

УДК 621.391

**ПОТОКОВАЯ МОДЕЛЬ МАРШРУТИЗАЦИИ С БАЛАНСИРОВКОЙ
НАГРУЗКИ ПО ДЛИНЕ ОЧЕРЕДИ В ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМЫХ
СЕТЯХ****Т.В. Вавенко, В.Л. Стерин, А.В. Симоненко**

Предложена потоковая модель многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди для программно-конфигурируемых сетей. Показаны результаты анализа предложенной модели для фрагмента телекоммуникационной сети корпорации Google. Проведено сравнение решения задачи маршрутизации в рамках предложенной модели и модели маршрутизации с балансировкой нагрузки на основе коэффициента максимального использования каналов.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, многопутевая маршрутизация, балансировка нагрузки, многопутевая задержка, коэффициент максимального использования каналов связи, длина очереди, трафик.

Введение

На сегодняшний день многие ученые в области телекоммуникаций говорят о недостатках традиционных TCP/IP-сетей, которые сводятся к главному – невозможности гибко управлять телекоммуникационной сетью (ТКС), что приводит к ухудшению показателей качества обслуживания (Quality of Service, QoS) [1]. Большая часть этих недостатков минимизируется при реализации идей, заложенных в концепцию программно-конфигурируемых сетей (Software Defined Networking, SDN) [2], которая сегодня активно развивается и, по мнению своих разработчиков, должна эффективно дополнить и модернизировать многие существующие сетевые технологии. Главная идея SDN состоит в отделении управляющего уровня (control plane) от уровня передачи данных (forwarding data plane), что предполагает передачу ряда основных управляющих функций от операционных системы (ОС) узлов (маршрутизаторов и коммутаторов) ТКС к сетевой ОС. При этом сетевая ОС с помощью определенных протоколов, основываясь на работе специальных облачных серверов, решает задачи управления трафиком, в том числе задачи маршрутизации [3], что повышает уровень централизации управления в сети. В связи с этим развитие и внедрение SDN-решений требует усовершенствования протоколов маршрутизации, а также их адаптацию под новые условия.

С другой стороны, стоит отметить, что с целью удовлетворения растущих требований по QoS [1] маршрутные протоколы, кроме классических функций (расчет маршрутов передачи трафика через сеть), поддерживают дополнительные возможности, среди которых – балансировка нагрузки каналов ТКС с реализацией многопутевой стратегии маршрутизации. Обеспечение балансировки нагрузки на практике позволяет оптимизировать решение задачи маршрутизации и эффективно использовать ресурсы сети, в

результате чего улучшаются значения показателей QoS. Эффективность балансировки нагрузки и достигаемое при этом качество обслуживания во многом зависит от адекватности математических моделей и методов, используемых при разработке соответствующих протоколов [3, 4]. Анализ известных протоколов маршрутизации в ТКС показал, что они основаны преимущественно на графовых моделях, в рамках которых задача поиска кратчайшего пути решается при помощи алгоритмов Дейкстры, Беллмана–Форда и др. [3–5]. Однако, учитывая потоковый характер трафика, циркулирующего в современных сетях, перспективным является переход от графовых к потоковым моделям, которые, наряду с расчетом множества путей, определяют порядок распределения по ним трафика пользователей. В результате проведенного анализа [4, 5] замечено, что к настоящему моменту времени известны потоковые модели многопутевой маршрутизации, основанные на сетях массового обслуживания, алгебраических, интегрально-дифференциальных и разностных уравнениях состояния ТКС, тензорном представлении и др.

