

# Інфокомунікаційні системи

УДК 621.391

Т.В. Вавенко, Адефисан Феми

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

## ПОТОВОКАЯ МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ С БАЛАНСИРОВКОЙ НАГРУЗКИ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ

Проведено исследование решения задачи маршрутизации с балансировкой нагрузки. Показано, что качество балансировки нелинейно зависит от структурных и функциональных параметров сети, характеристик трафика, а их учет при помощи введения дополнительных условий в модель маршрутизации очень затруднен. Поэтому в работе предложено и обосновано использование модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по показателям качества обслуживания – по средней многопутевой задержке. Использование предложенной модели позволяет уменьшить многопутевую задержку пакетов, минимизировать джиттер, а также улучшить показатели качества обслуживания в целом.

**Ключевые слова:** многопутевая маршрутизация, балансировка нагрузки, качество обслуживания, многопутевая задержка, трафик, коэффициент максимальной загрузки каналов связи, топология.

### Введение

Как показал анализ [1, 2] модернизация телекоммуникационных сетей (ТКС) на сегодняшний день ориентируется на перспективные сетевые решения, которые в себе включает концепция сетей нового поколения (Next Generation Network, NGN). Достаточно актуальными остаются вопросы по обеспечению требуемого уровня качества обслуживания (Quality of Service, QoS) [3, 4]. Высокие значения показателей QoS невозможны без эффективного решения задач сетевого уровня эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМОС), среди которых основной является задача маршрутизации [5, 6].

Протоколы маршрутизации находятся в постоянном развитии и совершенствовании. Исследования показали [7], что использование как однопутевой, так и многопутевой маршрутизации целесообразно с учетом характеристик обслуживаемых потоков (их числа, интенсивности, требования к качеству обслуживания и т.д.). Тем не менее, на сегодняшний день наблюдается тенденция развития по-

добных протоколов в направлении поддержки функций многопутевой маршрутизации. Реализация данной функции на практике позволяет осуществлять балансировку нагрузки на сетевые элементы: маршрутизаторы, каналы связи ТКС – за счет рационального выбора путей прохождения трафика через сеть и распределение трафика по каналам. Применение технологии балансировки нагрузки позволяет эффективно использовать ресурсы сети и оптимизировать решение задачи маршрутизации с учетом количества и производительности маршрутизаторов, структуры сети (ее топологии и пропускных способностей каналов), характеристик трафика, и тем самым обеспечивает улучшение показателей QoS.

Как показал анализ (табл. 1), функции балансировки нагрузки включены в стандартные протоколы маршрутизации, такие как RIP, RIPv2, EIGRP, OSPF, IGRP и др. [8]. При этом спецификация каждого протокола маршрутизации определяет количество используемых им путей по умолчанию, в также характеристику каждого маршрута (с равной или неравной метрикой) [9 – 12].

Таблица 1

Поддержка функций балансировки нагрузки протоколами маршрутизации

Протокол маршрутизации	Балансировка нагрузки	Максимально количество путей при балансировке нагрузки	Характеристика путей
RIP, RIPv2 (Routing Information Protocol)	поддерживается	6	с равной метрикой
IGRP (Interior Gateway Routing Protocol)	поддерживается	6	с равной/неравной метрикой
EIGRP (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol)	поддерживается	6	с равной/неравной метрикой
OSPF (Open Shortest Path First)	поддерживается	16	с равной метрикой

Известно, что эффективность протоколов маршрутизации, и в том числе механизмов балансировки нагрузки, во многом зависит от математических моделей, которые положены в их основу [5 – 7]. Существующие протоколы маршрутизации опираются преимущественно на графовые модели. Однако при решении задач маршрутизации наблюдается тенденция перехода от графовых моделей к потоковым, которые позволяют учитывать мультимедийность и потоковый характер трафика, циркулирующего в современных ТКС. Как показал анализ [7, 10 – 18], исследование и дальнейшее развитие маршрутизации с балансировкой нагрузки невозможно без обоснованной и эффективной математической модели. В результате проведенного анализа математических моделей [7, 10 – 18] для исследования была выбрана одна из наиболее перспективных – потоковая модель многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию минимизации максимального использования каналов ТКС, представленная в [13].

Достоинством модели является соответствие технологии Traffic Engineering (TE) при реализации многопутевой маршрутизации, при этом коэффициент балансировки с ростом загруженности сети также растет линейно [14, 15], что гарантирует отсутствие колебаний в численных значениях основных показателей качества обслуживания. Хотя выбранная модель не положена в основу протокольных решений, ее нередко используют для получения эталонных значений решения задачи маршрутизации при усовершенствовании и настройке существующих протоколов маршрутизации с использованием технологии балансировки нагрузки [13 – 20].

Возникает задача анализа влияния структурных (топология ТКС, связность узлов, степень неоднородности), функциональных (пропускные способности каналов сети, характеристики маршрутизаторов) параметров сети, характеристик трафика (интенсивность, узел отправителя и получателя, длина пакетов, количество потоков, требования к качеству обслуживания) на качество балансировки нагрузки, и, следовательно, на качество маршрутизации.

