УДК 004.9

Кочнев Егор Евгеньевич,
студент
4 курс, факультет «Комплексной безопасности ТЭК»
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
Россия, г. Москва
Научный руководитель: Павловский Владимир Владимирович,
Преподаватель кафедры БИТ
РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
Россия, г. Москва

ПРОВЕРКА КОДИРОВАНИЯ СТЕКА МЕТОК MPLS (RFC 8657) НА ОСНОВЕ ECOROUTER, RFC 2544 (MPLS)

Аннотация: *В данной статье исследуется производительность отечественного программного маршрутизатора EcoRouter при обработке MPLS-трафика. Проведен комплексный эксперимент в виртуализированной среде, в ходе которого выполнено нагрузочное тестирование в соответствии с методологией RFC 2544, оценена задержка и вариация задержки при различной глубине стека меток (от 2 до 5) согласно RFC 8657, а также измерена утилизация процессорных ресурсов с помощью системы мониторинга Zabbix.*

Ключевые слова: *MPLS, EcoRouter, RFC 2544, RFC 8657, стек меток, производительность, задержка, джиттер, импортозамещение, Zabbix.*

Annotation: *This article examines the performance of the domestic software router EcoRouter when processing MPLS traffic. A comprehensive experiment was conducted in a virtualized environment, during which load testing was performed in accordance with the RFC 2544 methodology, latency and jitter were evaluated for*

various MPLS label stack depths (from 2 to 5) according to RFC 8657, and CPU utilization was measured using the Zabbix monitoring system.

Key words: *MPLS, EcoRouter, RFC 2544, RFC 8657, label stack, performance, latency, jitter, import substitution, Zabbix.*

Введение

Современные сети передачи информации сталкиваются с необходимостью обработки высоких объемов трафика. Технология MPLS на протяжении длительного времени остается основным инструментом построения магистральных сетей и реализации VPN-сервисов. Однако с развитием концепции сетевых функций и переходом к программно-конфигурируемым сетям, критически важным становится вопрос производительности программных маршрутизаторов. Оценка эффективности обработки стека меток на базе современных отечественных решений, таких как EcoRouter, является актуальной задачей.

В условиях реализации государственной программы «Цифровая экономика РФ» [1] и требований Федерального закона № 183-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [2] перед отечественными организациями стоит стратегически важная задача импортозамещения зарубежного сетевого оборудования на подходящие и проверенные отечественные аналоги. Одним из ключевых российских решения в данном классе выступает комплекс EcoRouter, который включен в Единый реестр российского ПО Минцифры России [3]

Объект исследования**:** Программный комплекс маршрутизации EcoRouter в виртуализированной среде.

Предмет исследования**:** Характеристики производительности и стабильности передачи MPLS-трафика при различной конфигурации стека меток.

Цель работы**:** Проведение комплексного экспериментального исследования производительности маршрутизатора EcoRouter по методологии RFC 2544 и оценка влияния многоуровневого кодирования меток (RFC 8657) на системные ресурсы.

Литературный обзор

MPLS (Multiprotocol Label Switching, многопротокольная коммутация меток) — это технология, которая используется в телекоммуникационных сетях для передачи данных между узлами сети, используя метки вместо IP-адресов.

Сама технология детально описана в RFC 3031, где определена структура метки (32 бита: 20 бит — метка, 3 бита — класс трафика, 1 бит — флаг дна стека, 8 бит — TTL) и принцип стека меток, работающего по правилу LIFO [4]. Расширение для многоуровневого кодирования меток представлено в RFC 8657, которое уточняет обработку иерархических стеков в сетях сегментной маршрутизации [5].

Методология оценки производительности сетевых устройств закреплена в RFC 2544, определяющем ключевые метрики: пропускную способность (throughput), задержку (latency) и устойчивость к всплескам трафика [6].

Существует ряд программных маршрутизаторов с поддержкой MPLS: VyOS (ядро Linux), FRRouting с DPDK, Cisco CSR 1000v. Однако, как показано в работе [3], только EcoRouter в полной мере соответствует требованиям импортозамещения и работе в критической информационной инфраструктуре РФ. При этом публикаций, посвящённых нагрузочному тестированию EcoRouter с использованием RFC 2544 и RFC 8657, обнаружено не было, что подчёркивает научную новизну данной работы.

Для мониторинга вычислительных ресурсов использовалась система Zabbix, позволяющая в реальном времени отслеживать загрузку процессора маршрутизатора [7].

В статье на хабре [8] подробно описан принципы работы технологии, заключающийся в работе поверх привычно IP-маршрутизации – вместо того, чтобы заглядывать внутрь пакета и анализировать таблицу маршрутизации, маршрутизаторы ориентируются на некоторую метку. Работает технология таким образом, что пакет с меткой отправляется между маршрутизаторами, и каждый из них по заранее подготовленным таблицам меток определяет действие с пакетом и меткой – какую новую метку поставить и на какой интерфейс переслать.

