

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЕМ КОЛИЧЕСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПУТЕЙ

### Введение

Многопутевая маршрутизация (МПМ) в современных мультисервисных телекоммуникационных сетях (ТКС) является эффективным средством повышения производительности сети и отказоустойчивости маршрутных решений, обеспечения скоростных и вероятностно-временных показателей качества обслуживания, а также сбалансированной загрузки сетевых ресурсов (Load-Balancing Routing, Traffic Engineering) [1, 2]. Как показал анализ, реализация многопутевой стратегии маршрутизации в существующих транспортных технологиях – IP (Internet Protocol), ATM (Asynchrony Transfer Mode) и MPLS (MultiProtocol Label Switching) кроме отмеченных достоинств имеет и ряд следующих недостатков:

- сложность обеспечения гарантий качества обслуживания в т.ч. одновременно по множеству показателей;
- увеличение объемов маршрутных таблиц, приводящее к снижению масштабируемости получаемых решений, ввиду необходимости мониторинга состояний большого количества узлов и трактов передачи и поддержания показателей качества обслуживания;
- сложность сборки сообщений из пакетов, которые следуют по различным путям, что в современных технологиях наиболее характерно для IP-сетей;
- рост объемов циркулируемой служебной информации, связанный с установлением и поддержкой не одного, а одновременно нескольких путей;
- прогнозируемое повышение доли адресной информации в структуре пакетов, следующих по различным маршрутам, т.к. необходимо учитывать не только целевой, но и исходный адрес, а также информацию транспортного и, быть может, более высоких уровней при передаче пакетов одного и того же трафика по разным маршрутам (например, для того чтобы обеспечить поддержку классов обслуживания).

Ниже остановимся на особенностях реализации многопутевой маршрутизации в современных транспортных технологиях, с выяснением причин возникающих при этом проблем и возможных направлений их решения.

### Особенности реализации многопутевой маршрутизации в технологии IP

Отличительной особенностью стека протоколов TCP/IP является поддержка дейтаграммного способа доставки сообщений, когда последние разбиваются на отдельные дейтаграммы (пакеты), которые следуют каждый по своему маршруту. В этой связи неизбежно возникает проблема сборки сообщений, заключающаяся в сложности упорядочивания пакетов одного и того же сообщения, а также в необходимости их буферизации и выравниванию задержки, ввиду неконтролируемого джиттера пакетов, следующих по различным путям.

В IP-сетях у каждого пакета, длина которого может колебаться от 1500 до 65535 байт, в обязательном порядке должна присутствовать адресная информация – 8 байт (рис.1), что приблизительно составляет от 0.01 до 0.5 % от общей длины пакета.

	0	4	8	12	16	20	...	1500-65535
IP	Version (4 бита) IHL (4 бита)	Identification (16 бит) Flags (4 бита) Fragment Offset (12 бит)	Time to Live (8 бит) Protocol (8 бит)	Source Address (32 бита)	Destination Address (32 бита)	Options/ Padding	...	Поле Данных
	Type of Service (8 бит) Total Length (16 бит)		Header Checksum (16 бит)					

Рис. 1

Кроме того, в технологии IP принят так называемый одношаговый (hop-by-hop) подход к поддержке маршрута продвижения пакета (рис. 2), т.е. каждый транзитный маршрутизатор

принимает участие в выборе только одного шага (hop) передачи пакета. Это оказывает существенное влияние на рост размера маршрутных таблиц, хранящихся и постоянно обновляющихся на маршрутизаторах ТКС.

