
Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 504.054

Потоковая модель маршрутизации с учётом потерь пакетов на узлах телекоммуникационной сети

Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гаркуша С.В.

Аннотация: Предложена потоковая модель маршрутизации с учётом потерь пакетов на узлах телекоммуникационной сети. В модели модифицировано условие сохранения потока в узлах (маршрутизаторах) и в сети в целом. Модификация касается учёта возможных потерь пакетов, вызванных перегрузкой очередей на интерфейсах узлов. В ходе аналитического моделирования установлено, что применение предложенной модели целесообразно в условиях средней и высокой загрузки сети.

Ключевые слова: модель, трафик, интерфейс, очередь, маршрутизация, сеть, потери пакетов.

Flow-based model for routing in telecommunications network with packet loss on nodes

Lemeshko A.V., Yevsyeyeva O.Yu., Garkusha S.V.

Abstract: The new flow model for routing in telecommunications network with packet loss on nodes is suggested. The model is based on the modified flow conservation condition for the nodes (routers) and the network as a whole. The proposed modification concerns the possible packet loss caused by the congestion queues on router's interfaces. The results of analytical modeling show that the application of the proposed model appears to be sufficient under the conditions of medium and high network traffic.

Key words: model, traffic, interface, queue, routing, network, packet loss.

Введение

Постоянное расширение перечня предоставляемых инфокоммуникационных услуг, а также рост требований к уровню качества обслуживания (Quality of Service, QoS) запросов пользователей является эффективным катализатором процесса совершенствования технологических средств управления трафиком. С другой стороны, появление концепции программно-конфигурируемых сетей (Software Define Networking, SDN) [1] нацеливает на возможность перехода к системным решениям в области маршрутизации как ключевой задачи по управлению трафиком и обеспечения межконцевого качества обслуживания (end-to-end QoS). Ведь не секрет, что современные протоколы в

своём подавляющем большинстве основаны на математических моделях и алгоритмах поиска кратчайшего пути на графе [2, 3], предложенных в 50-60 годах прошлого века, что в свое время было больше продиктовано требованиями к минимальной вычислительной сложности их практической реализации, чем к уровню качества обслуживания. Распределённый характер маршрутизации, поддерживаемый в современных протоколах маршрутизации [4, 5] с целью повышения масштабируемости конечных решений, также нередко становился причиной множества технологических проблем, связанных, например, с заикливанием пакетов, реализацией эффективной балансировки нагрузки и т.д.

В рамках SDN-решений [1] предполагается, что решение ряда системнозначимых задач, таких, как маршрутизация, управление безопасностью и др., будет вынесено за пределы операционной системы маршрутизаторов, значительно удешевив последние. Эти и другие ключевые задачи по управлению трафиком и сетью должны быть возложены на сетевую операционную систему, развернутую на специальных серверах. Вызванное таким образом повышение централизации решений открывает дополнительные возможности по использованию более эффективных потоковых моделей и методов маршрутизации, более адекватно учитывающих (по сравнению с графовыми моделями) особенности структурно-функционального построения телекоммуникационной сети (ТКС) – её структуру, пропускные способности каналов связи, характеристики трафика, порядок обслуживания пакетов на узлах (маршрутизаторах, маршрутизирующих коммутаторах) сети и др.

Важно отметить, что в настоящее время известно достаточно большое число потоковых моделей маршрутизации, основные из которых представлены линейными [6, 7], нелинейными [8, 9] алгебраическими или дифференциальными [10], разностными [11, 12] уравнениями состояния ТКС. Эти модели значительно расширили возможности по исследованию процессов маршрутизации в ТКС на основе более полного учета особенностей обеспечения качества обслуживания, реализации многопутевой маршрутизации с балансировкой нагрузки и т.д. Однако в основу большинства из перечисленных моделей маршрутизации положены условия сохранения потока на отдельных маршрутизаторах и в ТКС в целом без учёта возможных отказов в обслуживании

ввиду возможных перегрузок, сопровождающихся переполнением очереди пакетов. В этой связи важной *научной и прикладной задачей* является разработка и исследование потоковой модели маршрутизации с учётом потерь пакетов на узлах ТКС.