Важно отметить, что решение задачи маршрутизации в рамках потоковых моделей может осуществляться по разным критериям, которые, как правило, через маршрутную метрику связаны тем или иным образом с коэффициентом использования каналов связи (КС) сети, пропускными способностями КС или показателями QoS. Наибольшее распространение получила модель с балансировкой нагрузки по критерию, связанному с минимизацией коэффициента максимального использования каналов ТКС, соответствующему технологии Traffic Engineering [5]. Достоинством этой модели является то, что этот коэффициент использования с ростом загруженности сети растет линейно, что гарантирует отсутствие колебаний в численных значениях основных показателей QoS. Однако исследование данной модели для программно-конфигурированных сетей показало, что балансировка нагрузки по критерию обеспечения минимума коэффициента максимального использования КС не во всех случаях позволяет максимально улучшить уровень QoS [6]. В связи с этим при решении задачи маршрутизации в SDN рекомендуется изменить критерий, положенный в основу оптимизации процесса балансировки нагрузки, таким образом, чтобы максимально улучшить значения основных показателей QoS. Таким образом, актуальной с научной и практической точки зрения представляется задача, связанная с выбором критериев оптимальности процесса балансировки нагрузки в сетях SDN на основе реализации многопутевой стратегии маршрутизации.

Потоковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди на маршрутизаторах телекоммуникационных сетей

При выборе критерия оптимальности процесса балансировки нагрузки в ТКС стоит учесть, что рост интенсивности случайного по своей природе сетевого трафика вызывает образование очередей пакетов на маршрутизаторах. Как известно, именно образование и перегрузка очередей являются основными источниками роста задержек и потерь пакетов. В связи с этим в данной работе предлагается модель многопутевой маршрутизации, в которой критерием балансировки нагрузки выступает минимум функции, связанной с длинами очередей на интерфейсах маршрутизаторов ТКС.

В рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди структура ТКС описывается с помощью графа $G = (V, E)$, где V – множество маршрутизаторов сети, E – множество каналов сети. Для каждой дуги $(i, j) \in E$ характерна ее пропускная способность $c_{i,j}$. Каждому трафику из множества K сопоставлен ряд параметров: d_k, s_k, t_k – интенсивность k -го трафика, маршрутизатор-источник и маршрутизатор-получатель соответственно. Управляющей переменной служит величина $x_{i,j}^k$, которая характеризует долю k -го трафика, протекающего в канале $(i, j) \in E$. В соответствии с физикой решаемой задачи на переменные $x_{i,j}^k$ накладываются следующие ограничения:

$$0 \leq x_{i,j}^k \leq 1. \quad (1)$$

Для учета возможных потерь пакетов на маршрутизаторах и в сети в целом в модели предусмотрено условие сохранения потока [7]:

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

где ε^k – доля пакетов k -го трафика, обслуженного сетью, т.е. пакеты которого доставлены от узла-отправителя до узла-получателя; $p_{(i,j)}^k$ – вероятность потерь пакетов k -го трафика на j -м интерфейсе i -го маршрутизатора по причине его перегрузки.

Чтобы предотвратить перегрузку в каналах сети, необходимо обеспечить выполнение условий [8]

$$\sum_{k \in K} d_k x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, \quad (i, j) \in E. \quad (3)$$

В качестве критериев оптимальности предлагается использовать одно из условий –

$$\min_x \left(\sum_{(i,j) \in E} (a_{i,j} n_{i,j}) \right), \quad (4)$$

связанное с минимизацией взвешенной суммы длин очередей на интерфейсах маршрутизаторов в ТКС, или

$$\min_x (\max_{(i,j) \in E} a_{i,j} n_{i,j}), \quad (5)$$

обеспечивающее минимизацию максимальной по всем интерфейсам длины очереди, где $n_{i,j}$ – длина очереди в i -м маршрутизаторе на исходящем интерфейсе к j -му маршрутизатору ($i, j \in V, i \neq j$), $a_{i,j}$ – весовой коэффициент очереди, который зависит от важности того или иного канала связи $(i, j) \in E$ и его места в структуре ТКС.