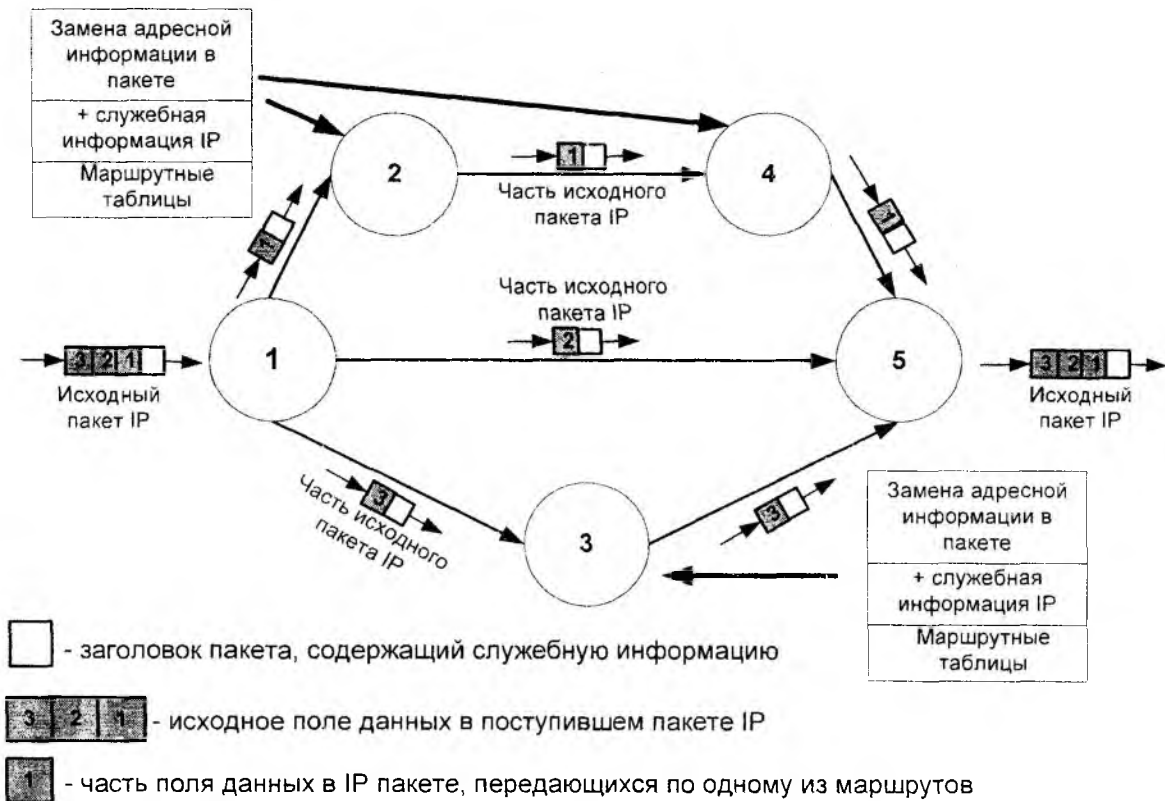


Рис. 2

В первоначальном виде, IP-сети ввиду реализации дейтаграммного способа доставки сообщений не поддерживают гарантии качества связи, ограничиваясь уровнем качества сервиса «best effort service». С переходом от однопутевых стратегий маршрутизации к многопутевым в сетях IP несколько модифицированы поддерживаемые протоколы маршрутизации: RIP (Routing Internet Protocol), IGRP (Interior Gateway Routing Protocol), EIGRP (Extended IGRP), IS-IS (Intermediate System – to – Intermediate System), в которых заложены эвристические процедуры балансировки нагрузки по путям как с равной, так и с различной стоимостью (метрикой). Например, протоколы RIP выполняют автоматическую балансировку нагрузки одновременно по шести маршрутам с равной стоимостью, а в протоколах IGRP и EIGRP количество используемых путей с различной метрикой определяется преимущественно административно с помощью команды «variance» [3].

### Особенности многопутевой маршрутизации в технологиях, ориентированных на соединение – ATM, Frame Relay и MPLS

В технологии ATM в качестве протокольной единицы принят пакет фиксированной длины – ячейка (рис. 3), включающая заголовок (5 байт) и информационное поле (48 байт), поэтому вне зависимости от реализации однопутевой или многопутевой стратегии маршрутизации, объем адресной служебной информации не изменяется и составляет 10.5 % от общей длины ячейки. Пропорционально увеличению количества используемых путей растет и объем служебной информации для установления и поддержки соединений между сетевыми узлами – коммутаторами ATM [4].

Технология ATM – технология, ориентированная на установление соединений, в этой связи она хорошо адаптирована под решение задач гарантированного качества обслуживания, т.к. контроль показателей качества связи вдоль одного пути не самая

сложная задача. Однако и она несколько осложняется ввиду необходимости реализации многопутевой стратегии маршрутизации.