Разработка потоковой модели маршрутизации с учетом потерь

пакетов телекоммуникационной сети

В рамках разрабатываемой потоковой модели маршрутизации структура ТКС описывается с помощью графа $G = (V, E)$, где V – множество узлов сети, E – множество каналов связи. Для каждого канала $(i, j) \in E$ характерна его пропускная способность ϕ_{ij} , измеряемая в пакетах в секунду (1/с). Каждый маршрутизирующий узел сети имеет несколько интерфейсов, через которые он передает пакеты инцидентным ему узлам-соседям. Причем номера интерфейсов для каждого отдельно взятого узла соответствуют номерам подключаемых через них соседних узлов. Результатом решения задачи маршрутизации является расчёт множества маршрутных переменных x_{ij}^k , каждая из которых характеризует долю интенсивности k -го трафика, направленного с i -го на j -й маршрутизатор через соответствующий, т.е. j -й интерфейс. Стоит отметить, что в процессе функционирования ТКС на интерфейсах сети могут возникать потери пакетов, которые обусловлены первоначально как перегрузкой самого канала, так и в последующем перегрузкой создаваемой очереди. Пусть p_{ij}^k – вероятность потерь пакетов k -го трафика на j -м интерфейсе i -го маршрутизатора по причине его перегрузки. Тогда выражение

$x_{ij}^k(1 - p_{ij}^k)$ (рис. 1) характеризует долю интенсивности k -го трафика, протекающего в канале $(i, j) \in E$, а произведение $x_{ij}^k p_{ij}^k$ численно определяет долю интенсивности k -го трафика, получившего отказ в обслуживании на j -м интерфейсе i -го узла.

Необходимость учёта потерь пакетов на узлах телекоммуникационной сети сопряжена с пересмотром общепринятой записи условия сохранения потока [6, 7], которое в рамках предлагаемой модели маршрутизации принимает вид:

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k = 1, k \in K, i = s_k; \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k(1 - p_{ij}^k) = 0, k \in K, i \neq s_k, d_k; \\ \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k(1 - p_{ij}^k) = \varepsilon^k, k \in K, i = d_k, \end{cases} \quad (1)$$

где K – множество трафиков в сети; s_k – узел-отправитель и d_k – узел-получатель для пакетов k -го трафика; ε^k – доля k -

го трафика, обслуженного сетью, т.е. пакеты которого доставлены от узла-отправителя до узла-получателя.

Важно отметить, что отбрасывание пакетов из очереди на каждом из интерфейсов узла может происходить ввиду её фактического переполнения, реализуя схему Tail Drop, или превентивно – в соответствии с механизмами активного управления очередями (Active Queue Management, AQM) – RED (Random Early Detection), WRED (Weighted RED), ECN (Explicit Congestion Notification) [13] и др.

В ходе расчётов интерфейс, функционирующий в соответствии со схемой Tail Drop, можно представить, например, в виде системы массового обслуживания с отказами вида $M/M/1/N$ [14], в рамках которой вероятность потерь пакетов может быть рассчитана как

$$p = p(q < \Theta_{\text{выф}}) = \frac{(1 - \rho)(\rho)^N}{1 - (\rho)^{N+1}}, \quad (2)$$

