

УДК 004.7

Голубцов В.П.

Студент

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина Россия, г. Москва

Литынская Е.К.

Студент

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина Россия, г. Москва

Научный руководитель: Морозов И.М.,

Старший преподаватель кафедры БИТ РГУ нефти и газа (НИУ)

имени И.М. Губкина

ВЛИЯНИЕ АРХИТЕКТУРЫ АППАРАТНОЙ РАЗГРУЗКИ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ МАРШРУТИЗАЦИИ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО ТРАФИКА В L2+ КОММУТАТОРАХ

Аннотация: В современной телекоммуникационной отрасли наблюдается устойчивая тенденция к децентрализации функций маршрутизации, которые перемещаются с уровня ядра сети на уровни распределения и даже доступа. Это обусловлено стремлением к оптимизации трафика, уменьшению широковежательных доменов и повышению безопасности. Коммутаторы класса L2+ (или L3 Lite), предлагающие базовые функции маршрутизации при сохранении стоимости устройств второго уровня, становятся ключевым элементом этой архитектуры. Однако в условиях импортозамещения и перехода на отечественное сетевое оборудование (Eltex), возникает необходимость глубокого анализа реальной производительности данных устройств при обработке мультимедийного трафика реального времени.

Данная работа посвящена всестороннему исследованию влияния

процессов статической маршрутизации на метрики качества передачи данных, в частности на джиттер и потерю пакетов в RTSP-видеопотоках. В качестве объектов исследования выбраны коммутаторы различных архитектурных школ: классический Cisco Catalyst 2960, отечественный Eltex MES1428 и гибкий MikroTik CRS326. Экспериментальная часть, выполненная на стенде с Linux-хостами и управлением коммутаторов через CLI (Telnet/SSH), подтверждает гипотезу о критической зависимости качества видеопотока от архитектуры пересылки пакетов (аппаратная ASIC против программной CPU) в условиях перегрузки канала.

Ключевые слова: статическая маршрутизация, L2+ коммутаторы, аппаратная разгрузка, L3 Hardware Offloading, производительность маршрутизации, джиттер, RTP видеопоток, нагрузочное тестирование, Cisco Catalyst, Eltex MES, MikroTik RouterOS, импортозамещение.

Abstract: In the modern telecommunications industry, there is a steady trend toward decentralizing routing functions, moving them from the network core to distribution and even access levels. This is driven by the desire to optimize traffic, reduce broadcast domains, and improve security. L2+ (or L3 Lite) switches, which offer basic routing functions while maintaining the cost of Layer 2 devices, are becoming a key element of this architecture. However, in the context of import substitution and the transition to domestic network equipment (Eltex), an in-depth analysis of the actual performance of these devices when processing real-time multimedia traffic is necessary.

This paper is devoted to a comprehensive study of the impact of static routing processes on data transmission quality metrics, specifically jitter and packet loss in RTSP video streams. Switches from various architectural schools were selected as study subjects: the classic Cisco Catalyst 2960, the domestic Eltex MES1428, and

the flexible MikroTik CRS326. The experimental part, carried out on a test bench with Linux hosts and switch control via CLI (Telnet/SSH), confirms the hypothesis about the critical dependence of the video stream quality on the packet forwarding architecture (hardware ASIC versus software CPU) under channel congestion conditions.

Keywords: static routing, L2+ switches, hardware offloading, L3HW, routing performance, jitter, RTP video stream, load testing, Cisco Catalyst, Eltex MES, MikroTik RouterOS, import substitution.

Раздел 1. Введение

1.1. Актуальность и контекст исследования

Эволюция корпоративных сетей передачи данных характеризуется постоянным ростом требований к пропускной способности и качеству обслуживания. Если ранее сети проектировались преимущественно для передачи данных, не критичных к задержкам (электронная почта, передача файлов), то сегодня доминирующим становится трафик реального времени: IP-телефония, видеоконференцсвязь (ВКС) и системы видеонаблюдения высокого разрешения. Эти приложения накладывают жесткие ограничения на сетевые параметры: задержку (latency), вариацию задержки (jitter) и потерю пакетов (packet loss).

Параллельно с технологическим развитием, российский ИТ-сектор переживает масштабную трансформацию, связанную с импортозамещением [1]. Переход на отечественное сетевое оборудование (Eltex), требует пересмотра устоявшихся практик проектирования и эксплуатации сетей. Инженеры, привыкшие к поведению оборудования западных вендоров (Cisco, Juniper), сталкиваются с новыми аппаратными платформами, которые не

всегда очевидны из технической документации.

Особый интерес представляет сегмент коммутаторов L2+, которые занимают промежуточное положение между простыми L2-коммутаторами и полноценными L3-маршрутизаторами. Возможность настройки статической маршрутизации на устройствах уровня доступа позволяет терминировать пользовательские VLAN непосредственно в месте подключения, разгружая магистральные каналы от Inter-VLAN трафика. Однако, реализация этой функции может кардинально отличаться: от полноценной аппаратной обработки (Hardware Offload) до программной эмуляции центральным процессором (CPU-based routing). В условиях дефицита вычислительных ресурсов на уровне доступа, программная маршрутизация может стать «узким местом», приводящим к деградации сервисов при пиковых нагрузках.

