

УДК 621.391

А. В. ПРОСКОЧИЛО¹, М. С. ЗРЯХОВ¹, А. В. ВОРОБЬЕВ², А. А. АКУЛИНИЧЕВ¹¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Flexaspect Company, Украина*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ IP-СЕТЯХ

Предложен метод повышения эффективности балансировки нагрузки в телекоммуникационных IP-сетях с использованием локально-динамических моделей маршрутизатора, который учитывает параметры трафика при его распределении (объем и тип потока, стационарность, коэффициент использования канала, состояние и режим работы сети). Для оценки эффективности предложенной балансировки нагрузки выполнено имитационное моделирование работы простой IP-сети в условиях различных интенсивностей и вероятностно-временных характеристик трафика. Эффективность балансировки нагрузки оценивалась коэффициентом использования сети (каналов). Анализ коэффициента использования сети показал существенное повышение данного критерия не менее чем на 15 % по сравнению с использованием стандартных механизмов балансировки нагрузки по маршрутам с равной метрикой.

Ключевые слова: маршрутизация, балансировка нагрузки, качество обслуживания, локально-динамическая модель, метод повышения эффективности.

Введение

Развитие рынка телекоммуникационных услуг и приложений является ключевым моментом в стремительном росте глобального Интернет трафика. Ожидается, что его годовой объем к 2019 году превысит два зеттабайта [1]. Кроме того, активная конвергенция вычислительных технологий и средств (систем) передачи информации привели к появлению программно-конфигурируемых сетей (software definition network – SDN), которые основаны на традиционных телекоммуникационных IP-сетях с вынесенным (разделённым от устройств передачи данных) уровнем управления [2]. Однако появление и развитие SDN связано со сложностью управления традиционными IP-сетями, ресурсы которых часто используются неэффективно, из-за чего снижается качество обслуживания (Quality of Service – QoS) трафика. Следовательно, повышение эффективности использования ресурсов IP-сетей остаётся одной из важных проблем на этапе перехода к SDN-сетям.

При решении подобного рода задач часто используют рекомендации из концепций Traffic Engineering, QoS-Based Routing, Load Balancing Routing и ряда других [3-9]. Однако эти концепции не в полной мере адаптированы к требованиям по обеспечению QoS для трафика, который носит потоковый характер. Предложенные методики реализации в обозначенных концепциях в подавляющем большинстве трудно реализуемы и сложны при настрой-

ке и адаптации к условиям использования, что нередко приводит к обратному результату (снижению эффективности работы сети как на локальных участках, так и в целом).

Из анализа работ [3, 10-14] и ряда других, посвящённых управлению трафиком и ресурсами телекоммуникационных систем (ТКС), следует, что повышение производительности в сетях зачастую возможно с помощью процесса равномерного распределения или балансировки нагрузки (БН) по недогруженным или вовсе не используемым маршрутам при передаче трафика к узлам назначения [11]. Большинство стандартных, используемых в IP-сетях, протоколов маршрутизации, таких как RIP, OSPF оперируют механизмом БН только по маршрутам с одинаковой рассматриваемой метрикой. Использование маршрутов с неравной метрикой (как было сказано ранее) затруднительно из-за сложности их настройки и необходимости использовать оборудование одного производителя. Например, эффективное использование фирменного протокола EIGRP (разработчик компания Cisco) возможно только на фирменном оборудовании, даже несмотря на то, что протокол стал открыт для широкого доступа [15-16].

На решение о применении БН влияет ряд комплекс-факторов, на основе которых производится расчёт метрики маршрутов в большинстве протоколов маршрутизации. Среди них можно отметить такие как: задержка в общем канале, полоса пропускания, загруженность маршрутов и т.д. При этом

часто не учитываются требования для различных потоков трафика при выполнении БН, что не позволяет удовлетворить все требования по обеспечению QoS из-за технических ограничений или противоречий, возникающих при использовании комплексного подхода. Это приводит к тому, что БН становится малоэффективной и, как следствие, она не применяется.

Вместе с тем, очевидно, что повышение производительности сети за счёт перераспределения нагрузки требует усовершенствования и адаптации методов по принятию решения об использовании БН или разработки новых, которые позволят учитывать потоковые свойства трафика.

Метод повышения эффективности балансировки нагрузки

Для повышения эффективности БН нами предложен метод, который учитывает состояния сети, параметры маршрутизатора и трафика, использует маршруты с равной и неравной метрикой. Опериро-

вание этой информацией позволяет оценить необходимость выполнения БН в сети и обеспечить выбор таких параметров БН, которые смогут удовлетворить требуемый QoS при распределении трафика.

Исходя из общепринятой концепции разработки моделей, имитационной схеме должна предшествовать структурная. Обычно, в качестве структурной модели сети используют её представление в виде взвешенного графа, в котором маршрутизаторы – вершины, а каналы (связующие линии) – ребра. Функциональная модель маршрутизаторов представляется в виде системы дифференциальных уравнений (более подробно рассмотрены в методе локально-динамических моделей маршрутизатора – ЛДМ [17-18]), которые позволяют производить БН с учётом потоковых свойств трафика.