В рамках предлагаемой потоковой модели (1)–(5) задача поиска множества оптимальных путей сведена к задаче нелинейного программирования с критериями (4) или (5) при наличии ограничений (1)–(3). Использование критериев (4), (5) при решении задачи многопутевой маршрутизации обеспечивает балансировку нагрузки по длинам очередей, возникающих на интерфейсах маршрутизаторов ТКС.

Исследование предложенной модели маршрутизации

Как известно, для каждого вида трафика в телекоммуникационных сетях характерен свой закон распределения интервалов поступления пакетов (табл. 1) [9, 10]. В результате исследования трафика в современных телекоммуникационных сетях с пакетной коммутацией было замечено, что ему присущи свойства самоподобия, что включает в себя долговременные зависимости, медленно затухающую дисперсию, бесконечные моменты, распределение с «тяжелыми хвостами» (распределение Парето, Вейбулла, логонормальное распределение).

Тип трафика	Уровень ЭМВОС	Закон распределения	
		интервалов поступления	длин протокольных блоков
VoIP	Прикладной	Парето	Парето
FTP/TCP	Транспортный	Парето	Вейбулла, логонормальное
SMTP/TCP	Транспортный	Экспоненциальный	Экспоненциальный
HTTP/TCP	Транспортный	Парето	Логонормальное, Парето
IP	Сетевой	Парето	Парето
Ethernet	Канальный	Парето	Парето
ATM	Канальный	FARIMA	Детерминированный

Таблица 1. Законы распределения интервалов поступления пакетов и длин протокольных блоков на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС)

Классической и довольно изученной моделью массового обслуживания является модель $M/M/1/N$, которая учитывает ограниченность объема буферного ресурса узлов ТКС и характеризуется показательным законом поступления пакетов в сеть и показательным законом их обслуживания [9, 10]. При этом N – максимальное число пакетов, находящихся на интерфейсе маршрутизатора (в очереди и канале). Однако в рамках системы массового обслуживания $M/M/1/N$ моделируются только SMTP/TCP-потоки (табл. 1), а решения при поступающем в сеть трафике со свойствами самоподобия дают большую погрешность.

Иногда для моделирования самоподобного трафика используют систему массового обслуживания $M/D/1/N$ с экспоненциальным законом поступления пакетов и постоянным временем их обслуживания, которая характеризуется постоянной длиной поступающих пакетов, что свойственно лишь отдельным технологиям телекоммуникационных сетей (например, Asynchronous Transfer Mode, ATM) [10].

Чтобы учесть влияние самоподобия, можно использовать систему массового обслуживания $fBM/M/1/N$, которая моделирует поступающий в систему поток с характеристиками фрактального броуновского движения. С этой целью вводится дополнительная функция, зависящая от некоторого коэффициента самоподобия H (коэффициент Херста), причем при $H = 0,5$ свойство самоподобия отсутствует, а при увеличении коэффициента самоподобия до единицы влияние самоподобности нагрузки усиливается. Для расчета средней длины очереди на интерфейсе маршрутизатора ТКС $n_{i,j}$, средней задержки пакета $\tau_{i,j}$ в канале $(i, j) \in E$ (согласно формуле Литтла) и вероятности потери пакета $p_{i,j}$ из-за переполнения буфера в рамках модели $fBM/M/1/N$ используют следующие формулы [11]:

$$n_{i,j} = \frac{\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)}{1 - \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+2}} \cdot \frac{\left\{ 1 - (N+1) \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^N \right\} + N \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+1}}{1 - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)} - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H), \quad (6)$$

$$\tau_{i,j} = \frac{n_{i,j} + \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)}{f(H) \cdot \sum_{k \in K} x_{i,j}^k \cdot d_k} + \frac{1}{c_{i,j}} = \frac{1}{\pi c_{i,j}} \cdot \frac{\left\{ 1 - (N+1) \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^N \right\} + N \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+1}}{1 - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)} + \frac{1}{c_{i,j}}, \quad (7)$$

$$p_{i,j} = \frac{1 - \frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H)}{1 - \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+2}} \left[\frac{\rho_{i,j}}{\pi} f(H) \right]^{N+1}, \quad (8)$$

