

УДК 621.391

# РАЗРАБОТКА ПОТОКОВОЙ МОДЕЛИ МАРШРУТИЗАЦИИ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ МНОГОИНТЕРФЕЙСНЫХ MESH-СЕТЯХ СТАНДАРТА IEEE 802.11, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ В ВИДЕ ГРАФА КЕНИГА



[С.В. ГАРКУША](#)

Полтавский университет  
экономики и торговли

**Abstract** – An approach to the use of graphs König for modeling multichannel multiradio mesh-networking standard IEEE 802.11. This, in turn, allowed for a fuller and describe in detail all the possible configurations of mesh- network as a whole and its individual elements are represented as vertices of dissimilar König. The proposed mathematical apparatus properly can be used to solve the routing problem. Based on the representation planar König's of multichannel multiradio mesh-network in the routing problem is solved, which is to identify those collision domains through which traffic is to be transmitted from the sender to the recipient, and so that end-to-end performance requirements have been satisfied. As a mathematical model was proposed routing flow model of producing records of structural and functional features of multichannel multiradio mesh-networks – the results of solving the problem of the distribution of frequency channels, bandwidth collision domains, traffic characteristics, order service packs on the mesh-station (wireless router) network etc. Under the proposed model uses an optimality criterion, aiming to minimize the performance multi-channel multiradio mesh-network, i.e. intensity of the total network traffic catered with its priorities.

**Анотація** – Запропоновано підхід до використання графів Кьоніга при моделюванні багатоканальних багатоінтерфейсних mesh-мереж стандарту IEEE 802.11. Це, в свою чергу, дозволило більш повно і детально описати можливі конфігурації як всієї mesh-мережі в цілому, так і окремих її елементів, представлених у вигляді різномірних вершин графа Кьоніга. Запропонований математичний апарат належним чином може бути використаний при розв'язанні задачі маршрутизації.

**Аннотация** – Предложен подход к использованию графов Кенига при моделировании многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11. Это, в свою очередь, позволило более полно и детально описать возможные конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов, представленных в виде разнородных вершин графа Кенига. Предложенный математический аппарат должным образом может быть использован при решении задачи маршрутизации.

## Введение

Появление технологически и экономически эффективных беспроводных mesh-сетей (Wireless Mesh Networks, WMNs), основанных на технологии IEEE 802.11, существенным образом изменило процесс организации как беспроводных сетей доступа, так и транспортных радиосетей. На сегодняшний день уже есть убедительные доказательства того, что модель доступа пользователей с использованием инфраструктуры стандарта IEEE 802.11 хорошо подходит для сетей, функционирующих в домашних условиях и в пределах небольших предприятий. Данные сети охватывают огра-

ниченную территорию с небольшим числом пользователей. В свою очередь транспортная модель mesh-сети подходит для сетей с высокой плотностью точек доступа (Access Point, AP), которые предназначены для связи пользователей на достаточно большой территории. Транспортная сетевая архитектура mesh-сетей обладает рядом достоинств, к которым необходимо отнести: надежность, масштабируемость, рентабельность и простоту в построении [1].

Среди многих требований, выдвигаемых к беспроводным mesh-сетям, основным является обеспечение высокой производительности с дифференцированным (или даже гарантированным) качеством обслуживания запросов пользователей. Исследования, направленные на повышение производительности mesh-сети в целом, затрагивают протокольные средства от физического до сетевого уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем (Open Systems Interconnection Basic Reference Model, OSI). Как показал анализ [2], существует ряд способов повышения производительности беспроводных сетей: использование технологии интеллектуальных антенных решеток, изменение территориального местоположения станций, разнесение сигнала по поляризации, использование технологии MIMO, объединение каналов, использование многоканального многоинтерфейсного режима работы, обеспечение эффективной маршрутизации, организация управления трафиком. Наиболее высокого результата при повышении производительности беспроводной сети (до 2-3-х раз) можно достигнуть при использовании многоинтерфейсных многоканальных беспроводных mesh-сетей (Multi-Radio Multi-Channel Wireless Mesh Networks, MR MC WMN) [3, 4], предполагающих использование как одного, так и нескольких радиointерфейсов на каждой mesh-станции, настроенных на различные неперекрывающиеся частотные каналы (ЧК). Особенностью данного типа сетей является переключение одного радиointерфейса с канала, организующего абонентский доступ, на транспортный канал, что позволяет избавиться от интерференционных помех, связанных с использованием одноканального решения. Однако использование многоканального многоинтерфейсного режима работы WMN не исключает его совместного применения с другими способами повышения производительности ввиду их принадлежности к различным уровням OSI.

Высокие заявленные потенциальные возможности MR MC WMN стандарта IEEE 802.11 обеспечиваются, с одной стороны, результативными решениями физического и канального уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем, а с другой стороны, выдвигают жесткие требования к эффективности средств управления ресурсами сети и, в частности, к протоколам управления трафиком и маршрутизации. В сетях беспроводной связи проблема маршрутизации пакетов между произвольной парой станций стоит намного сложнее, чем в сетях проводной связи. Причиной тому является то, что наряду с общими требованиями, касающимися поддержки качества обслуживания и балансировки нагрузки, в протоколах маршрутизации MR MC WMN необходимо учитывать случайный характер создаваемых доменов коллизий. В этой связи актуальной представляется задача, сопряженная с разработкой математических моделей и методов маршрутизации, которые могли бы быть положены в основу перспективных протоколов маршрутизации в MR MC WMN.

## I. Анализ известных решений по маршрутизации в MR MC WMN

Несмотря на то, что концепции по созданию MR MC WMN предложены сравнительно недавно, наукой и практикой предложен достаточно широкий спектр протоколов маршрутизации [5-7]. Как показал анализ известных решений маршрутизации, все они базируются на использовании графового представления WMN. Использование графового представления MR MC WMN целесообразно в случае использования на mesh-станциях направленных антенн, т.к. между ними формируется радиоканал, который может быть представлен в виде ребра графа. Однако в случае использования на mesh-станциях ненаправленных антенн, графовое представление MR MC WMN не обеспечивает адекватный учет их особенностей из-за формирования кластерной структуры mesh-сети. Хорошо зарекомендовали себя решения, базирующиеся на использовании топологических идей [8, 9] при математическом описании структуры сети. Как показано в работах [10, 11], при моделировании MR MC WMN доказал свою эффективность подход, основанный на представлении mesh-сети в виде гиперграфа [12-14] при решении задач распределения неперекрывающихся частотных каналов. Поэтому актуальной является задача, связанная с разработкой модели маршрутизации в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях, представленных гиперграфами.