### 1. Описание потоковой модели многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки

В рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки структура ТКС описывается с помощью графа  $G = (V, E)$ , где  $V$  – это множество узлов сети,  $E$  – множество каналов сети [13]. Для каждой дуги  $(i, j) \in E$  характерна ее пропускная способность  $c_{ij}$ . Каждому трафику из множества  $K$  сопоставлен ряд параметров: пусть  $d_k, s_k, t_k$  – интенсивность  $k$ -го трафика, узел-источник и узел-получатель соответственно. Управляющей переменной служит величина

$x_{ij}^k$ , которая характеризует долю  $k$ -го трафика, протекающего в канале  $(i, j) \in E$ . В соответствии с физической решаемой задачей на переменные  $x_{ij}^k$  накладываются следующие ограничения:

$$0 \leq x_{ij}^k \leq 1. \tag{1}$$

Чтобы не допустить потери пакетов на сетевых узлах и в сети в целом, в модели предусмотрено условие сохранения потока:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 0, & k \in K, i \neq s_k, t_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 1, & k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = -1, & k \in K, i = t_k. \end{cases} \tag{2}$$

В результате исследования выбранной модели установлено [14], что при решении задачи маршрутизации для сетей с полудуплексными и (или) дуплексными каналами связи возникает заикливание пакетов, что является недостатком модели. Предложено решение [14] по усовершенствованию самой модели за счет введения в ее структуру дополнительных нелинейных ограничений, выполнение которых гарантируют отсутствие эффекта заикливания пакетов без снижения качества балансировки:

$$x_{ij}^k \cdot x_{ji}^k = 0, (i, j) \in E, k \in K. \tag{3}$$

Кроме этого, для предотвращения перегрузки в симплексных и дуплексных каналах сети необходимо обеспечить выполнение условий:

$$\sum_{k \in K} \lambda_{ij} d_k x_{ij}^k \leq c_{ij} \alpha, (i, j) \in E, \tag{4}$$

и также для полудуплексных каналов:

$$\sum_{k \in K} \lambda_{ij} d_k x_{ij}^k + \sum_{k \in K} \lambda_{ji} d_k x_{ji}^k \leq c_{ij} \alpha, (i, j) \in E, \tag{5}$$

где  $\alpha$  – динамически управляемый порог загруженности каналов ТКС;  $\lambda_{ij}$  – балансировочный коэффициент канала  $(i, j) \in E$  ( $\lambda_{ij} > 0$ ).

Балансировочный коэффициент вводится в модель с целью оценить влияние изменения структурных и функциональных параметров сети, характеристик трафика на качество балансировки. Значения балансировочного коэффициента будут определяться методом перебора. В ходе решения задачи маршрутизации минимизируется величина  $\alpha$ :

$$\alpha \rightarrow \min, 0 \leq \alpha \leq 1. \tag{6}$$

В рамках рассмотренной потоковой модели (1)–(6) задача поиска множества оптимальных путей сведена к задаче нелинейного программирования по минимизации величины (6) при наличии ограничений (1) – (5). Заметим, что при значении балансировочного коэффициента  $\lambda_{ij} = 1$  модель (1) – (6) сводится к модели, представленной в [13].

## 2. Анализ влияния структурных, функциональных параметров сети, а также характеристик трафика на качество балансировки

При проведении исследования выберем значения одного из основных показателей качества обслуживания, например, многопутевую задержку. Для расчета представим, что  $d(i, j)$  – это задержка в канале  $(i, j) \in E$  ТКС, тогда задержка  $d(p)$  вдоль пути  $p$  из множества путей  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_L\}$ , где  $L$  - количество путей между узлом-отправителем и узлом-получателем, определяется по формуле:

$$d(p) = \sum_{(i,j) \in E} d(i, j). \quad (7)$$

Для расчета межконцевой многопутевой задержки будет использована формула [21, 22]:

$$D(P) = \max_{p_i \in P} \{d(p_i)\}. \quad (8)$$

Для решения поставленной задачи по оценке влияния структурных и функциональных параметров сети, характеристик трафика на качество балансировки нагрузки проведено решение задачи многопутевой маршрутизации для разных исходных данных (топологий ТКС, связности узлов, пропускных способностей каналов сети, характеристик маршрутизаторов, длины пакетов, количества и интенсивности потоков, требований к качеству обслуживания).

В качестве примера рассмотрим решение задачи маршрутизации в рамках модели (1) – (6) для структуры, приведенной на рис. 1. Пусть сеть состоит из 5 узлов и 7 каналов, узел 1 – узел-источник, узел 5 – узел-получатель. На рис. 1 числовые значения в каналах связи указывают на их пропускную способность, измеряемую в 1/с.

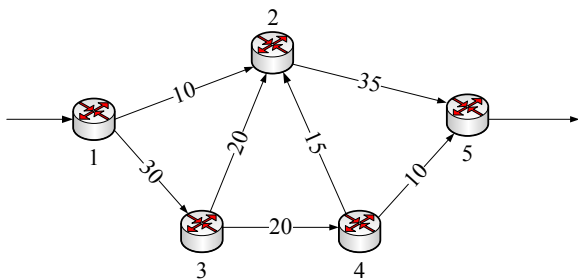


Рис. 1. Исследуемая сетевая структура № 1

Пусть в ТКС поступает трафик интенсивностью 20 1/с. На рис. 2 показаны результаты исследования для отдельного случая, когда значения балансирующего коэффициента разных каналов были равны между собой и изменялись от 0 до 2, так как при  $\lambda_{ij} > 2$  наблюдался резкий рост многопутевой задержки.