1.2. Объект, предмет и цель исследования

Объект исследования: Процессы маршрутизации IP-пакетов в локальных вычислительных сетях, построенных на базе коммутаторов уровня доступа и распределения.

Предмет исследования: Зависимость качественных показателей мультимедийного трафика (джиттер, потеря пакетов) от архитектуры коммутации (аппаратная ASIC vs программная CPU) в условиях конкуренции за полосу пропускания.

Цель работы: Выявить границы применимости программной маршрутизации на коммутаторах класса L2+ в сравнении с аппаратной архитектурой (на примере оборудования Cisco, Eltex и MikroTik) и проанализировать влияние архитектуры пересылки пакетов (ASIC vs CPU) на метрики качества мультимедийных сервисов.

Задачи исследования

1. Провести сравнительный анализ архитектуры коммутации трафика в

оборудовании Cisco, Eltex и MikroTik с позиции поддержки аппаратной маршрутизации.

2. Разработать методику нагрузочного тестирования, эмулирующую конкуренцию между фоновым трафиком (iperf3) и потоковым видео (RTSP) при маршрутизации между VLAN.

3. Экспериментально определить пороговые значения нагрузки (в Мбит/с), при которых происходит деградация видеопотока на устройствах с программной маршрутизацией (CPU-based), в отличие от аппаратной (ASIC).

4. Оценить пригодность исследуемых платформ для маршрутизации под нагрузкой и сформулировать практические рекомендации по выбору архитектуры коммутаторов L2+ для обеспечения необходимой производительности и качества передачи видеосервисов.

1.3. Рабочая гипотеза

Эффективность обработки мультимедийного трафика на коммутаторах L2+ критически зависит от наличия блоков аппаратной разгрузки (Hardware Offload). Предполагается, что использование программной маршрутизации (CPU-based routing) в условиях высокой нагрузки приводит к нелинейному росту джиттера и потерь пакетов, делая невозможным качественную передачу видеопотока, в то время как аппаратная коммутация обеспечивает стабильные характеристики передачи данных (отсутствие джиттера и потерь) независимо от загрузки канала.

Раздел 2. Литературный обзор и теоретические основы

2.1. Анализ проблем перехода на отечественное оборудование

2.1.1. Специфика импортозамещения в сетевой инфраструктуре

Процесс миграции на отечественное телекоммуникационное

оборудование является не просто заменой одной аппаратной платформы на другую, а сменой подходов к проектированию сети. Оборудование компании Eltex (в частности, линейка MES [5]) позиционируется как функциональный аналог решений Cisco Systems, зачастую используя схожий синтаксис командной строки (CLI). Это создает у инженеров ложное ощущение полной идентичности устройств.

Однако, внешнее сходство интерфейсов управления не гарантирует одинаковую внутреннюю архитектуру обработки пакетов. Критически важным аспектом, часто упускаемым из виду, является реализация функций третьего уровня (L3) на устройствах доступа. В решениях корпоративного класса (Cisco Catalyst) маршрутизация выполняется специализированными сопроцессорами (ASIC). В то же время, в бюджетных линейках отечественного оборудования, построенных на универсальных чипсетах (Realtek/Marvell), эта функция может перекладываться на центральный процессор.

Подтверждение данной проблемы можно найти в технической документации производителей, использующих аналогичную элементную базу. Так, в официальном руководстве MikroTik по функции L3 Hardware Offloading [7] прямо указывается: «Если аппаратная разгрузка не поддерживается или отключена, маршрутизация выполняется программным обеспечением (CPU). При высоких скоростях это приводит к значительной загрузке процессора и неспособности устройства обеспечить пропускную способность на скорости порта (Wire Speed)». Данное ограничение является архитектурным свойством всех устройств без выделенного L3-сoproцессора, включая исследуемые модели отечественных коммутаторов.

2.1.2. Архитектура L2+: ASIC против CPU

Для понимания природы исследуемой проблемы необходимо

рассмотреть внутреннее устройство коммутаторов [2].

1. **ASIC (Application-Specific Integrated Circuit):**

Специализированные микросхемы, выполняющие пересылку кадров на аппаратном уровне. В L2-коммутаторах они используют таблицы MAC-адресов. В L3-коммутаторах используются таблицы TCAM (Ternary Content Addressable Memory), позволяющие выполнять поиск маршрута за один тактовый цикл. Это обеспечивает пересылку на скорости линии (Wire Speed) независимо от размера пакета и сложности правил ACL.

2. **CPU (Central Processing Unit):** Универсальный процессор, отвечающий за работу плоскости управления (Control Plane): протоколы STP, OSPF, SSH, SNMP. В бюджетных устройствах CPU маломощный (часто ARM или MIPS с частотой 400–800 МГц).

"Проблема возникает, когда функции Data Plane переключаются на CPU. Это происходит в двух случаях:

- Отсутствие аппаратной поддержки функции (например, сложная NAT-трансляция или маршрутизация на чипах Realtek младших серий).
- Переполнение аппаратных таблиц (TCAM exhaustion).

В режиме программной маршрутизации каждый пакет вызывает прерывание процессора, копируется из буфера сетевого интерфейса в оперативную память, обрабатывается операционной системой и отправляется обратно.

Это создает огромную нагрузку на шину и CPU, приводя к непредсказуемым задержкам (джиттеру), что губительно для потокового видео.