Динамическое управление IP-сетью является сложной задачей, поэтому представление метода повышения эффективности БН в IP-сети целесообразно отобразить в виде алгоритма, представленного на рисунке 1.

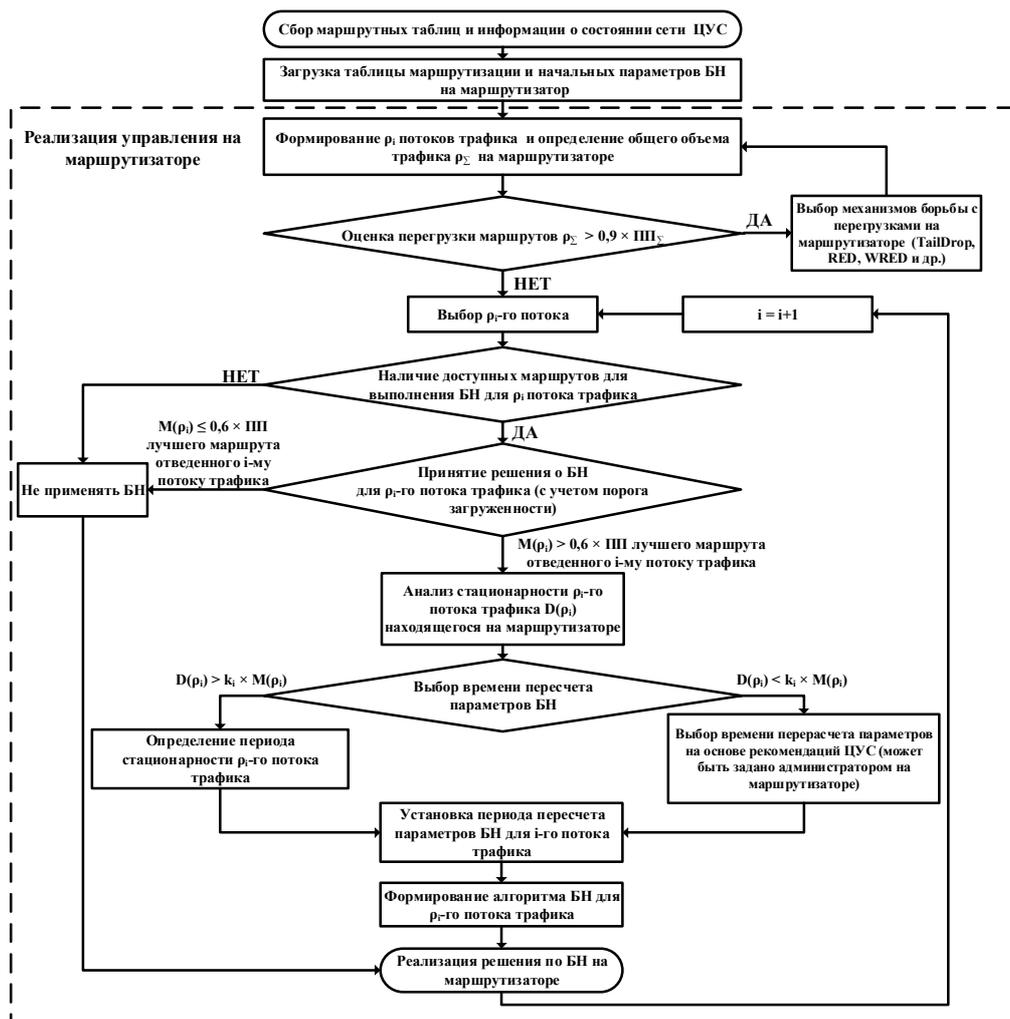


Рис. 1. Метод повышения эффективности балансировки нагрузки

Для решения задачи распределения трафика метод использует комбинацию централизованного и децентрализованного подходов к управлению.

Централизованный подход к управлению выполнен на основе центра управления сетью (ЦУС), основной задачей которого является сбор информации о состоянии узлов и каналов в сети, их загруженности, маршрутных таблиц и параметров трафика посредством протоколов управления сетью (таких как SNMP, CMIP и др.). Собранные информация анализируется сервером, после чего принимается решение о выборе маршрутизаторов, на которых возможно и целесообразно выполнять БН. Время повторного анализа параметров сети и трафика для модификации настроек БН может быть выбрано автоматически (при их изменении) или задано фиксировано. Рассчитанные ЦУС параметры БН передаются на маршрутизаторы. Окончательное решение о БН принимается маршрутизатором локально (децентрализованно) исходя из текущей нагрузки. Считается, что маршрутизатор эффективно работает при текущей загрузке буфера до 90% [19]. В противном случае возможно переполнение памяти с одновременным запуском механизма борьбы с перегрузкой. Механизмы борьбы с перегрузками включают в себя алгоритмы обслуживания очередей (FIFO, WFQ, PQ и др.) и управления очередями (Tail Drop, RED, WRED и т.п.) с обеспечением QoS.

