

УДК 621.394.39:004.4

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЙ MPLS-ТЕ СЕТЕЙ НА БАЗЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ OMNET++

М.С. Ткачев

Приведены результаты моделирования и сравнительный анализ трех топологий сетей *MPLS-TE* с разным числом *LSR*-маршрутизаторов, на базе разных протоколов передачи *MPSL*-меток.

*Ключевые слова:* телекоммуникационные сети; управление трафиком; многопротокольная коммутация по меткам; интегрированная среда разработки OMNeT++.

---

## MODELING AND ANALYSIS OF TOPOLOGIES OF MPLS-TE NETWORKS IN THE INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT OMNET ++

M.S. Tkachev

The modeling and comparative analysis of the three topologies of MPLS-TE networks with different number of LSR-routers based on different protocols MPSL-label are considered.

*Key words:* telecommunication network; control of traffic; multiprotocol label switching; integrated development environment OMNET ++.

**Введение.** Лучшие характеристики *IP*-маршрутизации, такие как масштабируемость и высокая производительность, были объединены со способами коммутации ячеек (*cell*) режима асинхронной передачи *ATM* (*Asynchronous Transfer Mode*) в технологии многопротокольной коммутации по меткам *MPLS* (*MultiProtocol Label Switching*). Возможности расширения сети, совместное использование средств технологий *IP* и *ATM*, возможности перераспределения потоков данных (*Traffic Engineering, TE*), особый тип виртуальных частных сетей *MPLS* (*Virtual Private Networks, VPN*), моментальное изменение структуры маршрутизации и гарантированное обеспечение качества обслуживания (*Quality of Service, QoS*) предоставляют технологии *MPLS* не только в магистральных сетях провайдеров Интернет-услуг, но и как транспортную основу сетей следующего поколения (*Next Generation Network, NGN*).

Под термином *Traffic Engineering (TE)* понимают методы и механизмы сбалансированной загрузки всех ресурсов сети за счет рационального выбора пути прохождения трафика через сеть. Механизм управления трафиком позволяет устанавливать явный путь, по которому будут передаваться потоки данных. Основным инструментом выбора и установления путей в сетях передачи данных

сегодня является технология *MPLS-TE*. Она применяет и развивает концепцию виртуальных каналов в сетях *X.25, Frame Relay* и *ATM*, объединяя ее с техникой выбора путей на основе информации о топологии и текущей нагрузке сети, получаемой с помощью протоколов маршрутизации сетей [1, 2].

Для разработки и моделирования телекоммуникационных систем в настоящее время используется специальная объектно-ориентированная модульная среда с открытой архитектурой *OMNeT++*. Она может быть использована для решения следующих задач [3]:

- моделирования и разработки проводных и беспроводных сетей передачи данных;
- моделирования и разработки протоколов;
- моделирования мультипроцессорных и других распределенных аппаратных систем;
- моделирования и разработки любых систем, в которых происходят дискретные события и которые могут быть легко отображены в виде взаимодействующих объектов, обменивающихся сообщениями.

Цель настоящей работы – анализ топологий сетей *MPLS-TE* с маршрутизаторами, использующими различные протоколы передачи *MPLS*-меток, по результатам моделирования в среде *OMNeT++*.

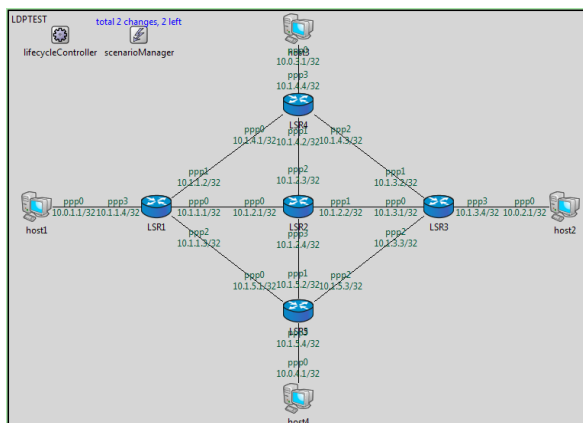


Рисунок 1 – Модель MPLS-TE сети, состоящей из пяти LSR-маршрутизаторов на базе протокола LDP