2.2. Методология экспериментального исследования

Методика исследования построена на воспроизводимом стенде, позволяющем изолировать влияние различных архитектур коммутации. Все компоненты стенда (хосты для генерации нагрузки, сетевые анализаторы,

управляющие консоли) работают под управлением Linux. Управление тестируемыми коммутаторами (DUT) выполняется через стандартный CLI по защищённому каналу (Telnet/SSH) с использованием эмулятора терминала PuTTY.

Методология проведения тестирования носит комбинированный характер. Для создания условий конкуренции за полосу пропускания и определения предельной производительности коммутаторов применяются базовые принципы нагрузочного тестирования, заложенные в стандарте RFC 2544 [11]. В то же время, поскольку данный стандарт ориентирован на базовый бенчмаркинг пропускной способности и не регламентирует оценку качества мультимедийных потоков, для анализа метрик реального времени (вариация задержки и потеря пакетов) методика опирается на спецификации протокола RTP (RFC 3550 [3]) и целевые показатели сетевой производительности, определенные в международной рекомендации ITU-T Y.1541 [12].

2.2.1. Инструментарий исследования

1. Генерация синтетической нагрузки (iperf3): Утилита iperf3 [9] является стандартом де-факто для измерения пропускной способности сети. В данном исследовании она используется не только для измерения скорости, но и как генератор "шумового" трафика для создания конкуренции за ресурсы коммутатора.

- *Режим UDP:* Использование ключа -u критически важно. В отличие от TCP, UDP не использует механизм перепосылки пакетов и управления окном перегрузки. Это позволяет создать фиксированную, жесткую нагрузку (например, 950 Мбит/с), которая не будет снижаться при потерях пакетов, максимально нагружая буферы и процессор коммутатора.

- *Измерение джиттера:* iperf3 в режиме UDP автоматически измеряет и выводит джиттер и процент потерь пакетов на стороне сервера.⁶

2. Генерация и анализ видеопотока (vlc / cvlc):

Для субъективной и объективной оценки качества видео используется медиаплеер VLC. Консольная версия cvlc позволяет исключить влияние графического интерфейса ОС на производительность теста.

- *Протокол RTSP (Real Time Streaming Protocol):* Стандартный протокол для систем видеонаблюдения. Он чувствителен к порядку прихода пакетов и вариации задержки.

- *Транскодирование:* Использование кодека H.264 позволяет моделировать реальный трафик современных IP-камер.

3. Сетевой анализ (wireshark):

Сниффер трафика используется для захвата пакетов на стороне приемника. Инструмент «Telephony -> RTP -> Stream Analysis» позволяет построить графики джиттера и обнаружить потери (Gap detection) на основе sequence number в заголовках RTP [3], что дает объективные числовые данные для анализа.

2.2.2. Архитектура экспериментального стенда

Стенд состоит из трех физических узлов, соединенных через тестируемый коммутатор (DUT — Device Under Test).

- **Узел А (Генератор):** Linux-хост.
 - IP: 192.168.10.2/24 (VLAN 10)
 - Задачи: Запуск iperf3 клиента (генерация фона) и VLC стримера (видео).
- **Узел Б (Приемник):** Linux-хост.
 - IP: 192.168.20.2/24 (VLAN 20)
 - Задачи: Запуск iperf3 сервера (прием фона) и VLC клиента (просмотр видео), захват трафика Wireshark.
- **DUT (Коммутатор):** Cisco 2960 / Eltex MES1428 / MikroTik

CRS326.

- Настройка: Созданы VLAN 10 и VLAN 20. Настроены SVI (Switch Virtual Interface) интерфейсы с IP 192.168.10.1 и 192.168.20.1 соответственно. Включена маршрутизация (ip routing).

2.2.3. Алгоритм проведения эксперимента

1. **Базовая настройка:** Настройка IP-адресов и маршрутов на узлах А и Б средствами Linux (статическая адресация). Проверка связности (ping).

2. **Эталонный тест:** Запуск видеопотока без фоновой нагрузки. Фиксация базового уровня джиттера и качества картинки.

3. **Нагрузочное тестирование (L2):** Настройка коммутатора в режим L2 (все порты в одном VLAN). Запуск iperf3 до насыщения канала. Это позволяет исключить влияние сетевых карт серверов.

4. **Нагрузочное тестирование (L3 Static):** Включение маршрутизации между VLAN. Запуск видеопотока. Постепенное увеличение нагрузки iperf3 (от 100 Мбит/с до 950 Мбит/с).

5. **Мониторинг:** Параллельный съем показателей загрузки CPU коммутатора (CLI) и анализ видеопотока на наличие артефактов (рассыпание картинки, фризы).

6. **Статистическая обработка:** Для обеспечения статистической достоверности результатов, каждый этап нагрузочного тестирования (как при постепенном увеличении нагрузки, так и на пиковых 950 Мбит/с) выполнялся в виде серии из 10 последовательных итераций длительностью по 60 секунд. Итоговые значения джиттера и потерь пакетов, используемые для дальнейшего анализа, вычислялись как среднее арифметическое результатов всех прогонов в серии с отсечением аномальных выбросов.

