

Protokół MPLS

Internet przechodzi ewolucję podyktowaną rozwojem świadczonych usług. Do tej pory znakomicie spełniał swoją rolę jako platforma transmisji danych. Jednak wprowadzenie nowych technik i powiązanych z nimi multimediów wymusiło wdrożenie metod zapewniania jakości usług, ze szczególnym uwzględnieniem czasu rzeczywistego.

Sieci tworzące Internet są w dużej mierze oparte na IP, dlatego nie jest on zdolny do świadczenia usług o gwarantowanej jakości. Z kolei w sieciach stricte telekomunikacyjnych od początku chodziło o spełnianie warunków czasu rzeczywistego na potrzeby transmisji głosu. Protokołem, który wg przewidywań zaoferuje możliwości obu sieci, jest MPLS (*Multi Protocol Label Switching*).

Modyfikowanie IP

Protokół IP przewidywany do dalszego stosowania w wielousługowej sieci transmisji danych, by móc w pełni sprostać stawianym mu wymaganiom, musi być uzupełniony mechanizmami, które dotąd nie odgrywały tak istotnej roli. Są one związane z zapewnieniem, sterowaniem i zarządzaniem jakością oferowanych usług (QoS), ze szczególnym uwzględnieniem multimedialnych aplikacji czasu rzeczywistego.

W obecnej fazie ewolucji sieci teleinformatycznych w kierunku NGN (*Next Generation Network*) konieczne jest wprowadzenie pewnych modyfikacji i uzupełnień protokołu IP na potrzeby przyszłych zastosowań. W istocie nie jest to zadanie łatwe, biorąc pod uwagę rozmiary globalnej sieci i możliwość współpracy urządzeń pochodzących od różnych producentów. Problemy napotyka się również przy wdrażaniu już usprawnionych i znacznie bardziej efektywnych (niż te, którymi dysponuje IP) mechanizmów sterowania i zarządzania ruchem (*Traffic Engineering*).

Należy podkreślić, że IP nie ma mechanizmów zabezpieczenia przed przeciążeniami. Wynika to z metody przenoszenia pakietów w sieci opartej na protokołach routingu, np. OSPF (*Open Shortest Path First*) czy RIP (*Routing Information Protocol*). Nie obsługują one zarządzania ruchem, w wyniku czego wszystkie pakiety kierowane w tę samą stronę są transportowane tą samą trasą, bez uwzględnienia warunków w sieci. Zatem niemożliwe jest sterowanie ruchem tak, aby sieć była obciążona równomiernie i nie dochodziło do przeciążeń na „obleganych” kierunkach.

Niekorzystnie wpływają również mechanizmy retransmisji pakietów (w przypadku wystąpienia błędów), co dyskwalifikuje właściwie TCP/IP do przenoszenia usług czasu rzeczywistego. Poza tym IP jest zoptymalizowany pod kątem doboru najkrótszej trasy w sieci, a nie mechanizmów sterowania przepływem danych. Dlatego istniejące rozwiązania dla sieci transportowych muszą zostać wzbogacone w mechanizmy wspomagające różnicowanie ruchu i zarządzanie nim. To umożliwia implementację w środowisku IP protokołów IntServ (*Integrated Services*), DiffServ (*Different Services*) i MPLS.

MPLS ma zmienić sytuację obecnych sieci i uelastyczyć je w celu wprowadzania nowych usług. MPLS jako swoisty upgrade IP w założeniach powinien zapewniać m.in.

- możliwość etykietowania przenoszonych pakietów, co zwiększy efektywność zarządzania ruchem w sieci;
- przenoszenie pakietów o takiej samej przypisanej etykietce, po takich samych, ustalonych wirtualnych ścieżkach – tunelach (na wzór ATM);
- realizację funkcji routingowych i przełączających w węzłach wspierających technikę MPLS;

- usprawnić proces routingu i przenoszenia pakietów przez sieć.
- Zatem proponowany dla IP protokół MPLS integruje zalety obu technik transmisyjnych, czyli routingu w IP i zarządzania jakością w ATM.

