

УДК 621.391

МНОГОУРОВНЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАФИКОМ В СЕТИ MPLS-TE DiffServ НА ОСНОВЕ КООРДИНАЦИОННОГО ПРИНЦИПА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ



[А.В. ЛЕМЕШКО](#),

[АХМАД М. ХАЙЛАН](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Запропоновано модель управління трафіком у мережі MPLS-TE DiffServ, яка описує процеси маршрутизації та розподілу каналного ресурсу. З метою підвищення масштабованості отриманих рішень запропоновано метод дворівневого управління трафіком у мережі MPLS-TE DiffServ на основі принципу прогнозування взаємодій.

In the paper the mathematical model of traffic management in the MPLS-TE DiffServ network is proposed. This model describes the processes of routing and distribution channel resource. In article the method of bi-level traffic management in the MPLS-TE DiffServ network is offered to improve the scalability of the solutions on the basis of interactions prediction.

Предложена модель управления трафиком в сети MPLS-TE DiffServ, описывающая процессы маршрутизации и распределения каналного ресурса. С целью повышения масштабируемости получаемых решений предложен метод двухуровневого управления трафиком в сети MPLS-TE DiffServ на основе принципа прогнозирования взаимодействий.

Введение

Проблема обеспечения качества обслуживания (*Quality of Service, QoS*) в современных мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС), развивающихся в направлении создания сетей следующего поколения (*Next Generation Network, NGN*), стоит все еще достаточно остро и требует серьезной проработки множества задач, возникающих практически на всех уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМОС). В этой связи все больше внимания уделяется средствам управления трафиком, реализуемым на сетевом уровне ЭМОС, к которым, прежде всего, стоит отнести протоколы маршрутизации, механизмы профилирования трафика и распределения каналного и буферного ресурса ТКС. На роль транспортной основы *NGN* обоснованно претендует, завоевывая все большее признание, технология многопротокольной коммутации меток – *MPLS (MultiProtocol Label Switching)* [1, 2]. Проведенный анализ [1–3] позволил сформулировать следующие важные требования, выдвигаемые к решениям по управлению трафиком в *MPLS*-сетях:

- ✓ согласованное решение отдельных задач управления трафиком;
- ✓ поддержка качества обслуживания;
- ✓ реализация многопутевых стратегий маршрутизации «от источника»;

✓ высокая масштабируемость результирующих решений, под которой в данном случае понимают способность технологий и протоколов управления выполнять возложенные на них функции без существенного снижения эффективности своей рабо-

ты в условиях роста размерности сети – числа маршрутизаторов и трактов передачи, увеличения числа трафиков и расширения перечня показателей QoS.

К сожалению известные технологические и протокольные решения в этой области не обеспечивают удовлетворение перечисленных требований в должном объеме. Причина во многом состоит в несовершенстве математических моделей и методов, заложенных в маршрутизирующие протоколы, механизмы управления очередями и др. Графовые модели поиска кратчайшего пути, используемые в современных протоколах маршрутизации, а также основанные преимущественно на административном вмешательстве механизмы управления очередями имеют достаточно ограниченные возможности по учету характеристик трафика и требований, касающихся качества обслуживания. Кроме того, отдельные задачи управления трафиком решаются, как правило, разрозненно, что, в итоге, не способствует росту производительности ТКС. В этой связи, *актуальной представляется задача*, связанная с совершенствованием моделей и методов управления трафиком на основе удовлетворения вышеперечисленных требований. При этом важно не допустить чрезмерного усложнения вновь используемых моделей и методов, что на практике может повлечь снижение масштабируемости протокольных решений. Также необходимо обеспечить изначальную «привязку» модели к той или иной транспортной технологии, в данном случае MPLS, для более полного учета особенностей ее структурно-функционального построения.