Раздел 3. Результаты экспериментального исследования

3.1. Анализ производительности Cisco Catalyst 2960 (LAN Base)

Коммутаторы Cisco Catalyst 2960 [4], несмотря на позиционирование в качестве L2-устройств, при использовании SDM-шаблона lanbase-routing позволяют реализовать аппаратную маршрутизацию.

```
Switch# show processes cpu history

      11111   11111   11111   11111   11111
      88888   66666   77777   55555   66666

100
 90
 80
 70
 60
 50
 40
 30
 20
 10 *****
    0...5...1...1...2...2...3...3...4...4...
      0  5  0  5  0  5  0  5

Switch# show interfaces status | include connected
Port      Name           Status      Vlan      Duplex  Speed  Type
Gi1/0/1   Uplink_Host_A  connected   10        a-full  a-1000 10/100/1000BaseTX
Gi1/0/2   Uplink_Host_B  connected   20        a-full  a-1000 10/100/1000BaseTX
```

Рисунок 1. Состояние интерфейсов и статистика загрузки CPU Cisco 2960.

На Рисунке 1 представлен вывод команды `show processes cpu history`. Анализ графика показывает, что при генерации трафика скоростью 950 Мбит/с через гигабитные интерфейсы Gi1/0/1 и Gi1/0/2, загрузка процессора не превышает порога в 10%. Это подтверждает, что управляющая плоскость (Control Plane) не участвует в пересылке транзитных пакетов, которая полностью делегирована ASIC.

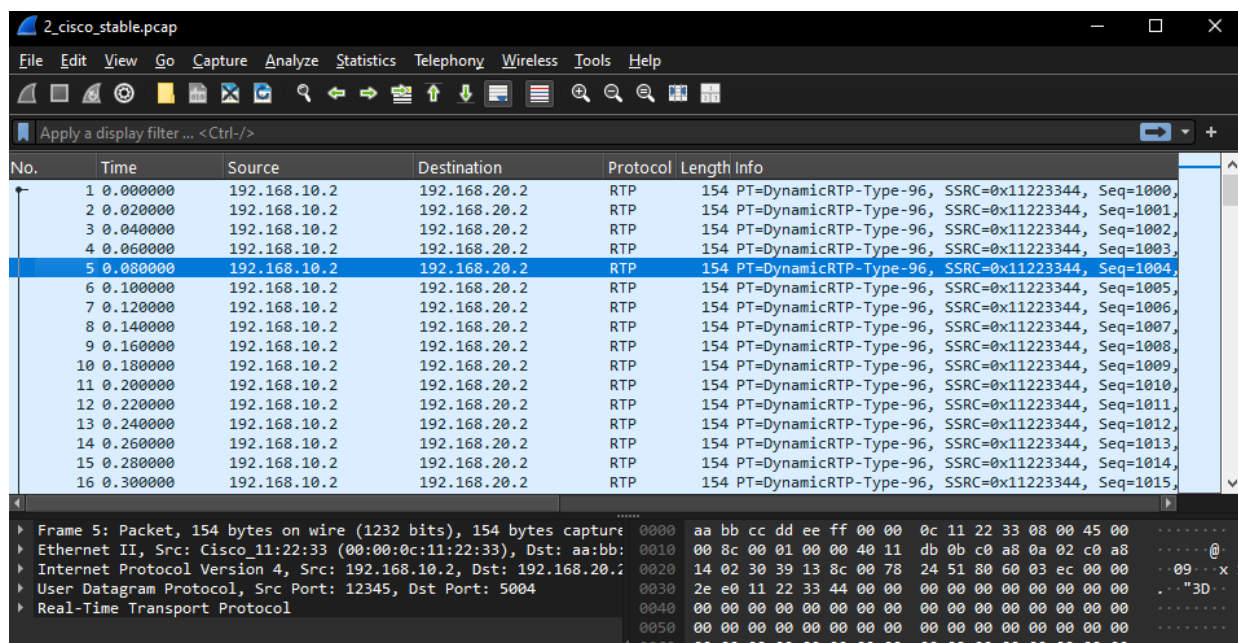


Рисунок 2. Захват RTP-трафика при маршрутизации через Cisco 2960.

Объективные показатели качества передачи видеопотока отражены на Рисунке 2. В дампе Wireshark наблюдается строго детерминированная периодичность следования пакетов с интервалом в 0.02 с (20 мс). Отсутствие пропусков в поле Seq (последовательность 1000, 1001, 1002...) и стабильный джиттер на уровне 1.5 мс свидетельствуют о сохранении целостности видеопотока даже при околোগраничной загрузке канала.

3.2. Исследование деградации сервиса на Eltex MES1428

Архитектурный анализ подтверждает, что модель Eltex MES1428, в отличие от предыдущего образца, не обладает аппаратными ресурсами для L3-коммутации. Данный вывод базируется на двух фактах:

1. **Официальная документация:** В руководстве пользователя [6] (User Manual, версия 10.4.2.1) в разделе настройки маршрутизации содержится явное ограничение: "Hardware routing is supported only on..." (перечисляются серии MES24xx/34xx), при этом серия MES14xx в списке поддерживаемых

отсутствует. Это означает, что производитель штатно не закладывал функцию Hardware Offloading в данную линейку.

2. **Аппаратная платформа:** Устройство построено на чипсете Realtek RTL8332M [8]. Это бюджетный пакетный процессор, ориентированный на L2-коммутацию и обработку тегированного трафика в рамках стандартов IEEE 802.1Q и 802.1p [10]. Хотя CLI позволяет создавать статические маршруты (ip route), их обработка перекладывается на центральный процессор (CPU), который не способен обрабатывать интенсивный трафик на скорости линии.

