

# Разработка механизма передачи данных большого объема в программно-конфигурируемых сетях

© А.Н. Носков

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

г. Ярославль

[anton.noskov@gmail.com](mailto:anton.noskov@gmail.com)

## Аннотация

Цель данной работы – разработать единый механизм адаптивной маршрутизации трафика различного рода, опираясь на текущие требования к качеству предоставления сервисов.

Программное конфигурирование сети – это технологии будущего. Современная тенденция развития систем связи постоянно подтверждает этот факт. Однако на сегодняшний день применение этой технологии в ее текущем виде оправдано лишь в больших сетях технологических гигантов и операторов связи.

К настоящему времени создано большое количество динамических протоколов маршрутизации трафика в сетях связи. Наша задача создать такое решение, которое сможет использовать возможности каждого узла принимать решение о передаче информации всеми возможными способами для каждого типа трафика.

Достижение поставленной цели возможно путем решения задачи разработки обобщенной метрики, подробно характеризующей каналы связи между устройствами в сети и задачи разработки механизма адаптивного перестроения логической топологии сети (управления маршрутами) для обеспечения качественной работы всей сети в целях удовлетворения текущим требованиям на качество предоставления того или иного вида сервиса.

## Введение

Современное общество живет в эпоху стремительного развития вычислительной техники. По прогнозам аналитиков, телекоммуникационная отрасль в недалеком будущем постепенно перейдет к концепции объединения всех устройств планеты в единую вычислительную сеть связи, основная задача которой – качественное предоставление сервисов любого рода. Различные сервисы – это

различные типы трафика (реального / не реального времени), качество передачи которых на данный момент регламентируется в рекомендациях сектора телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т) [1,2]. В связи с этим встает вопрос о необходимости наличия единого механизма управления трафиком в объединенных сетях связи, предоставляющих различные типы сервисов.

На сегодняшний день создано большое количество динамических протоколов маршрутизации трафика в сетях связи. В качестве примера можно привести динамические протоколы внутреннего шлюза EIGRP и OSPF, установленные почти на всех современных сетевых маршрутизаторах, протоколы NICE, ZigZag со структурированным представлением сети, наиболее часто используемые в пиринговых P2P-сетях. Все они обеспечивают оптимальную маршрутизацию трафика по тому или иному признаку, полагаясь на конкретный набор базовых рабочих характеристик, описывающих каналы между узлами связи. Но ни один из них не обладает гибким механизмом управления маршрутами, опираясь на текущие потребности всей системы связи в целом. К примеру, протоколы NICE и ZigZag, применение которых оправдано в задачах обеспечения оптимальной маршрутизации трафика реального времени, не могут, в свою очередь, обеспечить оптимальную маршрутизацию больших объемов документальных данных, качество передачи которых не сильно зависит от задержек на каналах связи [4]. Протоколы EIGRP и OSPF, в свою очередь, принято считать универсальными при решении задач передачи трафика любого вида, однако при создании таблиц маршрутизации они используют скудный по сегодняшним меркам набор первичных статических рабочих характеристик (статические значения, принятые для каналов различного типа, т.е. не вычисляются динамически), описывающих каналы связи. Помимо всего прочего, их применение в P2P-сетях является неоправданным по причине больших требований к вычислительным устройствам, на которых они работают. Всё же, это специализированные протоколы, создававшиеся для работы на специализированных сетевых

---

Труды XVII Международной конференции DAMDID/RCDL'2015 «Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных», Обнинск, 13-16 октября 2015

устройствах. Протокол MPLS был одним из первых протоколов, созданных для решения проблем адаптивной маршрутизации. Его механизмы в полной мере могут удовлетворить текущие потребности в грамотном перераспределении потоков данных. Однако данный протокол требует от сетевых специалистов больших навыков в его настройке и не обладает автоматизированным механизмом распределения потоков согласно текущим потребностям сети [5].