I. Анализ известных решений в области управления трафиком

Попытки обеспечения согласованного решения отдельных задач управления трафиком были известны и раньше. Особого внимания заслуживает, например, результат, предложенный в работе [4], в которой усовершенствована потоковая модель Р. Галлагера [5]. В рамках усовершенствованной модели обеспечивается согласованное управление маршрутизацией и распределением канальных ресурсов, однако ей же присущи и серьезные недостатки, которые особо критичны для территориально-распределенных ТКС. Прежде всего, с технологической точки зрения это касается излишней централизации управления, что непременно на практике приведет к снижению масштабируемости конечных решений. С математической точки зрения, в результате применения этой модели [4] возникает оптимизационная задача распределения ресурсов ТКС, которая относится к классу задач нелинейного программирования, что в конечном итоге усложняет поиск оптимальных решений.

Кроме того, достаточно результативной представляется попытка решения задач управления трафиком в рамках динамических моделей [6, 7], представленных разностными уравнениями состояния. С их использованием обеспечивается достаточно высокий уровень согласованности решений по маршрутизации, управлению очередями и пропускной способностью (ПС) трактов передачи. На добавок, с целью повышения масштабируемости получаемых решений данные модели адаптированы под многоуровневое управление в ТКС [8, 9]. Однако данные модели описывают процесс информационного обмена на основе дейтаграммного режима передачи и «по-

шаговой маршрутизации» (*hop-by-hop routing*), что является сдерживающим фактором при моделировании *MPLS*-сетей, которые изначально разрабатывались как технологии виртуальных соединений с маршрутизацией «от источника» (*source routing*).

Некоторым компромиссным вариантом являются математическая модель и метод маршрутизации, предложенные в работе [10]. Поточковая модель маршрутизации, представленная в декомпозиционном виде, позволяет описать процесс динамической маршрутизации применительно к стратегии «от источника». А сам метод целевой координации двухуровневой маршрутизации обеспечил высокую масштабируемость с точки зрения решения задач предотвращения перегрузки трактов передачи ядра *MPLS*-сети. Это решение полностью отвечает требованиям концепции *MPLS Traffic Engineering (MPLS-TE)*, в рамках которой не используется классификация трафика на классы обслуживания (*Class of Service, CoS*). Однако узкая «специализация» данного решения, направленного на формализацию лишь задач маршрутизации агрегированных потоков в *MPLS*-сети, определила перспективное направление дальнейших исследований в этом русле. Поэтому в настоящей статье будет предложена математическая модель управления трафиком, описывающая процессы маршрутизации и распределения канального ресурса в сети *MPLS-TE* с поддержкой архитектуры дифференцированных служб – *DiffServ* [3]. На основе этой модели с целью повышения масштабируемости получаемых решений будет предложен метод прогнозирования взаимодействий для оптимизации двухуровневого управления трафиком в сети *MPLS-TE DiffServ*.

2. Математическая модель управления трафиком в сети *MPLS Traffic Engineering DiffServ*

В соответствии с подходом, предложенным в работе [10], структура *MPLS*-сети (рис. 1) традиционно задается с помощью графа $G = (M, E)$, где M – множество узлов, а E – множество трактов передачи (ТП) в сети.