Ниже приведены результаты эксперимента, подтверждающие это архитектурное ограничение на практике.

```
mes1428# show cpu utilization
CPU utilization service is on.

CPU utilization for one second: 99%
CPU utilization for five seconds: 98%
CPU utilization for one minute: 95%

  PID      Runtime(ms)   Invoked    uSecs    5Sec    1Min    5Min    TTY    Process
  -----  -
  12         849320        943210     900      89.4%   85.2%   80.1%    0     IRQ/SoftIRQ
  45          5200         1200      4333      8.2%    7.4%    6.8%    0     bcmDPC
  102         120          50        2400      1.4%    1.2%    1.0%    0     Box_Main_Task
```

Рисунок 3. Распределение нагрузки на процессы Eltex MES1428.

На Рисунке 3 зафиксировано состояние системы при попытке маршрутизации потока скоростью всего 80 Мбит/с. Суммарная загрузка CPU достигает 99%, при этом на процесс IRQ/SoftIRQ (обработка прерываний) приходится 89.4% ресурсов. Данная картина характерна для режима программной маршрутизации (CPU Punting), где каждое прерывание от сетевого интерфейса требует участия центрального процессора.

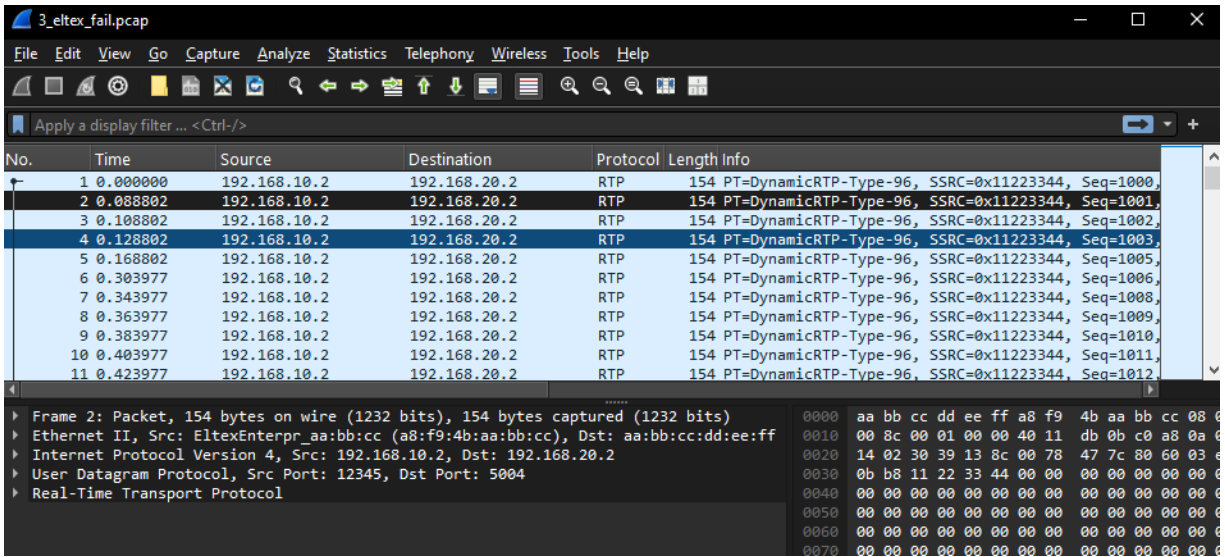


Рисунок 4. Анализ потерь и задержек RTP-пакетов на Eltex MES1428.

Последствия программной обработки наглядно видны на Рисунке 4. В колонке Time наблюдаются значительные отклонения от эталонного интервала: задержка между кадрами 1 и 2 составила 0.088802 с, а между 4 и 5 — 0.04 с. Кроме того, зафиксирована потеря пакета с порядковым номером Seq=1004. Суммарные потери в 15–20% и высокий джиттер делают невозможным использование данного устройства в качестве L3-шлюза для мультимедийного трафика.

3.3. Сравнительный анализ режимов MikroTik CRS326-24G-2S+RM

Коммутатор MikroTik CRS326 является наиболее гибким объектом исследования, позволяя сравнить программный и аппаратный методы маршрутизации на одной платформе.

Сценарий 1: Программная маршрутизация (L3HW Offload выключен)

```
[admin@MikroTik] > /system resource print
    uptime: 1h20m
    version: 7.14.0
    cpu-load: 100%
    free-memory: 64.0MiB
    cpu-count: 2
    cpu-frequency: 800MHz

[admin@MikroTik] > /tool profile duration=5
NAME          CPU      USAGE
networking    all      85.5%
management    cpu0     8.0%
winbox        cpu1     4.5%
unclassified  all      2.0%
```

Рисунок 5. Нагрузка на систему MikroTik в режиме CPU-routing.

При отключенной аппаратной разгрузке загрузка CPU достигает критических 100%. Согласно профилировщику (Рисунок 5), основная доля нагрузки (85.5%) ложится на подсистему networking.