Рис. 3

Следует учесть, что при однопутевой маршрутизации все передаваемые пакеты имеют один и тот же заголовок, а при реализации многопутевой маршрутизации, к пакетам прикрепляются заголовки фиксированной длины с различной адресной информацией, в зависимости от используемого маршрута. Основной функцией заголовка является идентификация виртуального соединения с помощью идентификатора и обеспечение гарантии правильной маршрутизации. Чтобы пакеты содержали адрес узла назначения, и в то же время процент служебной информации не превышал размер поля данных пакета, в технологии ATM применен стандартный для территориально-распределенных ТКС прием – передача ячеек в соответствии с техникой виртуальных каналов с длиной номера виртуального канала в 24 бита, что вполне достаточно для обслуживания большого количества виртуальных соединений каждым портом коммутатора сети ATM. На основе техники виртуальных каналов коммутаторы ATM пользуются 20-байтными адресами конечных узлов для маршрутизации трафика. Для сетей ATM определен протокол маршрутизации PNNI (Private NNI), с помощью которого коммутаторы могут строить таблицы маршрутизации автоматически.

В транспортной технологии Frame Relay для передачи данных, также как и в ATM технологии, используется техника виртуальных соединений. При многопутевой маршрутизации в заголовке пакетов изменяется поле номера виртуального соединения (Data Link Connection Identifier, DLCI), состоящее из 10 бит и позволяющее поддерживать до 1024 виртуальных соединений (рис. 4).

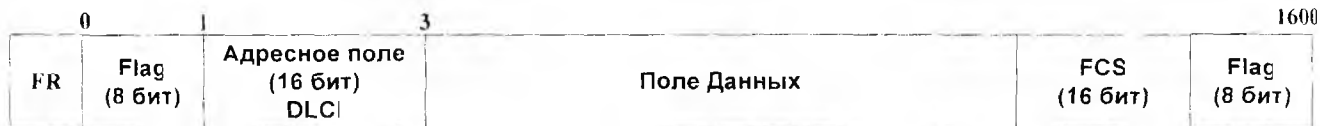


Рис. 4

Десятиразрядный формат DLCI является основным, но при использовании трех байт для адресации поле DLCI имеет длину 16 бит, а при использовании четырех байт – 23 бита. Соответственно, в технологии Frame Relay также используется фиксированная длина заголовка. Увеличение объема служебной информации происходит за счет расширения маршрутных таблиц в оконечных узлах.

В технологии MPLS передача данных происходит на основе замены меток в пакетах с использованием информации о маршрутах, причем к каждому пакету прикрепляется метка с соответствующим адресом передачи (рис. 5).

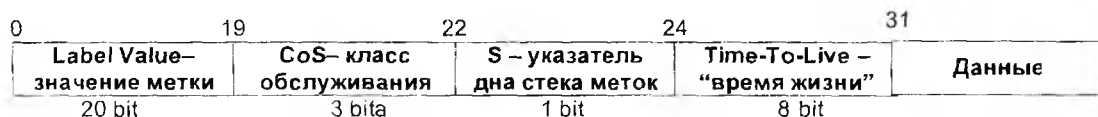


Рис. 5

Метка представляет собой короткий элемент фиксированной длины, используемый для локальной идентификации класса эквивалентности пересылки FEC (Forwarding Equivalence Classes). Поле MPLS метки состоит из заголовка и 20-битовой метки фиксированной длины [5]. С одной стороны, метка может быть ассоциирована с группой маршрутов, тем самым обеспечивая более высокую масштабируемость маршрутных решений. Многопутевая маршрутизация является результатом реализации механизма управления трафиком – Traffic Engineering.

В отличие от IP в данных технологиях при передаче пакетов используется маршрутизация от источника – Source Routing (рис. 6). В этом случае выбор маршрута производится конечным узлом или первым маршрутизатором на пути пакета, а все остальные маршрутизаторы только обрабатывают выбранный маршрут, осуществляя коммутацию пакетов, то есть передачу их с одного порта на другой на основе содержания таблиц коммутации меток, которые имеют размерность значительно меньше, чем таблицы маршрутизации в сетях IP.