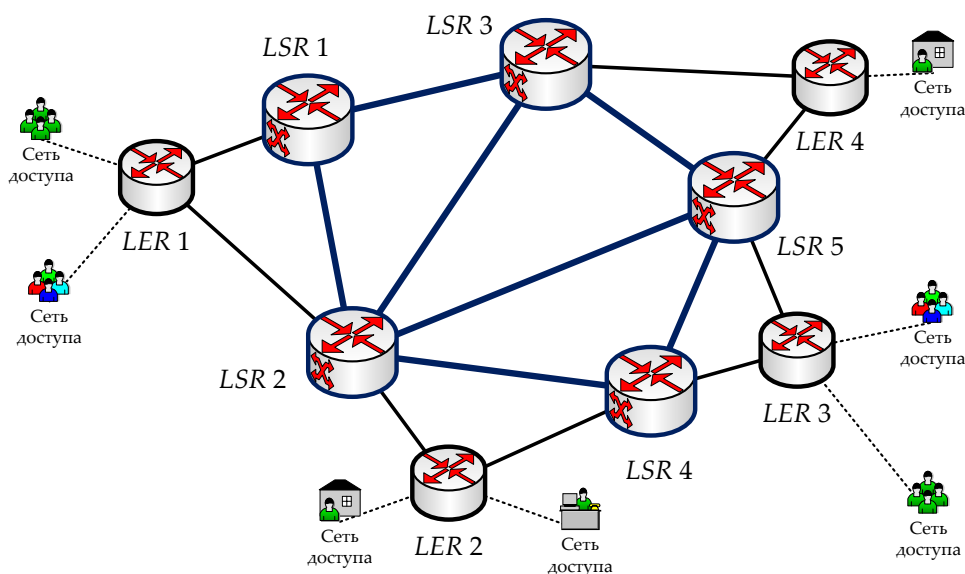


Рис. 1. Иерархия маршрутизаторов *MPLS*-сети

Все множество узлов в соответствии с функциональной иерархией MPLS-сети разбивается на два подмножества: $M^+ = \{M_r^+, r = \overline{1, m_{LER}}\}$ – подмножество приграничных маршрутизаторов (*Label Edge Router, LER*) и $M^- = \{M_j^-, j = \overline{1, m_{LSR}}\}$ – подмножество транзитных маршрутизаторов (*Label Switching Router, LER*). Каждой дуге $(i, j) \in E$ графа ставится в соответствие пропускная способность φ_{ij} соответствующего ей тракта передачи в сети. При этом пусть общее число трактов передачи в сети равно n .

Пусть также в ТКС поддерживается несколько классов обслуживания (*CoS*). Для сети *MPLS-TE DiffServ* число таких классов обслуживания равно 8 ($0 \div 7$) и определяется разрядность поля приоритета (3 бита) в структуре MPLS-метки (рис. 2).

Поле приоритета	Поле бит-индикатора канонического формата заголовка (<i>Canonical Format Identifier, CFI</i>)	Поле идентификатора виртуальной сети (<i>VLAN ID</i>)
3 бита	1 бит	12 бит

Рис. 2. Структура MPLS-метки

Все множество поступающих от абонентов (сетей доступа) трафиков K в зависимости от того, на какой приграничный маршрутизатор поступает этот трафик и в соответствии с каким классом он будет обслужен, декомпозицировано на подмножества $\{K_r^s, r = \overline{1, m_{LER}}, s = \overline{1, S}\}$, где K_r^s – множество трафиков s -го класса обслуживания *CoS*, поступающих на r -й *LER*, а S – общее число поддерживаемых сетью классов обслуживания. Тогда каждому трафику из множества K_r^s сопоставляется ряд параметров: M_r^+ – r -й *LER*, на который поступает k -й трафик (узел-источник); M_p^+ – p -й *LER*, через который k -й трафик убывает из MPLS-сети (узел-получатель); $\lambda_r^{k_s}$ – интенсивность k_s^s -го трафика, т.е. k -го трафика с s -м классом обслуживания, поступающего на r -й *LER*.

В MPLS-сети в ходе решения задач управления трафиком в рамках потоковых моделей необходимо рассчитать один или множество путей (*Label Switching Path, LSP*) между парой приграничных узлов отправитель-получатель, а также определить порядок распределения между ними трафика заданной интенсивности. Кроме того, с целью повышения согласованности при решении отдельных задач управления трафиком в разрабатываемой модели необходимо также описать процесс распределения канального ресурса (пропускной способности ТП ТКС) между трафиками разных классов.

Тогда для каждого r -го *LER* в качестве искомым выступают маршрутные переменные $x_{ij}^{k_s}$, которые характеризуют интенсивность k_s^s -го трафика в ТП $(i, j) \in E$. С целью недопущения потерь пакетов на маршрутизаторах и в ТКС в целом в ходе расчета маршрутных переменных необходимо обеспечить выполнение системы условий сохранения потока ($k_r^s \in K_r^s, s = \overline{1, S}$):

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r^s} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r^s} = \lambda^{k_r^s}, & \text{если } i = M_r^+; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r^s} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r^s} = 0, & \text{если } i \neq M_r^+, M_p^+; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^{k_r^s} - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^{k_r^s} = -\lambda^{k_r^s}, & \text{если } i = M_p^+. \end{cases} \quad (1)$$

Число условий в системе (1) соответствует количеству маршрутизаторов в сети.