Балансировку нагрузки предлагается применять только при работе оборудования в штатном режиме $\rho_{\Sigma} < 0,9\text{ПП}_{\Sigma}$ (ρ_{Σ} – суммарная входящая нагрузка, ПП_{Σ} – суммарная полоса пропускания исходящих каналов) и для конкретного заранее сформированного потока ρ_i (i – номера потока), для которого известны несколько вариантов исходящих маршрутов. В противном случае БН не применяется. БН также не применяется, если оценка средней интенсивности i -го потока трафика $M(\rho_i)$ меньше 60% полосы пропускания исходящего канала, выделенного этому трафику.

Эффективные методы балансировки нагрузки предполагают наличие информации о стационарно-

сти балансируемых потоков. Для этого предусмотрен этап определения дисперсии i -го потока $D(\rho_i)$, который позволяет включать механизм пересчёта параметров БН в соответствии с условием:

1) если $D(\rho_i) < k_i \times M(\rho_i)$, то считаем, что ρ_i стационарный (квазистационарный) и время пересчёта параметров БН определяется ЦУС или администратором;

2) если $D(\rho_i) \geq k_i \times M(\rho_i)$, то ρ_i нестационарен, необходимо запустить механизм поиска периода стационарности потока для определения параметров времени пересчёта БН.

Коэффициент регулировки k_i задаёт пределы допустимых отклонений $D(\rho_i)$ при кратковременных перегрузках и может устанавливаться администратором сети или ЦУС (по умолчанию). Обычно выбор значения k_i осуществляется на основе $M(\rho_i)$. Нами рекомендуется выбирать значения k_i исходя из следующих условий:

1) если $M(\rho_i) < 10\%$ пропускной способности интерфейсов маршрутизатора, задействованных для БН i -го потока, то принимаем k_i равным единице;

2) если $M(\rho_i) \geq 10\%$ пропускной способности интерфейсов маршрутизатора, задействованных для БН i -го потока, то принимаем k_i равным 0,3.

Исследование метода повышения эффективности БН в IP-сетях

Эффективность применения предложенного метода БН подтверждается результатами имитационного моделирования в среде MATLAB для IP-сети, структура которой показана на рисунке 2. В качестве критерия эффективности выбран коэффициент загрузки доступных для БН маршрутов. Принимаем, что оптимальной загрузкой маршрута является его загруженность в диапазоне 60% - 90% от максимальной пропускной способности. Такое значение обеспечивает минимальные потери трафика при целесообразности применения БН.

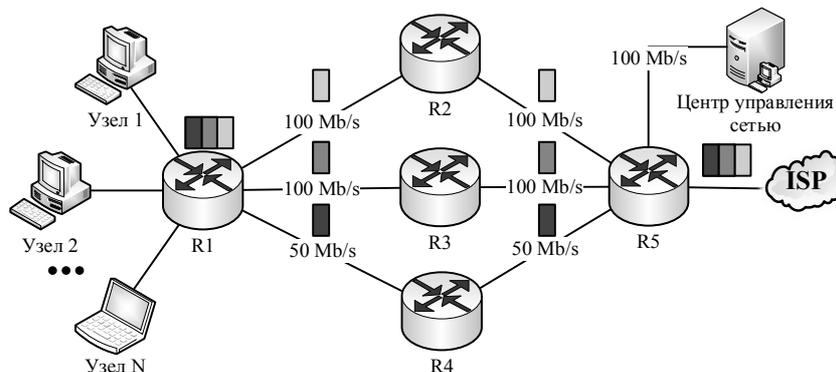


Рис. 2. Топология исследуемой сети

Модель исследуемой сети содержит центр управления сетью, пять маршрутизаторов (R1, R2, ..., R5), подключённых к сети Интернет-провайдера (ISP – Internet Service Provider) через маршрутизатор R5. Предполагается, что сеть однопродуктовая и весь генерируемый трафик направлен от маршрутизатора R1 в сеть ISP. Диапазон значений интенсивности трафика определён в пределах от 50 Мбит/с до 300 Мбит/с (полагаем, что интенсивность трафика до 80Мбит/с – низкая, от 80 Мбит/с до 150 Мбит/с – средняя, более 150 Мбит/с – высокая). По типу трафик разделён на пять видов: VoIP – передача голосовой информации, видео трафик, приложения данных, информация Web ресурсов и другие типы трафика, сформированные в единый поток. При этом стационарность потоков трафика для традиционных методов БН (в RIP, OSPF и др.) не оценивается (не предусмотрено протоколами). Для предложенного метода повышения эффективности

БН стационарность потоков оценивается только в случае средней и высокой интенсивностей трафика.

Исследуемая модель IP-сети содержит три маршрута, которые могут быть задействованы для передачи информации (количество используемых маршрутов зависит от метода БН и требований QoS). Маршруты R1-R2-R5 и R1-R3-R5 имеют пропускную способность по 100 Мбит/с, маршрут R1-R4-R5 – 50 Мбит/с.

