

УДК 621.391

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКОВОЙ МОДЕЛИ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С НЕОДНОРОДНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ



[АМАЛЬ МЕРСНИ](#)

Национальный технический
университет «ХПИ»

Abstract – The improvement of previously known flow-based model of load balancing in a telecommunications network (TCN) with nonuniform architectures have been proposed. Under the structural nonuniformity of the TCN it is understood that its structure could be represented by separable graph, or close to it, i.e., telecommunications network comprises routers and links, modeling by cutnodes and bridges, respectively. Functional nonuniformity of TCN has particularly revealed that the network can contain the minimal cut with capacity which was much less than capacity of other network cuts. The improvement is concerned with the revision of the optimality criterion used in routing solutions. It is proposed to transit to a linear-quadratic criterion, which minimizes not only the upper bound of utilization the network links as a whole, but also individual links utilization. It has allowed better organization of the process of load balancing in TCN and to ensure the best value of such an important QoS parameter as the average end-to-end delay of packets in the network: an average from 20-30% to 40-60% compared with solutions based on the use of the Traffic Engineering criterion, and an average from 5-9% to 20-40% as compared with a linear analog of the proposed criterion. As the calculation results demonstrated, the use of the proposed load balancing criterion is most effective in high nonuniformity of the network architecture, for example, when the structure of the network was modeled by separable graph, and capacity of minimal cut differed significantly (down) from the bandwidth of other network cuts. Also, the effectiveness of the proposed solutions was increased by routing traffic with higher Hurst parameter.

Анотація – Запропоновано удосконалення раніше відомої потокової моделі балансування навантаження в телекомунікаційній мережі (ТКМ), яка максимально задовольняє вимогам концепції Traffic Engineering. Удосконалення пов'язане з переглядом використаного критерію оптимальності маршрутних рішень. Пропонується перейти до лінійно-квадратичного критерія, в рамках якого мінімізується не тільки верхній поріг завантаженості каналів зв'язку мережі в цілому, але й окремі коефіцієнти використання каналів. Це дозволило більш ефективно організувати процес балансування навантаження в ТКМ і забезпечити найкращі значення такого важливого QoS-показника як середня міжкінцева затримка пакетів в мережі.

Аннотация – Предложено усовершенствование ранее известной потоковой модели балансировки нагрузки в телекоммуникационной сети (ТКС), которая максимально удовлетворяет требованиям концепции Traffic Engineering. Усовершенствование связано с пересмотром используемого критерия оптимальности маршрутных решений. Предлагается перейти к линейно-квадратичному критерию, в рамках которого минимизируется не только верхний порог загрузки каналов связи сети в целом, но и отдельные коэффициенты использования каналов. Это позволило более эффективно организовать процесс балансировки нагрузки в ТКС и обеспечить лучшие значения такого важного QoS-показателя как средняя межконцевая задержка пакетов в сети.

Введение

В соответствии с требованиями концепции Traffic Engineering (TE) при обеспечении качества обслуживания (Quality of Service, QoS) ресурс телекоммуникационной сети (ТКС) должен использоваться сбалансированно [1-3], не приводя к перегрузке отдельных сетевых элементов (маршрутизаторов и каналов связи) при недогрузке других. При этом сетевой ресурс классифицируется на буферный и каналный. Буферный ресурс представляет собой организованные на маршрутизаторах ТКС очереди пакетов, а каналный ресурс, в свою очередь, характеризуется пропускной способностью (ПС) каналов связи (КС). Именно загруженность буфера

очередей и каналов связи существенно влияет на численные значения ключевых QoS-показателей (среднюю задержку пакетов, джиттер, уровень потерь пакетов) и производительность ТКС в целом.

Концепция Traffic Engineering активно внедряется в современные ТКС на различных функциональных уровнях архитектуры обеспечения QoS: управления очередями, маршрутизации, резервирования ресурсов, профилирования трафика и др. Это подтверждается разработкой и постепенным внедрением таких сетевых решений, как TE-Queueing [4], OSPF-TE, ISIS-TE, RSVP-TE, CR-LDP [5-9]. Эффективность протокольной (программной) реализации идей, заложенных в концепцию TE, во многом определяется уровнем используемого при этом математического и алгоритмического обеспечения. С точки зрения решения маршрутных задач в качестве эталонного нередко используется математическая модель балансировки нагрузки, описанная в работах [10-12], ориентированная на минимизацию верхнего порогового значения загруженности каналов связи ТКС, что, как известно [13-15], способствует улучшению вышеперечисленных QoS-показателей. Однако к ее недостаткам, как показано в работах [16, 17], относят обеспечиваемую относительно невысокую эффективность решений задач многопутевой маршрутизации в ТКС, имеющих неоднородную архитектуру. При этом архитектурная неоднородность может быть вызвана как структурными особенностями построения сети [16, 17], так и функциональной асимметрией, проявляющейся, например, в таком распределении пропускных способностей каналов связи, что в итоге может вызвать образование в ТКС «узких мест», загруженность которых и будет определять максимальные значения загруженности элементов сети. Это негативно отражается на оптимизации использования каналов связи, не входящих в «узкое место» сети, но от загруженности которых также во многом зависят значения межконцевых QoS-показателей, в частности и средняя межконцевая задержка пакетов. Поэтому научная задача, связанная с усовершенствованием процессов балансировки нагрузки при решении задач многопутевой маршрутизации в ТКС с неоднородной архитектурой, является актуальной.

I. Описание базовой математической модели балансировки нагрузки при решении задач одноадресной маршрутизации в ТКС

В работах [10-12] решение задачи балансировки нагрузки основано на представлении ТКС в виде ориентированного графа $G = (V, E)$, в котором множество вершин V описывают маршрутизаторы сети, а множество дуг E моделируют каналы связи. При этом каждой дуге $(i, j) \in E$ соответствует некоторый весовой коэффициент, характеризующий, например, пропускную способность моделируемого канала связи $\mu_{i,j}$ или же его маршрутную метрику.

Рассматриваемая модель описывает мультипоточковый случай, т.е. когда учитывается взаимное влияние друг на друга множества поступающих в сеть пользовательских потоков $k \in K$. Для каждого k -го потока в качестве известных выступают следующие его основные характеристики: r_k – средняя пакетная скорость (интенсивность),

измеряемая в пакетах в секунду (1/с); s_k, d_k – вершины графа, моделирующие маршрутизатор-источник и маршрутизатор-получатель пакетов k -го потока соответственно. Порядок маршрутизации и балансировки нагрузки в ТКС определяют маршрутные переменные $x_{i,j}^k$, каждая из которых характеризует долю k -го потока, протекающего в канале связи, представленного дугой $(i, j) \in E$. Исходя из физического смысла маршрутных переменных на них накладываются ограничения вида

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

Введение ограничений (1) отвечает за реализацию в ТКС многопутевой стратегии маршрутизации, не запрещая при этом использование и однопутевых решений, при которой переменные $x_{i,j}^k$ могут принимать крайние из своих возможных значений (ноль или единицу). Кроме того, в ходе расчета маршрутных переменных должны выполняться условия сохранения потока на маршрутизаторах ТКС [11, 12]:

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

В ходе выполнения условий (2) гарантируется отсутствие потерь пакетов на каждом маршрутизаторе и в сети в целом, а также обеспечивается связность рассчитываемых маршрутов между отправителем и получателем k -го потока пакетов.

Для предотвращения перегрузки каналов связи ТКС необходимо обеспечить выполнение следующих условий [11-13]:

$$\sum_{k \in K} r_k \cdot x_{i,j}^k \leq \alpha \cdot \mu_{i,j}, \quad (i, j) \in E, \quad (3)$$

число которых соответствует количеству каналов связи в ТКС. В условиях (3) неизвестный параметр α – дополнительно вводимая управляющая переменная, на которую согласно ее физическому смыслу накладывается следующее ограничение:

$$0 \leq \alpha \leq 1. \quad (4)$$

Переменная α численно характеризует максимальное значение порога загрузки (коэффициента использования) каналов связи сети. Для повышения качества обслуживания в ходе реализуемой балансировки нагрузки в ТКС эту переменную необходимо минимизировать, определяя тем самым вид критерия оптимальности решений по маршрутизации и балансировке нагрузки в ТКС [10-12]

$$\alpha \rightarrow \min. \quad (5)$$

Оптимизационная задача (1)-(5) относится к классу задач линейного программирования, т.к. целевая функция (5), подлежащая минимизации, линейна, как и линейны все введенные на маршрутные переменные $x_{i,j}^k$ (1)-(3) и переменную α (3), (4) ограничения. При решении сформулированной оптимизационной задачи результирующее минимальное значение переменной α в соответствии с условиями (3) и (4) количественно соответствует коэффициенту использования наиболее загруженного канала. Как показано в работах [15, 16], значение переменной α при росте загруженности сети увеличивается линейно, способствуя тем самым прогнозируемому (не линейному, а плавному) изменению зависящих от нее основных показателей качества обслуживания – средней задержки, джиттера и вероятности потерь пакетов.

