

МИНИСТРЕСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

На правах рукописи

АНДРУШКО ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 621.391

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ МНОГОПУТЕВОЙ
МАРШРУТИЗАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СЕТЯХ
MPLS-TE**

05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети

**Научный руководитель –
МЕЛЬНИКОВА ЛЮБОВЬ ИВАНОВНА**
кандидат технических наук, доцент
кафедры Телекоммуникационных систем
Харьковского национального
университета радиоэлектроники

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Харьков-2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК МАРШРУТИЗАЦИИ.....	11
1.1 Анализ трафика в сетях следующего поколения.....	11
1.2 Анализ требований информационных потоков к качеству обслуживания.....	14
1.3 Задача маршрутизации и распределения информационных потоков в современных мультисервисных сетях.....	15
1.4 Технологии маршрутизации по кратчайшему пути.....	17
1.5 Технологии многопутевой маршрутизации.....	28
1.6 Особенности концепции трафик инжиниринга.....	36
1.7 Постановка задачи диссертационного исследования.....	39
1.8 Выводы.....	41
2 ВЫБОР МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТРАФИК ИНЖИНИРИНГА В СЕТЯХ MPLS-TE.....	42
2.1 Общие требования, выдвигаемые к многопутевым решениям маршрутных задач.....	42
2.2 Классификация математических моделей маршрутизации.....	44
2.3 Графокомбинаторные модели и алгоритмы маршрутизации.....	46
2.4 Поточковые модели маршрутизации.....	53
2.5 Модели МПМ, основанные на использовании интегрально-дифференциальных и разностных уравнений стояния ТКС.....	63
2.6 Тензорные модели многопутевой маршрутизации с поддержкой гарантированного качества обслуживания в ТКС.....	67
2.7 Выводы.....	69
3 СИНТЕЗ ПРОЦЕДУР ДИНАМИЧЕСКОЙ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ.....	71
3.1 Особенности маршрутизации в сетях MPLS-TE.....	71

3.1 Методика выбора множества кратчайших путей для решения задачи трафик инжиниринга в сетях MPLS-TE.....	73
3.2 Определение оптимального числа путей для реализации многопутевой маршрутизации в сетях MPLS-TE.....	84
3.3 Постановка оптимизационной задачи распределения трафика по множеству независимых путей.....	91
3.4 Анализ результатов моделирования.....	93
3.5 Оценка вычислительной сложности алгоритма.....	96
3.6 Выводы.....	99
4 МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕТЕВЫХ РЕСУРСОВ ПОСЛЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ В СЕТЯХ MPLS-TE.....	100
4.1 Особенности использования различных телекоммуникационных технологий для построения магистральных сетей.....	100
4.2 Восстановление после сбоя в различных транспортных технологиях.....	102
4.3 Исследование сетевых параметров при различных режимах работы сети.....	112
4.4 Математическая модель управления распределением информационных потоков для сетей MPLS-TE в критических условиях....	119
4.5 Результаты моделирования.....	134
4.6 Оценка вычислительной сложности процедуры распределения информационных потоков.....	135
4.7 Выводы.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	142
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	145
Приложение А – Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс.....	153
Приложение Б - Акт внедрения результатов диссертационной работы в НИР центра технической защиты информации (ХГРНТЦ ТЗИ).....	154

ВВЕДЕНИЕ

Эпоха информационного сообщества, которая началась в середине 70-х годов прошлого столетия, вывела на первый план вопросы унифицированного обмена информацией. Эволюционируя от независимых телефонных сетей и сетей обмена данными между пользователями, к концу прошлого века стала очевидна необходимость создания единой сетевой архитектуры, реализующей три вида услуг: передача речи, видео и данных. Сегодня эта концепция известна как *triple play services*. Для реализации множества услуг на базе универсального транспорта комитетом ИТУ-Т была предложена концепция сетей следующего поколения (NGN) [1,2]. Согласно этой концепции, NGN определяется как пакетная сеть, способная предоставлять инфокоммуникационные услуги пользователям, построенная на базе широкополосных технологий с поддержкой качества обслуживания, в которых сервис-ориентированные функции независимы от транспортных. Сети следующего поколения предоставляют свободный доступ к услугам и поддерживают мобильность клиентов, что позволяет организовать целостное и повсеместное предоставление сервисов пользователям. В качестве унифицированной транспортной технологии для построения NGN используется протокол IP.