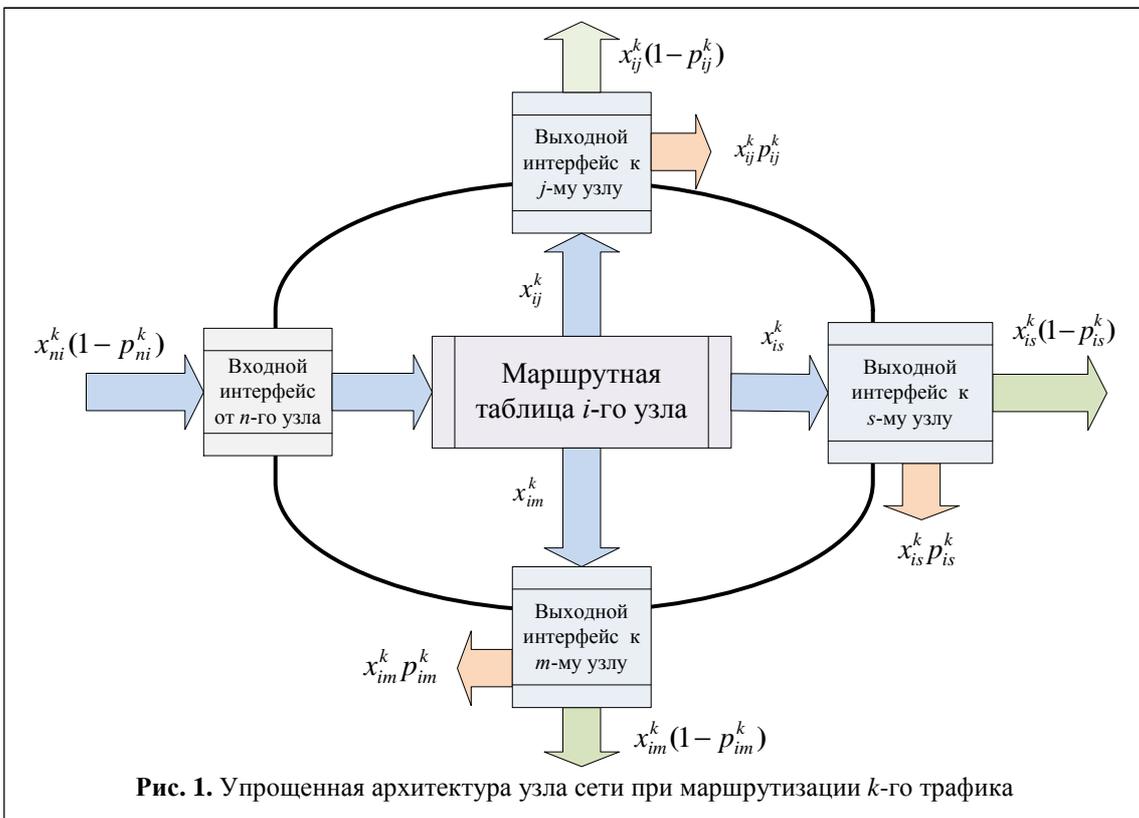


Рис. 1. Упрощенная архитектура узла сети при маршрутизации k -го трафика

где $\rho = \frac{\lambda}{\phi}$ – коэффициент загрузки канала; $N = \Theta_{\text{буф}} + 1$ – максимальное количество пакетов, которое может находиться на интерфейсе, включая буфер ($\Theta_{\text{буф}}$) и сам канал; λ – суммарная пакетная интенсивность трафика в рассматриваемом канале, 1/с. В выражении (2) индексы, характеризующие принадлежность интерфейса тому или иному узлу (маршрутизатору) и номер трафика, для наглядности опущены. С учётом возможных потерь пакетов интенсивность трафика в канале $(i, j) \in E$ в рамках введенных выше обозначений рассчитывается как

$$\lambda_{ij} = \sum_{k \in K} r^k x_{ij}^k (1 - p_{ij}^k), \quad (3)$$

где r^k – средняя интенсивность k -го трафика, поступающего в сеть на обслуживание.

Для примера, при использовании механизма случайного раннего обнаружения (RED) [13] для превентивного ограничения длины очереди на интерфейсе вероятность потерь (отбрасывания) пакетов определяется согласно следующему выражению:

$$p = \frac{q - \Theta_{\min}}{\Theta_{\max} - \Theta_{\min}} \cdot \frac{1}{\delta}, \quad (4)$$

где q – средняя длина очереди на интерфейсе; Θ_{\min} – минимальное пороговое значение длины очереди, при превышении которого начинается процесс отбрасывания пакетов; Θ_{\max} – максимальное пороговое значение длины очереди, начиная с которого отбрасываются все поступающие в узел пакеты; δ – знаменатель граничной вероятности (mark probability denominator). Вероятность потерь (отбрасывания) пакетов при $q < \Theta_{\min}$ равна нулю, а при $q > \Theta_{\max}$ – равна единице.