Результаты моделирования для традиционных методов БН по маршрутам с равной метрикой представлены в таблице 1 (опыты 1-3). Такие механизмы используют для БН только маршруты R1-R2-R5 и R1-R3-R5 с одинаковой пропускной способностью и распределяют трафик равномерно. При этом маршрут R1-R4-R5 с отличной от других маршрутов метрикой простаивает. Расчёт параметров БН выполнен с использованием метода ЛДМ [20-21].

Таблица 1

Результаты имитационного моделирования

Опыт	Тип трафика	Интенсивность трафика, Мбит/с (Математическое ожидание)	Интенсивность трафика на выходе маршрутизатора (суммарная), Мбит/с	Стационарность трафика	Всего маршрутов	Полоса пропускания, отведённая в маршрутах под каждый тип трафика, Мбит/с			Принятые решения по БН и управлению маршрутизатором	Время перерасчёта параметров БН, с	Коэффициент использования выделенной полосы пропускания в маршрутах, % (средняя)			
						Номер маршрута					Номер маршрута			
						1	2	3			1	2	3	
Методы БН по маршрутам с равной метрикой (в RIP, OSPF)														
1	Общее	50	49,92	Не предусмотрено	3	2	100	100	50	БН только по маршрутам с равной метрикой	На основе обновлений протокола маршрутизации	24,97	24,97	-
	VoIP	5	4,99		3	2	10	10	Не используется для БН			24,97	24,97	Не используется для БН
	Видео	20	19,97		3	2	40	40	24,97			24,97		
	Данные	15	14,98		3	2	30	30	24,97			24,97		
	Web	5	4,99		3	2	10	10	24,97			24,97		
	Другие	5	4,99		3	2	10	10	24,97			24,97		
2	Общее	150	149,84	Не предусмотрено	3	2	100	100	50	БН только по маршрутам с равной метрикой	На основе обновлений протокола маршрутизации	74,92	74,92	-
	VoIP	15	14,99		3	2	10	10	Не используется			74,92	74,92	Не используется для БН
	Видео	60	59,94		3	2	40	40	74,92			74,92		
	Данные	45	44,95		3	2	30	30	74,92			74,92		
	Web	15	14,99		3	2	10	10	74,92			74,92		
	Другие	15	14,99		3	2	10	10	74,92			74,92		
3	Общее	300	180,8	Не предусмотрено	3	2	100	100	50	БН только по маршрутам с равной метрикой	На основе обновлений протокола маршрутизации	90,4	90,4	-
	VoIP	30	18,08		3	2	10	10	Не используется для БН			90,4	90,4	Не используется для БН
	Видео	120	72,32		3	2	40	40	90,4			90,4		
	Данные	90	54,24		3	2	30	30	90,4			90,4		
	Web	30	18,08		3	2	10	10	90,4			90,4		
	Другие	30	18,08		3	2	10	10	90,4			90,4		
Результат работы предложенного метода														
4	Общее	50	49,95	Не оценивается	3	3	100	100	50	Не применять	Задаёт ЦУС	49,95	Не используется	Не используется
	VoIP	5	4,995		3	3	10	10	5			49,95		
	Видео	20	19,98		3	3	40	40	20			49,95		
	Данные	15	14,985		3	3	30	30	15			49,95		
	Web	5	4,995		3	3	10	10	5			49,95		
	Другие	5	4,995		3	3	10	10	5			49,95		