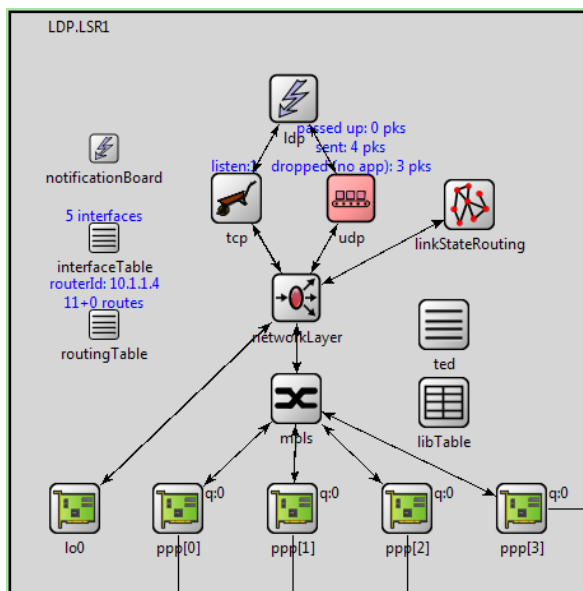


Рисунок 2 – Модель LSR-маршрутизатора в среде OMNeT++

Передача данных на основе MPLS-меток позволяет группировать потоки трафика и гарантировать доставку до адресов назначения.

Рассматриваются три варианта топологий сети MPLS-TE, состоящие из разного числа маршрутизаторов на базе разных протоколов для передачи MPLS-меток, каждый из которых среда OMNeT++ представляет набор функциональных подмодулей. Каждый подмодуль выполняет определенный набор функций, а вместе они образуют единый вычислительный узел, способный быстро реагировать на любые изменения в сети MPLS-TE.

**Моделирование топологии сети MPLS-TE, состоящей из LSR-маршрутизаторов на базе протокола LDP.** В работе [4] рассматривается не-

большая по топологии сеть MPLS-TE, состоящая из пяти модулей LSR (Label Switching Router) – маршрутизаторов и четырех конечных устройств (рисунок 1). В качестве транспорта для переноса меток используется протокол LDP (Label Distribution Protocol).

Модули LSR-маршрутизаторов являются основными элементами сети MPLS-TE в среде моделирования OMNeT++. Они состоят из нескольких взаимосвязанных функциональных подмодулей, каждый из которых отвечает за определенные сетевые возможности (рисунок 2). Все подмодули модуля LSR условно можно разделить на две группы: *основные*, непосредственно участвующие в передаче данных, и *управляющие*, которые влияют на передачу данных.

В этой модели к основным относятся следующие подмодули:

1) подмодуль *lo0* – отвечает за внутренний сетевой интерфейс и за передачу данных внутри модуля LSR;

2) подмодуль *ppp[x]* – отвечает за внешние сетевые интерфейсы, которые позволяют LSR-маршрутизатору взаимодействовать с другими сетевыми устройствами;

3) подмодуль *MPLS* – задействует протокол многопротокольной коммутации по меткам. Основная задача этого подмодуля заключается в работе с метками и передаче пакетов на следующий участок маршрута;

4) подмодуль *NetworkLayer* – используется как общий интерфейс для протоколов транспортного уровня: *TCP*, *UDP*, *echo/ping*, *IGMP*;

5) подмодуль *UDP* – предоставляет возможности использования протокола *UDP (Label Distribution Protocol)*, как транспортного протокола для передачи без подтверждения доставки меток MPLS протокола, пакетов различных приложений и широковещательных сообщений;