Традиционно [6, 7] в зависимости от вида дополнительно накладываемых ограничений на переменные x_{ij}^k задача маршрутизации может быть классифицирована двояко. В случае наличия ограничений

$$0 \leq x_{ij}^k \leq 1 \quad (5)$$

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

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad (6)$$

то реализуется однопутевой способ доставки пакетов обслуживаемых трафиков.

Условия-ограничения, отвечающие за предотвращение перегрузки каналов связи по пропускной способности, в рамках предлагаемой модели имеют вид

$$\sum_{k \in K} r^k x_{ij}^k < \phi_{ij}, \quad (i, j) \in E. \quad (7)$$

Важно отметить, что выполнение условий (7) приводит к управляемости процесса борьбы с перегрузкой, т.к. обеспечивает справедливость выражения (2), гарантируя, что $\rho < 1$. Однако ввиду случайного характера современного преимущественно мультимедийного трафика выполнение условий (7) является лишь необходимым, но далеко не достаточным условием отсутствия потерь пакетов на узлах ТКС по причине возможного переполнения очередей. Достаточным условием выполнения ограничений (7) является лишь для случая обслуживания постоянного по своей интенсивности трафика, например, трафика CBR (Constant Bit Rate).

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

$$\max_{x, \epsilon} \sum_{k \in K} a^k r^k \epsilon^k, \quad (8)$$

в котором весовые коэффициенты a^k могут, в общем случае, отражать приоритет k -го трафика.

Использование критерия (8) обеспечивает максимизацию производительности ТКС, т.е. суммарную интенсивность обслуженного сетью трафика с учётом его приоритета. Тем самым минимизируются возможные отказы в обслуживании, вызванные перегрузкой элементов (каналов, очередей) сети. В приведенной постановке оптимизационная задача с критерием (8) и ограничениями (1)-(5), (7) относится к классу задач нелинейного программирования ввиду нелинейности условий сохранения потока (1). А при наличии множества ограничений (1)-(4), (6), (7) – это уже задача смешанного целочисленного нелинейного программирования (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP).

Анализ решений задачи маршрутизации с учётом потерь пакетов в телекоммуникационной сети

Для наглядности получаемых результатов проведем решение задачи многопутевой маршрутизации с учётом отказов (потерь пакетов) в ТКС, представленной на рис. 1, основываясь на предложенной потоковой модели (1)-(8). Рассмотрим однопродуктовый случай, когда сеть обслуживает один трафик, протекающий, например, от первого узла к шестому. На рис. 1 в разрывах каналов связи указаны их пропускные способности (1/с).

Для примера работа каждого из интерфейсов маршрутизаторов ТКС моделировалась системой массового обслуживания М/М/1/Н (2), а емкость буфера изменялась от десяти до тридцати пакетов ($N = 10 \div 30$). На рис. 2 показано, как изменяются интенсивности потерь пакетов на том или ином интерфейсе узлов ТКС ввиду переполнения очереди в зависимо-

сти от загруженности сети. Под загруженностью сети понималось отношение интенсивности трафика, поступающего в сеть, к ее пропускной способности. Как видно из рис. 1, пропускная способность ТКС в направлении от первого к шестому узлу составляет 300 пакетов в секунду. В этой связи интенсивность трафика, поступающего в сеть на первый маршрутизатор и предназначенного для шестого маршрутизатора, изменялась от нуля до 300 1/с.