С момента своего появления IP-сети строились по оверлейному принципу [3,4], т.е. были наложенными на существующую сеть, что приводило к дублированию функций управления и пересылки пакетов. В конце прошлого столетия, благодаря разработке методов IP-коммутации и стандартизации технологии мультипротокольной коммутации меток [5,57,90], удалось создать единый унифицированный уровень, в котором четко формализованы две группы задач: управления (в которую входят маршрутизация, сигнализация и др.) и пересылки данных. Механизмы трафик инжиниринга [3,5,6], стандартизированные как расширения технологии MPLS, обеспечили возможность оптимизации использования сетевых ресурсов для предоставления традиционных и создания новых услуг.

Благодаря этому MPLS-TE на сегодняшний день является базовой платформой для построения сетей NGN и предоставления новых услуг.

По мере внедрения технологий с пакетной коммутацией, очевидными стали проблемы качества обслуживания трафика пользователей. Одним из наиболее перспективных путей решения данной задачи является разработка новых методов многопутевой маршрутизации и распределения информационных потоков, гарантирующих оптимальное использование сетевых ресурсов. Существующие методы и протокольные решения, преимущественно реализуют однопутевую стратегию маршрутизации [7,8] и весь трафик передается по выбранному кратчайшему пути. Многопутевые стратегии маршрутизации, реализованные в таких протоколах как OSPF [7], EIGRP [8], позволяют распределять трафик по нескольким путям на основании статических коэффициентов без учета текущей загрузки сети и лишь в пределах ограниченной области сети. Для решения задачи распределения потоков трафика было предложено много методов [17,30,39,42,43,51-55,70-77]. Особенность этих методов состоит в том, что в их основе принято предположение о стационарности состояния трафика, а перераспределение трафика вызвано лишь изменением характеристик информационных потоков, что является определенной идеализацией состояния. Реальный же трафик является сугубо нестационарным и, как следствие, ограничивает эффективность процедур и вызывает снижение качества обслуживания, а иногда приводит к сбоям основных режимов. Кроме того, возможны ряд ситуаций, когда состояние сети переходит в критический режим или режим рестарта, например при восстановлении сети после выхода со строя отдельного участка или узла. Таким образом, возникает актуальная, важная научная и практическая задача поиска более надежных технологий управления распределением нагрузки, обеспечение качества по уровню предоставляемых услуг. В данной работе решается задача распределения информационных потоков в сетях MPLS-TE с учетом различных режимов работы.

Актуальность: в работах как отечественных [10-21,35,52,60,80], так и западных [22,25,32,40,42-43,48-50,53-56,61-65,73-79,84-86] ученых было предложено много математических методов для решения задач многопутевой маршрутизации и распределения ресурсов. Вопросами маршрутизации и распределения нагрузки в различных технологиях, а также реализации протокольных решений, занимаются многие международные организации, такие как IEEE, ITU-T, IETF [1-2,6-8,37-38,46,57,70]. При этом особое внимание уделяется механизмам обеспечения качества обслуживания, которые зависят от соответствующих методов маршрутизации и распределения трафика пользователей.

Исторически протокольные решения [8,9,97] были основаны на графо-комбинаторных математических моделях, которые обладают низкой вычислительной сложностью и простотой реализации. Однако в этих моделях предусмотрено использование лишь одного выбранного кратчайшего пути для обслуживания трафика, что приводит к неэффективному использованию сетевых ресурсов и перегрузке этого кратчайшего пути. В ряде работ [73-78,86] предлагается обобщение алгоритмов Дейкстры или Беллмана-Форда для реализации многопутевой стратегии маршрутизации и распределения трафика по множеству путей.