6) подмодуль *TCP* – предоставляет возможности использования протокола *TCP (Transmission Control Protocol)*, как транспортного протокола для передачи с подтверждением доставки меток MPLS протокола, пакетов различных приложений и широковещательных сообщений;

7) подмодуль *LDP* – предоставляет возможности использования протокола *LDP (Label Distribution Protocol)*, который используется одним LSR-маршрутизатором для информирования других LSR-маршрутизаторов о сделанных им привязках меток к потокам трафика. LSR-маршрутизаторы используют протокол LDP для установления путей по меткам LSP (Label Switch Path) через всю сеть MPLS-TE, используя информацию о метках, к уровню приложений модели OSI

(Open System Interconnection), т. е. к программному приложению – получателю пакетов;

8) подмодуль *LinkStateRouting* – использует протокол состояния каналов для передачи информации о топологии и состоянии соединений всем участникам сети *MPLS-TE*.

К управляющим подмодулям в этом *LSR*-маршрутизаторе относятся следующие подмодули:

1) подмодуль *NotificationBoard* – используется для уведомления о сетевых событиях, таких как изменения в таблице маршрутизации, изменение статусов сетевых интерфейсов, изменение настроек сетевых интерфейсов, изменение состояний каналов передачи данных и т. д.;

2) подмодуль *InterfaceTable* – содержит таблицу с информацией обо всех сетевых интерфейсах модуля *LSR1*;

3) подмодуль *RoutingTable* – содержит таблицу маршрутизации с указанием названий сетевых интерфейсов, *ip*-адресов и метрик маршрутов;

4) подмодуль *LIBTable* – содержит базу данных *LIB (Label Information Base)* с информацией обо всех метках, назначенных и обработанных маршрутизатором *LSR*;

5) подмодуль *TED* – содержит базу данных *TED (Traffic Engineering Database)* с информацией об обработанных и оптимизированных маршрутах, включая общую и зарезервированную полосу пропускания для каждого соединения.

При моделировании сети *MPLS-TE*, состоящей из пяти *LSR*-маршрутизаторов на базе протокола *LDP*, на начальном этапе, когда вся сеть только готовится к принятию пакетов с пользовательскими данными, в каждом *LSR*-маршрутизаторе заполняется таблица маршрутизации на основе данных об известных маршрутах. В данной статье под пользовательскими данными понимаются потоки данных, передаваемые программными приложениями пользователей сети *MPLS-TE*.

Завершающим этапом в подготовке к передаче данных является заполнение вектора *TED*, который содержит записи обо всех доступных оптимальных маршрутах для всех *LSR*-маршрутизаторов (рисунок 3). Оптимальные маршруты рассчитываются по встроенному в среду моделирования *OMNeT++* алгоритму Дейкстры. Каждая запись в векторе содержит информацию не только о доступных соседних сетевых узлах, но и об узлах, доступных через соседние узлы. При этом у каждого маршрута есть своя стоимость, обозначаемая в виде параметра *metric*. Например, запись под номером 0 говорит о том, что *ip*-адрес 10.1.1.4 соединен с *ip*-адресом 10.1.2.4 через локальный адрес маршрутизатора с *ip*-адресом 10.1.1.1 и удаленный *ip*-адрес 10.1.2.1. При этом статус у этого маршрута равен единице,

что говорит о его готовности принимать и передавать данные. Значение стоимостного параметра *metric* равно двум, и оно будет сравниваться со значениями других маршрутов в рассматриваемой базе данных *TED*. Чем меньше значение параметра *metric* у маршрута, тем предпочтительнее он становится для *LSR*-маршрутизатора. Оставшиеся три параметра несут в себе информацию о наибольшей доступной и о уже зарезервированной полосе пропускания маршрута (рисунок 3).