Продолжение таблицы 1

Опыт	Тип трафика	Интенсивность трафика, Мбит/с (Математическое ожидание)	Интенсивность трафика на выходе маршрутизатора (суммарная), Мбит/с	Стационарность трафика	Всего маршрутов	Наличие маршрутов для БН	Полоса пропускания, отведённая в маршрутах под каждый тип трафика, Мбит/с			Принятие решений по БН и управлению маршрутизатором	Время перерасчёта параметров БН, с	Коэффициент использования выделенной полосы пропускания в маршрутах, % (средняя)				
							Номер маршрута					Номер маршрута				
							1	2	3			1	2	3		
Результат работы предложенного метода																
5	Общее	150	149,85	-	3	3	100	100	50	-	-	59,94	59,94	59,94		
	VoIP	15	14,985	Стационарен	3	3	10	10	5	Применять	Задаёт ЦУС	59,94	59,94	59,94		
	Видео	60	59,94		3	3	40	40	20			59,94	59,94	59,94		
	Данные	45	44,95		3	3	30	30	15			59,94	59,94	59,94		
	Web	15	14,985		3	3	10	10	5			59,94	59,94	59,94		
	Другие	15	14,985		3	3	10	10	5			59,94	59,94	59,94		
Общее	149,02	144,88	-		3	3	100	100	50			-	-	57,96	57,96	57,96
6	VoIP	14,61	14,23	Не стационарен	3	3	10	10	5	Применять	40	56,94	56,94	56,94		
	Видео	60,27	58,59		3	3	40	40	20			40	58,59	58,59	58,59	
	Данные	44,50	43,27		3	3	30	30	15			40	57,70	57,70	57,70	
	Web	14,46	14,05		3	3	10	10	5			40	56,23	56,23	56,23	
	Другие	15,19	14,74		3	3	10	10	5			40	58,96	58,96	58,96	
	Общее	150	149,83		-	3	3	100	100			50	-	-	53,51	64,22
7	VoIP	15	14,98	Не оценивается	3	1	20	0	0	Не применять	Задаёт ЦУС	74,92	0,00	0,00		
	Видео	60	59,94	Стационарен	3	3	50	50	25	Применять	40	47,95	47,95	47,95		
	Данные	45	44,95		3	3	20	30	15			40	51,37	77,06	77,06	
	Web	15	14,98		3	3	5	10	5			40	42,81	85,62	85,62	
	Другие	15	14,98		3	3	5	10	5			40	42,81	85,62	85,62	
	Общее	300	226		Оценивается отдельно	3	3	100	100			50	Применяется совместно с механизмами борьбы с перегрузками	Задаёт ЦУС	90,4	90,4
VoIP	30	22,6	3			3	10	10	5			90,4			90,4	90,4
Видео	120	90,4	3	3		40	40	20	90,4	90,4	90,4					
Данные	90	67,8	3	3		30	30	15	90,4	90,4	90,4					
Web	30	22,6	3	3		10	10	5	90,4	90,4	90,4					
Другие	30	22,6	3	3		10	10	5	90,4	90,4	90,4					

Результаты моделирования опыта 1 показывают, что при низкой интенсивности трафика необходимость распараллеливать поток информации отсутствует, но традиционные методы БН на маршрутизаторе R1 работают, увеличивая нагрузку на вычислительную систему R1 и повышая задержку в узле коммутации.

В условиях средней интенсивности трафика (опыт 2) коэффициент загрузки маршрутов составляет порядка 75% от их предельной пропускной способности. При высокой интенсивности трафика (опыт 3, коэффициент загрузки маршрутов более 90%) R1 перегружен в направлении R2 и R3, что приводит к существенным потерям пакетов данных (до 40%) из-за перегрузок и работы механизмов

управления очередями с отказом. Устранить данный недостаток возможно использованием механизмов распределения трафика по маршрутам с неравной метрикой, которые требуют сложной ручной настройки (например, протоколы IGRP и EIGRP). В масштабируемых сетях это трудновыполнимо, а стандартных автоматических методов БН по маршрутам с неравной метрикой в настоящее время не предусмотрено [15, 22].

Анализ полученных выше результатов и учет особенностей стандартных методов БН позволил предложить способ повышения эффективности БН и автоматизировать процесс подстройки параметров БН с учётом характеристик трафика. Результат работы метода на имитационной модели IP-сети пока-

зан в опытах 4-8 (см. таблицу 1).

При низкой суммарной интенсивности трафика (опыт 4) балансировка не применяется и для передачи используется один из кратчайших маршрутов (в данном случае R1-R2-R5). Остальные интерфейсы маршрутизатора R1 могут быть временно отключены с целью энергосбережения.

При средней интенсивности трафика (опыты 5-6) маршрутизатор R1 выполняет БН по всем доступным маршрутам пропорционально пропускной способности канала и типу трафика, а коэффициент использования каждого канала составляет порядка 60%. Ключевым моментом для пересчета параметров БН является оценка стационарности трафика. Если потоки трафика стационарны (опыт 5) параметры БН пересчитываются маршрутизатором с периодом, заданным на ЦУС. При нестационарности трафика (опыт 6) время пересчёта параметров БН определяется маршрутизатором, что дает возможность своевременно реагировать на изменения характеристик трафика и выполнять подстройку параметров БН, учитывая изменения интенсивности потока.

Если политика обеспечения QoS требует передачи целостного потока (например, VoIP трафик) то БН может не применяться (опыт 7) и весь поток передается по одному кратчайшему маршруту (R1-R2-R5) с отведённой под него полосой пропускания, при этом оставшиеся потоки трафика распределяются с равномерной процентной загрузкой маршрутов.

Загрузка буфера маршрутизатора более 90% (опыт 8) запускает механизм понижения интенсивности трафика (механизмы борьбы с перегрузками), что может уменьшить потери трафика до 25%.

Таким образом, предложенный подход к БН с неравномерной метрикой на моделируемом участке IP-сети показал повышение коэффициента использования маршрутов R1-R2-R5 и R1-R3-R5 около 50% по сравнению с вариантом отсутствия БН и около 15% по сравнению с традиционными механизмами БН. При этом обеспечивается возможность не распределять те потоки данных, для которых балансировка трафика может существенно снизить QoS, что неприемлемо для приложений реального времени.