Программное конфигурирование сети связи можно назвать технологией будущего. Современная тенденция развития систем связи постоянно подтверждает этот факт. Однако на сегодняшний день применение этой технологии в ее текущем виде оправдано лишь в больших сетях технологических гигантов и операторов связи. Но, позаимствовав основные принципы работы программно-конфигурируемых сетей (централизованное управление, виртуализация сетевой функции и т.д.) и спроецировав их на ограниченное количество самостоятельных устройств, с единой политикой маршрутизации трафика, можно добиться гибкости в предоставлении сервисов различного рода [6]. Всё дальнейшее рассмотрение будет спроецировано на совокупности устройств, представляющих собой P2P систему связи.

Цель данной работы – разработать единый механизм адаптивной маршрутизации трафика различного рода, опираясь на текущие требования к качеству предоставления сервисов, регламентируемые МСЭ-Т [2]. Достижение поставленной цели возможно путем решения задачи разработки обобщенной метрики, подробно характеризующей каналы связи между устройствами в сети и задачи разработки механизма адаптивного перестроения логической топологии сети (управления маршрутами) для обеспечения качественной работы всей сети в целях удовлетворения текущим требованиям на качество предоставления того или иного вида сервиса.

Таблица маршрутизации – один из базовых элементов любого протокола маршрутизации трафика. Она регламентирует основные правила, на которые опирается сетевая функция при передаче трафика. Каждое сетевое устройство использует таблицу маршрутизации, в которой отражена топология сети на данный момент времени. Базовая единица представления таблицы маршрутизации – маршрутная информация (маршрут). Маршрут, как принято считать, состоит из четырёх основных частей:

- адрес (и маску) сети или узла назначения;
- шлюз, обозначающий адрес маршрутизатора в сети, на который необходимо отправить пакет, следующий до указанного адреса назначения;
- интерфейс (в зависимости от системы, это может быть порядковый номер, GUID или символьное имя устройства);
- метрику — числовой показатель, задающий предпочтительность маршрута. Чем меньше

число, тем более предпочтителен маршрут (интуитивно представляется как расстояние).

## Разработка метрики маршрута

Метрика маршрута – важнейшая часть любого протокола маршрутизации, являющаяся условием добавления того или иного набора маршрутов в таблицу маршрутизации. Чем лучше метрика, тем больше вероятность того, что сетевое устройство примет решение отправить пакет по маршруту, который она характеризует. Современные протоколы маршрутизации при вычислении метрик маршрутов часто опираются на использование до трех основных параметров, регламентируемых МСЭ-Т. Это процент потерянных пакетов (IPLR) на сквозном канале между двумя устройствами в сети, полоса пропускания (Bandwidth) и задержка при передаче сетевых пакетов (IPTD) [1]. Каждый из них по тем или иным причинам оказывает непосредственное влияние друг на друга. Данные параметры дают лишь общую оценку каналов связи, а изменения их значений могут являться лишь следствием влияния других сопутствующих факторов. Учет таких факторов в будущем поможет создавать наиболее подробную картину состояния связей в сети и всей системы в целом.

В качестве одного из таких факторов можно считать загруженность (Load) узлов связи (с учетом загруженности его отдельных вычислительных модулей, запаса оперативной памяти и т.д.), которые будут заниматься обработкой пакетов, отправленных по связанному с ним маршруту. Обратный к загруженности параметр – вычислительная эффективность. Проводимые исследования показывают, что учет данного параметра позволит в перспективе снизить вероятность потери пакетов на канале связи и, как следствие, задержки при передаче трафика с подтверждением доставки (сервисы обмена файлами).

Для получения информативной картины, характеризующей систему связи, введем интегральную метрику  $W_{(i,j)}$ , учитывающую четыре параметра: процент потерянных пакетов, полосу пропускания, задержку между узлами  $i$  и  $j$  и вычислительную эффективность узла связи  $j$ , задача которого заключается в обработке трафика от узла  $i$ .