где $\rho_{i,j}$ – нагрузка в канале $(i, j) \in E$, а именно: $\rho_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \cdot d_k}{c_{i,j}}$; π – вероятность отсутствия повторной

передачи пакетов; $c_{i,j}$ – пропускная способность канала $(i, j) \in E$; $f(H)$ – функция, которая учитывает влияние самоподобия поступающего в ТКС трафика. Повторная передача пакета возникает, например, когда пакет был отброшен в процессе работы алгоритма произвольного раннего обнаружения (Random early detection, RED).

Рассмотренные формулы (6)–(8) используются для расчета показателей качества обслуживания при входящем в сеть трафике со свойством самоподобия, например, для потоков Ethernet, IP, FTP, НТТР и др.

Для оценки качества конечных решений воспользуемся таким важным показателем QoS, как средняя многопутевая задержка. Задержка $\tau(m_l)$ вдоль пути m_l из множества путей $M = \{m_1, m_2, \dots, m_L\}$, где L – количество путей между маршрутизатором-отправителем и маршрутизатором-получателем, определяется по формуле

$$\tau(m_l) = \sum_{(i,j) \in m_l} \tau_{i,j}.$$

Для расчета межконцевой многопутевой задержки используем выражение [12]:

$$T(M) = \max_{m_l \in M} \{ \tau(m_l) \}, \quad (9)$$

а для расчета межконцевой вероятности доставки пакетов k -го трафика – выражение

$$p^k = \sum_{l=1}^L \left(x^k(m_l) \cdot \prod_{(i,j) \in m_l} (1 - p_{i,j}) \right), \quad (10)$$

где $x^k(m_l)$ – доля k -го трафика, протекающего в пути m_l .

Проведем сравнительный анализ предлагаемой модели с ранее известными решениями. Для этого используем результаты, полученные в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту максимального использования каналов ТКС [5]. Рассмотрим решение задачи маршрутизации для топологий, используемых в сетях SDN, соединяющих центры обработки данных (ЦОД), в которых циркулируют потоки данных высокой интенсивности. Известно, что одним из лидеров по тестированию и внедрению SDN-решений является корпорация Google, которая на сегодняшний день адаптировала свою территориально-распределенную телекоммуникационную сеть (рис. 1), связывающую крупнейшие ЦОД корпорации, под специальный протокол SDN – OpenFlow. Проведем исследование предложенной модели маршрутизации для фрагмента сети корпорации Google (рис. 2).

Для выбранного фрагмента телекоммуникационной сети при решении задачи маршрутизации каналам связи задавались различные значения пропускных способностей. Для примера рассмотрим случай, когда пропускные способности каналов равны числовым значениям, которые показаны на рис. 2 на дугах графа и измеряются в пакетах в секунду (1/с). Так, например, пропускная способность канала связи между первым и вторым маршрутизатором составляет 15 1/с.

Пусть узел-отправитель – это маршрутизатор 1, а узел-получатель – маршрутизатор 5. В сеть поступал трафик различной интенсивности. Результаты сравнения эффективности решений по QoS-показателям (9) и (10), получаемым для предлагаемой модели с критериями (4) и (5) и модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС [5], представлены на

рис. 3, 4. В качестве примера максимальное число пакетов, находящихся на интерфейсе маршрутизатора, равнялось десяти ($N=10$). Для определения функции $f(H)$ был использован линейный закон $f(H) = 2H$ [11], тогда значение данной функции для трафика со свойством самоподобия (например, с коэффициентом Херста $H = 0,75$) равно 1,5. Пусть в сети включен алгоритм произвольного раннего отбрасывания пакетов RED, и его знаменатель граничной вероятности по умолчанию принимает свое максимальное значение 10, т.е. процент отброшенных пакетов равен 10%, и вероятность отсутствия повторной передачи π равна 0,9.