II. Анализ направлений усовершенствования базовой математической модели балансировки нагрузки в ТКС

Как отмечалось во введении, описанная модель (1)-(5) не обеспечивает максимальное улучшение основных QoS-показателей при решении задач многопутевой маршрутизации в ТКС, имеющих неоднородную архитектуру [16, 17]. Таким образом, при наличии в сети «узких мест», имеющих невысокую пропускную способность, именно их загруженность будет определять значения функции (5), не запрещая, но и не способствуя минимизации загруженности остальных каналов связи ТКС. Для некоторых частных случаев, ограничивающихся представлением сети в виде разделимого графа, в работе [16] предлагается осуществлять балансировку нагрузки «по частям», т.е. отдельно в каждой связной компоненте графа, соединенных мостом через точки сочленения. В этом случае максимальная загруженность каналов связи сети, представленная значением переменной α , будет соответствовать коэффициенту использования канала, моделируемого мостом графа. Оптимизация балансировки в связных компонентах сети, соединенных мостом, позволяет улучшить конечные решения с точки зрения повышения качества обслуживания [16].

Однако подобный подход адекватно может быть применен лишь в тех, случаях, когда физическая или логическая архитектура сети может быть представлена разделимым графом с несколькими точками сочленения и мостом. Если же низкопроизводительный участок (узкое место) сети на графовой модели ТКС не может быть описано единственным мостом или же структура сети не содержит точек сочленения, то подход, основанный на раздельном решении задач балансировки по отдельным сетевым фрагментам, применить невозможно. Это объясняется тем, что возникает неоднозначность получаемых решений в связных фрагментах сети и в каналах связи, которые образуют «узкое место» ТКС, что сопровождается нарушением связности межконцевых маршрутов. Поэтому в работах [10, 17] усовершенствование базовой модели (1)-(5) касается не пересмотра порядка расчета маршрутных переменных, а изменения самого вида используемого критерия оптимальности и заложенной в его основу целевой функции.

Как правило, для повышения чувствительности критерия оптимальности к загруженности не только «узкого места» сети, но и других каналов связи в критерий оптимальности вводят слагаемые, численно связанные с коэффициентом использования всех каналов ТКС. При этом по аналогии с подходом, изложенным в статье [17], целевая функция, подлежащая минимизации, может сохранять свой линейный вид

$$J_l = \vec{f}^t \cdot \vec{x} + g \cdot \alpha \rightarrow \mathbf{min}, \quad (6)$$

где \vec{x} – вектор маршрутных переменных $x_{i,j}^k$; \vec{f} – вектор маршрутных метрик, координатами которого являются величины $1/\mu_{i,j}$, что ориентирует на включение в оптимальный путь (пути) каналов связи с наибольшей пропускной способностью; g – положительный весовой коэффициент, величина которого определяет важность второго слагаемого в критерии (6); $[\cdot]^t$ – операция транспонирования матрицы (вектора). Для того, чтобы минимизировался в первую очередь верхний порог загруженности каналов ТКС, т.е. второе слагаемое в выражении (6), значение коэффициента g необходимо выбрать достаточно большим.

В работе [17] критерий оптимальности, модифицируя выражение (5), уже приобретает линейно-квадратичную форму:

$$J_{lq} = \vec{x}^t \cdot H \cdot \vec{x} + g \cdot \alpha \rightarrow \mathbf{min}. \quad (7)$$

где H – диагональная матрица, координатами которой являются маршрутные метрики (величины $1/\mu_{i,j}$).

В этой связи в данной работе проведено исследование, заключающееся в сравнительном анализе решений задачи балансировки нагрузки в ТКС с неоднородной архитектурой, получаемых на основе использования различных критериев оптимальности (5), (6) и (7). В качестве показателя эффективности получаемых решений выступали значения средней межконцевой задержки пакетов, которая для каждого из потоков рассчитывалась в соответствии с формулой [16, 17]:

$$\tau^k = \sum_{p \in P} x_p^k \tau_p^k, \quad (8)$$

где P – множество путей между анализируемой парой маршрутизаторов «отправитель» и «получатель»; x_p^k – доля k -го потока, протекающего по p -му пути;

$$\tau_p^k = \sum_{(i,j) \in p} \tau_{i,j}^k \quad (9)$$

– средняя задержка пакетов k -го потока вдоль p -го пути; $\tau_{i,j}^k$ – средняя задержка пакетов k -го потока в канале, представленного дугой (i,j) . Без потери общности получаемых результатов предполагалось для вычисления средней задержки пакетов в канале использовать выражение [13]

$$\tau_{i,j} = \frac{1}{\mu_{i,j}} + \rho_{i,j} \frac{\rho_{i,j}^{1/2(1-H)}}{(1-\rho_{i,j})^{H/(1-H)} \sum_{k \in K} r_k \cdot x_{i,j}^k}, \quad (10)$$

где

$$\rho_{i,j} = \frac{\sum_{k \in K} r_k \cdot x_{i,j}^k}{\mu_{i,j}}$$

– коэффициент использования канала, представленного дугой (i, j) ; $0,5 \leq H \leq 1$ – параметр самоподобия (параметр Херста), значения которого зависят от типа передаваемого трафика (табл. 1) [18].

Табл. 1. Значения параметра Херста при моделировании различных типов трафика (в соответствии с рекомендациями ITU-T Q.3925)

Тип трафика		Тип потока	Диапазон значений параметра Херста (H)
WWW-трафик		самоподобный	$H=0,7...0,9$
Передача данных (файлов)			$H=0,85...0,95$
Электронная почта (e-mail)			$H=0,75$
Одноранговый (P2P) трафик			$H=0,55...0,6$
Трафик IPTV	одноадресный		$H=0,75...0,8$
	многоадресный		$H=0,55...0,6$
Трафик телеметрии в сенсорных сетях			$H=0,67...0,69$

Такую задержку (10) будут испытывать все пакеты потоков, претендующих на пропускную способность канала, заданную величиной $\mu_{i,j}$. Поэтому в формуле (10) в обозначении величины $\tau_{i,j}$ индекс k опущен.

III. Сравнительный анализ решений задачи балансировки нагрузки в ТКС с неоднородной архитектурой

Сравнительный анализ решений задачи балансировки нагрузки в ТКС с неоднородной архитектурой, получаемых на основе использования различных критериев оптимальности (5), (6) и (7), произведен на ряде сетевых архитектур, отличающихся размером, степенью неоднородности и производительностью. Для наглядности результаты сравнительного анализа будут представлены на примере четырех сетевых конфигураций.

Так, на рис. 1 представлена ТКС, структурная неоднородность которой состоит в том, что сеть может быть описана разделимым графом, в котором точкой сочленения выступает вершина, моделирующая третий маршрутизатор. Именно при выходе из строя данного маршрутизатора исходная ТКС распадется на две связанных компоненты, первая из которых включает в себя первый, второй и четвертый маршрутизаторы, а вторая – маршрутизаторы с номерами пять, шесть, семь и восемь. На рис. 1

в разрывах каналов связи указаны их пропускные способности. Первый маршрутизатор выступает отправителем, а восьмой – получателем пакетов, передаваемых, например, с интенсивностью в 400 1/с.

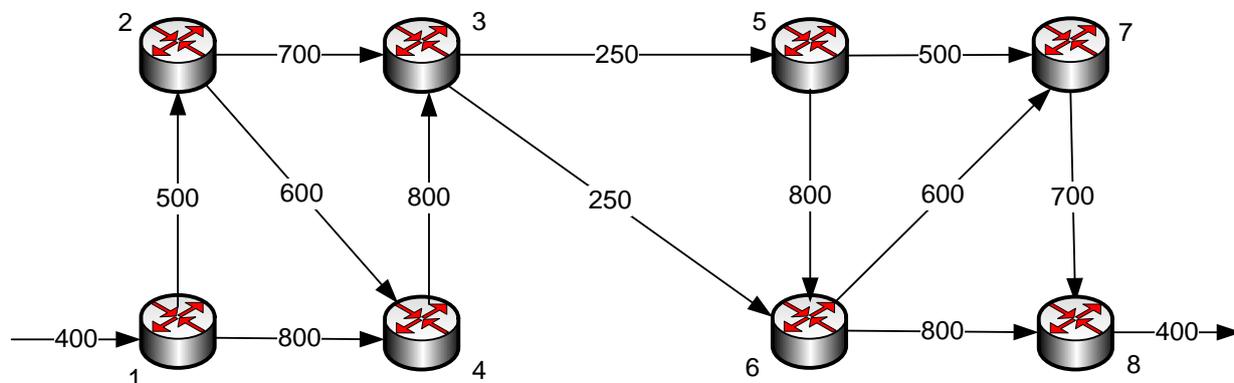
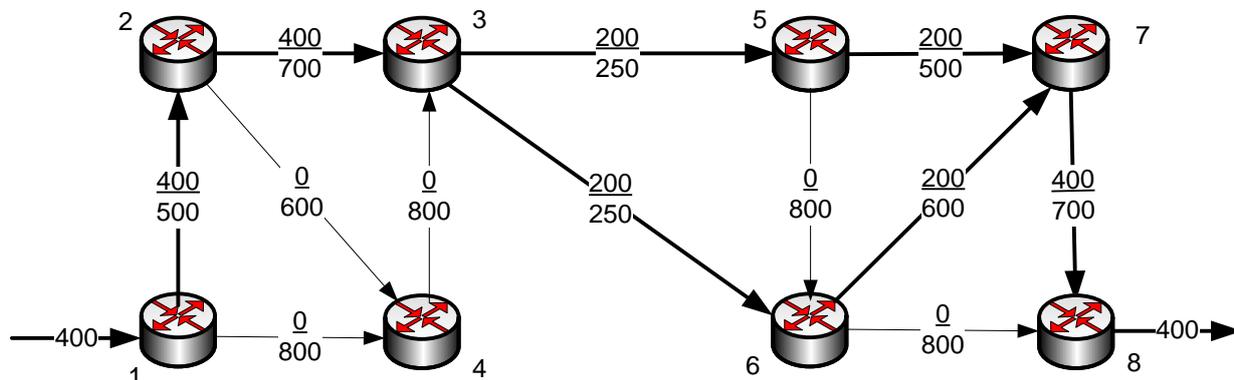