Заключение

В работе предложен метод повышения эффективности балансировки нагрузки в телекоммуникационных IP-сетях. Выполнено имитационное моделирование участка IP-сети, что подтвердило улучшение БН по сравнению с традиционными подходами (RIP, OSPF и других) до 15%.

Исследования и анализ результатов показали, что возможно улучшить предложенный подход к БН (для этого требуется дополнительное исследование работы различных сетей) и реализовать его аппаратно. Алгоритмическая простота метода позволяет реализовать его на существующем оборудовании (при наличии открытого кода) или программно в качестве скрипта на сервере ЦУС.

Литература

1. *The Zettabyte Era: Trends and Analysis [Electronic resource]*. - Access mode: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.pdf>. - Access date 22.03.2017.
2. *SDN, NFV, and Network Virtualization Define The Wave of New IP Infrastructure [Electronic resource]*. - Access mode: <https://www.sdxcentral.com/sdn/definitions/sdn-nfv-network-virtualization-define-new-ip-infrastructure/>. - Access date 22.03.2017.
3. *Обзор и сравнительный анализ основных моделей и алгоритмов многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях [Текст] / В. В. Поповский, А. В. Лемешко, Л. И. Мельникова, Д. В. Андрушко // Прикладная радиоэлектроника. - 2005. - Том.4, № 4. - С. 372-382.*
4. *QoS/Policy/Constraint Based Routing [Electronic resource]*. - Access mode: http://www1.cse.wustl.edu/~jain/cis788-99/ftp/qos_routing/index.html. - Access date 22.03.2017.
5. *Overview and Principles of Internet Traffic Engineering [Electronic resource]*. - Access mode: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3272.txt>. - Access date 22.03.2017.
6. *Trimintzios, P. Providing traffic engineering capabilities in IP networks using logical paths [Text] / P. Trimintzios, G. Pavlou, I. Andrikopoulos // Eighth IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM and IP Networks (IFPM ATM and IP 2000), Ilkey, UK July. - 2000. - P. 1-14.*
7. *Bouzig, A. Proof of Concept of DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering: A VoIP-based approach [Text] / A. Bouzig, A. Zelfani // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. - 2015. - Vol. 4, No. 3. - P. 801-806.*
8. *Nair, T. R. G. A QoS-based routing approach using genetic algorithms for bandwidth maximisation in networks [Text] / T. R. G. Nair, K. Sooda, R. Selvarani // International Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing. - 2014. - Vol. 4, No. 1. - P. 80-94.*
9. *Sakhri, K. Towards efficient MPLS traffic engineering: New Load Balancing Algorithm using Pheromone Deposit for Deviation Path Selection [Text] / K. Sakhri, D. Korichi // International Research Journal*

of *Engineering and Technology (IRJET)*. – 2016. – Vol. 3, No. 3. – P. 266-269.

10. Симаков, Д. В. Управление трафиком в сети с высокой динамикой метрик сетевых маршрутов [Текст] / Д. В. Симаков // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 1-13.

11. Singh, R. K. Load balancing in IP/MPLS networks: a survey [Text] / R. K. Singh, N. S. Chaudhari, K. Saxena // *Communications and Network*. – 2012. – Vol. 4, No. 2. – P. 151-156.

12. Кириченко, Л. О. Анализ дисбаланса распределенной системы при самоподобной нагрузке [Текст] / Л. О. Кириченко, И. Н. Иванисенко, Т. А. Радивилова // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон : ХНТУ, 2016. – № 3(58). – С. 224-231.

13. Вавенко, Т. В. Поточковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди в программно-конфигурируемых сетях [Текст] / Т. В. Вавенко, В. Л. Стерин, А. В. Симоненко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №. 4(86). – С. 38-45.

14. Pereira, V. Optimizing load balancing routing mechanisms with evolutionary computation [Text] / V. Pereira, M. Rocha, P. Sousa // *Intelligent Environments 2016 (FI&SN 2016 Workshops)*. – IOS Press, 2016. – Vol. 21. – P. 298-307.

15. Как работает средство балансировки нагрузки? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cisco.com/cisco/web/support/RU/9/92/92036_46.html. – 22.03.2017.

16. Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP) [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/ios-nx-os-software/enhanced-interior-gateway-routing-protocol-igrp/index.html>. – Access date 22.03.2017.

17. Разработка модели и метода потоковой балансировки нагрузки [Текст] / А. В. Проскочило, А. В. Воробьев, А. А. Акулиничев, А. Н. Гора // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ-2013. – 2013. – Т. 2. – С. 215.

18. Load Balancing on Flows in Router IP-Network [Text] / A. Proskochylo, A. Vorobyov, A. Gora, A. Akulinichev // *International Scientific Conference TCSET-2014*, 27.02.2014. – P. 569-570.

19. Петров, А. С. Методика управления сетевым трафиком для повышения живучести корпоративной сети [Текст] / А. С. Петров, А. В. Минин // Сучасна спеціальна техніка. – 2012. – №. 2(29). – С. 65-69.