Альтернативные подходы решения задач многопутевой маршрутизации, предлагаются в рамках потоковых моделей. Для таких моделей обычно реализуется принцип централизованного управления, когда величина трафика для каждого пути рассчитывается на управляющем узле, а затем передается в сеть. В ряде работ [58,84], рассматривается решение задачи распределения трафика с помощью динамического и линейного программирования. Предлагаемые математические модели позволяют добиться минимизации или максимизации какого-либо параметра качества обслуживания и распределить информационные потоки по множеству путей. Однако предложенные методики решают лишь часть задачи, принимая тот

факт, что возможные пути предварительно рассчитаны и существует лишь задача распределения ресурсов.

Таким образом, несмотря на большое количество предложенных математических методов, для решения задач многопутевой маршрутизации не имеется целостной методики, позволяющей оптимально распределить информационные потоки с учетом различных ограничений. Поэтому решаемая в работе научная задача, где предлагается методика оптимального распределения трафика по множеству независимых путей для сетей MPLS-TE, направленной на совершенствование современной технологии маршрутизации. Предлагаемая методика ориентирована на использование в реальных сетях, где происходят не значительные изменения стационарности трафика.

Для случая нестационарного трафика, когда возможна перегрузка или выход со строя отдельных участков сети, оптимальные методы распределения нагрузки неэффективны в виду большой вычислительной сложности и значительной избыточности. В работе предлагается подоптимальная эвристическая рекурсивная процедура распределения нагрузки для сетей, находящихся в критическом режиме. Данная процедура позволяет задействовать все доступные сетевые ресурсы для обслуживания трафика в условиях временных ограничений и обеспечить условия качественного обслуживания.

Связь работы с научными программами и темами кафедры: Исследования по теме диссертационной работы связаны с выполнением плана госбюджетных и хоздоговорных НИР. Так, материалы диссертационной работы использованы в НИР кафедры Телекоммуникационных систем ХНУРЭ г.р. №0103U004932 и научно-исследовательских работах проводимых Харьковским государственным научно-техническим центром технической защиты информации.

Цель и задачи исследования: Повышение эффективности использования сетевых ресурсов в сетях MPLS-TE посредством

усовершенствования методов многопутевой маршрутизации и распределения ресурсов. Для достижения поставленных целей были сформулированы следующие научные задачи:

1. Анализ режимов функционирования сети в условиях критических состояний, методов многопутевой маршрутизации и распределения информационных потоков в сетях MPLS-TE с целью определения направления исследования, характера задачи и требований к ее решению.

2. Выбор и обоснование математического аппарата многопутевой маршрутизации, учитывающего сформулированные требования к функционированию сети.

3. Разработка методов оптимального распределения ресурсов по множеству независимых путей в сетях MPLS-TE для стационарного режима работы. Разработка метода распределения информационных потоков для сетей MPLS-TE в критических режимах работы.

4. Разработка рекомендаций по практическому применению предложенных решений.

Объект исследования: процессы распределения трафика в сетях NGN.

Предмет исследования: сеть NGN в условиях нестационарного трафика.

Методы исследования: методы системного анализа, теория оптимизации, теория графов, теория вероятностей и математическая статистика, математическое моделирование, методы имитационного моделирования.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые на основе экспериментального исследования и анализа состояния сети NGN в критическом режиме получены вероятностно-временные характеристики, позволяющие задать технические требования к решению задачи.

2. Впервые разработан метод определения оптимального числа независимых путей для распределения информационных потоков в случае заданной топологии и известной нагрузки.

3. Усовершенствован метод перераспределения потоков в сети на основании эвристической рекурсивной процедуры для случая критического режима работы, путем введения процедуры оценки состояния загрузки сети.