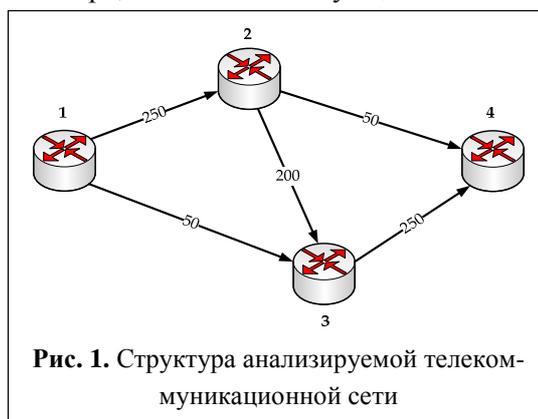
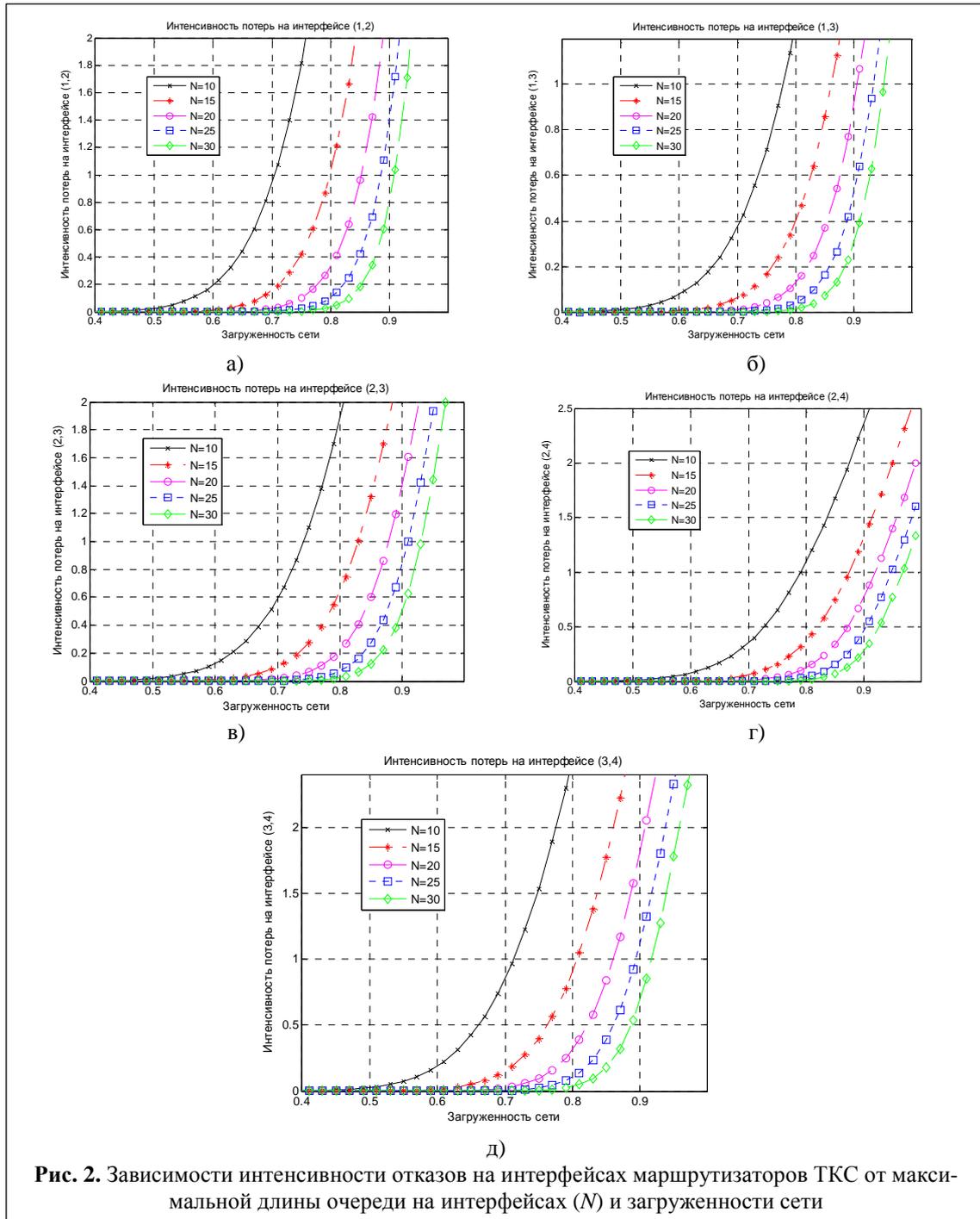


Рис. 1. Структура анализируемой телекоммуникационной сети

Как показали результаты моделирования (рис. 2), при загруженности сети от 0,45 и выше практически на всех интерфейсах маршрутизаторов возникают потери пакетов ввиду переполнения очереди. Значения интенсивности отказов зависели, как и ожидалось, от максимальной длины очереди (N), пропускной способности канала и его места в структуре ТКС.