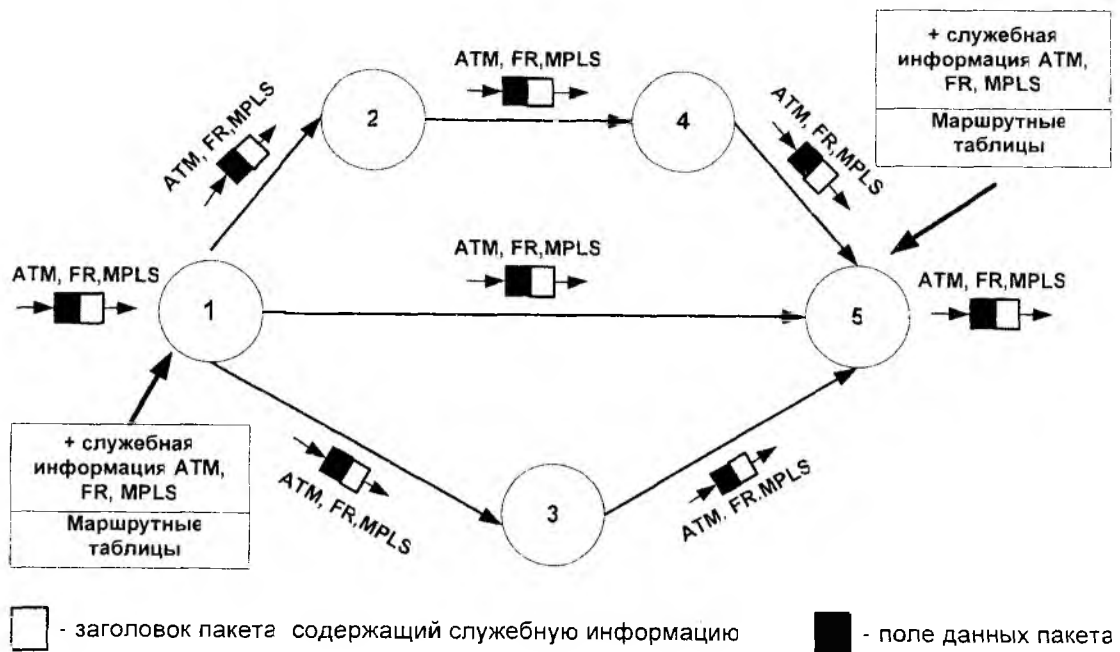


Рис. 6

Таким образом, в качестве промежуточных выводов следует отметить, что минимизировать возникающие при реализации многопутевой стратегии маршрутизации проблемы на технологическом уровне целесообразно путем организации виртуальных каналов и путей для каждого поддерживаемого маршрута. Подобное решение является более выигрышным по сравнению с действующим способом передачи сообщений, особенно, что касается последующей сборки пакетов в сообщения. Выше перечисленные недостатки в основном возникают из-за большого количества использованных путей при реализации многопутевой стратегии маршрутизации. Обоснованное уменьшение числа маршрутов приведет к минимизации данных проблем, т.к. количество используемых путей с современных протоколах определяется эмпирически, основываясь на инженерной интуиции и опыте администратора сети, что не может не сказаться на качестве решения задач многопутевой маршрутизации. В этой связи актуальной представляется задача теоретического обоснования количества используемых путей или его верхнего порога в ходе решения задач МПМ.

### Анализ теоретических решений задач многопутевой маршрутизации

Несмотря на достаточно большое разнообразие постановок задач многопутевой маршрутизации, на сегодня существует два сравнительно больших класса моделей маршрутизации – графовые и потоковые. Первые модели основаны на представлении структуры ТКС в виде графа с дальнейшим поиском на взвешенных дугах кратчайшего мультипути. Тенденция к административному, т.е. теоретически необоснованному выбору числа путей сохраняется и во вновь предлагаемых графовых моделях многопутевой маршрутизации. Недостатки подобных графовых моделей и комбинаторных алгоритмов поиска кратчайшего мультипути связаны с ограниченными возможностями обеспечения сбалансированной загрузки сети и QoS одновременно по нескольким.