Фактически, сама технология MPLS не дает огромного преимущества перед обычной ip-маршрутизацией, но когда речь заходит о работе в связке с другими технологиями маршрутизации, то становится заметно, что это и упрощается настройку, и позволяет высвобождать часть ресурсов. В данном случае речь идет о связке с технологией BGP [9], MPLS позволяет настроить BGP не на каждом маршрутизаторе, а лишь на пограничных с соседними AS [10].

Так же в статье [11] сказано, что MPLS применяется в создание VPN (MPLS VPN), базово объединяющий в себе функции безопасности и разделения клиентов, реализованные в overlay модели [12], с упрощенной маршрутизацией клиентов, реализованной в традиционной peer-to-peer модели [13]. Выделяют MPLS L3VPN[14] и MPLS L2VPN [15] , их основное различие заключается в управлении ip-маршрутизации – в L3VPN провайдер видит все ip-адреса клиента и соединяет воедино свои маршруты и маршруты клиента, а в случае L2VPN провайдер предоставляет «виртуальный провод» и не имеет возможности заглядывать в ip-заголовки. В каждой из реализаций MPLS использует две метки – транспортную и сервисную, первая определяет путь по которому передается метка, вторая – какому именно сервису или порту принадлежит пакет в случае L3 и кадр в случае с L2.

Методы исследования

Для эксперимента потребовались три виртуальные машины на гипервизорах VMware Workstation и PnetLab с ОС ALT Linux :

1. Генератор трафика — с разработанным скриптом на Python (библиотека Scapy), формирующим MPLS-кадры с настраиваемым стеком меток (от 2 до 5).
2. Исследуемый маршрутизатор — EcoRouter с настроенной таблицей LFIB для операций Swap меток и SNMP-сервером.
3. Приёмник — с Zabbix-сервером, tcpdump и Wireshark для анализа потерь и целостности данных.

Логическая топология представляла собой последовательное соединение: генератор → EcoRouter → приёмник.

Порядок работы:

1. Измерение пропускной способности.
2. Тестирование устойчивости к всплескам трафика.
3. Статистический анализ задержек и джиттера при глубине стека 2–5 меток.
4. Оценка загрузки процессора через Zabbix.

Значение пропускной способности в Мбит/с рассчитывается по формуле (1):

$$Throughput = \frac{N*(L+20)*8}{T*10^6} \quad (1)$$

где N — число пакетов, L — размер кадра (байт), T— время передачи (сек), а 20 байт — накладные расходы Ethernet

Джиттер определялся как среднее абсолютное отклонение времени задержки между последовательными пакетами (2):

$$J = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}|D_{i+1} - D_i| \ (2)$$

где D — задержка конкретного пакета.

Результаты исследования

1. Оценка пропускной способности

Первым этапом эксперимента стало определение максимальной пропускной способности системы согласно методологии RFC 2544. Целью данного теста являлось нахождение предельной скорости передачи кадров со стеком из двух меток, при которой вероятность потери данных стремится к нулю.

Тестирование проводилось итерационным методом с использованием разработанного генератора на базе Scapy. Результаты измерений для различных размеров кадра представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Показатели пропускной способности EcoRouter (стек из 2-х меток)

Размер кадра (байт)	Пропускная способность (Мбит/с)	Производительность (PPS)	Время теста (сек)
64	0.13	255	39.18
512	1.01	247	40.45
1280	3.42	334	29.93
1500	3.77	314	31.85

Анализ результатов тестирования пропускной способности показал, что при использовании стека из двух меток MPLS и инкапсуляции IP-трафика, производительность системы на малых размерах кадров (64 байта) составляет порядка 255 PPS. С увеличением размера кадра до 1500 байт наблюдается закономерный рост пропускной способности до 3.77 Мбит/с.

2. Анализ устойчивости к всплескам трафика

При проведении теста на предельную устойчивость к всплескам трафика согласно RFC 2544, на испытуемый маршрутизатор подавались

последовательности до 100 000 MPLS-кадров со стеком из 2-х меток с минимально возможным интервалом. И согласно показаниям утилиты tcpdump на целевой стороне, потерь данных зафиксировано не было.

3. Анализ зависимости задержки и джиттера от размера кадра

Зависимость показателей качества передачи информации от размера кадра будем определять следующим образом: произведем 1000 итераций по отправке пакетов соответствующего размера, при этом подсчитаем средние показатели задержки, вариации задержки, а также рассчитаем доверительный интервал.

Выбор размеров кадров (64, 512, 1280, 1500 байт) обусловлен методологией RFC 2544

Таблица 2.