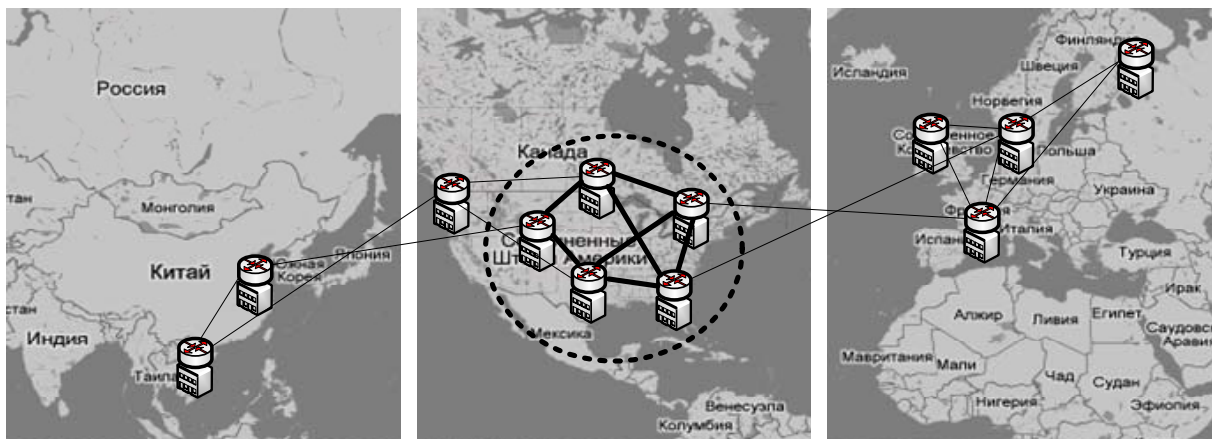


Рис. 1. Телекоммуникационная сеть корпорации Google, которая связывает крупнейшие ЦОД

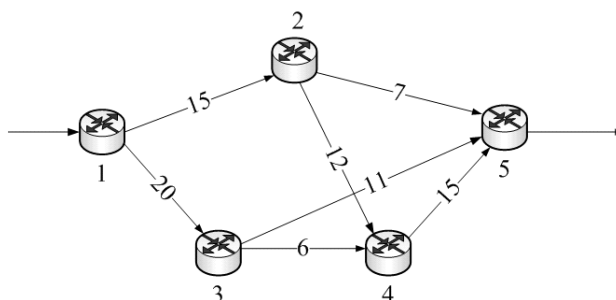


Рис. 2. Фрагмент североамериканского компонента телекоммуникационной сети корпорации Google

В ходе анализа полученных результатов установлено, что при решении задачи многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки в рамках предложенной модели с критерием (4) выигрыш по средней многопутевой задержке составил 3,7–5,32 % (рис. 3), а с критерием (5) – 6,3–10,3% по сравнению с решением, полученным в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС.

Вероятность доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели с балансировкой нагрузки по критерию (4) была улучшена на 1–2,1% (рис. 4), а по критерию (5) – на 1–2% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС. Незначительное, на первый взгляд, улучшение вероятности доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели с критериями (4) и (5) является достаточно существенным, учитывая тот факт, что должна обеспечиваться вероятность доставки пакетов для сетей IP не ниже 0,999 [1].

При решении задачи маршрутизации для других исходных данных (сетевых структур и пропускных способностей КС) наблюдалась та же закономерность: в рамках предложенной модели маршрутизации с критерием (4) значения многопутевой задержки были улучшены в среднем от 2–4,6% до 5,1–7,3%, а с критерием (5) – в среднем от 5,7–8,3% до 9,5–12,4% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС. Вероятность доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели маршрутизации с критериями (4) и (5) была улучшена в среднем от 0,3–0,5% до 1–1,9% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС [5].