Кроме того, с целью предотвращения возможной перегрузки трактов передачи MPLS-сети в ходе расчета маршрутных переменных важно выполнить условия (по количеству трактов передачи):

$$\sum_{s=1}^S \sum_{k_r^s \in K_r^s} x_{ij}^{k_r^s} \leq \varphi_{ij} - \sum_{\substack{l=1 \\ g \in M^+ \\ g \neq r}}^S \sum_{k_g^s \in K_g^s} x_{ij}^{k_g^s} \quad (r \in M^+, (i, j) \in E), \quad (2)$$

в рамках которых учитывается децентрализация при расчете маршрутных переменных на каждом отдельно взятом LER, т.к. каждый приграничный маршрутизатор определяет LSP для поступающих на него трафиков пользователей без информации о результатах расчета на соседних LER. Смысл выражения (2) состоит в том, что трафик, маршрутизируемый с r -го LER, не должен по своей интенсивности превышать доступной пропускной способности тракта передачи, которая осталась после обслуживания трафиков других приграничных маршрутизаторов.

С учетом организации обслуживания сетевого трафика на основе использования классов условия (2) можно более детально представить в следующем виде:

$$\sum_{k_r^s \in K_r^s} x_{ij}^{k_r^s} \leq \beta_{ij}^s \varphi_{ij} - \sum_{\substack{g \in M^+ \\ g \neq r}} \sum_{k_g^s \in K_g^s} x_{ij}^{k_g^s} \quad (r \in M^+, s = \overline{1, S}, (i, j) \in E), \quad (3)$$

где β_{ij}^s – доля пропускной способности ТП $(i, j) \in E$, выделенная для трафиков s -го класса и трактуемая также как управляющая переменная. В случае если распределение пропускной способности трактов передачи между классами трафика осуществляется идентично, то индексы (i, j) в переменных β_{ij}^s могут быть опущены, а их общее количество будет соответствовать количеству классов обслуживания в сети.

Введенный параметр модели β_{ij}^s хорошо согласуется с принятыми на практике решениями, когда каналный ресурс делится в процентном соотношении между классами трафиков пользователей. Для примера, на рис. 3 представлен вариант распределения пропускной способности интерфейса между тремя классами обслуживания трафиков в соотношении 15%–20%–40%, а еще 25% ПС в соответствии с механизмом Class-Based Weighted Fair Queuing (CBWFQ) отводится на обслуживание неклассифицированного трафика.

Согласно физическому смыслу маршрутных переменных и переменных, отвечающих за распределение ПС ТП, на них следует наложить ограничения вида

$$0 \leq x_{ij}^{k_r^s} \leq \lambda^{k_r^s}, \quad (4)$$

$$0 \leq \beta_{ij}^s \quad \text{и} \quad \sum_{s=1}^S \beta_{ij}^s \leq 1. \quad (5)$$

```

policy-map University
class rector
    bandwidth percent 15
class faculty
    bandwidth percent 20
class department
    bandwidth percent 40
class class-default
    fair-queue
    
```

Рис. 3. Пример настройки интерфейса под классы обслуживания

В условиях обеспечения согласованного управления маршрутизацией и канальным ресурсом MPLS-сети в качестве искомого может выступать следующий вектор:

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_{ij}^{k_r^s} \\ - \\ \beta_{ij}^s \end{bmatrix} \quad (r \in M^+, s = \overline{1, S}, (i, j) \in E), \quad (6)$$

размерность которого определяется как сумма числа маршрутных переменных ($x_{ij}^{k_r^s}$) и переменных, отвечающих за распределение ПС ТП (β_{ij}^s). Вектор (6), в свою очередь, можно представить в декомпозиционном виде

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} \vec{x}_1 \\ \vdots \\ \vec{x}_r \\ \vdots \\ \vec{x}_{m_{LER}} \\ - \\ \vec{\beta} \end{bmatrix},$$

где координатами подвектора \vec{x}_r являются переменные $x_{ij}^{k_r^s}$, отнесенные к r -му LER, а подвектор $\vec{\beta}$ имеет координаты β_{ij}^s ($k_r^s \in K_r^s, s = \overline{1, S}, (i, j) \in E$).