На рис. 3 приведены примеры решения задачи маршрутизации при различной интенсивности трафика (r), поступающего в сеть. Результатом решения являются значения интенсивности трафика (1/с), протекающего в каждом из каналов связи (эти значения указаны на рисунке в разрывах линий). В первом случае – случае низкой интенсивности входного трафика ($r = 105$) – потерь пакетов на интерфейсах узлов сети не наблюдалось, т.к. очереди не переполнялись (рис. 3 а). Во втором случае ($r = 267$, рис. 3 б) в сети имела ме-



сто перегрузка очередей, и соответственно происходили потери пакетов, интенсивность которых ($1/c$) указана дополнительно возле каждого интерфейса.

Потери пакетов на отдельных интерфейсах ТКС вызвали снижение и относительной производительности сети (рис. 4), под которой понималось отношение интенсивности обслуженного сетью трафика

к общей интенсивности трафика, поступающего в сеть.

В рамках модели (1)-(8) относительная производительность ТКС рассчитывалась в соответствии с выражением

$$F = \sum_{k \in K} \varepsilon^k . \quad (9)$$

Исходя из (9), согласно выражению $1 - F$ можно аналитически оценить вероятность потерь пакетов в сети в целом.

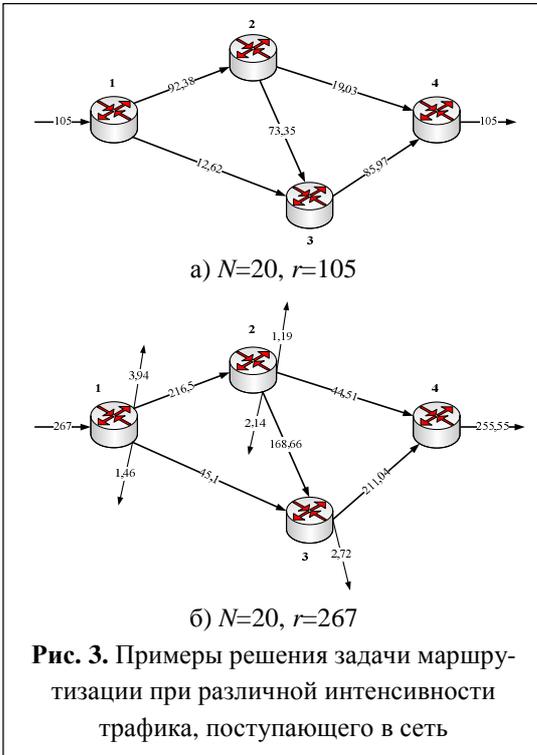


Рис. 3. Примеры решения задачи маршрутизации при различной интенсивности трафика, поступающего в сеть

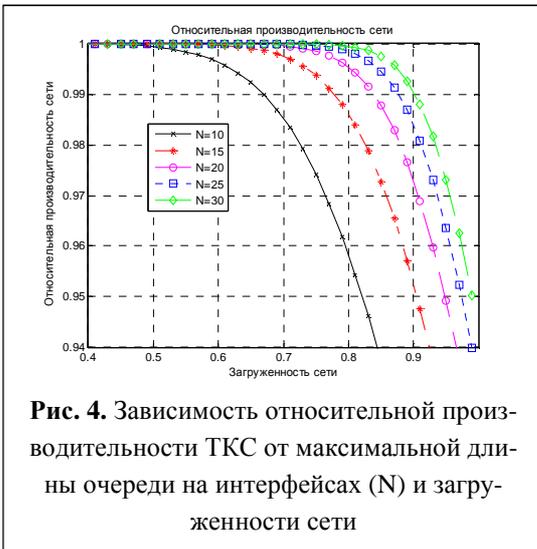


Рис. 4. Зависимость относительной производительности ТКС от максимальной длины очереди на интерфейсах (N) и загрузки сети