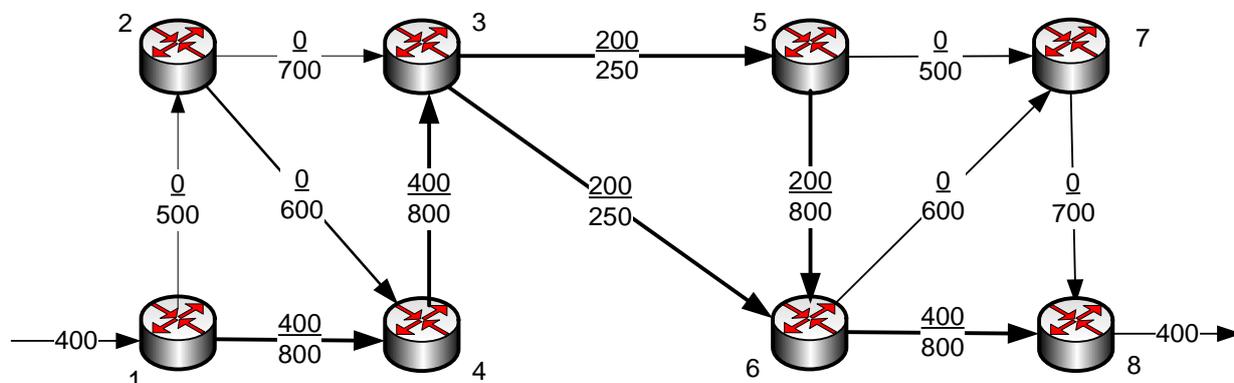
Рис. 1. Пример первой сетевой архитектуры

Функциональная неоднородность представленной на рис. 1 архитектуры ТКС определяется тем, что при передаче пакетов от первого маршрутизатора к восьмому в сети формируется разрез сети, имеющий очень ограниченную производительность – «узкое место» по сравнению с другими разрезами. Этот разрез включает в себя каналы, соединяющие третий маршрутизатор с шестым и пятым, и имеет пропускную способность в 500 1/с. На рис. 2 представлены примеры оптимальных решений задачи балансировки нагрузки в ТКС на основе использования модели (1)-(4) с различными критериями оптимальности: для критерия (5) – рис. 2 а, для критерия (6) – рис. 2 б, для критерия (7) – рис. 2 в. В разрывах каждого канала связи на рис. 2 указана дробь, в которой в числителе приведена интенсивность передаваемого потока пакетов, а в знаменателе – пропускная способность данного канала связи.

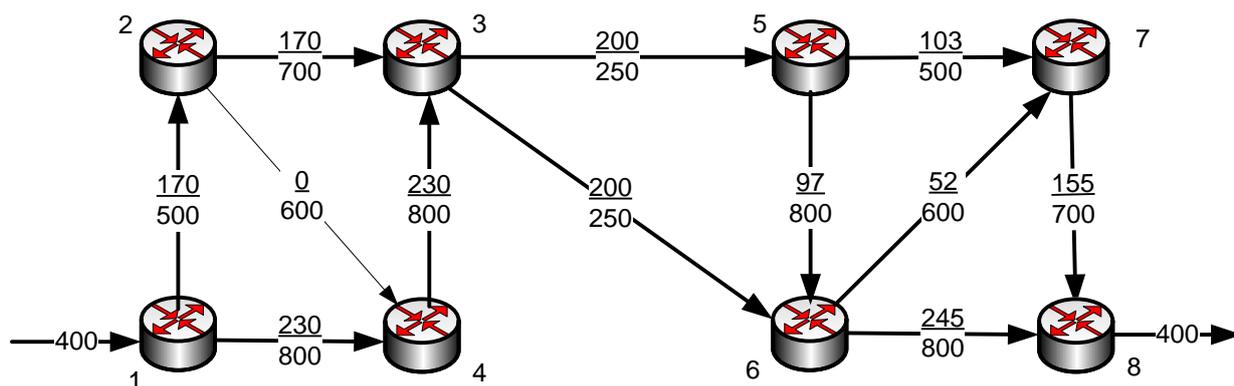
Каждое из решений, показанных на рис. 2, ориентировано на реализацию многопутевой стратегии маршрутизации и обеспечение одинакового значения параметра $\alpha = 0,8$, определяемого для каналов связи (3, 5) и (3, 6) минимального разреза сети. Однако порядок маршрутизации и балансировки нагрузки по каналам связи, не входящим в данный разрез, при использовании различных критериев оптимальности достаточно сильно отличается. В табл. 2 подробно охарактеризованы мультипути и образующие их пути с точки зрения интенсивности передаваемых по ним потоков (рис. 2) и результирующих значений средней межконцевой задержки пакетов (8). При этом в табл. 2 результаты расчета средней задержки (8)-(10), для примера, детализированы для значения параметра Херста $H = 0,5$.



а) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (5)



б) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (6)



в) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (7)

Рис. 2. Пример решения задачи балансировки нагрузки при использовании модели (1)-(4) и различных критериев оптимальности для первой сетевой архитектуры (рис. 1)

Табл. 2. Характеристика решений задачи балансировки нагрузки при использовании различных критериев оптимальности для первой сетевой архитектуры

Используемый критерий	Маршруты, входящие в мультипуть	Доля потока, протекающего вдоль пути	Скорость передачи пакетов (1/с)	Средняя задержка вдоль маршрута (мс)	Средняя межконцевая задержка пакетов (мс)
(5)	1→2→3→5→7→8	0,5	200	40	39,6
	1→2→3→6→7→8	0,5	200	39,2	
(6)	1→4→3→5→6→8	0,5	200	29,2	28,3
	1→4→3→6→8	0,5	200	27,5	
(7)	1→4→3→6→8	0,5	200	25,3	27,1
	1→2→3→5→7→8	0,2575	103	29,3	
	1→2→3→5→6→7→8	0,13	52	30	
	1→2→3→5→6→8	0,035	14	28,1	
	1→4→3→5→6→8	0,0775	31	26,7	

На рис. 3 представлены результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста. Результаты отнесены к архитектуре ТКС, приведенной на рис. 1. Применение предложенного критерия (7) позволяет улучшить численные значения средней межконцевой задержки пакетов на 31-34% по сравнению с использованием критерия (5) и на 3-4,5% по сравнению с использованием критерия (6).

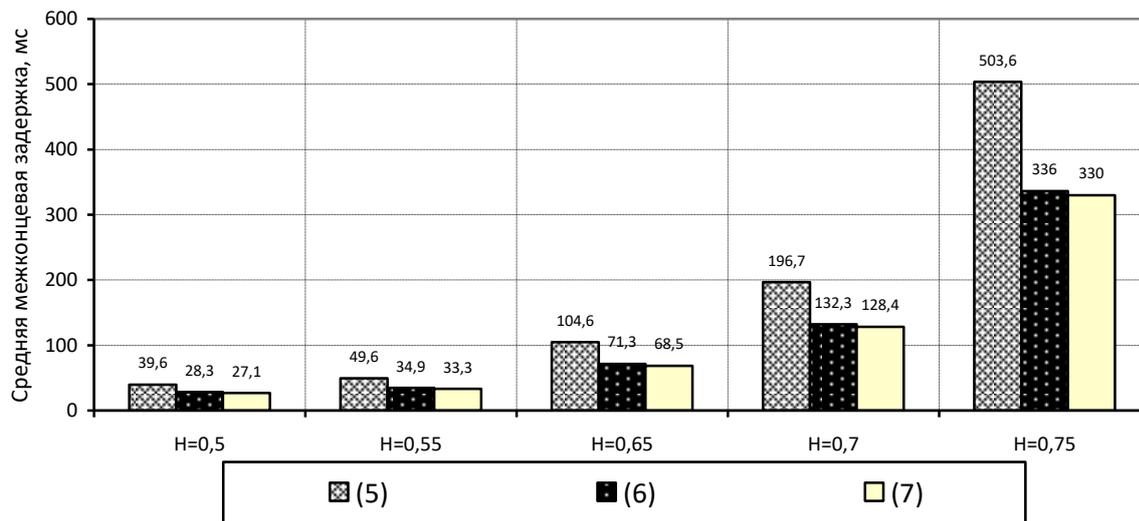


Рис. 3. Результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста (архитектура ТКС приведена на рис. 1)

Второй вариант сетевой архитектуры, подлежащий анализу, показан на рис. 4 и отличается от первой архитектуры наличием дополнительно введенного канала между четвертым и шестым маршрутизаторами. На этом рисунке в разрывах каналов связи указаны их пропускные способности. Как и в предыдущем случае (рис. 1), первый маршрутизатор выступает отправителем, а восьмой – получателем пакетов, передаваемых, например, с интенсивностью в 600 1/с. Представленная на рис. 4 ТКС лишена структурной неоднородности, т.к. не может быть представлена разделимым графом, т.е. не содержит ни точек сочленения, ни мостов. Однако данная сетевая архитектура имеет функциональную неоднородность, ибо разрез, представленный каналами (3, 5), (3, 6), (4, 6), является минимальным, имея пропускную способность 750 1/с, что примерно в два раза меньше, чем производительность любого другого разреза сети.