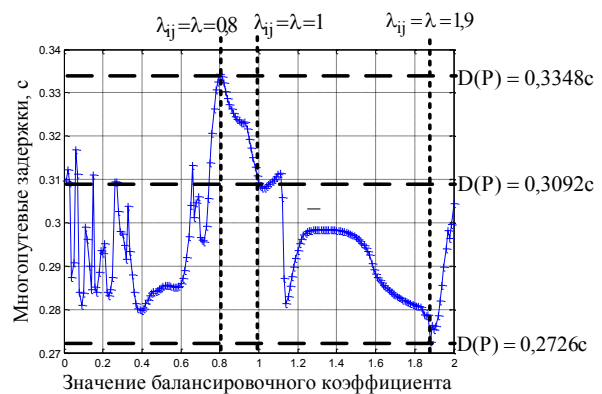


Рис. 2. Оценка влияния изменений балансирующего коэффициента на значения многопутевой задержки

Таким образом, в результате решения задачи маршрутизации видно (рис. 2), что многопутевая задержка нелинейно зависит от изменения значений балансирующего коэффициента. При этом в определенных точках графика значения многопутевой задержки являются экстремальными. Так, в точке  $\lambda_{ij} = \lambda = 0,8$  достигается абсолютный максимум, а в точке  $\lambda_{ij} = \lambda = 1,9$  – абсолютный минимум. Таким образом, в результате решения задачи маршрутизации в рамках модели (1)-(6) для рассмотренных исходных данных при значениях балансирующих коэффициентов  $\lambda_{ij} = \lambda = 1,9$  получаем снижение многопутевых задержек на 11,8% по сравнению с результатами решения задачи маршрутизации с  $\lambda_{ij} = \lambda = 1$ , т.е. в рамках модели маршрутизации, представленной в [13].

Распределение трафика по каналам сети в результате решения задачи маршрутизации в рамках модели (1)-(6) с значениями балансирующего коэффициента  $\lambda_{ij} = \lambda = 1,9$  и  $\lambda_{ij} = \lambda = 1$  приведены на рис. 3. Здесь числовые значения каналов обозначают интенсивности проходящего по ним трафика. Кроме этого, на рис. 3 показаны значения максимального порога загрузки  $\alpha$ , значение многопутевой задержки  $D(P)$ , а также маршрут, для которого она определена.

По полученным на рис. 3 результатам видно, что при разных значениях балансирующего коэффициента получаем разное распределение трафика по каналам, т.е. различную балансировку нагрузки. При этом изменяется значение многопутевой задержки, которая и определяет качество балансировки нагрузки: чем она ниже – тем качество лучше.

Таким образом, для разных исходных данных в результате перебора значений балансирующего коэффициента для каждого канала отдельно были определены оптимальные их значения, которые способствуют максимальному снижению многопутевой задержки.

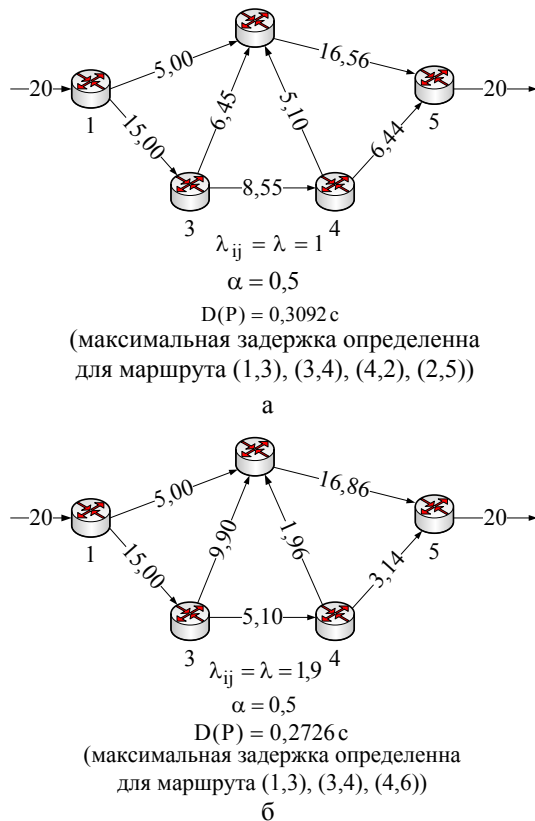


Рис. 3. Сравнительный анализ решения задачи маршрутизации в рамках модели (1) – (6)

В результате проведенного исследования был определен характер зависимости качества балансировки от структурных, функциональных параметров сети и характеристик трафика. Особенности влияния ключевых факторов (изменения интенсивности поступающего в сеть трафика, пропускных способностей каналов ТКС, связности узлов) на качество балансировки, продемонстрируем на примере выбранной ранее структуры ТКС.