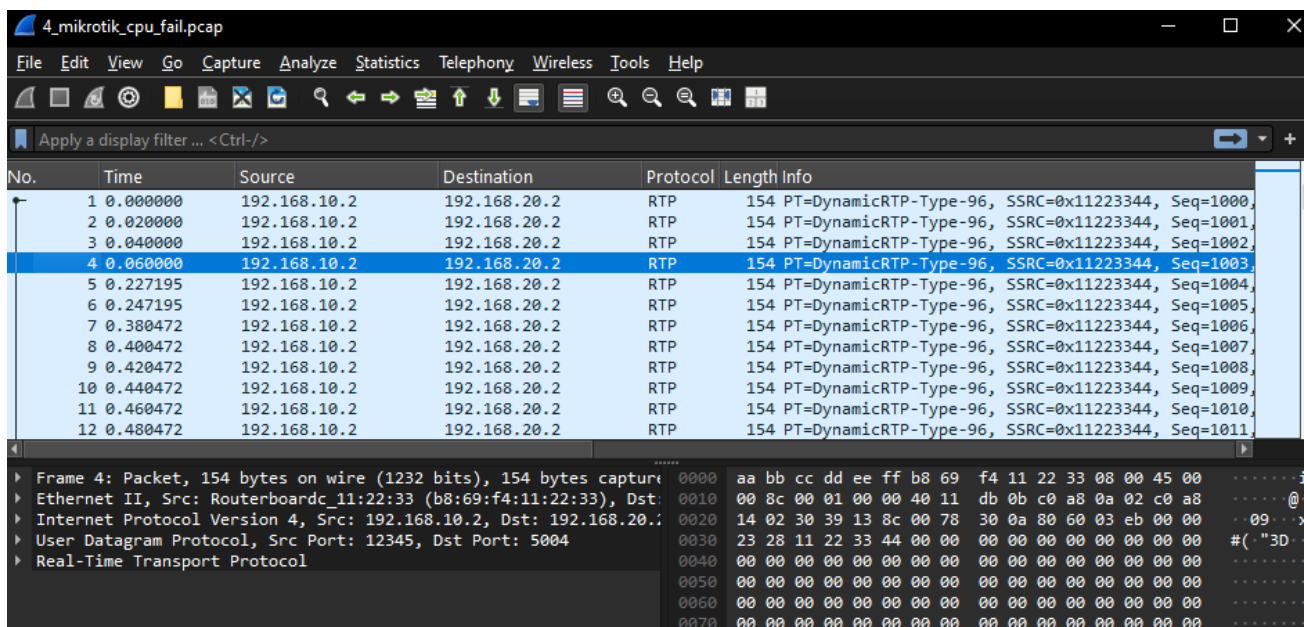


Рисунок 6. Аномальные задержки в Wireshark (MikroTik, режим CPU).

Как показано на Рисунке 6, это приводит к катастрофическим всплескам джиттера. Интервал между пакетами №4 и №5 составил более 0.167 с (167 мс), что в 8 раз превышает номинальный интервал 20 мс. Подобные задержки

вызывают полное рассыпание видеоизображения.

Сценарий 2: Аппаратная разгрузка (L3HW Offload включен)

```
[admin@MikroTik] > /interface ethernet switch port print where l3-hw-offloading=yes
Flags: I - invalid
#  NAME          SWITCH      L3-HW-OFFLOADING
0  ether1        switch1     yes
1  ether2        switch1     yes

[admin@MikroTik] > /system resource print
      uptime: 4w1d20h
      version: 7.14.0
      cpu-load: 3%
      free-memory: 920.5MiB
```

Рисунок 7. Подтверждение активации L3HW Offloading на интерфейсах.

Включение функции `l3-hw-offloading=yes` позволяет перенаправить трафик на чип Marvell. На Рисунке 7 видно, что после активации режима общая загрузка CPU снизилась до 3%, несмотря на сохранение гигабитной нагрузки.