Практическое значение результатов:

Полученные научные результаты имеют практическое значение, что подтверждается актами внедрения результатов.

1. Обеспечено более рациональное использование сетевых ресурсов в сетях MPLS-TE, что позволяет повысить качество обслуживания трафика пользователей на 15-20%.

2. Обеспечена возможность дифференцированного распределения информационных потоков в зависимости от текущего состояния, что уменьшает время восстановления сети после сбоя до 50 мс.

3. Экспериментально оценены временные и вероятностные характеристики функционирования сети, определяющие текущий режим работы сети.

4. Методы, алгоритмы, и программные средства моделирования распределения информационных потоков в сети используются в учебном процессе ХНУРЭ в курсе «Управление и маршрутизация в ТКС» и «Алгоритмы управления и адаптации в ТКС».

Личный вклад соискателя. Автором опубликовано 6 статей в специализированных изданиях ВАК Украины. Диссертационная работа является обобщением результатов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных автором лично.

Апробация результатов: Результаты исследований, которые включены в диссертацию, докладывались на международной конференции «ДУИКТ» в 2006г. в г. Киеве, на 2-ом Международном радиоэлектронном

Форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2005 в г.Харькове, Международная конференция “Теория и техника передачи, приема и обработки информации” в 2005, 2006 гг. г. Харьков, а также на международном молодежном форуме «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» в 2003, 2004, 2005 и 2006гг. в г.Харькове.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и списка использованных источников, включающего в себя 98 наименований. Объём работы составляет 152 страницы текста.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. General overview of NGN // ITU-T recommendation Y.2001, 2004.
2. General principles and general reference model for Next Generation Networks // ITU-T recommendation Y.2011, 2004.
3. Awduche D., MPLS and Traffic Engineering in IP Networks. //IEEE Communications Magazine., pp. 42-47, 1999.
4. Morrow M., Sayeed A., MPLS and Next-Generation Networks: Foundations for NGN and Enterprise Virtualization, CiscoPress., 2006, 422p.
5. Олвейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. 480 с.
6. Awduche D., Overview and principles of internet traffic engineering// RFC3272, 2002.
7. Awduche D., Requirements for traffic engineering over MPLS// RFC2702, 1999.
8. Moy J., "OSPF Version 2", RFC-2328, Internet Engineering Task Force, April 1998.
9. Cisco Systems Inc Руководство по технологиям объединенных сетей , 4-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1040с.
10. Беркман Л.Н., Ефремов В.П., Отрок С.И., Обеспечение качества обслуживания в сетях NGN на базе IP ориентированных протоколов // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2006. Вып.144. с. 48-52.
11. Евсеева О.Ю. Динамическая маршрутизация в гибридных телекоммуникационных сетях // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2002. Вып.128. С. 86-90.
12. Лемешко А.В., Беленков А.Г. Динамическая модель комплексного решения задач маршрутизации и абонентского доступа в территориально-распределенных телекоммуникационных сетях // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2003. Вып. 18. С. 134-139.
13. Лемешко А.В., Вероятностно-временная модель QoS-маршрутизации в предвычислении путей в условиях неидеальной надежности элементов

телекоммуникационной сети // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2005. Вып.142. с. 11-20.

14. Лемешко А.В., Дробот О.А., Модель многопутевой QoS-маршрутизации в мультисервисной телекоммуникационной сети // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2006. Вып.144. с. 16-23.

15. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Функциональная модель адаптивной маршрутизации комбинированного типа // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2002. Вып.127. С. 152-159.

16. Лемешко А.В., Евсеева О.Ю., Гема Н.И. Динамическая маршрутизация в пакетных сетях с гарантированным качеством обслуживания // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 123. С.45-50.

17. Лемешко А.В. Алгоритм иерархическо-координационного управления информационным обменом в сети передачи данных // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 1998. Вып. №1. С.323-328.