## II. Гиперграфовое представление MR MC WMN

В рамках гиперграфового представления, как было показано в работах [10, 11], MR MC WMN поставим в соответствие гиперграф  $H(I, J; R)$ , где  $I$  – множество вершин,  $J$  – множество ребер,  $R$  – предикат, определяющий смежность станций с зонами устойчивого приема.  $I = \{n_i, i = \overline{1, N}\}$ , где  $n_i$  – элемент множества  $I$ , моделирующий mesh-станции MR MC WMN,  $N$  – их общее количество в mesh-сети.  $J = \{z_j, j = \overline{1, Z}\}$ , где  $z_j$  – элемент множества  $J$ , моделирующий зону устойчивого приема,  $Z$  – их общее количество в MR MC WMN. Предикат  $R$ , являясь инцидентором гиперграфа  $H$ , определяет принадлежит ли  $i$ -я станция  $j$ -й зоне устойчивого приема. Так, в случае, если  $i$ -я mesh-станция участвует в формировании  $j$ -й зоны устойчивого приема, предикат  $R(n_i, z_j)$  – истинный, т.е. равный единице, в противном случае  $R(n_i, z_j)$  – ложный, т.е. равный нулю. В результате этого описание MR MC WMN может быть произведено с использованием конечного гиперграфа  $H(I, J; R)$ , состоящего из пары множеств вершин  $I = \{n_i, i = \overline{1, N}\}$  и ребер  $J = \{z_j, j = \overline{1, Z}\}$  вместе с двуместным предикатом  $R \Leftrightarrow R(n_i, z_j)$ , определенным для всех  $n_i \in I$  и  $z_j \in J$  [12-14].

При функционировании MR MC WMN с целью устранения интерференции используется множество неперекрывающихся ЧК  $T = \{k_t, t = \overline{1, K}\}$ , где  $k_t$  – элемент множества  $T$ , моделирующий  $t$ -й неперекрывающийся ЧК,  $K$  – их общее количество в зависимости от используемого стандарта беспроводной сети (табл. 1). В моделируемой MR MC WMN считается, что неперекрывающиеся ЧК в рамках известных

моделей [15-18] предварительно распределены между радиointерфейсами mesh-станций, в результате чего производится закрепление  $t$ -го частотного канала за  $i$ -й станцией, принадлежащей  $j$ -й зоне устойчивого приема. Таким образом, предикат  $P(n_i, k_t, z_j)$  определяется из выражения:

$$P(n_i, k_t, z_j) = x_{n_i, k_t} R(n_i, z_j), \quad (1)$$

где  $x_{n_i, k_t}$  – переменная, характеризующая закрепление частотного канала  $k_t \in K$  за mesh-станцией  $n_i \in N$ .

Таблица 1. Количество неперекрывающихся ЧК для различных стандартов беспроводных сетей

Стандарт	Количество неперекрывающихся частотных каналов, $K$
IEEE 802.11a/n	12
IEEE 802.11b/g/n	3 или 4
IEEE 802.11ac	25

Закрепление частотных каналов за радиointерфейсами mesh-станций одной зоны устойчивого приема приводит к формированию доменов коллизий. В рамках домена коллизий mesh-станции используют один и тот же частотный канал. MR MC WMN, формируемую в результате решения задачи распределения ЧК, также можно представить в виде гиперграфа  $G(I, U; Q)$ , где  $U = \{d_u, i = \overline{1, D}\}$  – множество формируемых доменов коллизий,  $d_u$  – элемент множества  $U$ , моделирующий домены коллизий,  $D$  – общее количество доменов коллизий в MR MC WMN. Предикат  $Q(n_i, d_u)$  в свою очередь однозначно определяется соответствием

$$Q(n_i, d_u) \Leftrightarrow P(n_i, k_t, z_j). \quad (2)$$

Так, если  $i$ -й mesh-станции, входящей в состав  $j$ -й зоны устойчивого приема, выделен  $t$ -й неперекрывающийся частотный канал ( $P(n_i, k_t, z_j)=1$ ), станция участвует в формировании  $u$ -го домена коллизий и предикат  $Q(n_i, d_u)=1$ . В противном случае, если  $i$ -я mesh-станция не входит в состав  $j$ -й зоны устойчивого приема или ей не выделен  $t$ -й неперекрывающийся частотный канал ( $P(n_i, k_t, z_j)=0$ ), предикат  $Q(n_i, d_u)=0$ . Таким образом, использование  $i$ -й станции при формировании  $u$ -го домена коллизий определяется предикатом  $Q(n_i, d_u)$ .

В качестве примера рассмотрим конфигурацию MR MC WMN, состоящую из пяти зон устойчивого приема ( $Z=5$ ), формируемых двадцатью пятью mesh-станциями ( $N=25$ ), и функционирующую с использованием пяти неперекрывающихся ЧК ( $K=5$ ). Пример указанной многоинтерфейсной многоканальной mesh-сети приведен на рис. 1. Указанной конфигурации mesh-сети соответствует гиперграф  $G(I, U; Q)$ , изображенный на рис. 2, с множеством вершин  $I = \{n_1, n_2, \dots, n_{25}\}$ , множеством используемых неперекрывающихся ЧК  $T = \{k_1, k_2, \dots, k_5\}$  и предикатом

$Q(n_i, d_u)$ , определяющим принадлежность той или иной станции к одному из доменов коллизий  $U = \{d_1, d_2, \dots, d_{11}\}$ .