Рассмотрим сеть связи, состоящую из  $N$  устройств. Численные значения метрики  $W_{(i,j)}$  можно представить в виде матрицы смежности  $AW$  как:

$$AW = \begin{pmatrix} W_{1,1} & \cdots & W_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N,1} & \cdots & W_{N,N} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Стоит отметить, что матрица параметров  $AW$  не является симметричной ( $W_{i,j} \neq W_{j,i}$ ).

Минимизация некоей целевой функции  $W(i,j)$ , на которую могут быть наложены несколько ограничений или предельных значений, называется многокритериальной оптимизацией. Главная возникающая сложность в решении задач такого

рода – неоднозначность оптимального решения в точке, где один из критериев достигает своего максимума, а другой может быть очень далек не только от максимума, но и даже от какой-либо приемлемой величины. Свертка данных метрики методом «идеальной точки» требует одинаковой размерности всех величин. Для этого зададим характеристики канала в следующем виде:

- для количества потерянных пакетов

$$P_{i,j} \rightarrow \min, P_{i,j} = \left(1 - \frac{N_{i,j}}{M_{i,j}}\right), \quad (2)$$

где  $N_{i,j}$  – количество принятых пакетов,  $M_{i,j}$  – количество переданных пакетов и  $M_{i,j} > 0$

- для времени задержки сигнала

$$D_{i,j} \rightarrow \min, D_{i,j} = \left(1 - \frac{t_{min}}{t_{i,j}}\right), \quad (3)$$

где  $t_{min}$  – минимальное значение задержки в матрице смежности, и  $t_{min}, t_{i,j} > 0$

- для ширины полосы пропускания

$$G_{i,j} \rightarrow \min, G_{i,j} = \left(1 - \frac{B_{i,j}}{B_{max}}\right), \quad (4)$$

где  $B_{max}$  – максимальное значение ширины полосы пропускания в матрице смежности.

- для вычислительной эффективности узла-обработчика информации

$$CE_j \rightarrow \max, CE_j = \left(1 - \frac{L_j}{L_{jmax}}\right), \quad (5)$$

где  $L_{jmax}$  – максимальное значение загрузки узла связи в матрице смежности.

Таким образом, метрика на основе четырех параметров будет иметь следующий вид:

$$W(i, j) = \sqrt[4]{X_1(P_{i,j})^2 + X_2(D_{i,j})^2 + X_3(G_{i,j})^2 + X_4\left(\frac{1}{CE_j}\right)^2}, \quad (6)$$

где  $X_1, X_2, X_3, X_4$  – весовые коэффициенты, изменяющиеся в диапазоне от 0 до 1, и их сумма должна быть равна единице:

$$\begin{cases} X_1 + X_2 + X_3 + X_4 = 1 \\ X_1 \leq 1 \\ X_2 \leq 1 \\ X_3 \leq 1 \\ X_4 \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

Варьируя значения весовых коэффициентов в метрике  $W(i, j)$ , мы, тем самым, создаем аппарат для управления значимостью того или иного параметра метрики в итоговой оценке канала передачи данных от узла  $i$  к узлу  $j$ .

С математической точки зрения в качестве «идеальной» выбирается точка с координатами, соответствующими  $t_{min}, P_{min}, B_{max}, CE_{max}$  (или  $L_{min}$ ) при фиксированных весовых коэффициентах  $X_1, X_2, X_3, X_4$ .

В реальности, с учетом динамики работы всей системы связи, выбор весовых коэффициентов обусловлен характером первостепенных типов

трафика, обеспечивающих предоставление первостепенных сервисов.