**2.1. Исследование влияния изменения интенсивности поступающего в сеть трафика на качество балансировки**

Пусть интенсивность поступающего в ТКС (рис. 1) трафика изменяется от 1 до 20 1/с. Для каждого значения интенсивности определяются свои балансировочные коэффициенты. Значения многопутевой задержки, полученные в результате решения задачи маршрутизации, а также балансировочные коэффициенты для текущих значений интенсивности поступающего в ТКС трафика показаны на рис. 4. Кроме этого, на рис. 4 показан сравнительный анализ многопутевой задержки двух вариантов решений:

**Вариант 1:** значения балансировочного коэффициента постоянны и равны единице ( $\lambda_{ij} = \lambda = 1$ ), что соответствует модели маршрутизации, представленной в [13].

**Вариант 2:** значения балансировочного коэффициента различны для всех каналов и изменяются в пределах  $0,1 < \lambda_{ij} < 2$ .

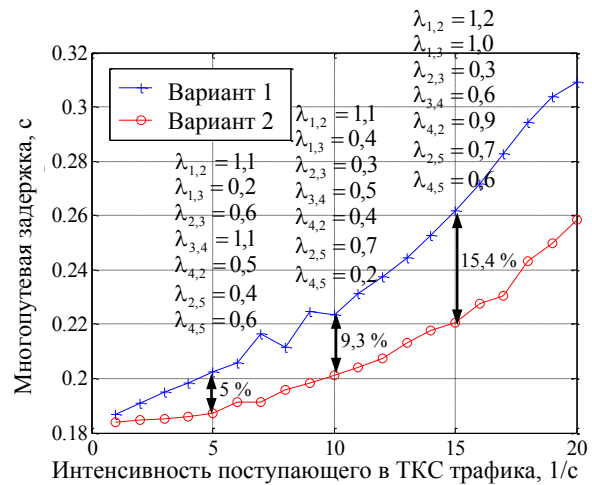


Рис. 4. Исследование влияния изменения интенсивности поступающего в сеть трафика на качество балансировки

В ходе анализа полученных результатов (рис. 4) сделан ряд выводов:

- во-первых, при решении задачи маршрутизации в рамках варианта 2 получено снижение значений многопутевой задержки до 15,4%, поэтому использование подстраиваемого балансировочного коэффициента, а, следовательно, и учет в модели характеристик поступающего в ТКС трафика (интенсивности) эффективен;

- во-вторых, зависимость качества балансировки от изменения интенсивности поступающего в ТКС трафика является нелинейной, о чем свидетельствует характер изменения балансировочных коэффициентов.

Установить аналитическую формулу зависимости балансировочного коэффициента от интенсивности поступающего в ТКС трафика в рамках проведенных исследований не представляется возможным.

**2.2. Исследование влияния изменения пропускных способностей каналов ТКС на качество балансировки**

Для оценки влияния изменения пропускных способностей каналов телекоммуникационной сети на качество балансировки в структуре ТКС (рис. 1) каналам задавались разные значения пропускных способностей. Для примера изменялась пропускная способность лишь канала (2,5), например, в пределах от 18 до 34 1/с. Результаты решения задачи маршрутизации в рамках модели (1) – (6) представлены на рис.5. Здесь же показаны результаты сравнения многопутевой задержки для двух вариантов решения задачи маршрутизации, рассмотренных ранее (вариант 1 и 2).

При анализе полученных результатов (рис. 5) заметим, что при решении задачи маршрутизации в рамках варианта 2 получено снижение значений многопутевой задержки до 19,1%. Т.е. учет в ходе

балансировки функциональных параметров каналов ТКС, а именно их пропускных способностей, позволяет обеспечить улучшение показателей QoS (многопутевой задержки пакетов).

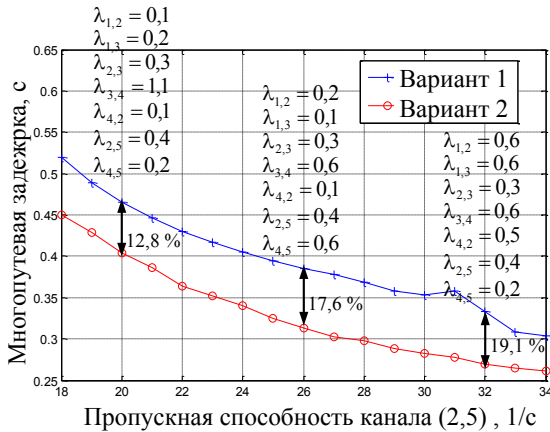


Рис. 5. Исследование влияния изменения пропускных способностей каналов ТКС на качество балансировки

Необходимо заметить, что значения балансирующих коэффициентов при изменении пропускной способности канала связи (2,5) с целью минимизации многопутевой задержки также менялись нелинейно. И при изменении пропускных способностей других каналов, наблюдалась та же ситуация. Таким образом, в результате исследования зависимости качества балансировки от изменения пропускных способностей каналов ТКС, показано, что эта зависимость является также нелинейной, а ее аналитическая формализация очень затруднена.

### 2.3. Исследование влияния изменения связности узлов ТКС на качество балансировки

С целью исследования влияния изменения связности узлов ТКС на качество балансировки задача многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки решалась для разных структур ТКС. В качестве примера приведены две структуры ТКС №2 (рис. 6) и №3 (рис. 7). На рисунках числовые значения каналов обозначают их пропускные способности.