Выводы

Таким образом, как показали результаты моделирования (рис. 4), целесообразность применения предлагаемой модели напрямую связана с текущей загруженностью сети. Так, при невысокой загруженности ТКС (до 0,5) переполнения очередей не возникает, потери пакетов фактически

отсутствуют, а потому имеет смысл применять ранее известную и более простую по сравнению с (1)-(8) модель маршрутизации [6, 7] с линейными условиями сохранения потока

$$\begin{cases} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k = 1, k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 0, k \in K, i \neq s_k, d_k, \\ \sum_{j:(j,i) \in E} x_{ji}^k = 1, k \in K, i = d_k. \end{cases} \quad (10)$$

В подобных условиях применение условия (1) лишь усложняет процесс расчётов, а его замена на выражение (10) значительно упрощает решение поставленной задачи, переводя её в класс задач линейного программирования [6, 7].

Однако уже при средней, а тем более высокой загруженности сети (от 0,5 и выше) более адекватной является предлагаемая в данной статье модель, основанная на нелинейном условии сохранения потока в узлах и сети в целом (1). Её применение, как показано на рис. 4, позволяет более точно (в среднем на 3-4 %) оценить скоростные показатели QoS (интенсивность обслуженного трафика) и показатели надежности (вероятность потерь пакетов). Для примера, как указано в рекомендациях Международного союза электросвязи Y.1541 [15], 3% потерянных пакетов является граничным значением при обеспечении качества обслуживания мультимедийного трафика. Кроме того, при расчете показателей воспринимаемого качества обслуживания (Quality of experience, QoE) увеличение процента потерянных пакетов до 2-3% приводит практически к неудовлетворительному предоставлению услуг VoIP [16], IPTV [17] и видеотелефонии [18]. Поэтому пренебрежение даже 2-3% потерянных пакетов не является допустимым в условиях маршрутизации мультимедийного трафика, доля которого в

современных мультисервисных ТКС постоянно растет.

Литература

1. Барсков А. Cisco и SDN // Журнал сетевых решений / LAN. 2013. № 02. Режим доступа: <http://www.osp.ru/lan/2013/02/13033667>.
2. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир. 1989. 544 с.
3. Форд Л., Фалкерсон Д. Потoki в сетях: Пер. с англ. М.: Мир. 1966. 276 с.
4. Остерлох Х. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. С.Пб.: BHV, С.Пб. 2002. 512 с.
5. Medhi D., Ramasamy K. Network routing: algorithms, protocols, and architectures. Morgan Kaufmann. 2007. 788 p.
6. Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya Dynamic constrained multipath routing for MPLS networks // Proc. of IEEE ICCCN. Scottsdale. 2001. Vol.2., №1. P. 348-353.
7. Wang Y., Wang Z. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering // Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999. P. 582-588.
8. Gallager R.G. A minimum delay routing algorithm using distributed computation // IEEE Trans. on communications. 1975. Vol. 25, №1. P.73-85.
9. Лемешко А.В., Дробот О.А. Модель многопутевой QoS-маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2006. Вып. 144. С. 16-22.
10. Segall A. The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications. 1975. Vol. 25. №1. P. 85-95.
11. Лемешко А.В., Симоненко Д.В. Динамическая модель балансировки буферных и канальных ресурсов транспортной сети телекоммуникационной системы [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. 2010. № 2 (2). С. 42 – 49. Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_dynamic.pdf.
12. 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.
13. Вегешна Ш. Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 386 с.

14. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных систем. М.: Техносфера. 2003. 512 с.

15. Recommendation ITU-T Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. Geneva: ITU-T, 2012. 57 p.

16. Recommendation ITU-T G.107. The E-model: a computational model for use in transmission planning. Geneva: ITU-T, 2012. 18 p.