МСЭ-Т в рекомендации [2] регламентирует пять основных классов качества предоставления сервисов (IP QoS), к которым можно отнести систему связи. Сети класса 0 наиболее требовательны к значениям рабочих характеристик каналов связи. Как правило, это сети, обеспечивающие предоставления сервисов реального времени, наиболее чувствительные к задержкам (VoIP, видеоконференцсвязь, онлайн игры и т.д.). В настоящее время нет единой концепции к построению систем и сетей связи, обеспечивающих предоставление всех сервисов с наивысшим качеством [7]. В связи с этим возникает необходимость в разработке гибкого механизма маршрутизации трафика отдельно выбранного сервиса с учетом текущих возможностей системы связи и требований на качество его предоставления. Качество предоставления сервисов неразрывно связано с основными параметрами, фигурирующими в метрике  $W(i, j)$ . Основная идея разработанного механизма обеспечения гибкой эффективной маршрутизации заключается в манипуляции весовыми коэффициентами таким образом, чтобы добиваться наилучших возможных значений рабочих характеристик, определяющих класс IP QoS. В реалиях программно-конфигурируемых сетей возможность реализация такого механизма наиболее перспективна. Ядром такой сети является управляющее устройство – программный контроллер, управляющий структурой сети [6]. В данном случае – это устройство, способное оптимально подбирать весовые коэффициенты метрики  $W(i, j)$ .

МСЭ-Т в рекомендации [3] регламентирует пять основных классов качества предоставления сервисов (QoS), к которым можно отнести систему связи. Диапазоны значений, присущие основным трем классам представлены в таблице 1.

Таблица 1 Классы качества обслуживания

| Параметр рабочей характеристики сети | Классы QoS           |                      |                      |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                      | Класс 0              | Класс 1              | Класс 2              |
| <b>IPTD</b>                          | 100 мс               | 400 мс               | 100 мс               |
| <b>IPDV</b>                          | 50 мс                | 50 мс                | Н                    |
| <b>IPLR</b>                          | 1 x 10 <sup>-3</sup> | 1 x 10 <sup>-3</sup> | 1 x 10 <sup>-3</sup> |
| <b>IPER</b>                          | 1 x 10 <sup>-4</sup> | 1 x 10 <sup>-4</sup> | 1 x 10 <sup>-4</sup> |

## Разработка алгоритма маршрутизации

Качество предоставления сервисов неразрывно связано с основными параметрами, фигурирующими в метрике  $W(i,j)$ . Основная идея разрабатываемого алгоритма обеспечения гибкой эффективной маршрутизации заключается в манипуляции весовыми коэффициентами метрики (2.1) таким образом, чтобы добиваться наилучших возможных значений рабочих характеристик, определяющих класс QoS.

В таблице 2 представлен набор весовых коэффициентов, оказывающих непосредственное влияние на качество передачи соответствующего вида трафика[3].

Таблица 2 Влияние весовых коэффициентов на определенный тип трафика

| Тип трафика        | $X_2, X_3$      | $X_2, X_4$     | $X_3$         | $X_1, X_3, X_4$       |
|--------------------|-----------------|----------------|---------------|-----------------------|
|                    | <i>Задержка</i> | <i>Джиттер</i> | <i>Полоса</i> | <i>Потеря пакетов</i> |
| Реального времени  | +               | +              | +             | +                     |
| Обмена документами |                 |                | +             | +                     |
| Сигнализации/WEB   |                 |                |               | +                     |
| Потоковое видео    |                 |                | +             |                       |

На базе программно-конфигурируемых сетей, возможность реализации такого механизма наиболее перспективна. Ядром такого сети является управляющее устройство – программный контроллер, определяющий структуру сети. В данном случае – это устройство, способное гибко подбирать весовые коэффициенты метрики  $W(i,j)$ , опираясь на текущие возможности системы.

Далее приведем блок-схему разработанного алгоритма (рис. 1) и описание работы его функциональных блоков.

Работа алгоритма начинается с определения базовых значений весовых коэффициентов метрики. Для систем общего пользования, которые одновременно требуют равноправного вклада каждого из первичных параметров метрики, базовые коэффициенты можно задавать равнозначными. При приоритизации конкретного вида трафика выбор значений весовых коэффициентов может определяться согласно таблице 2, учитывающей их взаимное влияние на качество предоставления этого трафика.