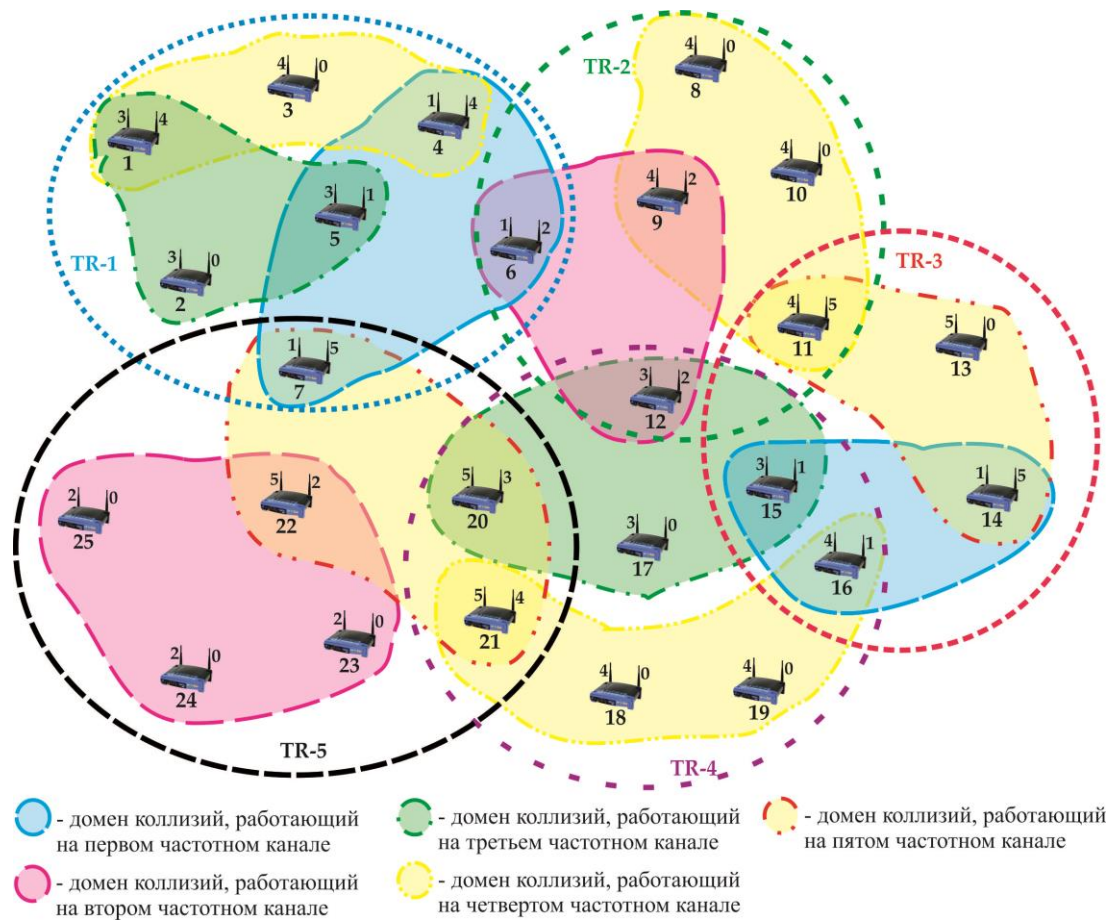


Рис. 1. Пример MR MC WMN, использующей пять неперекрывающихся ЧК

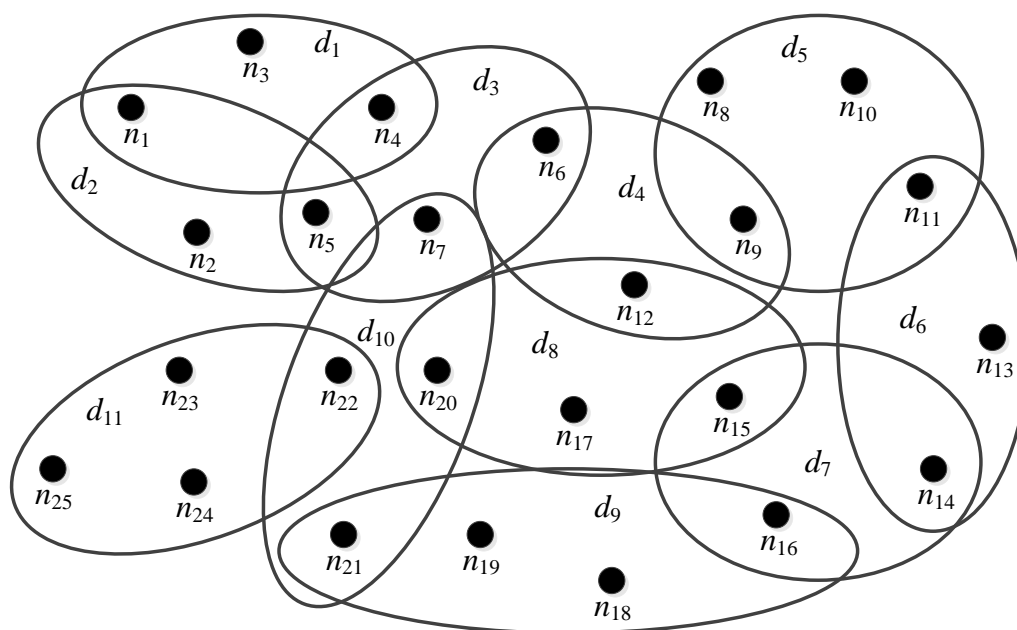


Рис. 2. Гиперграфовое представление MR MC WMN, приведенной на рис. 1

В результате проведенных исследований установлено, что гиперграфовое представление MR MC WMN позволило более полно и детально описать возможные конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов, представленных в виде вершин и ребер гиперграфа. Однако решение задачи маршрутизации подразумевает необходимость учета не только структурных, но и функциональных характеристик многоинтерфейсной многоканальной mesh-сети. В результате этого возникает необходимость в формализации задачи маршрутизации в MR MC WMN, представленной в виде гиперграфа. Для дальнейшего удобства гиперграфовое представление MR MC WMN будет преобразовано к виду графа Кенига.

### III. Представление MR MC WMN в виде графа Кенига

Для решения задачи маршрутизации трафика в конфигурации многоинтерфейсной многоканальной mesh-сети отнесем гиперграфу  $G(I, U; Q)$ , моделирующей mesh-сеть в виде доменов коллизий, граф Кенига  $K(G) = (I, U; Q)$  с множеством вершин  $I \cup U$  [12-14]. Предикат  $Q(n_i, d_u)$  определяет смежность вершин двух типов таким образом, что вершины  $n_i \in I$  и  $d_u \in U$  в  $K(G)$  смежны тогда и только тогда, когда в  $G$   $i$ -я вершина инцидентна  $u$ -му ребру, т.е.  $i$ -я станция участвует в формировании  $u$ -го домена коллизий. При этом граф  $K(G)$  называется кениговым представлением гиперграфа  $G$ . Таким образом, возможной конфигурацией WMN, представленной на рис. 1, соответствует ее кенигово представление (рис. 3).

