколів всіх груп з точки зору забезпечуваної мережевої продуктивності, може бути використана проєктувальниками мереж на етапі вибору протоколів багатопутової маршрутизації.

### Список використаних джерел

1. Sung-Ju Lee and Mario Gerla, "AODV-BR: Backup routing in ad hoc networks," in Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2000), Chicago, IL, September 2000.
2. "Performance Measurement of Various Routing Protocols in Ad-hoc Network", Md. Anisur Rahman,

3. Md. Shohidul Islam, Alex Talevski, Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2009, 1, IMECS 2009, March 18 - 20, 2009, Hong Kong.
3. Samir R. Das, Charles E. Perkins, and Elizabeth M. Royer, "Performance comparison of two on-demand routing protocols for ad hoc networks," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Tel Aviv, Israel, March 2000.
4. Vincent D. Park and M. Scott Corson, "A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks," in Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM), Kobe, Japan, April 1997, pp. 1405–1413.
5. A. Nasipuri and S.R. Das, On-Demand Multi-path Routing for Mobile Ad Hoc Networks, IEEE ICCCN'99, pp. 64-70
6. M. Li et al., "An Energy-Aware Multipath Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks", ACM Sigcomm, April, Beijing, China, pp. 10–12, 2005.
7. W. Yang et al., "A Bandwidth Aware Multi-path Routing Protocol in Mobile Ad Hoc Networks", Journal of Computational Information Systems, vol. 7, no. 3, pp. 685-696, 2011.
8. Nurul I. Sarkar & Wilford G. Loh "A Study of MANET Routing Protocols: Joint Node Density, Packet Length and Mobility" 978-1-4244-7755-5/10/\$26.00 ©2010 IEEE Page no. 515-520
9. P. Jacquet and T. Clausen, "Optimized Link State Routing Protocol", IETF Internet Draft, draft-ietf-manet-olsr-11.txt, July 2003.
10. Mehran Abolhasan, Tadeusz Wysocki, and Eryk Dutkiewicz, "A review of routing protocols for mobile ad hoc networks", Ad Hoc Networks, June 2003, pp.1-22.

**Князева Н. О., Казак Ю. С. Продуктивність протоколів багатомаршрутної маршрутизації у безпроводних Ad-hoc мережах.** Багатомаршрутна маршрутизація дозволяє створювати і використовувати кілька шляхів між парами «джерело-одержувач». За останні 15 років розроблено безліч нових протоколів для Ad-hoc мереж, призначених для різних сценаріїв організації маршрутизації. Серед існуючих сценаріїв одними з найбільш широко застосовуваних є сценарії, які забезпечують високу продуктивність мережі. Метою даного дослідження є аналіз і порівняння багатомаршрутних протоколів маршрутизації, які використовуються в Ad-hoc мережах, для вибору протоколів, що забезпечують найбільш високу продуктивність мережі.

**Ключові слова:** багатомаршрутна маршрутизація, Ad-hoc мережі, протоколи маршрутизації, продуктивність мережі, показники продуктивності.

**Kniazieva N.A., Kazak Y.S. The performance of multipath routing in wireless Ad-hoc networks.** In the past few years, we have seen a rapid expansion in the field of mobile computing due to the proliferation of inexpensive, widely available wireless devices. However, current devices, applications and protocols are solely focused on cellular or wireless local area networks (WLANs), not taking into account the great potential offered by Ad-hoc networking. Ad-hoc networks are wireless mobile networks that can operate without infrastructure and without centralized network management. In such networks, the wireless mobile nodes may dynamically enter the network as well as leave the network. Mobility and multipath are the main characteristics of Ad-hoc networks. Multipath routing allows to create and use multiple paths between a source-destination node pair. In the last 15 years designed hundreds of new routing protocols targeting the various scenarios of this design space. Among the existing scenarios, scenarios that provide high network performance are among the most used. The purpose of this study is to analyze and compare the multipath routing protocols used in Ad-hoc networks to select the protocols that provide the highest network performance.

**Keywords:** multipath routing, Ad-hoc networks, routing protocols, network performance, performance indicators.

*Надійшла 09.08.2017 р.*

*Князева Ніна Олексіївна, доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії Одеської національної академії харчових технологій, м. Одеса, вул. Дворянська, 1/3. E-mail: knyazeva@ukr.net*

*Казак Юлія Сергіївна, аспірант кафедри комп'ютерної інженерії Одеської національної академії харчових технологій, м. Одеса, вул. Дворянська, 1/3. E-mail: flyer11@bigmir.net*

*Nina Kniazieva, D Sc. (Technics), Professor Chair of Computer Engineering, Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Dvoryanskaya str. 1/3. E-mail: knyazeva@ukr.net*

*Yulia Kazak, graduate of chair of Computer Engineering Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Dvoryanskaya str. 1/3. E-mail: flyer11@bigmir.net*