Параллельно запускается процесс, отвечающий за вычисление первичных характеристик, определяющих состояние всех существующих каналов связи.

Полученные результаты поступают в блок «Вычисления значений метрики  $W(i,j)$ ». В нем по формуле (6) производится вычисление

соответствующих значений метрики для каждого канала. Значения записываются в матрицу смежностей  $AW$ , используемую для определения стоимости маршрутов таблиц маршрутизации.

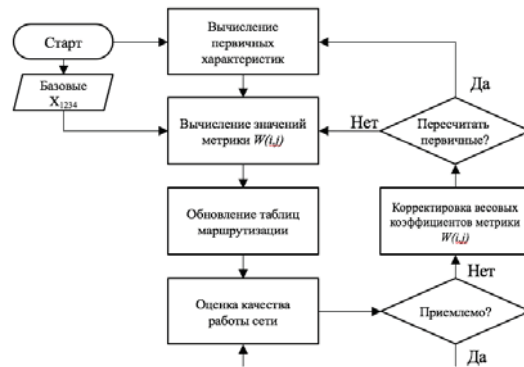


Рис. 1. Блок-схема разработанного алгоритма

Рекурсивность алгоритма позволяет добиваться постоянного улучшения качества работы сети, путем проверки текущих значений рабочих характеристик сети на соответствие текущим требованиям, возлагаемым на всю систему связи в целом. В варианте несоответствия значений рабочих характеристик заданным требованиям к системе связи, возможно, при необходимости, производить корректировку значений весовых коэффициентов, с целью настроить текущую топологию для работы с максимальной эффективностью.

Учитывая, что изменение значений может влиять на текущие значения первичных характеристик каналов связи, возможно осуществлять пересчет метрик, с целью поддержки актуальности характеристик каналов. Принятия решений по пересчету первичных параметров сети и непосредственной корректировке значений весовых коэффициентов метрики – основная задача контроллера программно-конфигурируемой сети. В реальности подбор значений весовых коэффициентов не тривиальная задача, поскольку, учитывая динамику работы IP-систем связи, нет четких правил по ее управлению, например, в случае возникновения непредвиденных ситуаций. Работа контроллера представляет собой интеллектуальную систему, которая, принимая во внимание текущее состояние сети, способна управлять всей сетью с целью достижения требуемых наилучших результатов передачи трафика. Разработанный алгоритм дает необходимый инструмент для упрощения управления системой связи, путем манипуляции весовыми коэффициентами метрики (6), тем самым сводя задачу к подбору их «наилучших» значений.

В следующем пункте будет рассмотрен процесс реализации разработанного алгоритма и произведен его анализ и сравнение с общепризнанными аналогами.



## Разработка имитационной модели

В процессе разработки была создана имитационная модель Р2Р-сети, состоящая из 18 узлов. Первичные параметры, характеризующие разработанную метрику, задавались с условием достижимости критических ситуаций, разрешение которых возможно путем логического перераспределения потоков данных. Задача, решаемая системой связи, сводилась к обеспечению наилучшего качества передачи потока данных высокой плотности из сети А в сеть В через транзитную сеть С, состоящую, в основном, из каналов с низкой пропускной способностью (рис.1).

В качестве эталонных алгоритмов маршрутизации трафика были выбраны алгоритмы OSPF и EIGRP, оперирующие лишь численными заданными значениями полосы пропускания и задержки на каналах связи.

В ходе проведенных исследований были получены значения задержки, проценты потерянных пакетов и джиттера для эталонных алгоритмов OSPF и EIGRP. После, в процессе установления соединения, из значений метрики  $W_{(i,j)}$  была составлена матрица смежностей, описывающая текущее состояние всей системы связи при заданных первоначальных коэффициентах, равных  $X_{1234} = 0.25$ , гарантирующих равнозначный вклад каждого из основных параметров метрики. В процессе моделирования было выявлено, что средняя задержка по отношению к OSPF снизилась на 34%, к EIGRP – на 20%. Процент потерянных пакетов в свою очередь снизился на 80% по отношению к OSPF и на 98% – по отношению к EIGRP.