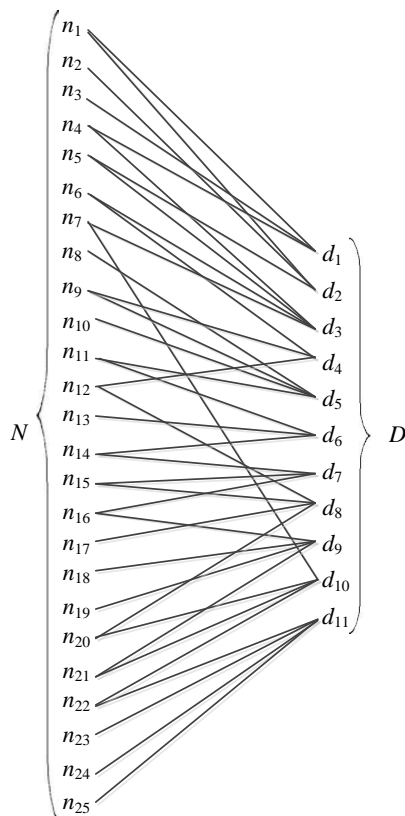


Рис. 3. Кенигово представление возможной конфигурации MR MC WMN

Преобразовывая кенигово представление возможной конфигурации MR MC WMN, mesh-сеть может быть представлена в виде плоского кенигово представления и в виде двудольного ориентированного графа. Пример такого преобразования третьего домена коллизий, формируемого mesh-станциями №4-№7 (рис. 1), представлен на рис. 4.

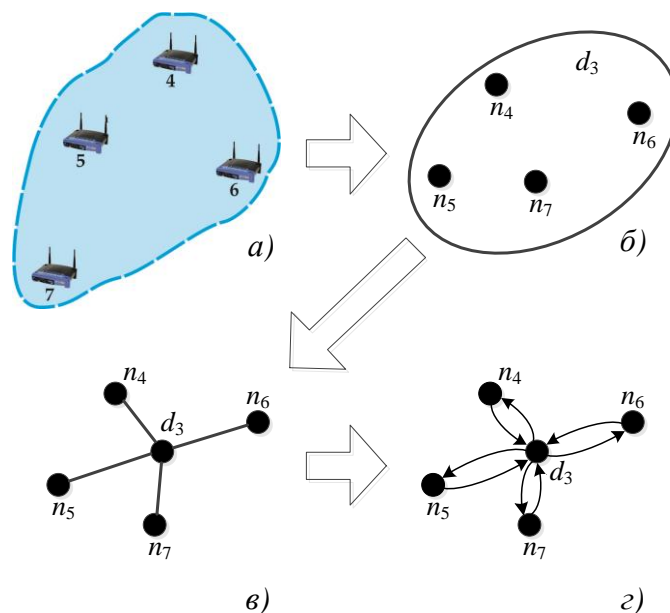


Рис. 4. Примеры представления возможной конфигурации домена коллизий (а) в виде гиперграфа (б), плоского кенигово представления (в) и двудольного ориентированного графа (г)

В результате вышесказанного конфигурации MR MC WMN (рис. 1) и ее гиперграфовому представлению (рис. 2) будет соответствовать плоское кенигово представление MR MC WMN, представленное на рис. 5.

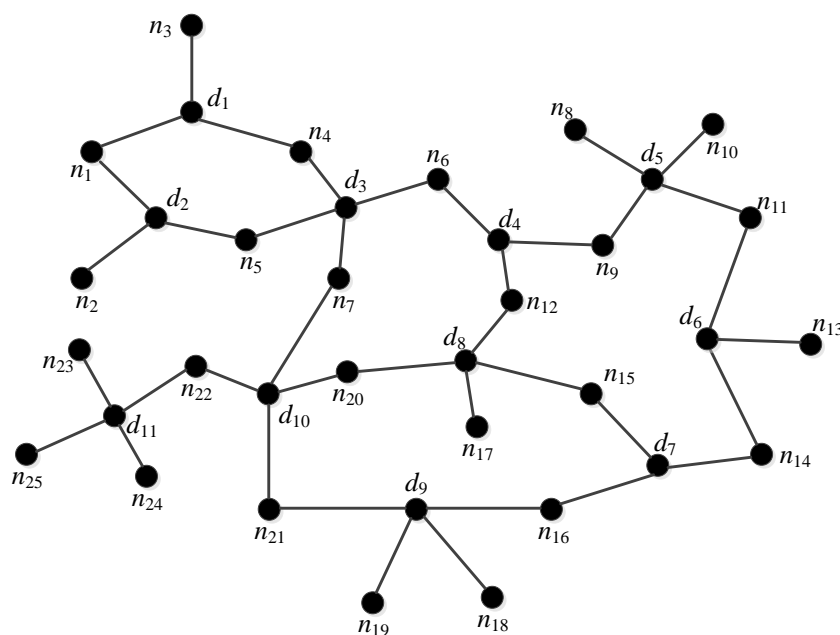


Рис. 5. Плоское кенигово представление возможной конфигурации WMN

Плоское кенигово представление MR MC WMN (рис. 5) состоит из множества вершин  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_{25}\}$ , моделирующих mesh-станции, а также множества вершин  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{11}\}$ , моделирующих формируемые домены коллизий. В свою очередь предикат  $Q(n_i, d_u)$  определяет принадлежность той или иной mesh-станции к одному из доменов коллизий.

#### IV. Метризация многоинтерфейсной многоканальной mesh-сети, представленной графом Кенига

Ключевым моментом как при постановке, так и в ходе решения задач маршрутизации в системах телекоммуникаций, а в особенности в WMN, является определение метрических свойств элементов сети. Известно, что в качестве ключевой метрики при решении маршрутных задач нередко используется функция от пропускной способности элемента сети. В данном случае в качестве такого элемента сети выступают домены коллизий, свойства и характеристики которых всецело определяют характер взаимодействия mesh-станций. Таким образом, важной представляется подзадача, связанная с формулировкой в аналитическом виде выражения для расчета пропускной способности домена коллизий, а именно текущего значения доступной скорости передачи данных от  $i$ -й mesh-станции другим mesh-станциям  $u$ -го домена коллизий ( $c_{n_i, d_u}$ ) и текущего значения доступной скорости передачи к  $i$ -й mesh-станции от других mesh-станций  $u$ -го домена коллизий ( $c_{d_u, n_i}$ ).