20. Воробьев, А. В. Исследование эффективности метода локальных динамических моделей

[Текст] / А. В. Воробьев // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. – 2011. – № 4(52). – С. 121-126.

21. Кортунов, В. И. Решение задачи распределения нагрузки на основе динамической модели маршрутизатора [Текст] / В. И. Кортунов, А. В. Воробьев // *Проблеми телекомунікацій*. – 2011. – № 2(4). – С. 128 – 138.

22. Как работает распределение нагрузки с неравной стоимостью путей (вариация) в IGRP и EIGRP? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cisco.com/c/ru/support/docs/ip/enhanced-interior-gateway-routing-protocol-igrp/13677-19.html>. – 22.03.2017.

References

1. *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*. Available at: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.pdf> (accessed 22.03.2017).

2. *SDN, NFV, and Network Virtualization Define The Wave of New IP Infrastructure*. Available at: <https://www.sdxcentral.com/sdn/definitions/sdn-nfv-network-virtualization-define-new-ip-infrastructure/> (accessed 22.03.2017).

3. Popovskij, V. V., Lemeshko, A. V., Mel'nikova, L. I., Andrushko, D. V. Obzor i sravnitel'nyj analiz osnovnyx modelej i algoritmov mnogoputevoj marshrutizacii v mul'tiservisnyx telekommunikacionnyx setyax [The survey and the comparative analysis of the main models and algorithms of multipath routing in multiservice telecommunication networks.]. *Prikladnaya radioelektronika* [Applied Radio Electronics], 2005, vol. 4, no. 4, pp. 372-382.

4. *QoS/Policy/Constraint Based Routing*. Available at: http://www1.cse.wustl.edu/~jain/cis788-99/ftp/qos_routing/index.html (accessed 22.03.2017).

5. *Overview and Principles of Internet Traffic Engineering*. Available at: <https://www.ietf.org/rfc/rfc3272.txt> (accessed 22.03.2017).

6. Trimintzios, P., Pavlou, G., Andrikopoulos, I. Providing traffic engineering capabilities in IP networks using logical paths. *Eighth IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM and IP Networks (IFPM ATM and IP 2000)*, Ilkey, UK July, 2000, pp. 1-14.

7. Bouzid, A., Zelfani, A. Proof of Concept of DiffServ-aware MPLS Traffic Engineering: A VoIP-based approach. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2015, vol. 4, no. 3, pp. 801–806.

8. Nair, T. R. G., Sooda, K., Selvarani, R. A QoS-based routing approach using genetic algorithms for bandwidth maximisation in networks. *International*

Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 80-94.

9. Sakhri, K., Korichi, D. Towards efficient MPLS traffic engineering: New Load Balancing Algorithm using Pheromone Deposit for Deviation Path Selection. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 2016, vol. 3, no. 3, pp. 266-269.

10. Simakov, D. V. Upravlenie trafikom v seti s vysokoj dinamikoj metrik setevyx marshrutov [Traffic engineering for networks with high dynamics of routing metrics]. *Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE»* [Science of Science], 2016, vol. 8, no 1, pp. 1-13.

11. Singh, R. K., Chaudhari, N. S., Saxena, K. Load balancing in IP/MPLS networks: a survey. *Communications and Network*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 151-156.

12. Kirichenko, L. O., Ivanisenko, I. N., Radivilova, T. A. Analiz disbalansa raspredelennoj sistemy pri samopodobnoj nagruzke [Analysis of imbalance of distributed system with a self-similar load]. *Visnik Xerxons'kogo nacional'nogo texnichnogo universitetu*. Kherson: KNTU [Journal of Kherson National Technical University], 2016, no. 3(58), pp. 224-231.

13. Vavenko, T. V., Sterin, V. L., Simonenko, A. V. Potokovaya model' marshrutizacii s balansirovkoj nagruzki po dline ocheredi v programmon-konfiguriruemyx setyax [Flow routing model with load balancing by queue length in software-defined networks]. *Nauchno-texnicheskij vestnik informacionnyx texnologij, mexaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2013, no. 4(86), pp. 38-45.

14. Pereira, V., Rocha, M., Sousa, P. Optimizing load balancing routing mechanisms with evolutionary computation. *Intelligent Environments 2016 (FI&SN 2016 Workshops)*, IOS Press, 2016, vol. 21, pp. 298-307.

15. *Kak rabotaet sredstvo balansirovki nagruzki?* [How Does Load Balancing Work?]. Available at: http://www.cisco.com/cisco/web/support/RU/9/92/92036_46.html (accessed 22.03.2017).

16. *Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP)*. Available at: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/ios-nx-os-software/enhanced-interior-gateway-routing-protocol-eigrp/index.html> (accessed 22.03.2017).

17. Proskochilo, A. V., Vorob'yov, A. V., Akulinichev, A. A., Gora, A. N. Razrabotka modeli i metoda potokovoj balansirovki nagruzki. *Vseukrains'ka nauko-vo-texnichna konferenciya molodix vchenix Integrovani komp'yuterni texnologii v mashinobuduvanni IKTM-2013* [Ukrainian scientific-technical conference of young scientists. The integrated computer technology in mechanical engineering IKTM 2013], Kharkiv, 2013, vol. 2, pp. 215.