После того как закончился первый этап подготовки сети *MPLS-TE* к принятию пакетов с пользовательскими данными, каждый *LSR*-маршрутизатор продолжает обмениваться пакетами служебной информации со своими сетевыми соседями. При этом база данных *TED* постоянно обновляется и дополняется, что позволяет быстро реагировать на любые изменения в сети *MPLS-TE*. Спустя 0,026 секунды база данных становится единой для всех *LSR*-маршрутизаторов.

**Моделирование *MPLS-TE* сети, состоящей из *LSR*-маршрутизаторов на базе протокола *RSVP*.** В работе [5] рассматривается топология *MPLS-TE* сети, состоящая из восьми модулей *LSR (Label Switching Router)* на базе протокола *RSVP* и пяти конечных устройств (рисунок 4).

В данной сети *MPLS-TE* в качестве транспорта для переноса меток используется протокол *RSVP-TE (ReSource reserVation Protocol- Traffic Engineering)*. Данный протокол выполняет функции перенаправления сетевого трафика, и предназначен для передачи меток в *MPLS-TE* сети. Возможности протокола *RSVP-TE* реализованы

```

ted (std::vector<TELinkStateInfo>)
├── ted[0] (TELinkStateInfo)
│   ├── [0] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.2.4 local:10.1.1.1 remote:10.1.2.1 state:1 metric:2 maxBW:60000 unResvBW[V1]:60000 unResvBW[V14]:60000
│   ├── [1] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.4 local:10.1.1.2 remote:10.1.4.1 state:1 metric:3 maxBW:60000 unResvBW[V17]:60000 unResvBW[V14]:60000
│   ├── [2] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.5.4 local:10.1.1.3 remote:10.1.5.1 state:1 metric:3 maxBW:60000 unResvBW[V17]:60000 unResvBW[V14]:60000
│   └── [3] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.1.4 local:10.1.1.4 remote:10.1.1.1 state:1 metric:3 maxBW:60000 unResvBW[V17]:60000 unResvBW[V14]:60000
└── ted[1] (TELinkStateInfo)
    ├── [0] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.2.4 local:10.1.1.1 remote:10.1.2.1 state:1 metric:2 maxBW:60000 unResvBW[V1]:60000 unResvBW[V14]:60000
    ├── [1] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.4 local:10.1.1.2 remote:10.1.4.1 state:1 metric:3 maxBW:60000 unResvBW[V17]:60000 unResvBW[V14]:60000
    ├── [2] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.5.4 local:10.1.1.3 remote:10.1.5.1 state:1 metric:3 maxBW:60000 unResvBW[V17]:60000 unResvBW[V14]:60000
    └── [3] = advrouter:10.1.1.4 linkid:10.1.1.4 local:10.1.1.4 remote:10.1.1.1 state:1 metric:3 maxBW:60000 unResvBW[V17]:60000 unResvBW[V14]:60000
    
```

Рисунок 3 – Начальная база данных *TED* с оптимальными маршрутами маршрутизатора *LSR1*

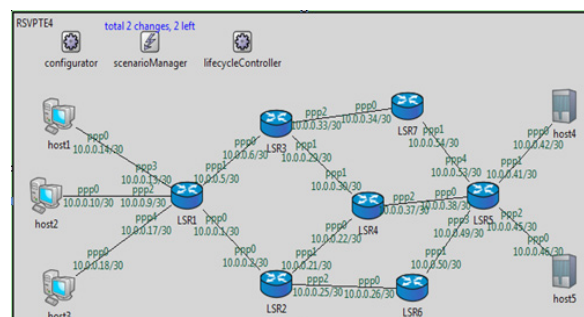


Рисунок 4 – Модель *MPLS-TE* сети, состоящей из восьми *LSR*-маршрутизаторов

в модуле *LSR* в виде подмодулей *RSVP* и *Classifier* (рисунок 5).