18. Лосев Ю.И., Польщиков К.А., Дуравкин Е.В., Адаптивная маршрутизация в телекоммуникационных сетях // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2002. Вып.128. С. 74-79.

19. Лосев Ю.И., Рафальский Ю.И., Шматков С.И., Руккас К.М., анализ возможных путей решения задачи динамического управления качеством обслуживания в телекоммуникационных сетях // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2005. Вып.142. с. 30-33.

20. Романов А.И., Голь В.Д., Анализ методов точной оценки живучести телекоммуникационных сетей // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2005. Вып.144. с. 80-88.

21. Романов О.І., Несторенко М.М., Правило В.В., Проблеми проектування і управління телекомунікаційними мережами та шляхи їх вирішення // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2006. Вып.144. С. 53-58.

22. Шринавас В., Качество обслуживания в сетях IP.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003 – 368с.

23. Apostolopoulos G., Guerin R., Kamat S., and others, "Improving QoS Routing Performance Under Inaccurate Link State," in Proceedings of the 16th International Teletraffic Congress (ITC'16), Edinburgh, 1999.

24. Casetti C., Cigno R.L., Mellia M., and others, "A New Class of QoS strategies Based on Network Graph Reduction," in Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM'02), 2002.

25. Chen S., Nahrstedt K., "An Overview of Quality of Service Routing for Next-Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions," IEEE Network Magazine, vol. 12, no. 6, 1998.

26. Chen S., Nahrstedt K., "An Overview of Quality-of-Service Routing for the Next Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions", IEEE Network Magazine, Special Issue on Transmission and Distribution of Digital Video, Vol. 12, No. 6, November- December 1998, pp. 64-79.

27. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 494 с.

28. Cidon I., Rom R., Shavitt Y., Analysis of Multi-Path Routing, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 7, no. 6, pp. 885 – 896. 1999.

29. Crawley E. and others, "A Framework for QoS-based Routing in the Internet", RFC-2386, 1998.

30. Awduche D., Berger L., Gan D. and others, RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels, RFC-3209, 2001

31. Rosen E., Tappan D., Fedorkow G., and others, MPLS Label Stack Encoding // RFC 3032, 2001.

32. Elwalid A., Jin C., Low S., Widjaja I., MATE: MPLS Adaptive Traffic Engineering 2001.

33. Бертсекас Д., Галлагер Р. Сети передачи данных. М.: Мир, 1989. 544 с.

34. Олифер В.Г., Олифер Н.А., Компьютерные сети. Принципы,

технологии, протоколы: Учебник для ВУЗов. 3-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 958с.: ил.

35. Вишнеvский В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных систем. М.: Техносфера, 2003. 512 с.

36. Ergun F., Sinha R., Zhang L., “QoS Routing with Performance-Dependent Costs,” in Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM’00), 2000.

37. Faucheur F. Le, Wu L., Davie B., and others, Multi-Protocol Label Switching (MPLS) Support of Differentiated Services // RFC-3270, 2002

38. Faucheur F. Le, Lai W., Requirements for Support of Differentiated Services-aware MPLS Traffic Engineering // RFC-3564, 2003

39. Форд Л., Фалкерсон Д. Потоки в сетях: Пер. с англ. М.: Мир, 1966. 276 с.

40. Fortz B., Thorup M., Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights. In INFOCOM (2), pages 519–528, 2000.

41. Guichard J. , Faucheur F. , Vasseur J.-P. , Definitive MPLS Network Designs, CiscoPress, 2005. – 552p.

42. Hao F., Zegura E., “On Scalable QoS Routing: Performance Evaluation of Topology Aggregation,” in Proceedings of the Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM’ 00), 2000.

43. Heusse M., Kermarrec Y., A new routing policy for load balancing in communication networks. In ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications, pages 267–272, Beirut, Lebanon, 2001.