Потоковые модели более полно описывают не только структуру сети, но и характеристики трафика, показатели качества обслуживания. Основными представителями потоковых

моделей являются модели, предложенные Галлагером [6,7], Сегалом [8] и В.М. Вишневым [9]. Общей чертой этих моделей Галлагера и Сегала является то, что с их использованием осуществляется балансировка нагрузки по всем возможным путям в сети, что ввиду территориально-распределенного характера современных ТКС не всегда является приемлемым. Следует отметить, что в данных моделях используются все возможные пути для передачи трафика, что имеет ряд недостатков, указанных выше. В отличие от них модель, предложенная В.М. Вишневым [9], в рамках затронутой проблемы предлагает решение с явным заданием числа поддерживаемых путей в сети. С помощью данной модели, решается задача определения оптимальных маршрутов в ТКС по критерию средней задержки с выполнением следующего условия сохранения потока:

$$\sum_{k=1}^m x_{kl}^{(i,j)} - \sum_{k=1}^m x_{lk}^{(i,j)} = \begin{cases} -1, l = i; \\ 0, l \neq i, j; \\ 1, l = j, \end{cases} \quad (1)$$

$$0 \leq x_{kl}^{(i,j)} \leq 1 \quad (i, j, k, l = \overline{1, m}), \quad (2)$$

где  $x_{kl}^{(i,j)}$  – доля потока в тракте  $(k, l)$ , пакеты которого передаются от  $i$ -го узла к  $j$ -му,  $m$  – общее количество сетевых узлов.

С целью определения используется ли выбранный тракт передачи для решения задачи многопутевой маршрутизации или нет, вводится переменная [9]:

$$v_{kl}^{(j)} = \begin{cases} 1, \text{ если } \sum_{i=1}^m x_{kl}^{(i,j)} > 0, \\ 0, \text{ если } \sum_{i=1}^m x_{kl}^{(i,j)} = 0; \end{cases} \quad (i, j, k, l = \overline{1, m}). \quad (3)$$

Иными словами, переменная  $v_{kl}^{(j)} = 1$ , если тракт передачи  $(k, l)$  используется для передачи пакетов потока в  $j$ -й узел-получатель от  $i$ -го узла-отправителя; и равна 0 – в противном случае.

Условие реализации  $K$ -путевой маршрутизации выглядит следующим образом:

$$\sum_{l=1}^m v_{kl}^{(j)} \leq K \quad (j, k = \overline{1, m}), \quad (4)$$

где  $K$  – ограничение на число исходящих линий, используемых для передачи данных из каждого  $k$ -го узла к  $j$ -му узлу-получателю.

Недостаток данной модели состоит в отсутствии процедуры или рекомендаций по выбору и обоснованию численного значения параметра  $K$  (4). Таким образом, в перспективных моделях и алгоритмах (методах) маршрутизации необходимо предусматривать процедуру адаптивного ограничения количества поддерживаемых путей для повышения масштабируемости решений задач многопутевой маршрутизации.

### Определение верхнего порога для числа путей в решении задач многопутевой маршрутизации

Как показано в работах [10, 11], количество рассчитываемых путей в случае использования тензорных моделей МПМ определяется автоматически в зависимости от уровня требований к качеству обслуживания. Другими словами, в рамках данных моделей многопутевая маршрутизация – не самоцель, а средство обеспечения заданных значений тех или иных показателей качества обслуживания. То есть, если один путь обеспечивает заданные гарантии связи, то достаточно использовать и поддерживать лишь этот единственный путь. Но для менее сложных моделей маршрутизации [12], в рамках которых не учитываются в явном виде требования к качеству обслуживания, необходимо использовать методику определения

путевого базиса и его размерности как верхнего порога для числа независимых (базисных) путей в сети [13].

В работе [13] доказано, что количество базисных путей между произвольной парой узлов на единицу больше, чем число независимых контуров [14], и может быть рассчитано следующим образом:

$$n_{path}^{(i,j)} = n - m + 2, \quad (5)$$

$n$  – число трактов передачи в сети.