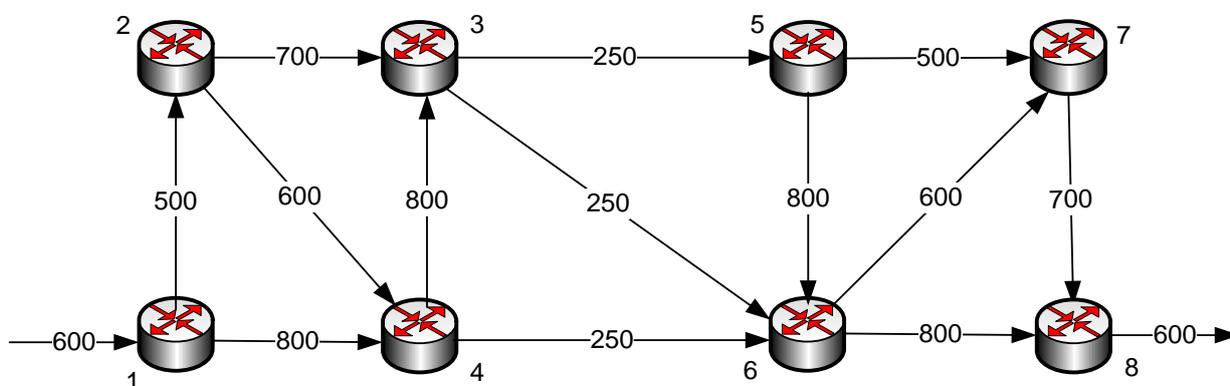
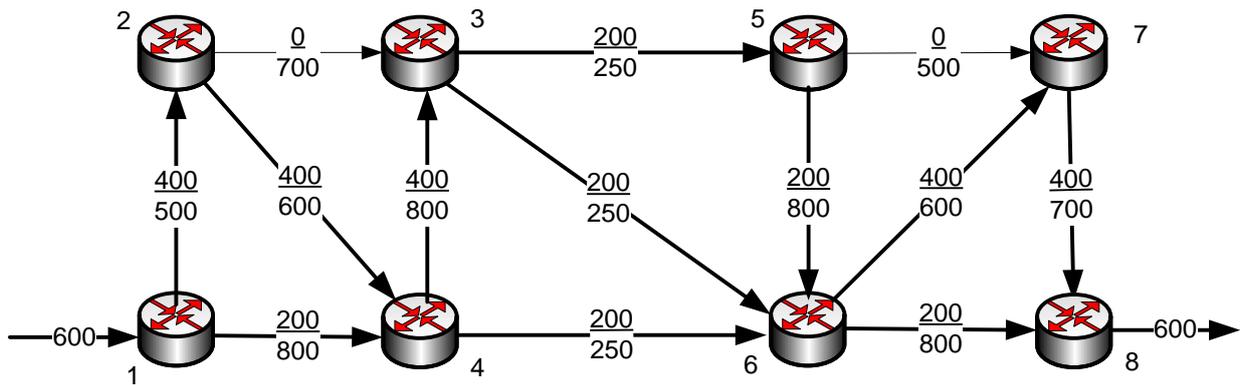
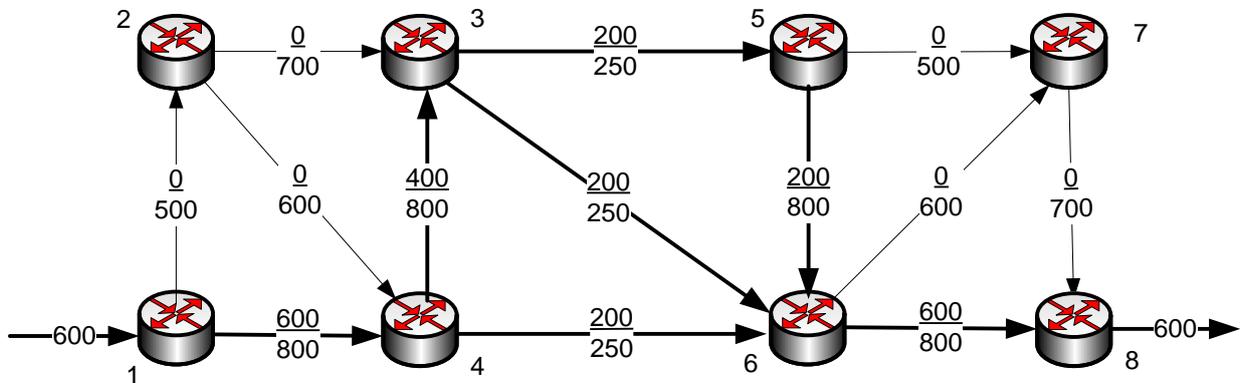


Рис. 4. Пример второй сетевой архитектуры

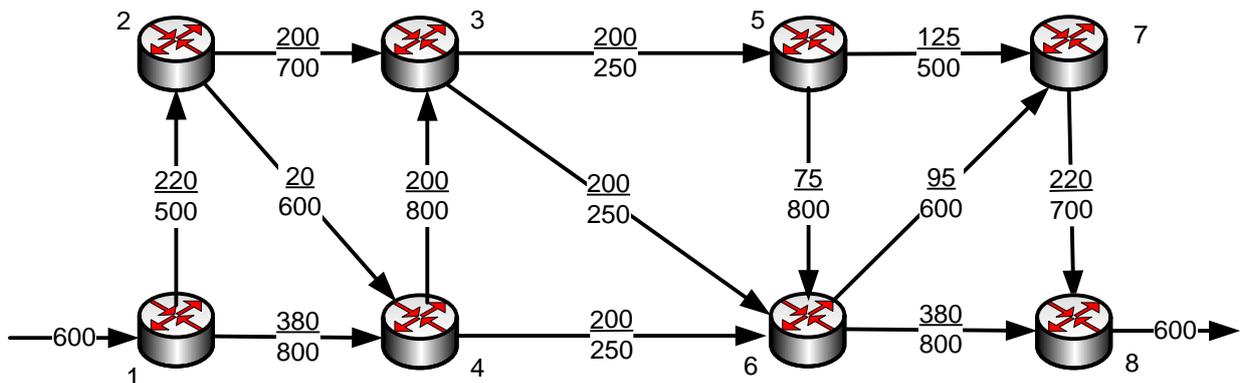
На рис. 5 представлены примеры вариантов решения задачи балансировки нагрузки в ТКС, представленной на рис. 4, на основе использования модели (1)-(4) с различными критериями оптимальности: для критерия (5) – рис. 4 а, для критерия (6) – рис. 4 б, для критерия (7) – рис. 4 в. По аналогии с рис. 2 в разрывах каждого канала связи на рис. 5 указана дробь, в которой в числителе приведена интенсивность передаваемого потока пакетов, а в знаменателе – пропускная способность данного канала связи. Как и для ранее полученных результатов (рис. 2), каждое из представленных на рис. 5 решений имеет две общие особенности: во-первых, используется многопутевая стратегия маршрутизации, а во-вторых, обеспечиваются одинаковые значения максимальной загруженности каналов связи ТКС ($\alpha = 0,8$) ввиду наличия минимального разреза, представленного каналами (3, 5), (3, 6), (4, 6). Использование отличающихся по форме критериев оптимальности определяет различный порядок маршрутизации и балансировки нагрузки в ТКС, что особенно характерно для каналов связи, не входящих в минимальный разрез. По аналогии с табл. 2 в табл. 3 приведены характеристики задействованных маршрутов (рис. 5) и результирующих значений средней межконцевой задержки пакетов (8) для значения параметра Херста $H = 0,5$.



а) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (5)



б) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (6)



в) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (7)

Рис. 5. Пример решения задачи балансировки нагрузки при использовании модели (1)-(4) и различных критериев оптимальности для второй сетевой архитектуры (рис. 4)

Табл. 3. Характеристика решений задачи балансировки нагрузки при использовании различных критериев оптимальности для второй сетевой архитектуры

Используемый критерий	Маршруты, входящие в мультипуть	Доля потока, протекающего вдоль пути	Скорость передачи пакетов (1/с)	Средняя задержка вдоль маршрута (мс)	Средняя межконцевая задержка пакетов (мс)
(5)	1→2→4→3→5→6→7→8	1/3	200	47,5	38,9
	1→2→4→3→6→7→8	1/3	200	45,8	
	1→4→6→8	1/3	200	23,3	
(6)	1→4→3→5→6→8	1/3	200	34,2	31,97
	1→4→6→8	1/3	200	30	
	1→4→3→6→8	1/3	200	31,7	
(7)	1→2→3→5→7→8	0,21	125	30,3	27,4
	1→4→6→8	1/3	200	24,8	
	1→2→3→5→6→7→8	0,125	75	31	
	1→2→4→3→6→7→8	0,033	20	31	
	1→4→3→6→8	0,3	180	26,4	

На рис. 6 представлены результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста. Результаты отнесены к архитектуре ТКС, приведенной на рис. 4. Применение предложенного критерия (7) позволяет улучшить численные значения средней межконцевой задержки пакетов на 29-31% по сравнению с использованием критерия (5) и на 15-21% по сравнению с использованием критерия (6).

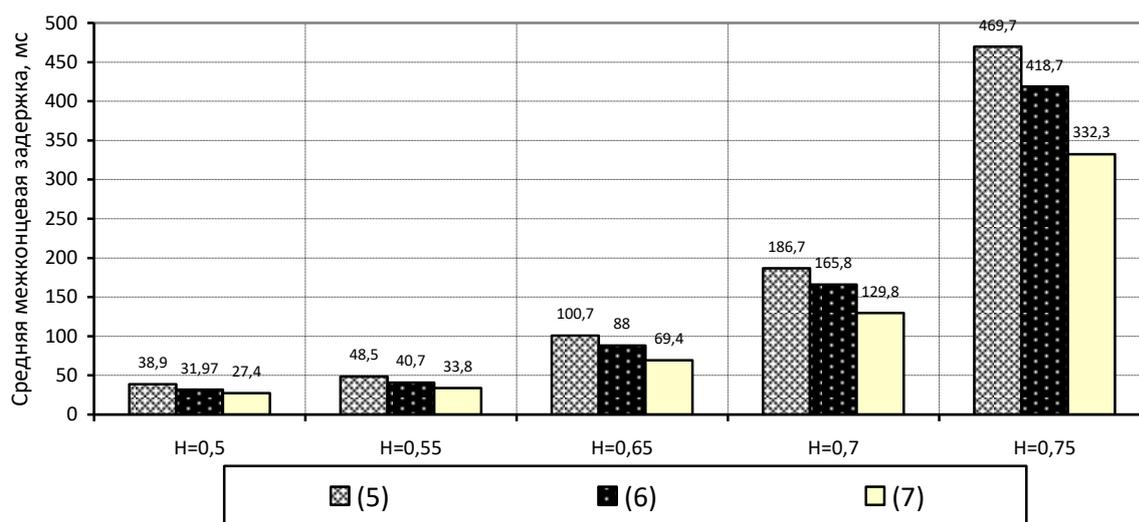


Рис. 6. Результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста (архитектура ТКС приведена на рис. 4)

Третий пример анализируемой сетевой архитектуры приведен на рис. 7. Как и в первом случае (рис. 1), структура ТКС может быть представлена разделимым графом, в котором вершина, моделирующая четвертый маршрутизатор, является точкой сочленения. Именно при выходе из строя данного маршрутизатора исходная ТКС распадется на две связные компоненты, первая из которых включает в себя первый, второй, третий и пятый маршрутизаторы, а вторая – маршрутизаторы с номерами с шестого по десятый. Это определяет наличие структурной неоднородности в рассматриваемой архитектуре, но в отличие от первого варианта сетевой архитектуры (рис. 1) данные компоненты включают в себя большее число маршрутизаторов.

На рис. 7 в разрывах каналов связи снова указаны их пропускные способности, первый маршрутизатор выступает отправителем, а десятый – получателем пакетов, передаваемых, например, с интенсивностью в 800 1/с. Функциональная неоднородность, как и в предыдущих случаях, определяется тем, что в архитектуре сети присутствует минимальный разрез, представленный каналами (4, 6) и (4, 7), который имеет по сравнению с другими разрезами достаточно низкую суммарную пропускную способность – 1000 1/с.

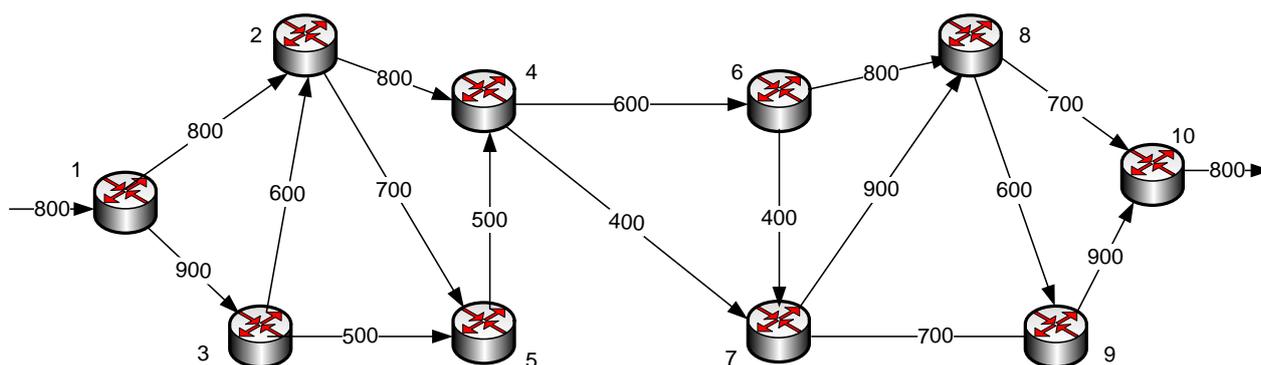
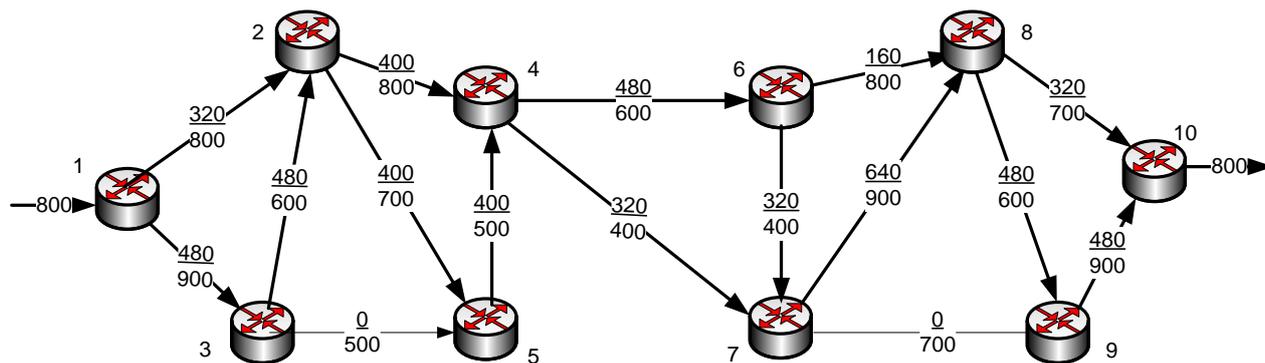
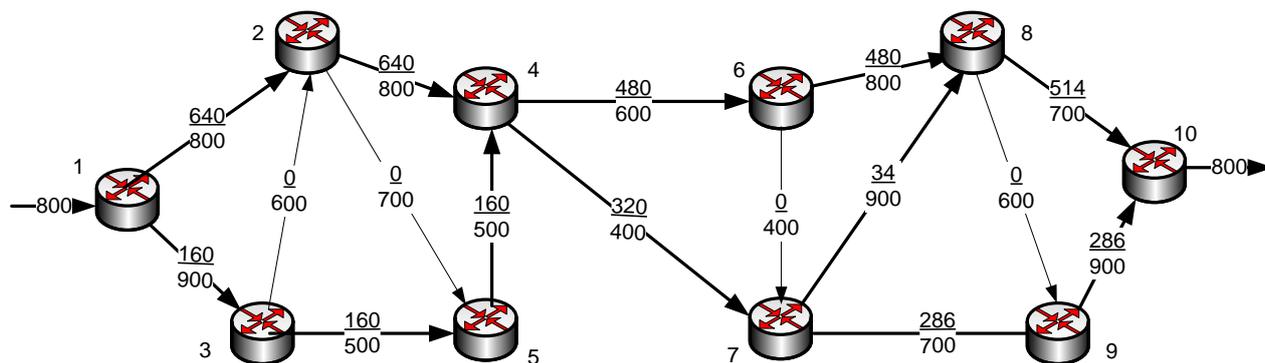