Необходимо заметить, что в соответствии с протоколом множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance, CSMA/CA) [19] доступ к среде передачи одного домена коллизий WMN будет предоставляться в любой момент времени только одной mesh-станции. Тогда в случае высокой загруженности WMN, т.е. когда все станции пытаются производить передачу данных, скорости  $c_{n_i, d_u}$  и  $c_{d_u, n_i}$  будут определяться из выражений

$$c_{n_i, d_u} = \frac{Y_{d_u}}{\sum_{i=1}^N Q(n_i, d_u)}, \quad (u = \overline{1, D}), \quad (3)$$

$$c_{d_u, n_i} = Y_{d_u} \left( \frac{\sum_{i=1}^N Q(n_i, d_u) - 1}{\sum_{i=1}^N Q(n_i, d_u)} \right), \quad (u = \overline{1, D}), \quad (4)$$

где  $Y_{d_u}$  – максимальная производительность  $u$ -го домена коллизий WMN на сетевом уровне, поддерживаемая в используемой технологии беспроводной связи (Мбит/с) (табл. 2);  $\sum_{i=1}^N Q(n_i, d_u)$  – количество mesh-станций, участвующих в формировании  $u$ -го домена коллизий.



Таблица 2. Производительности WMN семейства стандартов IEEE 802.11

Стандарт	Максимальная производительность $u$ -го домена коллизий на физическом уровне, (Мбит/с)	Максимальная производительность $u$ -го домена коллизий на сетевом уровне, $Y_{d_u}$ (Мбит/с)
802.11a	54	24
802.11b	11	4,8
802.11g	54	24
802.11n	300	60

## V. Модель маршрутизации в MR MC WMN

Основываясь на плоском кениговом представлении, решение задачи маршрутизации заключается в определении тех доменов коллизий, через которые должны быть переданы пакеты от отправителя к получателю, причем таким образом, чтобы межконцевые требования по производительности были удовлетворены. В качестве математической модели маршрутизации будет предложена потоковая модель, производящая учет особенностей структурно-функционального построения MR MC WMN – порядка распределения частотных каналов, пропускных способностей доменов коллизий, характеристик трафика, порядка обслуживания пакетов на mesh-станциях (беспроводных маршрутизаторах) сети и др.

В рамках разрабатываемой потоковой модели маршрутизации необходимо произвести расчет множества маршрутных переменных

$$\vec{X} = \begin{bmatrix} x_{n_i, d_u}^v \\ \dots \\ x_{d_u, n_i}^v \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $x_{n_i, d_u}^v$  – доля интенсивности  $v$ -го потока пакетов, передаваемых от  $i$ -й mesh-станции к станциям  $u$ -го домена коллизий,  $x_{d_u, n_i}^v$  – доля интенсивности  $v$ -го потока пакетов, передаваемых  $i$ -й mesh-станции от других станций  $u$ -го домена коллизий.

В рамках предлагаемой модели необходимо обеспечить выполнение условий сохранения потока [20-22] в вершинах графа Кенига, моделирующего MR MC WMN, которые принимают вид:

$$\begin{cases} \sum_{u:Q(n_i, d_u)=1} x_{n_i, d_u}^v = 1, \quad v \in V, n_i = s_v; \\ \sum_{u:Q(n_i, d_u)=1} x_{n_i, d_u}^v - \sum_{u:Q(n_i, d_u)=1} x_{d_u, n_i}^v = 0, \quad v \in V, n_i \neq s_v, d_v; \\ \sum_{i:Q(n_i, d_u)=1} x_{d_u, n_i}^v - \sum_{i:Q(n_i, d_u)=1} x_{n_i, d_u}^v = 0, \quad v \in V; \\ \sum_{u:Q(n_i, d_u)=1} x_{d_u, n_i}^v = 1, \quad v \in V, n_i = d_v, \end{cases} \quad (6)$$

где  $V$  – множество потоков в WMN;  $s_v$  – станция-отправитель и  $d_v$  – станция-получатель для пакетов  $v$ -го потока.

Традиционно [20-22] в зависимости от вида дополнительно накладываемых ограничений на управляющие переменные задача маршрутизации может быть классифицирована двояко. В случае наличия ограничений

$$0 \leq x_{n_i, d_u}^v \leq 1, \quad (7)$$

$$0 \leq x_{d_u, n_i}^v \leq 1 \quad (8)$$

сформулированная задача классифицируется как задача многопутевой маршрутизации, а если имеют место ограничения

$$x_{n_i, d_u}^v \in \{0, 1\}, \quad (9)$$

$$x_{d_u, n_i}^v \in \{0, 1\}, \quad (10)$$

то реализуется однопутевой способ доставки пакетов обслуживаемых потоков.

Условия-ограничения, отвечающие за предотвращение превышения текущих значений доступной скорости передачи, в рамках предлагаемой модели имеют вид

$$\sum_{v=1}^V r^v x_{n_i, d_u}^v \leq c_{n_i, d_u}, \quad (i = \overline{1, N}; u = \overline{1, D}), \quad (11)$$

$$\sum_{v=1}^V r^v x_{d_u, n_i}^v \leq c_{d_u, n_i}, \quad (i = \overline{1, N}; u = \overline{1, D}), \quad (12)$$

где  $r^v$  – средняя интенсивность  $v$ -го потока, поступающего в mesh-сеть на обслуживание.

Необходимо заметить, что значение производительности  $c_{n_i, d_u}$ , определяемое с использованием выражения (3), является справедливым при условии, когда все станции беспроводной сети пытаются производить передачу данных. С целью более детального учета наличия потоков, передаваемых через mesh-станцию в MR MC WMN, производительность  $c_{n_i, d_u}$  может быть определена из выражения

$$c_{n_i, d_u} = \frac{Y_{d_u}}{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=1}^K Q(n_i, d_u) \lceil x_{n_i, d_u}^v \rceil + 1}, \quad (u = \overline{1, D}), \quad (13)$$

где  $\lceil \cdot \rceil$  – операция округления числа к большему целому.