Таблица 3.

Влияние значений весовых коэффициентов на работу сети

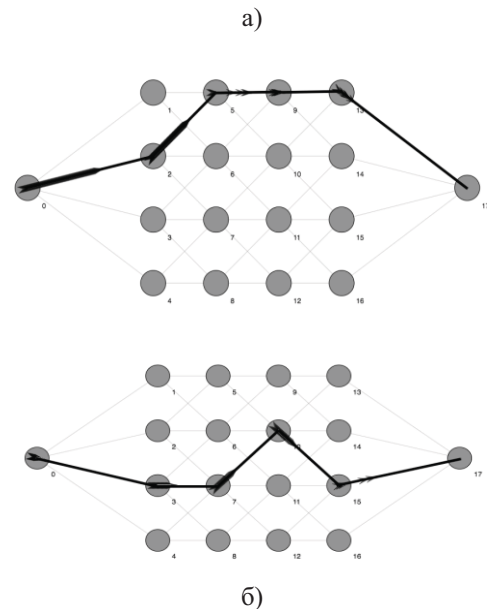
| Параметр Алгоритм  | Средняя задержка, мс | Процент потерянных пакетов | Джиттер, мкс |
|--|----------------------|----------------------------|--------------|
| OSFP   | 1341,45              | 10,82%                     | 219,69       |
| EIGRP  | 1115,44              | 84,60%                     | 573          |
| Prime<br>$X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0.25$                            | 890,93               | 2,14%                      | 55,46        |
| Prime<br>$X_2 = [0,58; 0,99]$<br>$X_1 = X_3 = X_4 = (1 - (X_3))/3$ | 612,52               | 84,44%                     | 570,7        |
| Prime<br>$X_3 = [0,3; 0,35]$<br>$X_1 = X_2 = X_4 = (1 - (X_2))/3$  | 803,71               | 0%                         | 12,99        |

При приоритизации параметра, характеризующего задержку на канале связи в диапазоне значений  $X_2 = [0,58; 0,99]$ , при равных  $X_1 =$

$X_3 = X_4$ , средняя задержка за весь сеанс работы сети снизилась на 54% по отношению к OSPF и на 45% по отношению к EIGRP, что на 31% эффективнее по сравнению с работой алгоритма при равных значениях весовых коэффициентов. При этом процент потерянных пакетов составил 84%, что может очень негативно сказываться на предоставлении сервисов, чувствительных к потерям пакетов.

При приоритизации параметра, характеризующего полосу пропускания каналов в диапазоне значений  $X_3 = [0,3; 0,35]$ , при равных  $X_1 = X_2 = X_4$ , средняя задержка снизилась на 40% по отношению к эталонному алгоритму OSPF и на 28% к EIGRP, что на 10% эффективнее по сравнению с работой алгоритма при равных значениях  $X_{1234}$ . При этом потери пакетов снизились до нуля, что говорит о том, что был найден оптимум, удовлетворяющий текущим потребностям сети. Алгоритм определил оптимальный маршрут для потока высокой плотности, минуя при этом низкопроизводительные узлы и каналы с низкой пропускной способностью и высокой вероятностью потерь пакетов. Характер работы алгоритма можно проследить на рис. 2.

Из него видно, что при различных методах оценки стоимости каналов связи меняется маршрут потока. На практике задача разработанного механизма, адаптивно подбирать маршрут, максимизирующий качественные характеристики работы сети, исходя из потребностей системы и текущего состояния всей сети.