Необходимо отметить, что при реализации многопутевой маршрутизации использование независимых путей является компромиссным вариантом между использованием всех возможных (пересекающихся) или лишь непересекающихся путей. В этом нетрудно убедиться, рассмотрев следующий пример. На структуре сети (рис. 7) видно, что всего существует четыре маршрута из 1-го узла в 4-й: 1-2-4; 1-3-4; 1-2-3-4 и 1-3-2-4. Количество же независимых путей, исходя из выражения (5), равно трем (или 1-2-4; 1-3-4 и 1-2-3-4; или 1-2-4; 1-3-4 и 1-3-2-4), а непересекающихся путей всего два: 1-2-4 и 1-3-4.

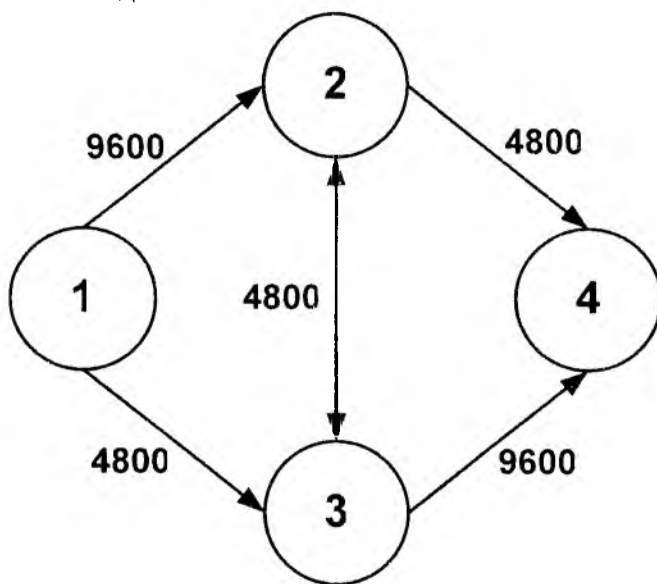


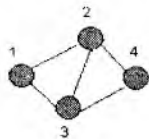
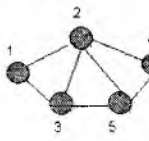
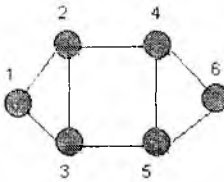
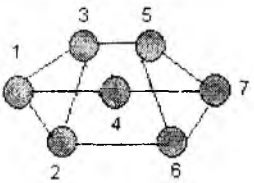
Рис. 7

При использовании независимых путей можно обслужить между первым и четвертым узлом трафик интенсивности 14400 пакетов в секунду, как и при использовании всех доступных путей, но с использованием меньшего числа маршрутов. При использовании лишь непересекающихся путей (1-2-4 и 1-3-4) интенсивность обслуживаемого трафика не превысит 9600 пакетов в секунду. Таким образом, использование непересекающихся путей приводит к потере пропускной способности, а использование всех возможных маршрутов, в свою очередь, приводит к дополнительным затратам на установление и поддержку «избыточных» путей, т.е. путей, использование которых не способствует дальнейшему росту производительности сети.

### **Сравнительный анализ моделей многопутевой маршрутизации с ограничением и без ограничения количества используемых путей**

С целью оценки эффективности моделей многопутевой маршрутизации проведен сравнительный анализ, результаты которого приведены в таблице.

Из таблицы видно, что общее количество бесконтурных путей, как правило, значительно больше, чем число независимых путей, особенно это характерно для сетей высокой размерности. В данных случаях, для сетей из 5-6 узлов общее количество бесконтурных путей в 1,5-2 раза больше, чем количество независимых маршрутов. Для наглядности, полученные результаты показаны на рис. 8, где приведено общее количество бесконтурных путей, количество независимых путей, а также общее количество непересекающихся путей.

Структура сети	Узел отправитель-узел получатель	Общее количество бесконтурных путей	Количество независимых путей	Количество непересекающихся путей
	1-4	4	3	2
	1-5	7	4	2
	1-6	8	4	2
	1-7	9	5	3