Кроме того, с целью учета не только самого наличия, но и интенсивности потока значение  $c_{n_i, d_u}$  будет определяться из выражения

$$c_{n_i, d_u} = \left[ \frac{\sum_{v=1}^V x_{n_i, d_u}^v}{\sum_{j=1}^N \sum_{v=1}^V (x_{n_j, d_u}^v Q(n_j, d_u))} \right] Y_{d_u}, \quad (i = \overline{1, N}; u = \overline{1, D}). \quad (14)$$

В ходе решения задачи маршрутизации в качестве критерия оптимальности получаемых решений выберем следующее условие:

$$\min_x \sum_{v=1}^V r^v \left( \sum_{u:Q(n_i,d_u)=1} x_{n_i,d_u}^v + \sum_{i:Q(n_i,d_u)=1} x_{d_u,n_i}^v \right), \quad (15)$$

выполнение которого обеспечивает минимизацию загрузки элементов (станций и доменов) и MR MC WMN в целом.

В зависимости от выбранного варианта использования выражений (3)-(15) оптимизационную задачу можно классифицировать следующим образом:

– (3)-(8), (11), (12), (15) – класс задач линейного программирования (Linear Programming, LP);

– (3)-(6), (9)-(12), (15) – целочисленного линейного программирования (Integer Linear Programming, ILP);

– (4)-(8), (11)-(13), (15) – нелинейного программирования (Nonlinear Programming, NLP);

– (4)-(8), (11), (12), (14), (15) – NLP;

– (4)-(6), (9)-(13), (15) – смешанного целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP);

– (4)-(6), (9)-(12), (14), (15) – MINLP.

## VI. Пример решения задачи маршрутизации в MR MC WMN

Для наглядности получаемых результатов проведем решение задачи многопутевой маршрутизации в MR MC WMN (рис. 1), основываясь на предложенной потоковой модели (3)-(6), (9)-(12), (15). Рассмотрим однопродуктовый случай, когда сеть обслуживает один поток, протекающий, например от одиннадцатой mesh-станции к двадцатой. Условимся, что в рамках рассматриваемой MR MC WMN все mesh-станции используют стандарт IEEE 802.11g с максимальной производительностью каждого домена коллизий на сетевом уровне 24 Мбит/с (табл. 2). На рис. 6 приведено плоское кенигово представление возможной конфигурации MR MC WMN в виде двудольного ориентированного графа, в разрывах дуг которого указаны скорости передачи mesh-станций (Мбит/с) по доменам коллизий, получаемые в соответствии с выражениями (3) и (4).

На рис. 7 и 8 приведены примеры решения задачи маршрутизации при интенсивности потока  $r=13,47$  Мбит/с, поступающего в WMN. Результатом решения являются значения интенсивности потока (Мбит/с), протекающего между mesh-станциями различных доменов коллизий. Значения интенсивностей потоков и их направления указаны на рис. 7 вдоль дуг плоского кенигового представления MR MC WMN.

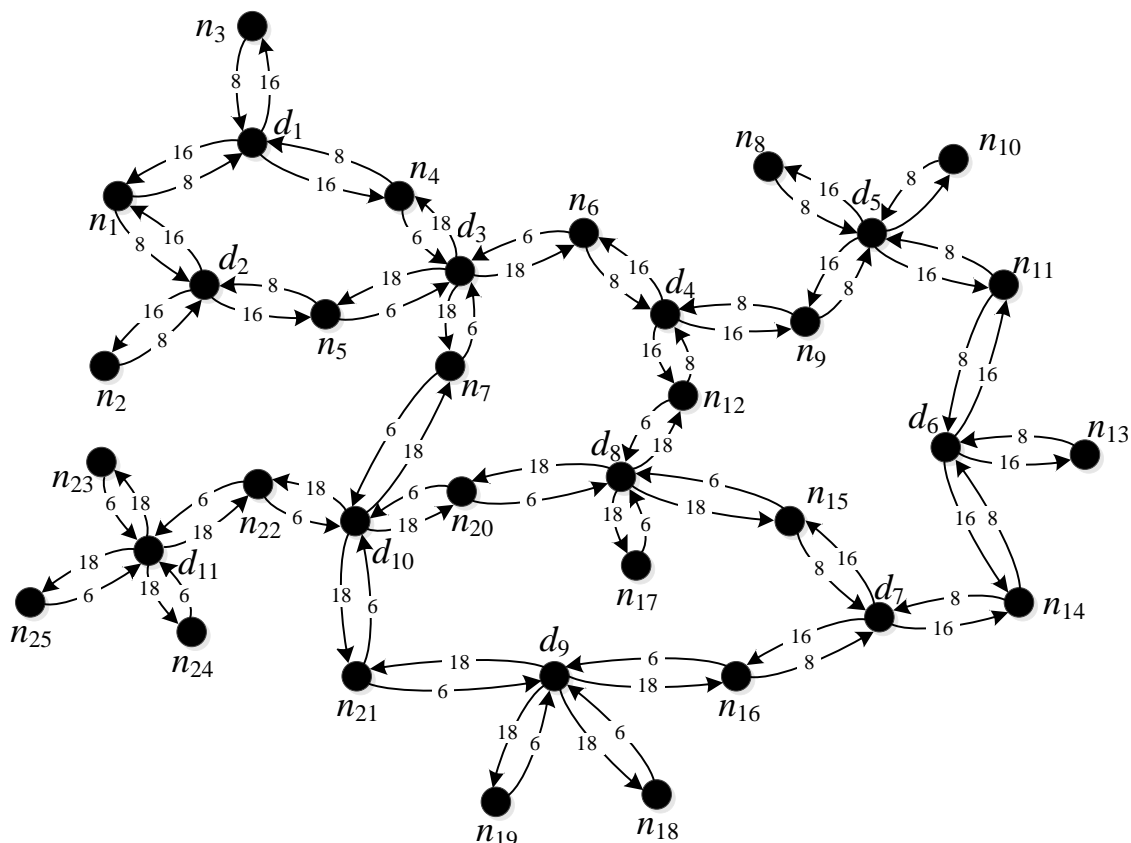


Рис. 6. Плоское кенигово представление конфигурации MR MC WMN, представленной на рис. 1, в виде двудольного ориентированного графа с указанием производительностей mesh-станций (Мбит/с)