В матричной форме систему условий (3) можно представить в следующем виде:

$$B_r^s \bar{x}_r \leq \text{diag}(\varphi) \bar{\beta} - \sum_{\substack{g \in M^+ \\ g \neq r}} C_{rg}^s \bar{x}_g, \quad (7)$$

где $\text{diag}(\varphi)$ – диагональная матрица, координатами которой являются величины φ_{ij} .

В ходе расчета вектора искомым переменных (6) в качестве критерия оптимальности получаемых решений выберем экстремум некоторой целевой функции, основным требованием к которой является учет технологических особенностей решаемой задачи и возможность представления в аддитивной форме. Примером может служить линейная функция, используемая в [10], или следующая квадратичная форма:

$$\min_{x, \beta} F$$

при

$$F = \sum_{r \in M^+} \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \beta^t Q \beta, \quad (8)$$

где H_r – диагональная матрица весовых коэффициентов, которые являются по сути метриками соответствующих трактов передачи, характеризующая условную стоимость использования k_r^s -м трафиком этого тракта; Q – диагональная матрица весовых коэффициентов, характеризующих условную важность того или иного класса обслуживания; $[\cdot]^t$ – операция транспонирования матрицы.

Применение целевой функции вида (8) позволит обеспечить минимизацию использования канального ресурса и загруженности трактов передачи сети. Использование линейной целевой функции [11] позволяет организовать многопутевую маршрутизацию с последовательным включением наиболее производительных путей по мере перегрузки уже используемых. Переход к квадратичной форме целевой функции (8), подлежащей минимизации, в отличие от линейной функции [10] позволяет, как показано в работе [11], организовать процесс балансировки нагрузки сразу по всему множеству доступных путей, что более полно соответствует требованиям концепции *Traffic Engineering* в MPLS-сети.

Таким образом, в рамках предложенной модели управления трафиком (1)–(8) формализованы основные закономерности процессов многопутевой маршрутизации и распределения пропускной способности ТП сети в интересах пользовательского трафика того или иного класса. Модель по своему содержанию соответствует особенностям построения сетей *MPLS-TE DiffServ*. На выходе модели ввиду множества возможных решений сформулирована задача по оптимизации процессов маршрутизации и управления канальным ресурсом сети.

III. Метод двухуровневого управления трафиком в сети MPLS-TE DiffServ на основе принципа прогнозирования взаимодействий

В основу предлагаемого метода будет положено решение оптимизационной задачи, связанной с минимизацией квадратичной целевой функции (8) при наличии

условий-ограничений (4), (5) и (7). В ходе решения задачи условной оптимизации (8) с целью учета условий на взаимодействие приграничных маршрутизаторов, переходя к задаче на безусловный экстремум, необходимо максимизировать по множителям Лагранжа (μ) функцию

$$\Omega(\mu) = \min_{x, \beta} \mathcal{L}(x, \beta, \mu),$$

где

$$\mathcal{L} = \sum_{r \in M^+} \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{\beta}^t Q \bar{\beta} + \sum_{r \in M^+} \bar{\mu}_r^t \left[B_r^s \bar{x}_r - \text{diag}(\varphi) \bar{\beta} + \sum_{\substack{g \in M^+ \\ g \neq r}} C_{rg}^s \bar{x}_g \right]. \quad (9)$$