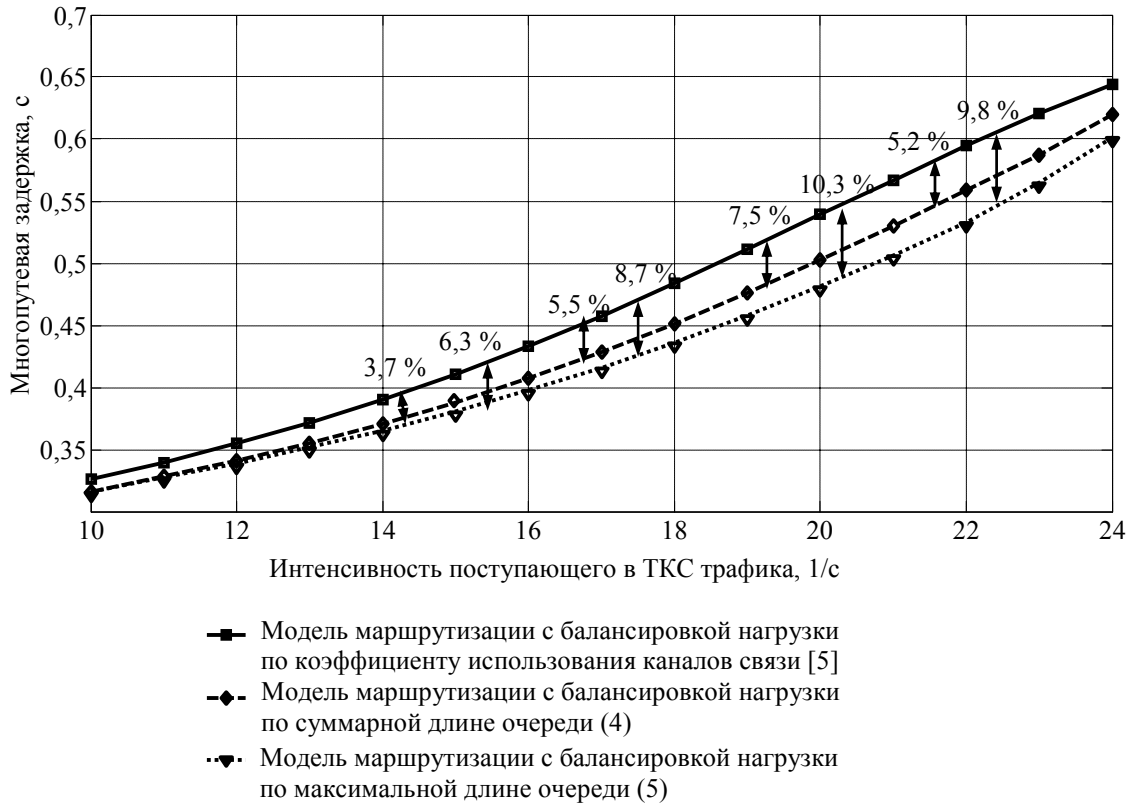


Рис. 3. Результаты сравнения средней многопутевой задержки при решении задачи маршрутизации для разных моделей