44. Hussain I., Fault-Tolerant IP and MPLS Networks, CiscoPress, 2004, 336p.

45. Lang J., Rajagopalan B., Papadimitriou D., Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Recovery Functional Specification, RFC-4426, 2006

46. Kompella K., Swallow G., Detecting Multi-Protocol Label Switched (MPLS) Data Plane Failures, RFC-4379, 2006

47. Thompson K., Miller G.J., and Wilder R., ”Wide-area internet traffic

patterns and characteristics”, IEEE Networks, 6(6), Dec. 1997.

48. Kodialam M., Lakshman T. Minimum Interference Routing with Applications to MPLS Traffic Engineering

49. Korkmaz T., Krunz M., Multi-Constrained Optimal Path Selection. IEEE INFOCOM'01, vol.2, pp. 834 -843, 2001.

50. Kwon M., Fahmy S., “Topology-Aware Overlay Networks for Group Communication,” in Proceedings of the ACM NOSSDAV, pp. 127–136. 2002.

51. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. М.:Советское радио, 1976. – 344с.

52. Кільчицький Є.В., Стеклов В.К. Особливості управління телекомунікаційними мережами та послугами в екстремальних умовах // Радіотехніка. Всеукр. міжведомств. науч.-техн. сб. 2002. Вып.128. С. 63-66.

53. Liu G., Ramakrishnan K.G., A Prune: an algorithm for finding k shortest paths subject to multiple constraints. In Proceedings of the INFOCOM 2001 Conference, pages 743.749, Anchorage, Alaska, April 2001. IEEE.

54. Mieghem P., Neve H., Kuipers F., Hop-by-hop quality of service routing, Computer Networks, vol. 37, pp. 407-423, 2001.

55. Murali Kodialam, T. V. Lakshman, Minimum Interference Routing with Applications to MPLS Traffic Engineering, 2001.

56. Osborne E. , Simha A., Traffic Engineering with MPLS CiscoPress, 2002, 608p.

57. Pan P., Swallow G., Atlas A., Fast Reroute Extensions to RSVP-TE for LSP Tunnels, RFC-4090, 2005

58. Qingming Ma, Peter Steenkiste, On Path Selection for Traffic with Bandwidth Guarantees, 1998.

59. QoS routing via multiple paths using bandwidth reservation // Proc. IEEE Infocom. San Francisco, 1998. Vol. 1. P. 11-18.

60. Безрук В.М., Свид И.В., Корсун И.В., Многокритериальная оптимизация управления сетью связи с пакетной коммутацией // Радиотехника. Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. 2005. Вып.142. с. 53-58.

61. Raju J., Garcia-Luna-Aceves J.J. A New Approach to On-demand Loop-Free Multipath Routing // Proc. IEEE IC3N. Boston, 1999. P. 53-62

62. Raz D., Shavitt Y., Raz D., and oth., Optimal partition of QoS requirements with discrete cost functions, IEEE INFOCOM'00, vol.2, pp. 613 – 622, 2000.

63. Savage S., Anderson T., Aggarwal A., and others, “Detour: A Case for Informed Internet Routing and Transport,” IEEE Micro, vol. 1, no. 19, pp. 50–59. – 1999.

64. 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.

65. Seok Yo., Lee Yo., Choi Ya., Kim C. A constrained multipath traffic engineering scheme for MPLS networks // Proc. of IEEE ICC 2002. 2002. New York. P. 2431-2436.

66. Subhash Suri, Marcel Waldvogel, Daniel Bauer, and Priyank Ramesh Warkhede, Profile-Based Routing and Traffic Engineering, 2001

67. Suwala G., Swallow G., SONET/SDH-Like resilience for IP networks: a survey of traffic Protection Mechanisms. IEEE Network. 2004. - p.20-25.