Интенсивность трафика, поступающего в сеть, изменялась, в качестве примера, от 1 до 20 1/с. Решения задачи маршрутизации для сетевых структур №2 и №3 представлены на рис. 8 и 9. На рисунках показаны значения балансирующего коэффициента для текущих интенсивностей поступающего в ТКС трафика. Задача маршрутизации решилась для вариантов 1 и 2, описанных ранее.

Таким образом, в ходе анализа полученных результатов (рис. 8 и 9) сделаны выводы:

- во-первых, для обеих структур решение задачи маршрутизации с настраиваемым балансирующим коэффициентом позволило улучшить многопутевую задержку от 4 до 21%.

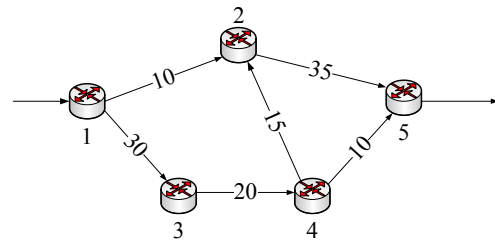


Рис. 6. Исследуемая сетевая структура №2

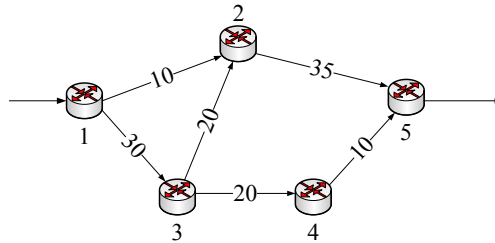


Рис. 7. Исследуемая сетевая структура №3

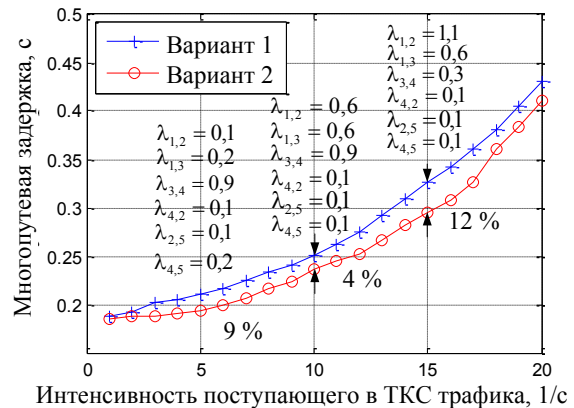


Рис. 8. Решение задачи маршрутизации для структуры №2

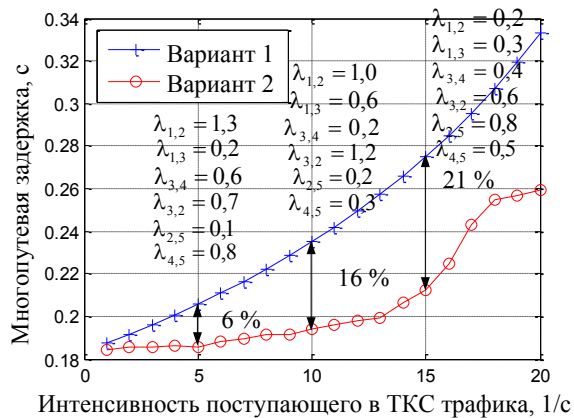


Рис. 9. Решение задачи маршрутизации для структуры №3

– во-вторых, для каждой структуры при изменении интенсивности поступающего в ТКС трафика были получены свои значения балансирующих коэффициентов, которые изменялись нелинейно. Установить аналитическую формулу зависимости балансирующего коэффициента от связности узлов ТКС в рамках проведённых исследований не представляется возможным, как и в предыдущих случаях.

В связи с тем, что аналитически выразить зависимость балансирующего коэффициента в выражениях (4) и (5) затруднено, а задачу перебора его значений в реальном времени решать нецелесообразно, то перспективным является переход к другим критериям при решении задачи маршрутизации, отказавшись от критерия минимизации коэффициента использования каналов связи (6). В результате анализа, был сделан вывод о том, что в основу балансировки нагрузки должны быть положены критерии, которые непосредственно связаны с показателями качества обслуживания (временными, скоростными и показателями надежности). В этой связи была предложена модель маршрутизации с балансировкой нагрузки на основе показателей качества обслуживания.

### 3. Модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по показателям качества обслуживания

Так как, одним из ключевых показателей качества обслуживания является многопутевая задержка, рассмотрим ее в качестве критерия при решении задачи маршрутизации. Для этого в модель (1)-(6) введем дополнительное условие. В рамках применения тензорных подходов [23] с целью устранения контуров (петель) в рассчитываемых маршрутах обслуживания трафика контурные слагаемые по средним задержкам для каждого трафика  $k \in K$  приравняются к нулю:

$$\bar{\tau}_{\text{контг.}}^k = 0, \tag{9}$$

где  $\bar{\tau}_{\text{контг.}}^k$  – вектор контурных задержек, координаты которого определяют сумму задержек вдоль каждого независимого контура в структуре ТКС.