Рис. 7. Пример третьей сетевой архитектуры

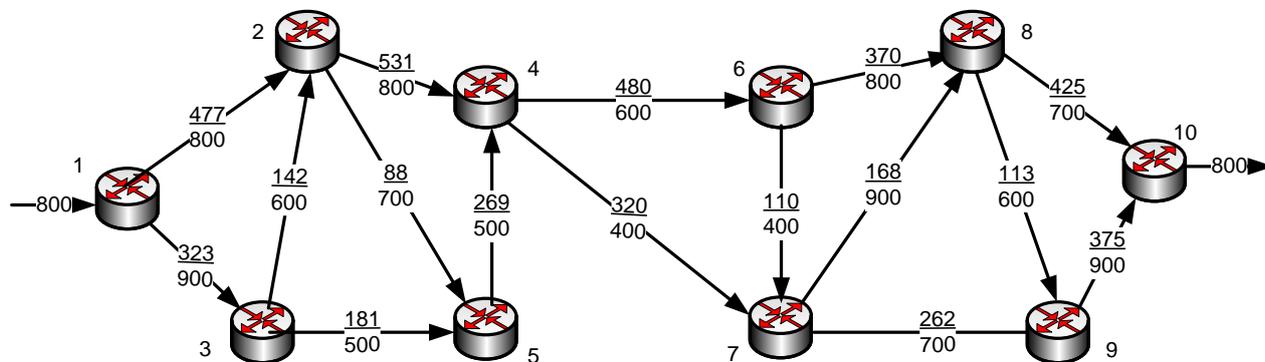
На рис. 8 показаны результаты решения задачи балансировки нагрузки в ТКС, архитектура которой представлена на рис. 7, на основе использования модели (1)-(4) с различными критериями оптимальности: для критерия (5) – рис. 6 а, для критерия (6) – рис. 6 б, для критерия (7) – рис. 6 в. По аналогии с рис. 2 и 5 в разрывах каждого канала связи на рис. 8 указана дробь, в которой в числителе приведена интенсивность передаваемого потока пакетов, а в знаменателе – пропускная способность данного канала связи.



а) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (5)



б) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (6)



в) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (7)

Рис. 8. Пример решения задачи балансировки нагрузки при использовании модели (1)-(4) и различных критериев оптимальности для третьей сетевой архитектуры (рис. 7)

Для полученных решений задачи балансировки нагрузки в ТКС, представленных на рис. 8, в табл. 4 приведены итоговые значения средней межконцевой задержки пакетов (8) и характеристики используемых при этом путей ($H = 0,5$). Все три решения обеспечивают одинаковые пороговые значения загруженности каналов связи ($\alpha = 0,8$), прежде всего ввиду наличия в структуре сети минимального разреза, представленного каналами (4, 6), (4, 7).

Табл. 4. Характеристика решений задачи балансировки нагрузки при использовании различных критериев оптимальности для третьей сетевой архитектуры

Используемый критерий	Маршруты, входящие в мультипуть	Доля потока, протекающего вдоль пути	Скорость передачи пакетов (1/с)	Средняя задержка вдоль маршрута (мс)	Средняя межконцевая задержка пакетов (мс)
(5)	1→3→2→5→4→6→7→8→9→10	0,4	320	59,4	41
	1→3→2→4→7→8→9→10	0,2	160	40,3	
	1→2→5→4→7→8→10	0,1	80	34,4	
	1→2→4→7→8→10	0,1	80	23,6	
	1→2→4→6→8→10	0,2	160	17,1	
(6)	1→2→4→6→8→10	0,6	480	29,3	28,3
	1→2→4→7→9→10	0,2	160	29	
	1→3→5→4→7→9→10	0,1575	126	24	
	1→3→5→4→7→8→10	0,0425	34	26,5	
(7)	1→2→4→7→9→10	0,3275	262	23,5	23,4
	1→2→4→7→8→9→10	0,0725	58	24,6	
	1→3→5→4→6→8→10	0,2263	181	23,5	
	1→2→4→6→8→10	0,1962	157	21,1	
	1→3→2→4→6→7→8→10	0,0675	54	24,4	
	1→3→2→5→4→6→8→10	0,04	32	24,2	
	1→3→2→5→4→6→7→8→9→10	0,07	56	27	

На рис. 9 представлены результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста. Результаты отнесены к архитектуре ТКС, приведенной на рис. 7.

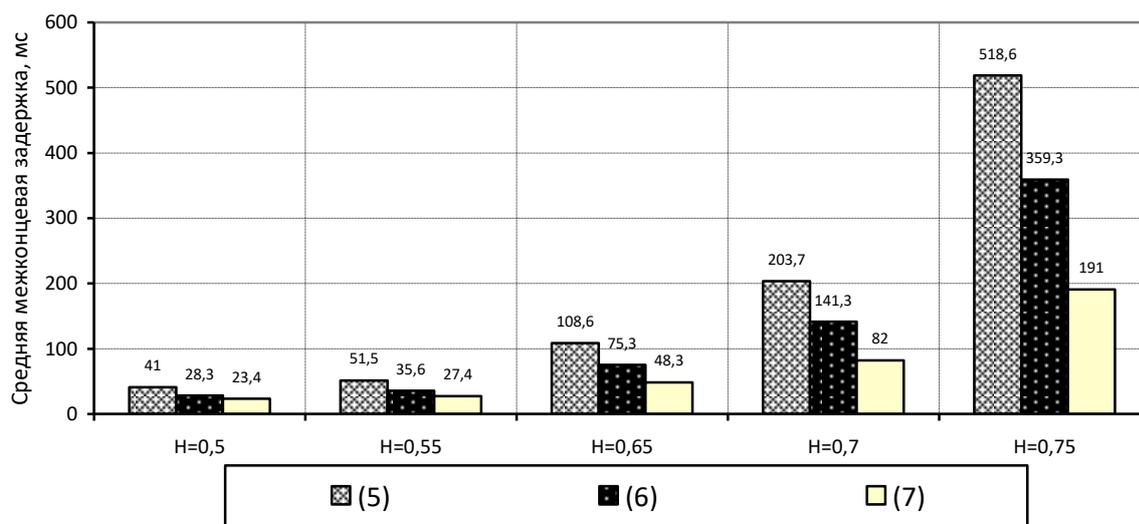


Рис. 9. Результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста (архитектура ТКС приведена на рис. 7)

Для данной сетевой архитектуры применение предложенного критерия (7) позволяет улучшить численные значения средней межконцевой задержки пакетов на 43-63% по сравнению с использованием критерия (5) и на 20-45% по сравнению с использованием критерия (6).

Завершающий пример анализа для четвертой сетевой архитектуры приведен на рис. 10. Эта архитектура не может быть представлена разделимым графом, т.е. не содержит структурной неоднородности. Однако она включает в себя минимальный разрез, представленный каналами (4, 6), (4, 7) и (5, 7) и имеющий пропускную способность 1500 1/с, что определяет функциональную неоднородность. На рис. 10 в разрывах каналов связи снова указаны их пропускные способности, первый маршрутизатор выступает отправителем, а десятый – получателем пакетов, передаваемых, например, с интенсивностью в 1200 1/с.

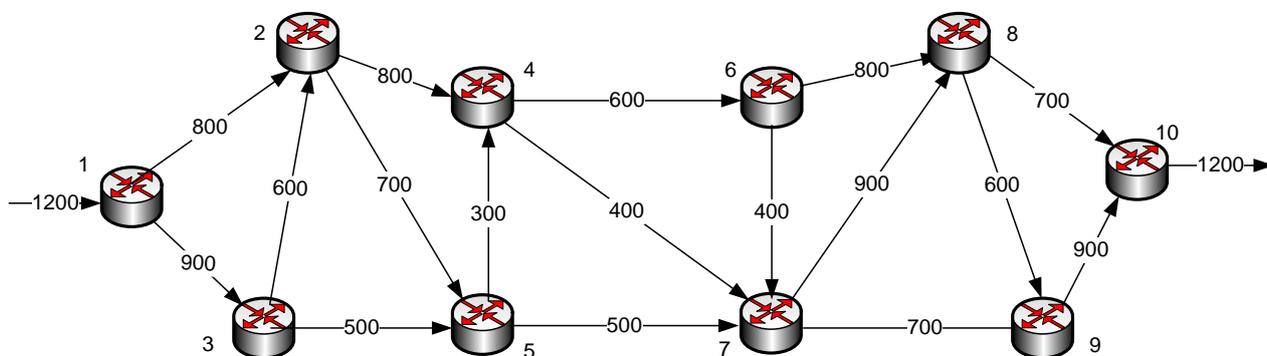
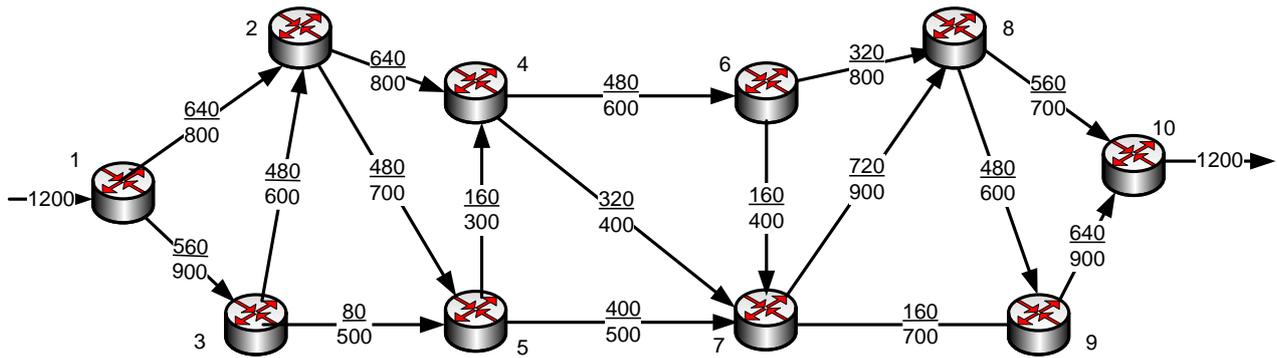