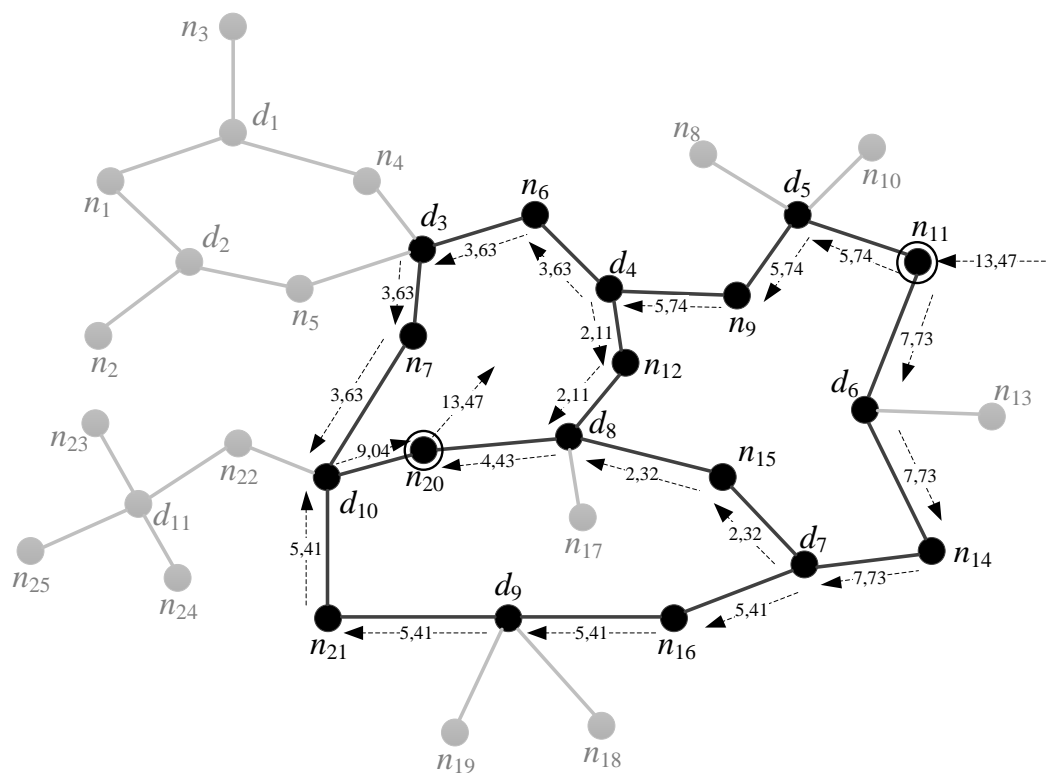


Рис. 7. Пример расчета маршрутов при использовании предложенной потоковой модели, основанной на плоском кениговом представлении mesh-сети

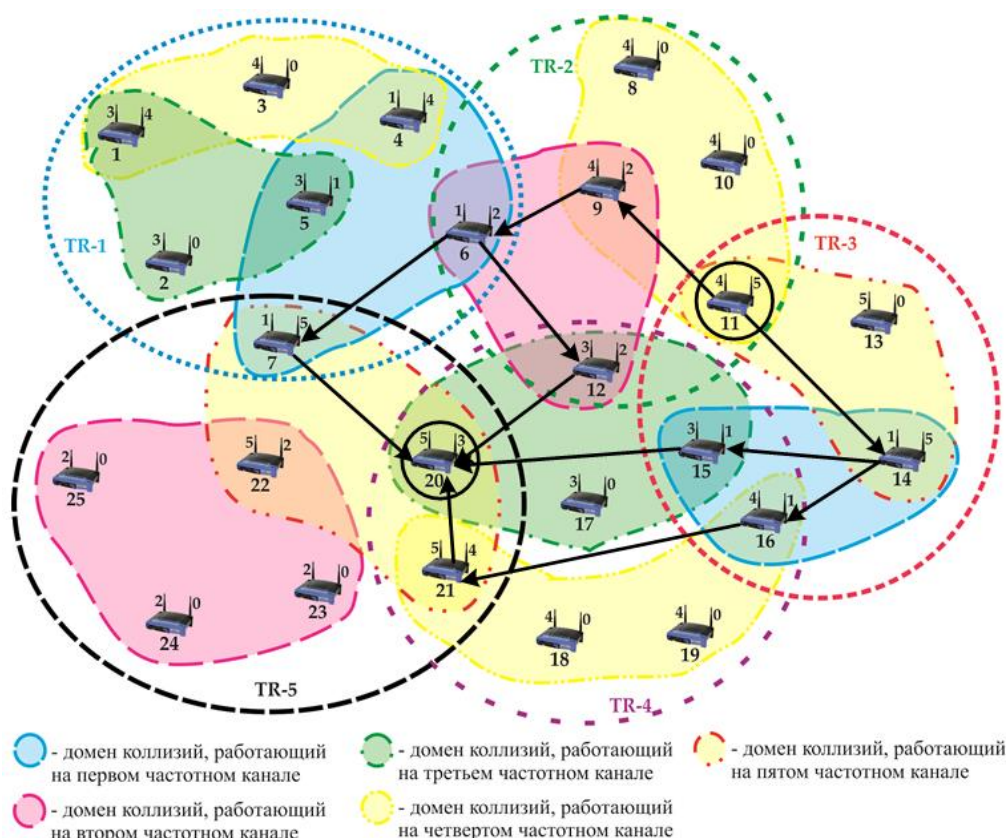


Рис. 8. Пример решения задачи маршрутизации в MR MC WMN

В результате решения задачи многопутевой маршрутизации с использованием предложенной модели (3)-(6), (9)-(12), (15) формировалось четыре маршрута (рис. 7):

маршрут 1:  $n_{11} \rightarrow d_5 \rightarrow n_9 \rightarrow d_4 \rightarrow n_6 \rightarrow d_3 \rightarrow n_7 \rightarrow d_{10} \rightarrow n_{20}$  обслуживает поток с интенсивностью 3,63 Мбит/с;

маршрут 2:  $n_{11} \rightarrow d_5 \rightarrow n_9 \rightarrow d_4 \rightarrow n_{12} \rightarrow d_8 \rightarrow n_{20}$  – поток с интенсивностью 2,11 Мбит/с;

маршрут 3:  $n_{11} \rightarrow d_6 \rightarrow n_{14} \rightarrow d_7 \rightarrow n_{15} \rightarrow d_8 \rightarrow n_{20}$  – поток с интенсивностью 2,32 Мбит/с;

маршрут 4:  $n_{11} \rightarrow d_6 \rightarrow n_{14} \rightarrow d_7 \rightarrow n_{16} \rightarrow d_9 \rightarrow n_{21} \rightarrow d_{10} \rightarrow n_{20}$  – поток с интенсивностью 5,41 Мбит/с.