Количество независимых контуров определяется следующим выражением:

$$r = n - m + 1, \tag{10}$$

где  $n$  – количество каналов связи,  $m$  – количество узлов ТКС [23].

В ходе решения задачи маршрутизации минимизируется линейная целевая функция:

$$\min \bar{X}, \tag{11}$$

где  $\bar{X}$  – вектор с координатами  $x_{ij}^k$ .

Введение дополнительного условия (9), отказ от критерия минимизации максимального использования каналов связи (6) и переход к критерию (11) в модели (1) – (6) обеспечивают балансировку нагрузки по многопутевой задержке при решении задачи маршрутизации, что позволяет улучшение ее численные значения.

В результате исследования задача маршрутизации была решена для различных исходных данных (топологии ТКС, связности узлов, степени неоднородности, пропускных способностей каналов сети, интенсивности, узлов отправителя и получателя,

длины пакетов, количества потоков, требования к качеству обслуживания).

Особенности решения задачи маршрутизации в рамках модели (1)-(5), (9), (11) продемонстрированы на трех структурах ТКС: структуре №2 (рис. 10), №1 (рис. 11) и №4 (рис. 12) (порядок структур определен количеством связывающих отправителя и получателя путей – от меньшего к большему):

- структура №2 состоит из 6 каналов связи и 5 узлов, содержит два независимых контура. Количество независимых путей между отправителем и получателем равно трем;
- структура №1 состоит из 7 каналов связи и 5 узлов, содержит три независимых контура. Количество независимых путей между отправителем и получателем равно четырем;
- структура №3 состоит из 8 каналов связи и 5 узлов, содержит четыре независимых контура. Количество независимых путей между отправителем и получателем равно пяти.

Задача маршрутизации была решена для следующих вариантов исходных данных: вариант 1, рассмотренный ранее, и **вариант 3** (решение задачи многопутевой маршрутизации в рамках модели (1)-(5), (9), (11)).

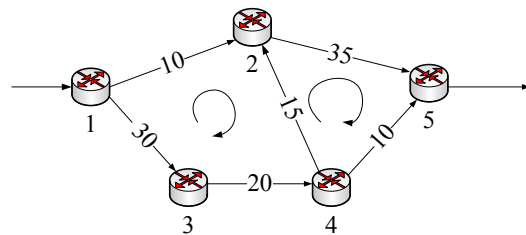


Рис. 10. Исследуемая сетевая структура № 2

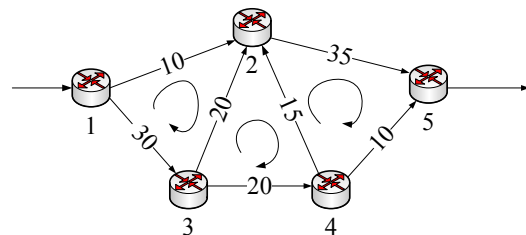


Рис. 11. Исследуемая сетевая структура № 1

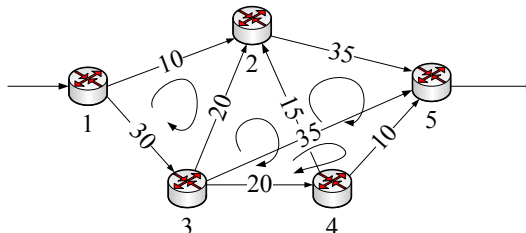


Рис. 12. Исследуемая сетевая структура № 4

В структуру №1 поступал трафик с интенсивностью от 1 до 25 1/с, в структуру №2 – от 1 до 37 1/с, в структуру №3 – от 1 до 38 1/с. Результаты ре-

шення задачі маршрутизації представлені на рис. 13, а саме порівняння вигришів по багатопутовій затримці при розв'язанні в межах варіантів 1 і 3 в залежності від зміни інтенсивності навантаження в мережу трафіка.

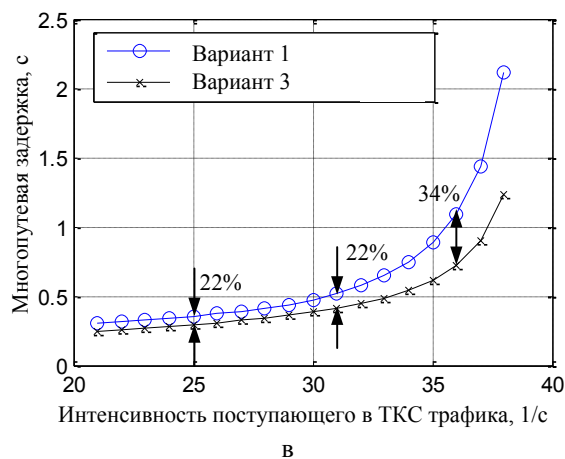
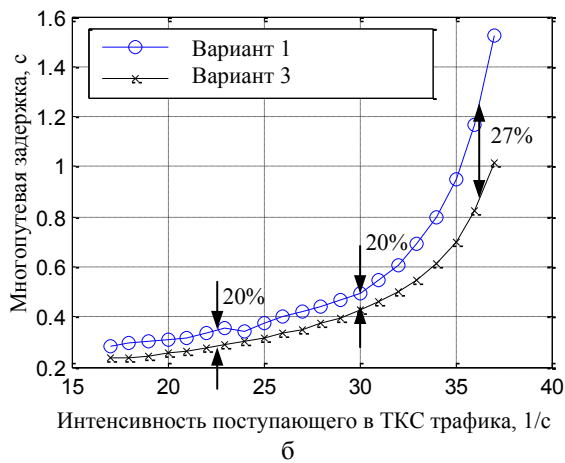
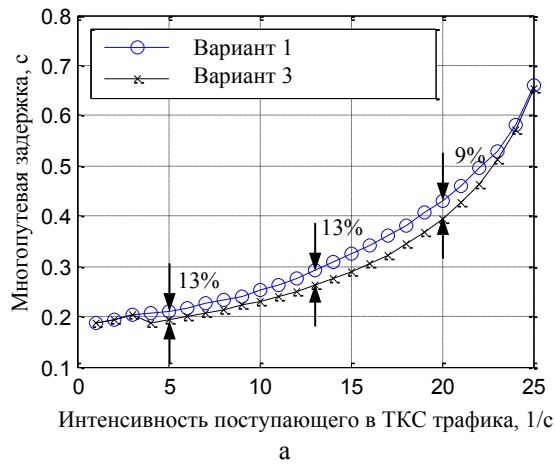