Временные характеристики и статистические показатели

Параметр\Размер кадра (байт)	64	512	1280	1500
Задержка, ms	2.377 ± 0.111	2.984 ± 0.094	3.433 ± 0.102	3.546 ± 0.103
Джиттер, ms	0.895	1.329	1.595	1.568

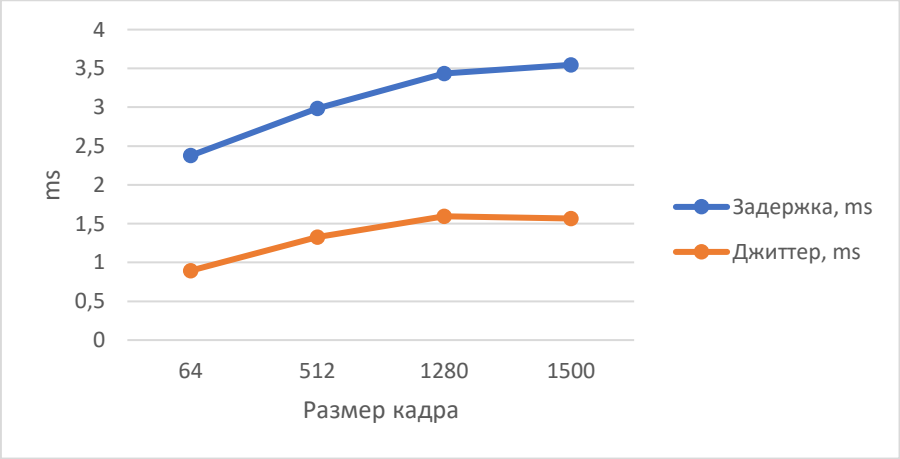


Рисунок 1. Зависимость задержки от размера кадра

Средняя задержка демонстрирует линейную зависимость от размера кадра, что характерно для систем с программной пересылкой. Значение джиттера остается в пределах 1.6 мс, что является допустимым для большинства сервисов реального времени

4. Анализ влияния глубины стека меток на задержку и джиттер

В рамках данного этапа проверялась гипотеза о деградации производительности маршрутизатора при увеличении вложенности меток. Для теста был выбран фиксированный размер кадра (512 байт), а количество инкапсулируемых меток последовательно увеличивалось с 2 до 5.

Таблица 3.

Зависимость метрик от количества меток в стеке

Параметр\Количество меток	2	3	4	5
Задержка, ms	2.883±0.092	3.021±0.092	3.169±0.092	3.474±0.092
Джиттер, ms	1.312	1.395	1.401	1.522

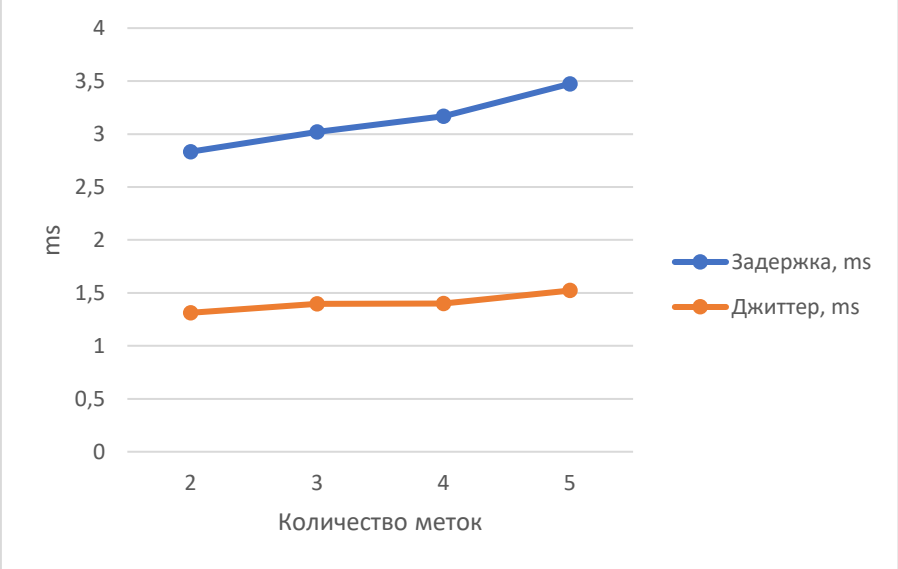


Рисунок 2. Зависимость задержки от количества меток

Наблюдается практически линейная зависимость времени обработки от глубины стека. Увеличение количества меток с 2 до 5 привело к росту задержки на 20.5% и увеличению джиттера на 15.2%. Это обусловлено

дополнительными операциями деинкапсуляции и необходимостью анализа поля в программном контуре EcoRouter.