Для решения сформулированной оптимизационной задачи используем принцип прогнозирования (предсказания) взаимодействий [12, 13], в рамках которого будем считать, что маршрутные переменные, т.е. векторы \bar{x}_r ($r \in M^+$) рассчитываются на нижнем уровне управления трафиком – на приграничных маршрутизаторах (LER). Задача же определения порядка распределения канальной емкости ($\bar{\beta}$) пусть будет возложена на координатор сети верхнего уровня иерархии. К его же функциям также отнесем расчет векторов множителей Лагранжа $\bar{\mu}_r$ ($r \in M^+$). Тогда Лагранжиан (9), записанный в виде

$$\mathcal{L} = \sum_{r \in M^+} \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{\beta}^t Q \bar{\beta} + \sum_{r \in M^+} \bar{\mu}_r^t B_r^s \bar{x}_r - \sum_{r \in M^+} \bar{\mu}_r^t \text{diag}(\varphi) \bar{\beta} + \sum_{r \in M^+} \bar{\mu}_r^t \sum_{\substack{g \in M^+ \\ g \neq r}} C_{rg}^s \bar{x}_g,$$

при фиксированных и рассчитываемых на втором уровне параметрах $\bar{\mu}_r$ ($r \in M^+$) и $\bar{\beta}$ с учетом тождества

$$\sum_{r \in M^+} \bar{\mu}_r^t \sum_{\substack{g \in M^+ \\ g \neq r}} C_{rg}^s \bar{x}_g = \sum_{r \in M^+} \sum_{\substack{g \in M^+ \\ g \neq r}} \mu_r^t C_{rg}^s \bar{x}_g$$

можно представить в форме

$$\mathcal{L} = \sum_{r \in M^+} \mathcal{L}_r,$$

где

$$\mathcal{L}_r = \bar{x}_r^t H_r \bar{x}_r + \bar{\beta}^t Q \bar{\beta} + \bar{\mu}_r^t B_r^s \bar{x}_r - \bar{\mu}_r^t \text{diag}(\varphi) \bar{\beta} + \sum_{\substack{g \in M^+ \\ g \neq r}} \bar{\mu}_g^t C_{gr}^s \bar{x}_r. \quad (10)$$

Таким образом, в рамках предлагаемого двухуровневого метода отдельные задачи управления трафиком предлагается разнести по разным уровням иерархии. То есть, маршрутные задачи целесообразно решать на нижнем уровне – LER-уровне приграничных маршрутизаторов MPLS-сети, а задачи распределения ПС ТП между классами обслуживания трафиков пользователей передать на верхний уровень (LSR-уровень) координатору сети. Причем управление трафиком на приграничных

маршрутизаторах MPLS-сети (рис. 4) осуществляется на основе расчета маршрутных переменных \vec{x}_r в ходе минимизации выражения (10) в соответствии с условиями (1), (3) и (4) при фиксированном (предварительно рассчитанном) порядке распределения пропускной способности ТП между классами трафиков пользователей (CoS), задаваемого вектором $\vec{\beta}^*$.

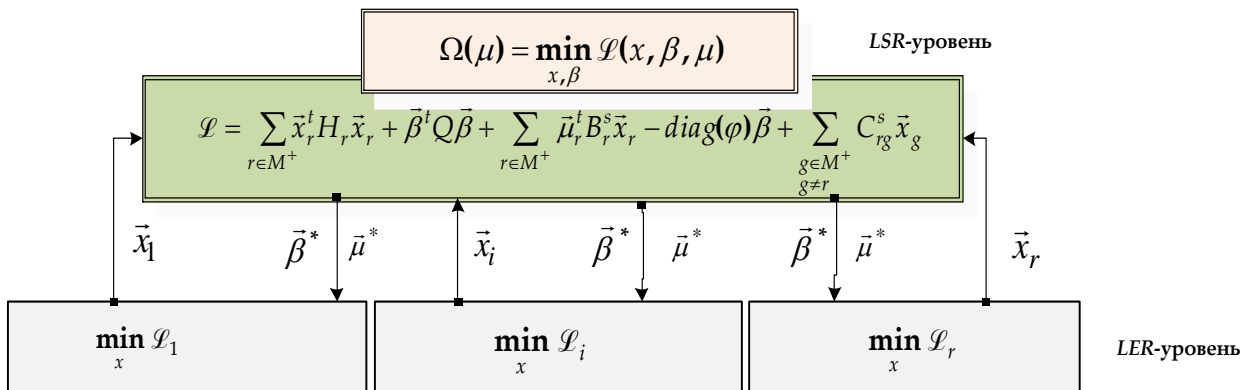


Рис. 4. Вычислительная структура метода управления трафиком в сети MPLS-TE DiffServ