Рис. 13. Результати порівняння розв'язання задачі маршрутизації в межах варіантів 1 і 3 для структур №2 (а), №1 (б), №4 (в)

Таким чином, у всіх випадках при розв'язанні задачі маршрутизації в межах варіанта 3 були отримані вигриші по багатопутовій затримці порівняно з результатами розв'язання задачі маршрутизації в межах варіанта 1, тобто при балансуванні

навантаження за критерієм мінімізації коефіцієнта використання каналів зв'язу. Так, для структури ТКС № 2 з трьома шляхами між отримувачем і відправителем вигриш склав в середньому 5-13% (рис. 13, а), для структури ТКС №1 з чотирма шляхами між отримувачем і відправителем вигриш склав в середньому 15-27% (рис. 13, б), для структури ТКС №4 з п'ятьма шляхами між отримувачем і відправителем вигриш склав в середньому 20-34% (рис. 13, в).

Як показав аналіз, при розв'язанні задачі маршрутизації в межах моделі (1) – (5), (9), (11) було суттєво зменшено багатопутову затримку. Крім цього, розв'язання задачі маршрутизації за показниками якості обслуговування дозволяє отримати однакові значення середніх затримок вздовж шляхів, що сприяє мінімізації джиттера пакетів, обумовленого реалізацією багатопутової стратегії маршрутизації.

При цьому було помічено, що для більш зв'язної топології ТКС з ростом числа шляхів проходження трафіка між відправителем і отримувачем, спостерігалося збільшення вигришу по середній багатопутовій затримці при розв'язанні задачі маршрутизації в межах моделі за показниками якості обслуговування (1) – (5), (9), (11).

## Висновки

З метою оцінки впливу структурних, функціональних характеристик мережі, а також характеристик трафіка в роботі проведено дослідження потокової моделі маршрутизації з балансуванням навантаження за коефіцієнту максимального використання. Було показано, що якість балансування при розв'язанні задачі маршрутизації нелінійно залежить від перерахованих факторів, а врахування їх при допомозі формалізації і введення додаткових умов в модель маршрутизації не представляється можливим.

Поэтому було обґрунтовано використання в моделі маршрутизації критерію, пов'язаного з показниками якості обслуговування. В зв'язі з цим в модель були введені додаткові умови (9), які забезпечили балансування навантаження по середній багатопутовій затримці.

Модель маршрутизації за показниками якості обслуговування була проаналізована для різних структур ТКС. Використання запропонованих рішень дозволило покращити значення багатопутової затримки від 5-13% до 20-34%. Крім того з ростом зв'язності мережі вигриш по середній багатопутовій затримці збільшувався.

## Список літератури

1. NGN: принципи побудови і організації / Під ред. Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 400 с.
2. Y.2001. ITU-T. Recommendation Y.2001: General overview of NGN [Text] / ITU-T. – Geneva, 2004. – 18 p.

3. Вегенія Ш. *Качество обслуживания в сетях IP: пер. с англ. / Ш. Вегенія.* – М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. – 386 с.

4. *Контроль качества в телекоммуникациях и связи. Обслуживание, качество услуг, бизнес-управление / А.В. Засецкий, А.Б. Иванов, С.Д. Постников, И.В. Соколов.* – М.: Syrus Systems, 2003. – 440 с.

5. Medhi D. *Network routing: algorithms, protocols, and architectures [Text] / D. Medhi, K. Ramasamy.* - Morgan Kaufmann: Elsevier Digital Press, 2007. – 788 p.

6. *Остерлох Х. Маршрутизація в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка / Х. Остерлох.* – СПб.: BHV. – СПб., 2002. – 512 с.

7. Лемешко А.В. *Анализ решений задач однопутевой и многопутевой маршрутизации многопоточкового трафика в телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Системи обробки інформації.* – Вип. 8(98). – 2011. – С. 224-228.

8. Wendell Odum. *CISCO Официальное руководство по подготовке к сертификационным экзаменам CCENT/CCNA ICND1. Пер. с англ. / Odum Wendell.* – М.: Издательский дом «Вильямс», 2010. – 670 с.