17. Recommendation ITU-T G.1080. Quality of experience requirements for IPTV services. Geneva: ITU-T, 2009. 36 p.

18. Recommendation ITU-T G.1070. Opinion model for video-telephony applications. Geneva: ITU-T, 2013. 22 p.

References

1. Barskov A. Cisco i SDN [Cisco and SDN], Zhurnal setevyh reshenij / LAN, 2013, № 02. <http://www.osp.ru/lan/2013/02/13033667>.
2. Bertsekas D., Gallager R. Seti peredachi dannyh [Data Networks]. M.: Mir, 1989. 544 p.
3. Ford L., Falkerson D. Potoki v setjakh [Flows in networks]. M.: Mir, 1966, 276 p.
4. Osterloh H. Marshrutizacija v IP-setjah. Principy, protokoly, nastrojka. [IP Routing] – S.Pb.: BHV-S.Pb., 2002, 512 p.
5. Medhi D., Ramasamy K. Network routing: algorithms, protocols, and architectures, Morgan Kaufmann, 2007, 788 p.
6. Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya. Dynamic constrained multipath routing for MPLS networks, Proc. of IEEE ICCCN. Scottsdale, 2001. Vol.2., №1, pp. 348-353.
7. Wang Y., Wang Z. Explicit routing algorithms for Internet Traffic Engineering, Proc. of 8th International Conference on Computer Communications and Networks. Paris, 1999, pp. 582-588.
8. Gallager R.G. A minimum delay routing algorithm using distributed computation, IEEE Trans. on communications, 1975, Vol. 25, №1, pp.73-85.
9. Lemeshko A.V., Drobot O.A. Radiotekhnika: All-Ukr. Sci. Interdep. Mag., 2006, N. 144, pp. 16-22.
10. Segall A. IEEE Trans. on communications, 1975, Vol. 25. №1, pp. 85-95.
11. Lemeshko A.V., Simonenko D.V. Problemy telekomunikatsiy, 2010, № 2 (2), pp. 42 – 49. http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_dynamic.pdf.
12. Popovskij V.V., Lemeshko A.V., Evseeva O.Ju. Naukovi zapiski UNDIIZ, 2009, №1(9), pp. 3-26.
13. Vegeshna Sh. Kachestvo obsluzhivaniya v setjah IP [IP Quality of Service], M.: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2003, 386 p.

14. *Vishnevskij V.M. Teoreticheskie osnovy proektirovaniya komp'yuternyh sistem* [Theoretical foundations of computer system design], M.: Teh-nosfera, 2003, 512 p.

15. Recommendation ITU-T Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. – Geneva: ITU-T, 2012. 57 p.

16. Recommendation ITU-T G.107. The E-model: a computational model for use in transmission planning. Geneva: ITU-T, 2012. 18 p.

17. Recommendation ITU-T G.1080. Quality of experience requirements for IPTV services. Geneva: ITU-T, 2009. 36 p.

18. Recommendation ITU-T G.1070. Opinion model for video-telephony applications. Geneva: ITU-T, 2013. 22 p.

Поступила 20 марта 2013 г.

Информация об авторах

Лемешко Александр Витальевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники.

E-mail: avlem@ukr.net.

Евсеева Оксана Юрьевна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники.

E-mail: evseeva.o.yu@ gmail.com.

Гаркуша Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры телекоммуникационных систем Харьковского национального университета радиоэлектроники.

E-mail: sv.garkusha@mail.ru.

Адрес: Украина, 61066, г. Харьков, пр. Ленина, 14.

Alexandr V. Lemeshko – Doctor of Technical Sciences, professor of department of Telecommunication Systems in Kharkov National University of Radioelectronics.

Oksana Yevsyeyeva – Doctor of Technical Sciences, associate professor, professor of department of Telecommunication Systems in Kharkov National University of Radioelectronics.

Sergey Garkusha – PhD, associate professor, doctoral candidate of department of Telecommunication Systems in Kharkov National University of Radioelectronics.

Address: Ukraine, 61166, Kharkov, Lenin Prosp., 14.