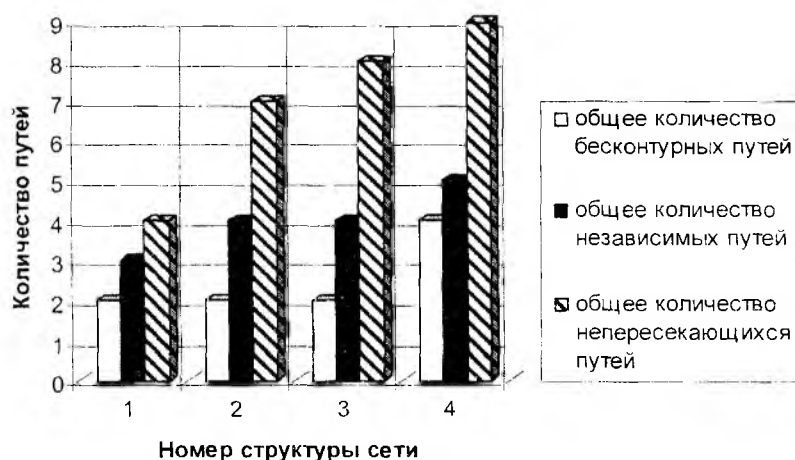


Рис. 8

## Выводы

Таким образом, одной из причин возникновения рассмотренных основных проблем при реализации многопутевой маршрутизации в современных технологиях является использование большого количества маршрутов в сети. Причем, в существующих технологических и теоретических решениях задач многопутевой маршрутизации отсутствует процедура определения необходимого количества путей, и это число задается эмпирически или же используются все доступные маршруты. Нужно отметить, что для повышения эффективности многопутевой маршрутизации (снижения объемов служебной информации и повышения оперативности решений) в современных технологиях необходимо реализовывать стратегию маршрутизации от источника, основанную на использовании виртуальных путей и каналов.

В ходе сравнительного анализа различных решений МПМ получены результаты, которые свидетельствуют о том, что целесообразно использовать число путей, которое не превышает их базисное число в ТКС. Это позволит обеспечить те же значения произво-

дительности ТКС, что и при использовании всех бесконтурных путей, но значительно (в 1.5-2 раза и более) уменьшить число устанавливаемых и поддерживаемых путей в сети, повысив тем самым масштабируемость маршрутных решений и пропорционально сократив при этом объемы циркулирующего служебного трафика.

**Список литературы:** 1. *Остерлох Х.* Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. С.Пб.: ВHV-С.Пб., 2002. 512 с. 2. *Вегения Ш.* Качество обслуживания в сетях IP: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. 386 с. 3. *Руденко И.* Маршрутизаторы CISCO для IP-сетей. М.: КУДИС-ОБРАЗ, 2003. 656 с. 4. *Денисова Т.Б., Лихтциндер Б.Я., Назаров А.Н., Симонов М.В., Фомичев С.М.* Мульти-сервисные ATM сети. М.: Эко Трендз, 2005. 320 с. 5. *Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С.* Технология и протоколы MPLS. М.: Эко-Трендз, 2005. 304 с. 6. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. 544 с. 7. *Gallager R. G.* A minimum delay routing algorithm using distributed computation // IEEE Trans. on communications. 1975. Vol. 25, №1. P.73-85. 8 *Segall A.* The modeling of adaptive routing in data-communications networks // IEEE Trans. on communications, 1975. Vol. 25. №1. P. 85-95. 9. *Вишневецкий В.М.* Теоретические основы проектирования компьютерных систем. М.: Техносфера, 2003. 512 с. 10. *Лемешко А.В.* Тензорная модель многопутевой маршрутизации агрегированных потоков с резервированием сетевых ресурсов, представленная в пространстве с кривизной // Праці УНДІРТ. Вип. №4 (40). Одеса: Видання УНДІРТ, 2004. С. 12-18. 11. *Дробот О.А.* Комплексная модель обеспечения гарантированного качества обслуживания с реализацией динамических стратегий распределения сетевых ресурсов // Радиотехника: всеукр. міжвед. науч.-техн. сб. 2007. № 148. С.43-54.12. *Lee G. M.* A survey of multipath routing for traffic engineering // Proc. of LNCS 3391. Springer-Verlag, 2005. Vol. 4. P. 635-661. 13. *Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Дробот О.А.* Методика выбора независимых путей с определением их количества при решении задач многопутевой маршрутизации // Праці УНДІРТ. Випуск №4 (48). Одеса: Видання УНДІРТ, 2006. С. 69-73. 14. *Крон Г.* Тензорный анализ сетей: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1978. 719 с.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 13.10.2007*