9. Fortz B. *Traffic engineering with traditional IP routing protocols / B. Fortz, J. Rexford, M. Thorup // Communications Magazine IEEE.* – 2002. – 40(10). – p. 118-124.

10. Merindol P. *Improving Load Balancing with Multipath Routing / P. Merindol, J.-J. Pansiot, S. Cateloin // 2008 Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks.* – 2008. – P. 1-8.

11. *Overview and principles of internet traffic engineering, RFC 3272 [Электронный ресурс] / D. Awduche, A. Chiu, A. Elwalid, I. Widjaja, X. Xiao.* – 2002. – Режим доступа: <http://tools.ietf.org/html/rfc3272>.

12. *Profilebased routing and traffic engineering / S. Suri, M. Waldvogel, D. Bauer, P.R. Warkhede // Computer Communications.* – 2003. – № 4(26). – P 351–365.

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

14. Лемешко А.В. *Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Проблемы телекоммуникаций.* – 2012. – № 1 (6). – С. 12 – 29. – Режим доступа к статье: [http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121\\_lemeshko\\_multipath.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf).

15. Лемешко О.В. *Результаты порівняльного аналізу потокових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах / О.В. Лемешко, О.А. Дробот, Д.В. Симоненко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Вип. 1(13), 2007.* – С. 66-69.

16. Wang Y. *Internet traffic engineering without full mesh overlaying / Y. Wang, Z. Wang, L. Zhang // Proc. of INFOCOM'2001.* – 2001. – P. 565-571.

17. Méridol P. *Improving Load Balancing with Multipath Routing / P. Méridol, J. Pansiot, S. Cateloin // Proc. of the 17th International Conference on Computer Communications and Networks, IEEE ICCCN 2008.* – 2008. – P. 54-61.

18. *Robust Routing vs Dynamic Load Balancing: a Comprehensive Study and New Directions / P. Casas, F. Larroca, J.L. Rougier, S. Vaion // Proc. of 7th International Workshop on the Design of Reliable Communication Networks: Washington D.C., United States.* – 2009. – P. 123-130.

19. Pant, D. *k-Splitting of Traffic for Minimization of Delay, Congestion Control and Optimum Network Utilization / D. Pant, S.C. Dimri // International Transactions in Mathematical Sciences and Computer.* – 2010. – № 1, V.3. – P. 93-102.

20. Hashimoto M. *Partial Traffic Engineering over Cost Metric Network and Analysis on Its Oversubscription Capability / M. Hashimoto., A. Fukuda // Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT), December Edition.* – 2011. – p. 9-14.

21. Chen J.-C. *Multipath Routing for Video Unicast over Bandwidth-Limited Networks Department of Computer Science / J.-C. Chen, S.H. Chan // Proc. of GLOBECOM'01: San Antonio, Texas – Vol.3.* – 2001. – P. 1963-1997.

22. Mao S. *On minimizing end-to-end delay with optimal traffic partitioning / S. Mao, S.S. Panwar, Y.T. Hou // IEEE Transactions on vehicular technology.* – Vol. 55, No.2. – 2006. – P. 681-690.

23. Лемешко А.В. *Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной / А.В. Лемешко // Праці УНДІРТ. Вип. №4 (40).* – Одеса: Видання УНДІРТ, 2004. – С. 12-18.

Поступила в редколлегию 23.10.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, доц. О.Ю. Евсеева, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### ПОТОВОКА МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦІЇ З БАЛАНСУВАННЯМ НАВАНТАЖЕННЯ ПО ПОКАЗНИКАХ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ

Т.В. Вавенко, Адефісан Фемі

Проведено дослідження розв'язання задачі маршрутизації з балансуванням навантаження. Показано, що якість балансування нелінійно залежить від структурних і функціональних параметрів мережі, характеристик трафіку, і їх врахування за допомогою введення додаткових умов в модель маршрутизації дуже затруднене. Тому в роботі запропонована та обґрунтована модель маршрутизації з балансуванням навантаження за показниками якості обслуговування (за середньою багатошляховою затримкою). Використання запропонованої моделі дозволяє зменшити багатошляхову затримку пакетів, мінімізувати джиттер, а також поліпшити показники якості обслуговування в цілому.

**Ключові слова:** багатошляхова маршрутизація, балансування навантаження, якість обслуговування, середня затримка, трафік, коефіцієнт максимального завантаження каналів зв'язку, топологія.

### FLOW MODEL OF LOAD BALANCING ROUTING WITH QUALITY OF SERVICE PARAMETERS

T.V. Vavenko, Adefisan Femi

In the paper we have investigated the problem of routing with load balancing. It is shown that the quality of balancing depends nonlinearly on the structural and functional parameters of the network, and the characteristics of the traffic, and their account with the introduction of additional conditions into the model routing is very difficult. Therefore, in the paper proposed a model the load-balanced routing on other criteria - quality of service (average delay). The use of the proposed model can reduce the average packet delay, minimize jitter, and improve the quality of service as a whole.

**Keywords:** multipath routing, load balancing, quality of service, average delay, the traffic, coefficient of maximum link utilization, topology.