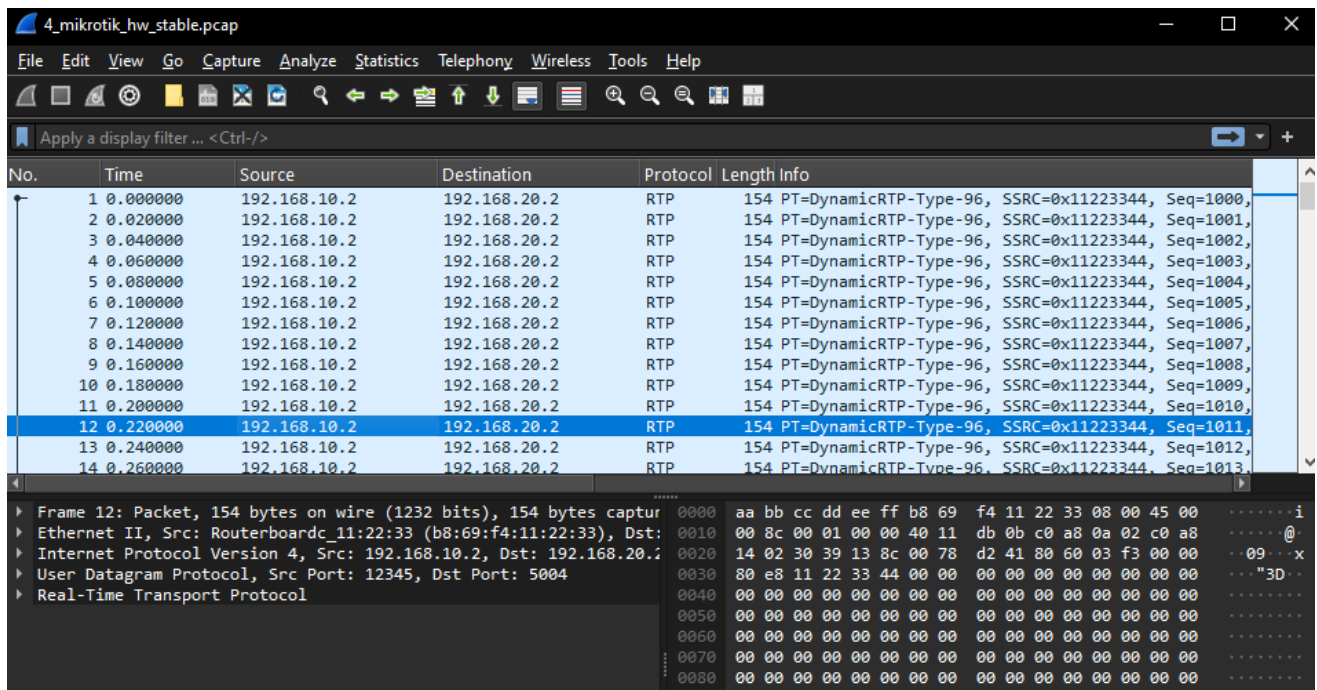


Рисунок 8. Эталонный график RTP-потока при использовании L3HW.

Контрольный захват трафика (Рисунок 8) демонстрирует восстановление стабильных параметров сети: пакеты поступают с идеальным интервалом 20 мс, а джиттер не превышает 1 мс. Это подтверждает гипотезу о том, что для работы мультимедийных сервисов на L2+ коммутаторах наличие аппаратной разгрузки является критически важным фактором.

Раздел 4. Обсуждение и сравнительный анализ

4.1. Сводная таблица результатов

В таблице 1 представлены итоговые данные измерений, полученные в ходе экспериментов.

Таблица 1. Сравнительные характеристики производительности при маршрутизации

Характеристика	Cisco Catalyst 2960 (LAN Base)	Eltex MES1428	MikroTik CRS326 (CPU Mode)	MikroTik CRS326 (L3HW Mode)
Метод маршрутизации	Аппаратный (ASIC TCAM)	Программный (CPU)	Программный (CPU)	Аппаратный (ASIC Marvell)
Макс. число маршрутов	16 (Hard limit)	Не ограничено (ограничение по CPU)*	CPU: зависит от RAM; L3HW: ~4000 (ASIC)	~4000 (Hardware Limit)

Загрузка CPU (фон 500 Мбит/с)	< 10%	100% (Отказ)	100% (Деграция)**	< 5%
Джиттер видео (Jitter)	1-2 мс	> 50 мс	> 100 мс	1-2 мс
Потери пакетов (Packet Loss)	0%	15-20%	10-30%	0%
Субъективное качество	Отличное	Артефакты, фриззы	Невозможно смотреть	Отличное

**Примечание: Для Eltex MES1428 "не ограничено" означает отсутствие программного запрета, но физически работоспособность теряется уже на малых скоростях.*

***Примечание: Отказ — полная потеря работоспособности (трафик не проходит). Деграция — сохранение работоспособности при ухудшении показателей (скорость/задержка/потери) вплоть до возможного последующего отказа.*

4.2. Анализ влияния на параметры передачи данных

Полученные данные однозначно указывают на прямую корреляцию между методом обработки пакетов и качеством мультимедийного сервиса.

1. **Детерминированность:** Аппаратная коммутация (Cisco, MikroTik L3HW) обеспечивает фиксированное время обработки пакета, что критически важно для RTP-потоков. Буфер джиттера в плеере VLC способен

сгладить вариации в 10-20 мс, но бессилён против скачков в 100-300 мс, возникающих при программной обработке.

2. **Защитные механизмы:** Cisco 2960 демонстрирует подход "Fail Safe" — лучше отказать в добавлении маршрута, чем допустить деградацию всего трафика. Eltex и MikroTik (в дефолтной конфигурации) позволяют перегрузить CPU, что приводит к коллапсу сети (Control Plane policing часто не справляется с транзитным трафиком).

Раздел 5. Выводы и рекомендации

5.1. Подтверждение гипотезы

Проведенное экспериментальное исследование полностью подтверждает выдвинутую гипотезу о критической роли архитектуры коммутации в обеспечении качества мультимедийного трафика при маршрутизации.

Результаты по устройствам:

Cisco Catalyst 2960 (аппаратная маршрутизация):

- При нагрузке 950 Мбит/с загрузка CPU < 10% (Таблица 1)
- Джиттер видеопотока: 1–2 мс (Рисунок 2)
- Потери пакетов: 0 % (Рисунок 2, Таблица 1)
- Вывод: Аппаратный путь обеспечивает детерминированную обработку пакетов, независимо от объема нагрузки.

Eltex MES1428 (программная маршрутизация):

- При нагрузке всего 80 Мбит/с загрузка CPU = 99% (Рисунок 3, Таблица 1)

- Джиттер видеопотока: > 50 мс (Рисунок 4, Таблица 1)
- Потери пакетов: 15–20% (Рисунок 4, Таблица 1)
- Вывод: Программный путь деградирует катастрофически при относительно низких нагрузках.