18. Proskochylo, A., Vorobyov, A., Gora, A., Akulinichev, A. Load Balancing on Flows in Router IP-Network. *International Scientific Conference TCSET-2014*, Lviv, 27.02.2014, pp. 569-570.

19. Petrov, A. S., Minin, A. V. Metodika upravleniya setevym trafikom dlya povysheniya zhivuchesti korporativnoj seti [The methodology of managing network traffic to improve the survivability of the corporate network]. *Suchasna special'na texnika* [Modern Special Technics], 2012, no. 2(29), pp. 65-69.

20. Vorob'ev, A. V. Issledovanie e'ffektivnosti metoda lokal'nyx dinamicheskix modelej [Research performance of the method local dynamic model]. *Radioelektronni i komp'yuterni sistemi* [Radioelectronic and computer systems], 2011, no 4(52), pp. 121-126.

21. Kortunov, V. I., Vorob'ev, A. V. Reshenie zadachi raspredeleniya nagruzki na osnove dinamicheskoy modeli marshrutizatora [Solution to the problem of load distribution based on a dynamic model of a router]. *Problemi telekomunikacij* [Problems of Telecommunications], 2011, no. 2(4), pp. 128 – 138.

22. *Kak rabotaet raspredelenie nagruzki c neravnoj stoimost'yu putej (variatsiya) v IGRP i EIGRP?* [How Does Unequal Cost Path Load Balancing (Variance) Work in IGRP and EIGRP?]. Available at: http://www.cisco.com/c/ru_ru/support/docs/ip/enhanced-interior-gateway-routing-protocol-eigrp/13677-19.html (accessed 22.03.2017).

Поступила в редакцию 12.04.2017, рассмотрена на редколлегии 12.06.2017

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ІР-МЕРЕЖАХ

А. В. Проскочило, М. С. Зряхов, А. В. Воробйов, А. А. Акулінічев

Запропоновано метод підвищення ефективності балансування навантаження в телекомунікаційних ІР-мережах з використанням локально-динамічних моделей маршрутизатора, який враховує параметри трафіка при його розподілі (об'єм та тип потоку, стаціонарність, коефіцієнт використання каналу, стан і режими роботи мережі). Для оцінки ефективності запропонованого балансування навантаження проведено імітаційне моделювання роботи простої ІР-мережі в умовах різноманітних інтенсивностей і ймовірно-часових хара-

ктеристик трафіка. Ефективність балансування навантаження оцінювалась коефіцієнтом використання мережі (каналів). Аналіз коефіцієнта використання мережі засвідчив вагоме підвищення даного критерію не менше ніж на 15% в порівнянні з використанням стандартних механізмів балансування навантаження по маршрутам з рівною метрикою.

Ключові слова: маршрутизація, балансування навантаження, якість обслуговування, локально-динамічна модель, метод підвищення ефективності.

THE INCREASING OF LOAD BALANCING EFFICIENCY IN TELECOMMUNICATION IP-NETWORKS

A. V. Proskochylo, M. S. Zriakhov, A. V. Vorobyov, A. A. Akulinichev

A method for increasing the load balancing efficiency in telecommunication IP-networks using locally-dynamic models of router that allows to estimate traffic parameters for traffic allocation (volume and type of flow, stationarity, coefficient of channel use, state and network operation modes) is proposed. For estimation of effectiveness of the proposed load balancing in conditions of varying intensity and probability-time traffic characteristics the simulation of simple IP-based network is done. The load balancing efficiency is evaluated by coefficient of network (channels) use. Analysis of the coefficient of network use shows significant increasing of this criterion by not less than 15% in comparison to standard mechanisms of load balancing by equal cost routes.

Key words: routing, load balancing, QoS, locally-dynamic model, method of increasing the efficiency.

Проскочило Артем Викторович – аспірант кафедри «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: a.proskochylo@khai.edu.

Зряхов Михаил Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: m.zriakhov@khai.edu.

Воробьев Андрей Васильевич – канд. техн. наук, web-разработчик в Flexaspect Company, Харьков, Украина, e-mail: and_vorobey@hotmail.com.

Акулиничев Артем Аркадьевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: akulinichev@xai.edu.ua.

Proskochylo Artem Viktorovich – PhD student of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Processing National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: a.proskochylo@khai.edu.

Zriakhov Mikhail Sergeevich – Candidate of Technical Science, Associate Professor of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Processing National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: m.zriakhov@khai.edu.

Vorobyov Andrey Vasilyevich – Candidate of Technical Science, Web developer at the Flexaspect Company, Kharkov, Ukraine, e-mail: and_vorobey@hotmail.com.

Akulynichev Artem Arkadievich – Candidate of Technical Science, Associate Professor of Dept. of Transmitters, Receivers and Signal Processing National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: akulinichev@xai.edu.ua.