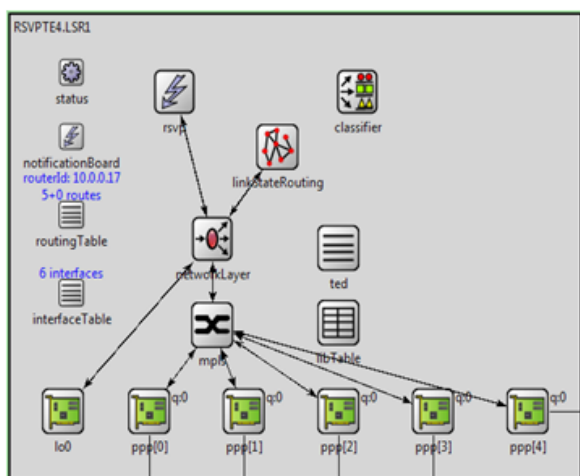


Рисунок 5 – Модель *LSR*-маршрутизатора в среде *OMNeT++*

Подмодули *RSVP* и *Classifier* заменяют собой три подмодуля из предыдущей топологии *MPLS-TE* сети – подмодули *UDP*, *TCP* и *LDP*. Подмодуль *RSVP* задействует для передачи сигнальных сообщений протокол *RSVP-TE*. Сообщения протокола *RSVP-TE* переносят метки и резервируют полосы пропускания для прокладки путей по меткам *LSP (Label Switch Path)*.

Основные подмодули идентичны подмодулям *LSR*-маршрутизатора на базе протокола *LDP*. К управляющим подмодулям на рисунке 2 добавляются еще два подмодуля:

1) подмодуль *Status (NodeStatus)* – содержит информацию о текущем состоянии модуля *LSR*. Это своеобразный индикатор для обозначения рабочей готовности всего модуля *LSR* в целом;

2) подмодуль *Classifier* – отвечает за классификацию поступающих потоков сетевых пакетов, и присвоение им меток.

С началом обмена служебной информацией, каждый *LSR*-маршрутизатор постепенно заполняет свою базу данных *TED* рассчитанными оптимальными маршрутами. База данных *TED* каждого *LSR*-маршрутизатора постоянно обновляется и реагирует на изменения во всей сети *MPLS-TE*. Таким образом, уже на 0,032 секунды база данных *TED* полностью наполняется информацией обо всех кратчайших маршрутах.

В работе [5] рассмотрена ситуация, когда из строя выходит маршрутизатор *LSR4*, а затем маршрутизатор *LSR6*.

Соседние *LSR*-маршрутизаторы, обнаружив неисправный маршрутизатор *LSR4*, обновляют свою базу данных *TED* и передают обновленную

информацию всем остальным маршрутизаторам в сети *MPLS-TE*. При этом все маршруты, идущие через неисправные маршрутизаторы, получают значение параметра *state*, равное нулю, описывающее их недоступность, а потоки сетевого трафика перенаправляются на альтернативный маршрут.

**Моделирование *MPLS-TE* сети, состоящей из *LSR*-маршрутизаторов на базе протоколов *LDP* и *RSVP*.** Рассмотрим комбинированную *MPLS-TE* сеть, состоящую из семи *LSR*-маршрутизаторов на базе протокола *RSVP-TE (LSR1, LSR3, LSR5, LSR7, LSR8, LSR9, LSR10)* и трех на базе протокола *LDP (LSR2, LSR4, LSR6)* (рисунок 6). С увеличением количества *LSR*-маршрутизаторов в сети *MPLS-TE* также увеличивается и объем передаваемой служебной информации. Каждый *LSR*-маршрутизатор собирает информацию обо всех сетевых интерфейсах своих соседей. Это напрямую влияет на время заполнения базы данных оптимальных маршрутов.

В первые моменты времени *MPLS-TE* сеть занимается только определением своей топологии и диагностикой всех сетевых компонентов. При этом все поступающие пакеты от узлов-отправителей будут отклонены с соответствующими ошибками о невозможности определения узлов-получателей. К 0,074 секунды базы данных *TED* всех *LSR*-маршрутизаторов наполняются информацией обо всех оптимальных сетевых маршрутах *MPLS-TE* сети.