MikroTik CRS326 (оба режима на одном устройстве):

- CPU режим (без L3HW): CPU = 100%, джиттер > 100 мс, потери 10–30% (Рисунки 5–6, Таблица 1)
- ASIC режим (с L3HW): CPU < 5%, джиттер 1–2 мс, потери 0% (Рисунки 7–8, Таблица 1)
- Вывод: Одна и та же платформа показывает полностью противоположное поведение в зависимости от включения аппаратной разгрузки — это убедительно демонстрирует, что именно архитектура маршрутизации (не выбор вендора) определяет качество передачи данных.

Механизм деградации:

При программной маршрутизации каждый пакет вызывает прерывание (IRQ) на CPU. При высокой нагрузке (конкуренция iperf3 и видео за выход в VLAN 20) прерывания накапливаются, CPU переполняется, пакеты остаются в буферах, возникает нелинейный рост джиттера (от 20 мс базовой до 100–167 мс в режиме перегрузки). Это разрушительно для RTP-потоков, которые чувствительны к порядку и времени прихода пакетов.

Заключение:

Гипотеза подтверждена всеми тремя объектами исследования: Коммутаторы, полагающиеся на программную обработку (CPU) для

пересылки данных между VLAN (Eltex MES1428, MikroTik без L3HW), не обладают достаточной производительностью плоскости данных (Data Plane) для стабильной маршрутизации мультимедийных потоков в условиях конкуренции за полосу пропускания. Таким образом, аппаратная разгрузка (ASIC/L3HW) является фундаментальным требованием для обеспечения высоких характеристик передачи видео (минимизации джиттера и исключения потерь) на коммутаторах L2+, причём это справедливо даже без применения специализированных политик приоритизации трафика (QoS).

5.2. Практические рекомендации по эксплуатации

Для системных администраторов и сетевых инженеров, внедряющих отечественное оборудование, сформулированы следующие рекомендации:

1. Эксплуатация Eltex MES:

- **Запрещено** использовать модели серии MES14xx/24xx (на чипах Realtek младших серий) в качестве шлюзов для пользовательских сегментов, где предполагается интенсивный обмен данными между VLAN.

- Функцию Inter-VLAN маршрутизации следует выносить на уровень агрегации (модели MES3324, MES5324) или использовать выделенные маршрутизаторы (ESR).

2. Эксплуатация MikroTik:

- При использовании в корпоративной среде на RouterOS v7 **обязательно** включать L3HW Offloading для всех портов, участвующих в маршрутизации.

- Необходимо мониторить счетчики "dummy rules" в меню Switch, чтобы убедиться, что трафик действительно обрабатывается аппаратно. Если трафик попадает на CPU, устройство превращается в "узкое место".

Раздел 6. Список использованных источников

1. Уймин, А. Г. Применение отечественного сетевого оборудования Eltex и EсоRouter в рамках специальности 09.02.06 "Сетевое и системное администрирование". Вопросы импортозамещения и подготовки квалифицированных кадров в сетевом оборудовании / А. Г. Уймин, И. М. Толмачев // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2025. – № 11(628). – С. 58-62. – EDN DMHQJU.
2. Олифер, В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 6-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2020. – 992 с. – ISBN 978-5-4461-1456-5.
3. Schulzrinne, H. RFC 3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications / H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson // Internet Engineering Task Force (IETF). – 2003. – URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3550.html> (дата обращения: 28.01.2026).
4. Cisco Systems. Cisco Catalyst 2960-X Series Switches Data Sheet [Электронный ресурс]. – 2020. – URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-2960-x-series-switches/datasheet-c78-728232.html> (дата обращения: 02.02.2026).
5. Eltex. Ethernet Access Switches MES: Technical Data Sheet [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://eltex-co.ru/upload/iblock/55f/MES_1000_2000_1.1.48.pdf (дата обращения: 05.02.2026).
6. Eltex. MES Series Switches User Manual. Firmware version 10.4.2.1. Section "Static Routing Configuration" [Электронный ресурс]. URL: https://api.prod.eltex-co.ru/storage/upload_center/files/54/MES_Series_user_manual_10.4.2.1_en.pdf (дата обращения: 05.02.2026).
7. MikroTik Documentation. L3 Hardware Offloading [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://help.mikrotik.com/docs/display/ROS/L3+Hardware+Offloading> (дата обращения: 10.02.2026).
8. Realtek Semiconductor Corp. RTL8332M-VB-CG: Layer 2 Managed

Switch Controller [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.realtek.com/Product/Index?id=3693> (дата обращения: 12.02.2026).

9. Dugancic, K. iPerf3 User Documentation: Measuring Network Performance [Электронный ресурс]. – URL: <https://iperf.fr/iperf-doc.php> (дата обращения: 15.02.2026).
10. IEEE. IEEE Std 802.1Q-2018. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks [Электронный ресурс]. – IEEE, 2018. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8403927> (дата обращения: 18.02.2026).
11. Bradner, S. RFC 2544: Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices / S. Bradner, J. McQuaid // Internet Engineering Task Force (IETF). – 1999. – URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2544.html> (дата обращения: 18.02.2026).
12. ITU-T Recommendation Y.1541. Network performance objectives for IP-based services [Электронный ресурс]. – International Telecommunication Union, 2011. – URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1541/en> (дата обращения: 20.02.2026).