68. Suzuki H., Knysh B., Tolley B., “Carrier Class Optical Ethernet,” NFOEC 2002 Conf., Dallas, TX, Sept. 15–19 2002.

69. Swallow G., MPLS advantages for traffic engineering. IEEE communications magazine, 37(12):54 –57, 1999.

70. V. Sharma, F. Hellstrand Framework for Multi-Protocol Label Switching (MPLS)-based Recovery, RFC-3469, 2003

71. Villamizar C., "MPLS Optimized Multipath (MPLS-OMP)", Internet Draft, February 1999.

72. Villamizar C., "OSPF Optimized Multipath (OSPF-OMP)", Internet Draft, February 1999.

73. Vutukury S. Multipath routing mechanisms for traffic engineering and quality of service in the Internet // PhD Dissertation. University of California, 2001. 152 p.

74. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J. J. A Distributed Algorithm for Multipath Computation. // Proc. IEEE GLOBECOM. Rio de Janeiro, 1999. 1203-1207.

75. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J. J. MDVA: A Distance-Vector Multipath Routing Protocol // Proc. IEEE INFOCOM. Anchorage, 2001. P. 557-564.

76. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J. MPATH: a loop-free multipath routing algorithm // Elsevier Journal of Microprocessors and Microsystems. 2001. № 24 (6). P. 319-327.

77. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J. J. An Algorithm for Multipath Computation Using Distance-Vectors with Predecessor Information // Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). Boston, 1999. P. 534-539.

78. Vutukury S., Garcia-Luna-Aceves J.J. A Simple Approximation to Minimum Delay Routing // Proc. ACM SIGCOMM. Cambridge, 1999. P.39-50.

79. 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.

80. Амосов А.А., Коленеченко А.М. Поточковые алгоритмы для управления нестационарными сетями связи // V Всесоюзная школа семинар по вычислительным сетям. Ч.2. Москва-Владивосток, 1980. С.13-18.

81. Wang Z., Crowcroft J., "Quality-of-Service Routing for Supporting Multimedia Applications," IEEE JSAC, Vol. 14, No. 7, pp. 1228-1234, 1996.

82. Сингх М., Титли А. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление. М.: Машиностроение, 1986. 494 с.

83. Шринавас В., Качество обслуживания в сетях IP.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003 – 368с.

84. Yongho Seok, Youngseok Lee, Yanghee Choi, Changhoon Kim,

85. Yuan X.. Heuristic algorithms for multiconstrained quality-of-service routing. IEEE/ACM Transactions on Networking, 10(2):244-256, 2002.
86. Zaumen W. T., Garcia-Luna-Aceves J.J. Loop-Free Multipath Routing Using Generalized Diffusing Computations // Proc. IEEE INFOCOM '98. San Francisco, 1998. P. 1408-1417.
87. Березко М.П., Вишнеvский В.М., Левнер Е.В. и др., Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных., Информационные процессы., Т1, №2 стр. 103-125, 2001.
88. Gallager R., A minimum delay routing algorithm using distributed computation., IEEE Trans. On Communications, pp73-85, 1985.
89. Types and characteristics of SDH network protection architectures // ITU-T Recommendation G.841, 1998.
90. Ethernet protection switching // ITU-T Recommendation G.8031/Y.1342, 2006.
91. Rosen E., Viswanathan A., Callon R., Multiprotocol label switching architecture. // RFC-3031, 2001.
92. Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) access method and physical layer specifications // Standard IEEE-802.3, 2005
93. Resilient packet ring (RPR) access method and physical layer specifications // Standard IEEE-802.17, 2004.
94. Tsiang D., Suwala G., The Cisco SRP MAC Layer Protocol // RFC-2892, 2000.
95. Архитектура сетей уровня MPLS //Рекомендация МСЭ-Т G.8110/Y.1370, 2005
96. Malkin G., RIP Version 2 Carrying Additional Information // RFC-1723, 1994.
97. Hedrick C., Routing Information Protocol // RFC-1058, 1988.
98. Braden R., L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, Resource ReSerVation Protocol (RSVP) - Version 1 Functional Specification // RFC-2205, 1997.