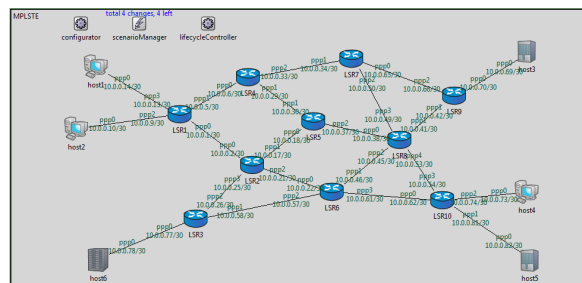


Рисунок 6 – Модель *MPLS-TE* сети, состоящей из десяти *LSR*-маршрутизаторов

Модульная система реализации *LSR*-маршрутизаторов в среде моделирования *OMNeT++* позволяет заменять отдельные компоненты на аналогичные по выполняемым функциям. Несмотря на различия в механизмах передачи меток протокола *MPLS*, все *LSR*-маршрутизаторы отлично взаимодействуют друг с другом. Для узла-получателя остается необязательной информация о способе передачи его данных через всю сеть *MPLS-TE*. Для него важно получение ответа от узла-приемника об успешном получении всех отправленных им данных.

**Заключение.** Таким образом, среда моделирования *OMNeT++* является универсальным и полезным инструментом не только для моделирования сетей с разнородными маршрутизаторами по типу переноса *MPLS*-меток, но и для проектирования сетей *MPLS-TE* любой сложности. При этом нужно учитывать следующие факторы.

На начальном этапе, когда вся сеть только готовится к принятию пакетов с пользовательскими данными, в каждом *LSR*-маршрутизаторе заполняется таблица маршрутизации на основе данных об известных маршрутах. Именно в это время происходят все основные вычисления. При этом все поступающие пакеты от узлов-отправителей будут отклонены с соответствующими ошибками о невозможности определения узлов-получателей.

Изменения параметров *MPLS-TE* сети (например, выход из строя какого-либо маршрутизатора или сетевого интерфейса) также влияют на перерасчет оптимальных маршрутов. Все изменения отслеживаются одновременно всеми *LSR*-маршрутизаторами путем периодического опроса всех своих “соседей” о физическом и логическом состоянии всех их элементов.

Чем больше *LSR*-маршрутизаторов в *MPLS-TE* сети, тем больше данных сигнализации будет передаваться по ней, и тем длительнее время сбора

первоначальных данных о состоянии всех вычислительных устройств и их сетевых интерфейсах для составления первоначальной топологии сети и вычисления оптимальных путей. Это подтверждается увеличением времени заполнения баз данных *TED* информацией обо всех доступных оптимальных маршрутах.

#### *Литература*

1. Гольдштейн Б.С., Гольдштейн А.Б. Технология и протоколы MPLS / Б.С. Гольдштейн, А.Б. Гольдштейн. СПб.: БХВ–Санкт-Петербург, 2005. 304 с.
2. Олвейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS / В. Олвейн. М.: Изд. дом “Вильямс”, 2004. 480 с.
3. <http://omnetpp.org>.
4. Ткачев М.С. Моделирование процессов управления трафиком в MPLS-сетях / Ткачев М.С. // Матер. V межд. молод. конф. “Современные техника и технологии в научных исследованиях”. 24–25 апреля 2013 г. Бишкек, 2013. С. 293–297.
5. Ткачев М.С. Моделирование отказоустойчивости маршрутов сети MPLS-TE / М.С. Ткачев // Матер. VII межд. молод. конф. “Современные техника и технологии в научных исследованиях”. Бишкек, 25–26 марта 2015. Бишкек, 2015. С. 208–212.