Результаты решения задач на каждом отдельном LER собираются координатором сети (верхний уровень иерархии), где осуществляется их анализ и координация путем расчета (корректировки) вектора $\vec{\beta}$ и векторов множителей Лагранжа $\vec{\mu}_r$ ($r \in M^+$) в ходе оптимизации лагранжиана (9). Полученные новые решения снова «спускаются» на первый уровень управления трафиком для итерационной оптимизации процесса многопутевой маршрутизации. При этом, если на промежуточных итерациях условия (3) будут выполняться, то целесообразно реализовать т.н. секвенционную координацию, когда промежуточные (субоптимальные) решения подлежат реализации на практике.

Выводы

В статье предложен подход к оптимизации процессов управления трафиком в сети MPLS-TE DiffServ на основе двухуровневой иерархии отдельных задач – маршрутизации и распределения канального ресурса ТКС. Особенности структурного и функционального построения сети MPLS-TE DiffServ описаны в рамках потоковой математической модели, представленной системой алгебраических уравнений (1). Отличительной чертой модели является совместное описание процессов маршрутизации и распределения ПС ТП сети, основываясь на CoS.

Декомпозиционное представление условий предотвращения перегрузки (3) или (7) с целью повышения масштабируемости получаемых решений позволило обосновать к применению координационный принцип прогнозирования взаимодействий. На его основе уточнены функции и задачи различных уровней иерархии в рамках структуры поставленной оптимизационной задачи (8), (9). Выигрыш в масштабируемости конечных решений заключался в снижении размерности общей задачи управления трафиком путем ее декомпозиции по приграничным маршрутиза-

торам MPLS-сети, что, в результате, позволит снизить объемы циркулирующей в сети служебной информации о ее состоянии, а также повысить надежность и оперативность управления. Кроме того, этому также может способствовать возможность реализации секвенционной координации, направленной на минимизацию числа координирующих процедур в сети при оптимизации управления трафиком в ней.

Список литературы:

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы MPLS. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 304 с.
2. *Simha A., Osborne E.* Traffic Engineering with MPLS. Cisco Press, 2002. – 608 p.
3. Вегенша III. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 386 с.
4. Дробот О.А. Комплексная модель обеспечения гарантированного качества обслуживания с реализацией динамических стратегий распределения сетевых ресурсов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – № 148. – С. 43–54.
5. *Gallager R. G.* A minimum delay routing algorithm using distributed computation // IEEE Trans. on communications. 1975. – Vol. 25, - №1. – P. 73–85.
6. Лемешко А.В., Беленков А.Г. Двухуровневый алгоритм оптимизации процессов маршрутизации и управления доступом в телекоммуникационных сетях магистрального уровня // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2003. – Вып. 135. – С. 113–118.
7. Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний // Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – №1(9). – С. 3–26.
8. Евсеева О.Ю. Решение задачи иерархическо-координационной маршрутизации в телекоммуникационных сетях методом предсказания взаимодействия // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков: НАКУ «ХАИ», 2003. – Вып. 21. – С. 102–111.
9. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Симоненко Д.В., Беленков А.Г. Метод иерархического управления ресурсами телекоммуникационной сети с аperiodической координацией по условиям обеспечения качества обслуживания // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. – Вып. 154. – С. 156–166.
10. Лемешко А.В., Ахмад М. Хайлан, Али С. Али. Целевая координация двухуровневой маршрутизации в MPLS-сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2009. – Вып. 159. – С. 41–45.
11. Добрышкин Ю.Н. Модель управления трафиком с его превентивным ограничением на основе абсолютных и относительных приоритетов // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – № 156. – С. 13-19.
12. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: Мир, 1973. – 344 с.
13. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. – М.: Машиностроение, 1986. – 494 с.