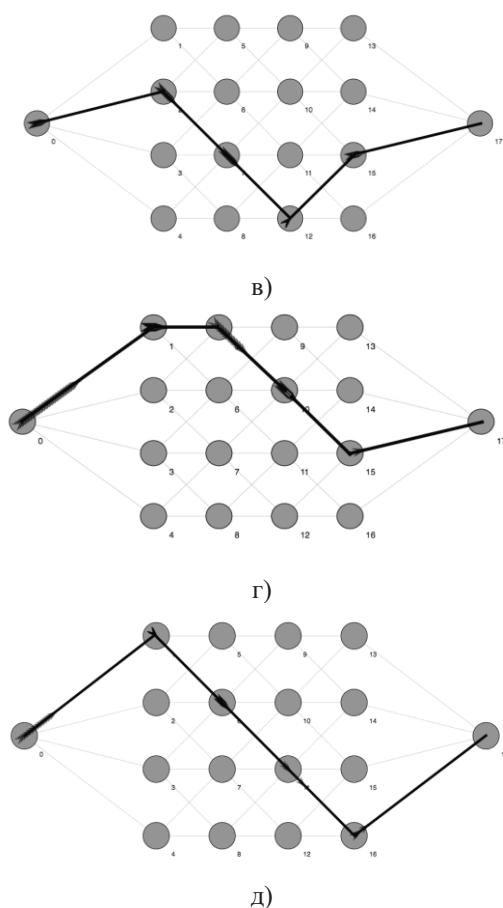


Рис. 2. Изменение движения потоков при различных значениях метрики:  
 а) эталонная модель OSPF, б) эталонная модель EIGRP, в) модель при равных весовых коэффициентах, г) модель с приоритезацией по задержке, д) с приоритезацией по полосе пропускания

В динамике процесса работы системы необходим пересчет первоначальных параметров метрики в текущих условиях работы сети и, как следствие, изменение значений весовых коэффициентов  $X_{1234}$ , согласно текущим потребностям системы связи.

## Заключение

Было показано, что, имея совокупность сетевых узлов, можно увеличить эффективность работы сети путем грамотного управления маршрутной информацией.

Существенным достоинством предложенного подхода к управлению механизмами маршрутизации является его возможность развертывания как в рамках текущих программно-конфигурируемых систем, так и в рамках отдельно взятой совокупности узлов связи, объединенной единой логикой организации сетевых ресурсов.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку интуитивного механизма принятия решений, суть которого – в

автоматическом режиме изменять весовые коэффициенты метрики с целью оптимизации передачи отдельных потоков данных, основываясь на текущих возможностях системы связи и возлагаемых на нее требований.

## Литература

- [1] ITU-T. Recommendation Y.1540 «Internet protocol aspects – Quality of service and network performance», 2011.
- [2] ITU-T. Recommendation Y.1541 «Network Performance Objectives for IP-Based Services», 2011.
- [3] ITU-T. Y.1541: Network performance objectives for IP-based services // ITU-T. 2014. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541/en> (дата обращения: 13.06.2015).
- [4] John F. Buford, Heather Yu, and Eng Lua. P2P Networking and Applications // the Morgan Kaufmann Series in Networking, 2009.
- [5] Luc De Ghein. MPLS Fundamentals // Cisco Press., 2006.
- [6] Thomas D. Nadeau, Ken Gray. SDN: Media, Inc., 2013.
- [7] Вешегна, Ш. Качество обслуживания в IP-сетях / Ш. Вешегна Cisco Press, 2003. 356 с

## Development of a Mechanism for Transferring of Big Data in Software-Defined Networks

Anton N. Noskov

The purpose of this work is to develop a unitary mechanism of adaptive routing of different kinds, basing on the current requirements on the quality of service. The software configuration of a network is the technology of the future. The trend in communication systems constantly confirms this fact. However, to date, the application of this technology in its current form is justified only in large networks of technology giants and telecom operators. Today we have a large number of dynamic routing protocols to route big volume traffic in communication networks. Our task is to create the solution that can use the opportunities of each node to make a decision on the transmission of information by all possible means for each type of traffic. Achieving this goal is possible by solving the problem of the development of generalized metrics, which details the links between devices in the network, and the problem of establishing a framework of adaptive logical network topology (route management) to ensure the quality of the whole network in order to meet the current requirements on the quality of a particular type service.