5. Определение нагруженности процессора

Целью финального теста являлась оценка «стоимости» обработки MPLS-трафика для центрального процессора. Измерения проводились путем сравнения базового состояния системы с состоянием под нагрузкой при различных параметрах трафика.

Таблица 4.

Утилизация ресурсов ЦП при обработке MPLS

Количество пакетов и размер кадра	10000 по 512	10000 по 1280	10000 по 1500	100000 по 1500
Загруженность, %	9.87	9.83	9.87	9.93
Расхождение со средним значением, %	-0.02	-0.06	-0.02	0.04

Анализ данных таблицы показывает, что загруженность процессора маршрутизатора EcoRouter при обработке MPLS-трафика остается стабильной и не превышает порога в 10%. Среднее значение нагрузки по всем тестам составило 9.875%, что при базовой нагрузке около 9.89% свидетельствует о крайне высокой оптимизации программного контура пересылки

Проведенный комплекс экспериментов подтвердил полную работоспособность программного маршрутизатора EcoRouter в сценариях коммутации меток MPLS. Система продемонстрировала:

1. Соответствие методологии RFC 2544 в части стабильности PPS и устойчивости к всплескам трафика.
2. Корректную обработку иерархических стеков меток согласно RFC 8657.

3. Низкую утилизацию ресурсов, что позволяет эффективно масштабировать решение.

Список использованных источников:

1. Паспорт национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации» / Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации : официальный сайт. – URL: https://digital.gov.ru/target/naczionalnaya-programma-czifrovaya-ekonomika-rossijskoj-federaczii (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

2. О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации : Федеральный закон от 26.07.2017 № 187-ФЗ // КонсультантПлюс : справочно-правовая система. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220885/ (дата обращения: 06.05.2026). – Текст : электронный.

3. Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных / Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации : официальный сайт. – URL: https://reestr.digital.gov.ru/reestr/ (дата обращения: 06.05.2026). – Текст : электронный.

4. RFC 3031. Multiprotocol Label Switching Architecture / E. Rosen, A. Viswanathan, R. Callon ; Internet Engineering Task Force (IETF). – 2001. – URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc3031 (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

5. RFC 8657. MPLS Deterministic Networking Non-IP Data Plane Encapsulation / B. Varga, J. Farkas, L. Berger ; Internet Engineering Task Force (IETF). – 2019. – URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8657 (дата обращения: 02.05.2026). – Текст : электронный.

6. RFC 2544. Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices / S. Bradner, J. McQuaid ; Internet Engineering Task Force (IETF). – 1999.

– URL: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2544 (дата обращения: 03.05.2026). – Текст : электронный.

7. Zabbix: The Enterprise-Class Open Source Monitoring Solution // Zabbix LLC : [официальный сайт ИТ-платформы мониторинга]. – URL: https://www.zabbix.com/ (дата обращения: 23.05.2026). – Текст : электронный.

8. Сети для самых маленьких. Часть десятая. MPLS // Хабр : [сообщество IT-специалистов]. – 2014. – URL: https://habr.com/ru/articles/246425/ (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

9. Принципы работы протокола BGP // Хабр : [сообщество IT-специалистов]. – 2019. – URL: https://habr.com/ru/articles/450814/ (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

10. BGP Inter-AS // Хабр : [сообщество IT-специалистов]. – 2016. – URL: https://habr.com/ru/articles/302600/ (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

11. Что такое MPLS: как работает и зачем нужен // НАГ.Блог : [информационный портал о сетевых технологиях]. – 2023. – URL: https://shop.nag.ru/blog/setevoe-oborudovanie/chto-takoe-mpls-kak-rabotaet-i-zachem-nuzhen (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

12. Что такое оверлейная сеть (Overlay Network)? // Cloudvps.by : база знаний. – URL: https://cloudvps.by/community/docs/glossarij/terminy/overlay-network/ (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

13. Что такое P2P VPN? // Nym : официальный блог. – 2024. – URL: https://nym.com/ru/blog/%D0%A7%D1%82%D0%BE-%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%B5-p2p-vpn (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

14. Сети для самых маленьких. Часть одиннадцатая. MPLS L3VPN // Хабр : [сообщество IT-специалистов]. – 2015. – URL:

https://habr.com/ru/articles/273679/ (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

15. MPLS L2VPN // CiscoMaster.ru : [информационно-технический блог]. – URL: http://ciscomaster.ru/content/mpls-l2vpn (дата обращения: 10.06.2026). – Текст : электронный.

16. Уймин, А. Г. Применение отечественного сетевого оборудования Eltex и EcoRouter в рамках специальности 09.02.06 «Сетевое и системное администрирование» / А. Г. Уймин, И. М. Толмачев // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 11(628). – С. 58–62. – EDN DMHQJU.