## Выводы

В работе предложен подход к использованию графов Кенига при моделировании многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11. Это, в свою очередь, позволило более полно и детально описать возможные конфигурации как всей mesh-сети в целом, так и отдельных ее элементов, представленных в виде разнородных вершин графа Кенига. Показано, что предложенный математический аппарат эффективно может быть использован при решении задачи маршрутизации в подобного рода сетях.

Основываясь на плоском кениговом представлении многоканальной многоинтерфейсной mesh-сети, в работе решена задача маршрутизации, которая заключается

в определении тех станций и доменов коллизий, через которые должны быть переданы пакеты от отправителя к получателю, причем таким образом, чтобы межконцевые требования по производительности были удовлетворены. В качестве математической модели маршрутизации была предложена потоковая модель, производящая учет особенностей структурно-функционального построения многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетей – результатов решения задачи распределения частотных каналов, пропускных способностей доменов коллизий, характеристик трафика, порядка обслуживания пакетов на mesh-станциях (беспроводных маршрутизаторах) сети и др.

В рамках предложенной модели использован критерий оптимальности, направленный на минимизацию загруженности многоканальной многоинтерфейсной mesh-сети. Кроме того, в приведенной постановке потоковая модель может быть сформулирована в виде нескольких классов оптимизационных задач в зависимости от количества формируемых путей и степени учета характеристик потоков, направляемых через mesh-станции.

### Список литературы:

1. *Akyildiz I.F., Wang X., Wang W.* Wireless mesh networks: a survey // Computer Networks. – 2005. – Vol. 47, No.2. – P.445–487.
2. *Raniwala A.* Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks / A. Raniwala, K. Gopalan, T. Chiueh // ACM Mobile Computing and Communications Review. – 2004. – Vol. 8. – P. 50-65.
3. *Chiang M.* Balancing Transport and Physical Layers in Wireless Multihop Networks: Joint Optimal Congestion and Power Control / M. Chiang // IEEE Journal on Selected Areas in Commun. – Vol. 23, No. 1. – 2005. – P. 104-116.
4. *Skalli H.* Channel Assignment Strategies for Multiradio Wireless Mesh Networks: Issues and Solutions / H. Skalli, S. Ghosh, S.K. Das, L. Lenzi, M. Conti // IEEE Comm. Magazine. – 2007. – Vol. 45, No. 11. – P. 86-95.
5. *Гаркуша С.В.* Огляд та класифікація протоколів маршрутизації в mesh-мережах стандарту IEEE 802.11 // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ „КПІ”. – 2012. – № 1. – С. 14-23.
6. *Гоголева М.А.* Классификация и анализ методов маршрутизации в mesh-сетях // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 155. – С. 173-185.
7. *Singh K.* Review on Routing Protocols in Wireless Mesh Networks / K. Singh, S. Behal // International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM). – 2013. – Vol. 2, Iss. 2. – P. 143-149.
8. *Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю.* Симплициальная модель оценки структурной сложности телекоммуникационных систем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2003. – Вып. 5 (5). – С. 48-51.
9. *Лемешко А.В.* Оценивание структурного разнообразия телекоммуникационных систем, представленных симплициальными моделями, по информационным показателям // Праці УНДІРТ. Випуск №2 (38). – Одеса: Видання УНДІРТ, 2004. – С. 77-79.
10. *Гаркуша С.В.* Особенности использования гиперграфов при моделировании многоканальных mesh-сетей стандарта IEEE 802.11 // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2013. – Вып. 175. – С. 160-169.
11. *Garkusha S., Garkusha O., Abed A.H.* Features of Use of Hypergraphs in the Simulation of Multi-Channel Mesh-Networks IEEE 802.11// Proceedings of the XII International Conference Mod-

ern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2014), Lviv-Slavske, February 25 – March 1, 2014. – Lviv-Slavske, Ukraine, 2014. – P. 510-512.

12. Зыков А.А. Гиперграфы // Успехи математических наук. – 1974. – № 6 (180). – С. 86-154.

13. Berge C. Graphs and Hypergraphs. – New York: Elsevier, 1973. – 528 p.

14. Berge C. Hypergraphs: The Theory of Finite Sets. – Amsterdam, Netherlands: North-Holland, 1989. – 256 p.

15. Лемешко А.В. Классификация методов распределения частотных каналов в многоинтерфейсных многоканальных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, С.В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 139-149. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112\\_lemeshko\\_classification.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_lemeshko_classification.pdf).

16. Лемешко А.В. Модель структурной самоорганизации многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, М.А. Гоголева // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 83-95. – Режим доступа к журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101\\_lemeshko\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_lemeshko_mesh.pdf).

17. Гаркуша С.В. Разработка и анализ двухиндексной модели распределения частотных каналов в многоканальной mesh-сети стандарта IEEE 802.11 [Электронный ресурс] / С.В. Гаркуша // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 38-57. – Режим доступа до журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_garkusha\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_garkusha_mesh.pdf).

18. Гаркуша С.В. Анализ результатов распределения частотных каналов в многоканальных многоинтерфейсных mesh-сетях стандарта IEEE 802.11 // Цифрові технології: Зб. наукових праць. – 2011. – Вып. 10. – С. 27-42.

19. Recommendation ITU-R M.1450-4. Characteristics of broadband radio local area networks. – Geneva: ITU-T, 2010.

20. Seok Yo. Dynamic constrained multipath routing for MPLS networks / Yo. Seok, Yo. Lee, Ya Choi // Proc. of IEEE ICCCN. Scottsdale. – 2001. – Vol. 2, № 1. – P. 348-353.

21. Wang Y., Wang Z. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering // Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999. – P. 582-588.

22. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гаркуша С.В. Поточковая модель маршрутизации с учетом потерь пакетов на узлах телекоммуникационной сети // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – №2. – С. 52-60.