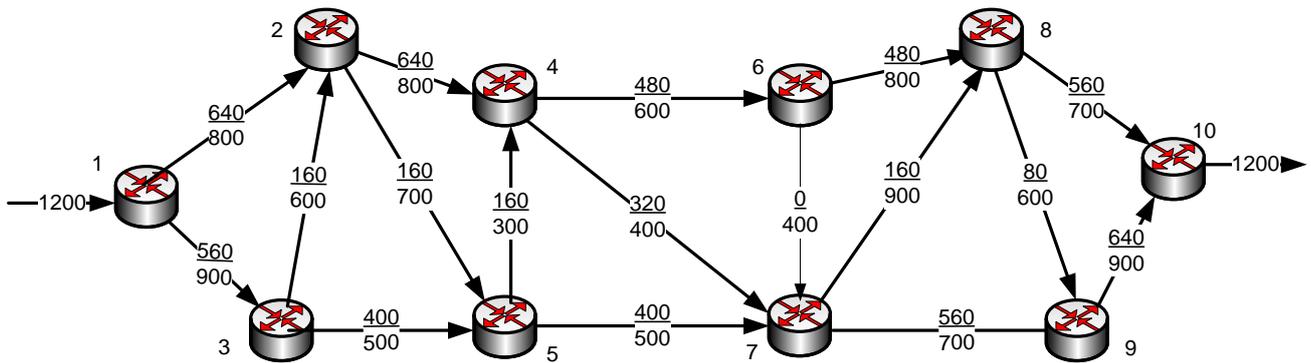
Рис. 10. Пример четвертой сетевой архитектуры

Результаты решения задачи балансировки нагрузки в ТКС, архитектура которой представлена на рис. 10, на основе использования модели (1)-(4) с различными критериями оптимальности показаны на рис. 11. Использованию критерия (5) отвечает рис. 11 а, критерия (6) – рис. 11 б, критерия (7) – рис. 11 в. По аналогии с рис. 7 в разрывах каждого канала связи на рис. 11 указана дробь, в которой в числителе приведена интенсивность передаваемого потока пакетов, а в знаменателе – пропускная способность данного канала связи.

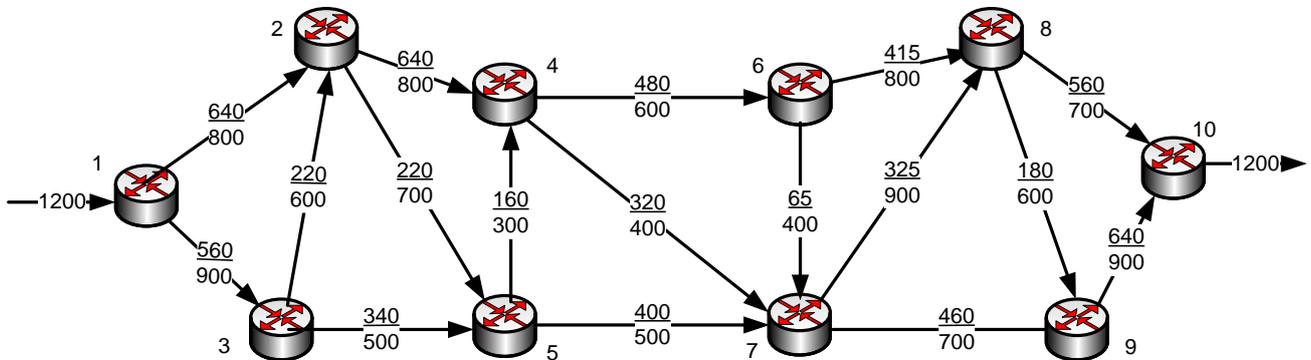
Характеристика рассчитанных путей и результирующие значения средней межконцевой задержки пакетов (8) для значения параметра Херста $H = 0,5$, полученные в ходе решения задачи балансировки нагрузки в ТКС (рис. 11), представлены в табл. 5. По-прежнему все три решения обеспечивают одинаковые пороговые значения загрузки каналов связи ($\alpha = 0,8$).



а) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (5)



б) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (6)



в) порядок балансировки нагрузки при использовании критерия (7)

Рис. 11. Пример решения задачи балансировки нагрузки при использовании модели (1)-(4) и различных критериев оптимальности для четвертой сетевой архитектуры (рис. 10)

На рис. 12 представлены результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста. Результаты отнесены к архитектуре ТКС, приведенной на рис. 10.

Табл. 5. Характеристика решений задачи балансировки нагрузки при использовании различных критериев оптимальности для четвертой сетевой архитектуры

Используемый критерий	Маршруты, входящие в мультипуть	Доля потока, протекающего вдоль пути	Скорость передачи пакетов (1/с)	Средняя задержка вдоль маршрута (мс)	Средняя межконцевая задержка пакетов (мс)
(5)	1→2→4→6→8→10	0,27	320	30,1	37,7
	1→2→4→6→7→9→10	0,13	160	30,7	
	1→3→2→5→7→8→9→10	0,33	400	43,6	
	1→3→2→5→4→7→8→9→10	0,07	80	53,2	
	1→3→5→4→8→10	0,07	80	37,7	
	1→2→4→7→8→10	0,13	160	37,7	
(6)	1→3→5→7→9→10	0,33	400	33,9	33,2
	1→2→4→6→8→10	0,4	480	31	
	1→3→2→5→4→7→9→10	0,13	160	38,1	
	1→2→4→7→8→9→10	0,07	80	32,1	
	1→2→4→7→8→10	0,07	80	33,4	
(7)	1→3→5→7→9→10	0,283	340	27,2	30,5
	1→3→2→5→4→6→8→10	0,133	160	32,9	
	1→3→2→5→7→8→9→10	0,05	60	25,6	
	1→2→4→6→8→10	0,213	255	30,6	
	1→2→4→6→7→8→9→10	0,054	65	31,8	
	1→2→4→7→9→10	0,1	120	33	
	1→2→4→7→8→10	0,121	145	33,9	
	1→2→4→7→8→9→10	0,046	55	33	

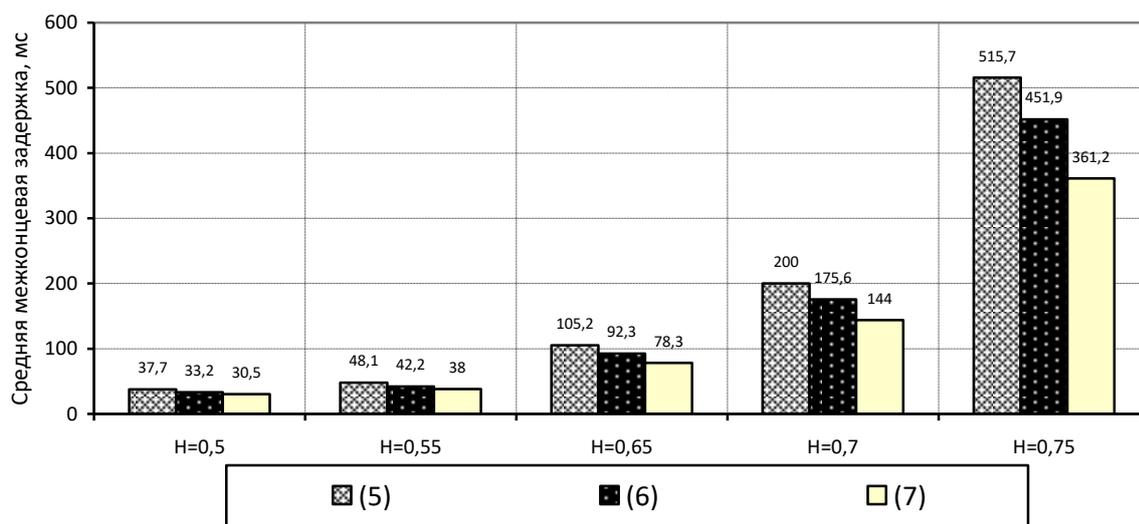


Рис. 12. Результаты сравнения средней межконцевой задержки пакетов, получаемой при использовании критериев оптимальности (5)-(7) для различных значений параметра Херста (архитектура ТКС приведена на рис. 10)

Для анализируемой сетевой архитектуры применение предложенного критерия (7) позволяет улучшить численные значения средней межконцевой задержки пакетов на 20-30% по сравнению с использованием критерия (5) и на 9-20% по сравнению с использованием критерия (6).