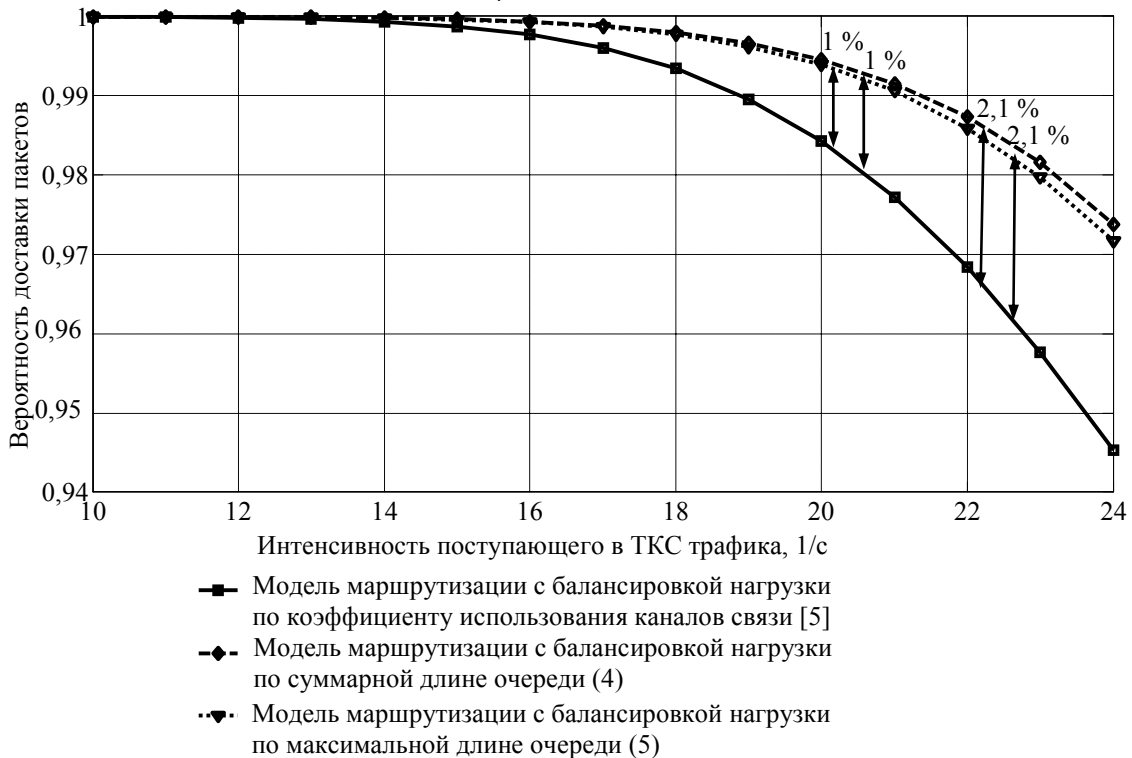


Рис. 4. Результаты сравнения вероятности доставки пакетов при решении задачи маршрутизации для разных моделей

В результате сравнительного анализа рассматриваемых моделей с использованием другой системы массового обслуживания, например, $M/M/1/N$, в рамках которой моделируется SMTP/TCP трафик, были получены подобные результаты. В рамках предложенной модели маршрутизации с критериями (4) и (5) значения многопутевой задержки были улучшены в среднем от 3,3–9,5% до 11,6–15,7% по сравне-

нию с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС. При этом вероятность доставки пакетов при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели маршрутизации с критериями (4) и (5) была улучшена в среднем от 0,6–1,3% до 2,3–2,9% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов ТКС.

Таким образом, предложенная модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критериям, связанным с минимизацией длины очереди на маршрутизаторах ТКС, с точки зрения обеспечиваемого качества обслуживания лучше, чем по критерию, связанному с коэффициентом использования каналов ТКС [5]. При сравнении результатов, полученных при решении задачи маршрутизации в рамках предложенной модели с критериями (4) и (5), сделаны следующие выводы. Средние задержки меньше при решении задачи маршрутизации в рамках модели с критерием (5), а вероятность доставки пакетов выше при решении задачи маршрутизации по критерию (4). Поэтому выбор критерия в модели маршрутизации зависит от QoS-требований того или иного трафика, поступающего в сеть. Например, для трафика реального времени, который выдвигает высокие требования к средним задержкам, рекомендуется использовать модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию, связанному с минимизацией максимальной длины очереди на интерфейсах маршрутизаторов ТКС. Если же в сеть поступает трафик, более критичный к потерям пакетов, рекомендуется использовать модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по критерию, связанному с минимизацией средней длины очереди на интерфейсах маршрутизаторов ТКС.