Выводы

В статье проведено исследование потоковой модели балансировки нагрузки в телекоммуникационной сети с неоднородной архитектурой. При этом неоднородность сетевой архитектуры разделялась на неоднородность структурную и функциональную. Под структурной неоднородностью ТКС понималось то, что ее структура могла быть представлена разделимым графом или близким к нему, т.е. телекоммуникационная сеть содержала маршрутизаторы и каналы, моделируемыми точками сочленения и мостами соответственно. Функциональная неоднородность ТКС проявлялась, в частности, в том, что сеть могла содержать минимальный разрез, пропускная способность которого была намного меньше пропускной способности других разрезов сети. Наличие как структурной, так и функциональной неоднородности ТКС, как показали проведенные исследования, приводит к образованию т.н. «узких мест» в сети, что отрицательно сказывается на эффективности балансировки нагрузки с точки зрения обеспечения экстремальных значений показателей качества обслуживания, например, средней межконцевой задержки пакетов.

В этой связи в статье предложено усовершенствование ранее известной и хорошо себя зарекомендовавшей математической модели балансировки нагрузки в ТКС [10-12], которая максимально удовлетворяет требованиям концепции Traffic Engineering. Усовершенствование коснулось пересмотра используемого критерия оптимальности маршрутных решений. Предлагается перейти к линейно-квадратичному критерию (7), в рамках которого минимизируется не только верхний порог загруженности каналов связи сети в целом, но и отдельные коэффициенты использования каналов. Это позволило более эффективно организовать процесс балансировки нагрузки в ТКС и обеспечить лучшие значения такого важного QoS-показателя, как средняя межконцевая задержка пакетов в сети.

В ходе количественного анализа преимуществ проведенного усовершенствования проводилось сравнение вновь полученных результатов с расчетами по другим критериям оптимальности: по критерию (5), соответствующему модели Traffic Engineering [10-12], и по критерию (6), который представляет собой линейную функцию от загруженности каналов связи сети. При этом расчеты проводились для множества сетевых архитектур, отличающихся размером и степенью неоднородности. Численные значения средней межконцевой задержки пакетов (8)-(10) оценивались для различных величин параметра Херста (табл. 1), отвечающего тому или иному типу сетевого трафика. В ходе исследований установлено, что использование предложенного критерия (7) при организации балансировки нагрузки в ТКС с неоднородной архитектурой позволяет снизить среднюю межконцевую задержку пакетов

по сравнению с решениями, основанными на использовании критерия (5), в среднем от 20-30% до 40-60%, а по сравнению с решениями, основанными на использовании критерия на (6), в среднем от 5-9% до 20-40% (рис. 3, рис. 6, рис. 9, рис. 12).

Как показали результаты расчетов, использование предложенного критерия балансировки нагрузки (7) наиболее эффективно в условиях высокой неоднородности сетевой архитектуры, например, когда структура сети моделировалась разделимым графом (рис. 7), а пропускная способность минимального разреза значительно отличалась (в меньшую сторону) от пропускной способности других разрезов сети. Также эффективность предлагаемого решения возрастала при маршрутизации трафика с высокими значениями параметра Херста.

Кроме того, было замечено, что использование линейного критерия (6) ориентирует преимущественно на реализацию однопутевой маршрутизации (рис. 2, б и рис. 5, б), т.е. без поддержки балансировки нагрузки в связных компонентах сети, на которые разбивается сеть минимальным разрезом. При доступности нескольких приблизительно равноценных по пропускной способности маршрутов использование критерия (7) всегда обеспечивало максимальный выигрыш по сравнению с применением критерия (6), что продемонстрировано на рис. 6 и рис. 9.

Установлено, что чем больше отличались по своей пропускной способности минимальный разрез и остальные разрезы сети, тем больший выигрыш по средней межконцевой задержке обеспечивало использование критерия оптимальности (7). Например, для четвертой архитектуры ТКС, представленной на рис. 10, минимальный разрез имел пропускную способность, которая всего на 12-15% меньше пропускной способности других разрезов сети, что сопровождалось улучшением средней межконцевой задержки на 20-30% по сравнению с использованием критерия (5) и на 9-20% по сравнению с использованием критерия (6) (рис. 12). Если же пропускная способность минимального разреза была в среднем на 42-50% меньше, чем пропускная способность других разрезов сети, что характерно для третьей архитектуры ТКС (рис. 7), то выигрыш по средней межконцевой задержке уже составлял 43-63% и 20-45% соответственно (рис. 9).

Предложенное усовершенствование не приведет к значительному усложнению алгоритмического и программного обеспечения современных маршрутизаторов ввиду преимущественно линейного характера модели (1)-(4). При необходимости учета в явном виде условий обеспечения качества обслуживания по множеству показателей нужно переходить к более сложным с вычислительной точки зрения, например, тензорным моделям маршрутизации [19-21]. В случае обеспечения учета динамики изменения состояния ТКС предложенный критерий (7) может быть использован в качестве основы оптимизационных функционалов при использовании динамических моделей маршрутизации [21-23], представленных интегральными или дифференциально-разностными уравнениями состояния сети.

Список литературы:

1. *Simha A., Osborne E.* Traffic Engineering with MPLS. Cisco Press, 2002. – 608 p.
2. *Awduche D., Chiu A., Elwalid A., Widjaja I., Xiao X.* Overview and Principles of Internet Traffic Engineering. IETF RFC 3272, May 2002. – 71 p.
3. *Katz D., Kompella K., Yeung D.* Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2. RFC 3630, September 2003. – 14 p.
4. *Li Y., Panwar S., Liu C.J.* On the Performance of MPLS TE Queues for QoS Routing // Simulation series. – 2004. – Vol. 36; part 3. – P. 170–174.
5. *Van Beijnum I.* BGP: Building Reliable Networks with the Border Gateway Protocol. - O'Reilly Media, 2002. – 290 p.
6. *Smit H., Li T.* ISIS Extensions for Traffic Engineering, RFC 5305. October 2008. – 17 p.
7. *Kompella K., Rekhter Y.* Signalling Unnumbered Links in Resource ReSerVation Protocol - Traffic Engineering (RSVP-TE), RFC 3477, January 2003. – 9 p.
8. *Kompella K., Rekhter Y., Kullberg A.* Signalling Unnumbered Links in CR-LDP (Constraint-Routing Label Distribution Protocol)", RFC 3480, February 2003. – 8 p.
9. *Ould-Brahim H., Fedyk D., Rekhter Y.* BGP Traffic Engineering Attribute. RFC 5543, May 2009. – 6 p.
10. *Seok Y., Lee Y., Choi Y., Kim C.* Dynamic Constrained Traffic Engineering for Multicast Routing // Proc. Wired Communications and Management. – 2002. – Vol. 2343. – P. 278-288.
11. *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.
12. *Seok Y., Lee Y., Kim C., Choi Y.* Dynamic Constrained Multipath Routing for MPLS Networks // IEEE International Conference on Computer Communications and Networks. – 2001. – №3. – P. 348 – 353.
13. *Крылов В.В., Самохвалова С.С.* Теория телетрафика и ее приложения.-СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
14. *Szigeti T., Hattingh C., Barton R., Briley K.* End-to-End QoS Network Design: Quality of Service for Rich-Media & Cloud Networks, 2nd Edition // Cisco Press. – 2013. – 1040 p.
15. *Лемешко О.В., Дробот О.А., Симоненко Д.В.* Результати порівняльного аналізу поточкових моделей маршрутизації в телекомунікаційних мережах // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. Вип. 1(13), 2007. – С. 66-69.
16. *Лемешко А.В., Вавенко Т.В.* Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12 – 29. Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.
17. *Мерсни А., Ильяшенко А.* Комплексный критерий оптимальности балансировки нагрузки при многопутевой маршрутизации в телекоммуникационной сети с неоднородной топологией // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб., 2016. Вып. 187. – С. 25-33.
18. Recommendation ITU-T Q.3925: Traffic flow types for testing quality of service parameters on model networks: Switzerland, Geneva, 2012. – 14 p.
19. *Lemeshko O.V., Garkusha S.V., Yeremenko O.S., Hailan A.M.* Policy-based QoS management model for multiservice networks // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015, Omsk, Russia. Publisher: IEEE. – P. 1-4.

20. *Lemeshko O.V., Garkusha S.V., Yeremenko O.S., Hailan A.M.* Policy-based QoS management model for multiservice networks // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), 21-23 May 2015, Omsk, Russia. Publisher: IEEE. PP. 1-4.

21. *Lemeshko O., Yeremenko O.* Dynamic Presentation of tensor model for multipath QoS-routing // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the international Conference TCSET'2016. – Lviv-Slavske, Ukraine, February 23 - 26, 2016: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2016. P. 601-604.

22. *Гуревич И.М.* Динамическая модель сети связи // Теория телетрафика в системах информатики. – М.: Наука, 1989. – С.54-64.

23. *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 до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_dynamic.pdf.