Как показало исследование, преимущественной областью применения модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди на интерфейсах маршрутизаторов ТКС является режим высокой и критичной загруженности сети, когда основную роль в значениях задержек пакетов и вероятности их доставки играют процессы образования и обслуживания очередей.

Заключение

В работе предложена потоковая модель многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди для программно-конфигурированных сетей. Проведено исследование предложенной модели с разными критериями оптимальности конечных решений путем ее сравнения с ранее известными решениями для фрагмента сети корпорации Google. Результаты сравнения подтвердили эффективность модели при использовании критерия, связанного с минимизацией максимальной или средней длины очереди на интерфейсах маршрутизаторов телекоммуникационной сети. Использование предложенной модели позволило улучшить значения многопутевой задержки в среднем от 2–4,6% до 9,5–12,4%, а также вероятность доставки пакетов от 0,6–1,3% до 2,3–2,9% по сравнению с решением задачи маршрутизации в рамках модели маршрутизации с балансировкой нагрузки по коэффициенту использования каналов телекоммуникационной сети. Наибольшие выигрыши по QoS-показателям замечены при росте интенсивности поступающего в телекоммуникационную сеть трафика, когда на узлах сети возникали очереди. В области малой загруженности сети целесообразно использовать менее сложные модели. Реализация предложенной модели на практике целесообразна именно в программно-конфигурируемых сетях, в которых некоторое усложнение процесса расчета может быть компенсировано более высокой производительностью серверов сетевой операционной системы по сравнению с классическими IP-маршрутизаторами.

Литература

1. Y.1541. ITU-T. Recommendation Y.1541: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks // ITU-T. – Geneva, 2011. – 66 p.
2. Смелянский Р.Л. Программно конфигурируемые сети – основа Интернета нового поколения // Сборник материалов 2-й Всероссийской научно-технической конференции «Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2012)». – Ростов-на Дону, Южный федеральный университет, 2012. – С. 321–329.
3. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. – СПб: BHV, 2002. – 512 с.
4. Евсеева О.Ю., Гаркуша С.В. Обзор технологических и теоретических решений в области маршрутизации на основе качества обслуживания // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3 (8). – С. 24–46 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_evseeva_review.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 12.06.2013).
5. Mérindol P., HYPERLINK "http://www.odysci.com/author/1010112984379483/jean-jacques-pansiot" Pansiot J., Cateloin S. Improving Load Balancing with Multipath Routing // Proc. of the 17th International Conference on Computer Communications and Networks, IEEE ICCCN 2008. – 2008. – P. 54–61.

-
6. Лемешко А.В., Вавенко Т.В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12–29 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 12.06.2013).
 7. Лемешко А.В., Евсева О.Ю. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 4 (9). – С. 16–31 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/4/1/124_lemeshko_tensor.pdf, свободный. Яз. рус. (дата обращения 12.06.2013).
 8. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями: Пер. с англ. / Под ред. Б.С. Цыбакова. – М.: Мир, 1979. – 600 с.
 9. Симонина О.А., Яновский Г.Г. Характеристики трафика в сетях IP // Труды учебных заведений связи. – 2004. – № 177. – С. 8–14.
 10. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб: БХВ, 2005. – 288 с.
 11. Петров М.Н., Пономарев Д.Ю. Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером // Электросвязь. – 2002. – № 2. – С. 35–39.
 12. Chen J.-C., Chan S.H. Multipath Routing for Video Unicast over Bandwidth-Limited Networks Department of Computer Science // Proc. of GLOBECOM'01: San Antonio, Texas. – 2001. – V. 3. – P. 1963–1997.

Вавенко Татьяна Васильевна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант, tv_vavenko@mail.ru
Стерин Вячеслав Леонидович – Харьковский филиал АО «Киевстар», директор, sterin@journal.kh.ua
Симоненко Александр Викторович – Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба, соискатель, simonenko@journal.kh.ua