Organizacja przełączania MPLS

MPLS, opracowany przez grupę IETF (*Internet Engineering Task Force*), składa się z zespołu protokołów zaprojektowanych na potrzeby elastycznego i wydajnego definiowania, kierowania, przenoszenia i przełączania strumieni ruchu występujących w sieci. Do podstawowych funkcji realizowanych przez MPLS należą:

- określenie mechanizmów zarządzania strumieniami ruchu o różnym natężeniu i między różnymi urządzeniami w sieci lub nawet między różnymi aplikacjami;
- dostarczanie narzędzi do odwzorowywania adresów IP w proste, stałe długości etykiety, wykorzystywane przez różne techniki komutacji i przesyłania pakietów;
- dostarczanie interfejsu rozszerzającego dla istniejących protokołów routingowych: RIP, BGP czy OSPF;
- obsługa warstwy drugiej stosu protokołów: TCP/IP, ATM czy FR.

W domenie MPLS przesyłanie danych odbywa się poprzez ścieżki LSP (*Label Switching Path*) tworzone na podstawie odpowiednich etykiet przypisywanych każdemu odcinkowi trasy między węzłami. LSP są ścieżkami do przesyłania danych, ustalonymi już wcześniej (*control-driven* – przesyłanie sterowane) lub na podstawie detekcji określonego strumienia danych (*data-driven* – sterowanie danymi). Etykiety, będące identyfikatorami strumieni danych, są dystrybuowane przy wykorzystaniu LDP (*Label Distribution Protocol*) lub RSVP. Każdy pakiet danych podczas całej drogi od źródła do miejsca przeznaczenia jest opatrzone etykietą. Przełączanie danych z dużą szybkością jest możliwe, ponieważ stałe długości etykiety są umieszczane na początku pakietu lub komórki i mogą być użyte przez urządzenia sieciowe do szybkiego przełączania pomiędzy portami.

Równoważna klasa przenoszenia FEC (*Forwarding Equivalence Classes*) stanowi reprezentację grupy pakietów, które mają takie same wymagania dotyczące sposobu ich przenoszenia. Wszystkie pakiety w takiej grupie są traktowane identycznie i przenoszone tą samą drogą. W przeciwieństwie do konwencjonalnego kierowania pakietów IP w MPLS przydzielenie pakietu odpowiadającej mu klasie jest wykonywane przy wejściu pakietu do sieci. Zapewnia to pierwszy węzeł będący wejściowym dla wchodzącego strumienia danych. Klasy FEC odpowiadają wymaganiom jakości obsługi dla danego zbioru pakietów lub uproszczonemu prefiksowi docelowego adresu sieciowego. Każdy LSR (*Label Switched Router*) ma wbudowaną tablicę wyszczególniającą, jak dane pakiety mają być przekazywane. W tabeli tej, zwanej etykietową bazą informacyjną (*Label Information Base*), zawarte są przypisania klas FEC danym typom etykiet.

Rola etykiet w MPLS

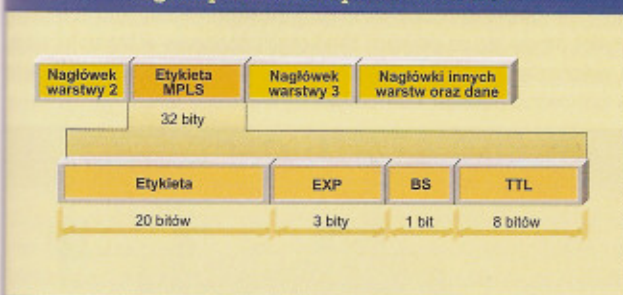
Na każdym odcinku ścieżki LSP wartości zapisane w etykietce mogą się zmieniać, podobnie jak w przypadku ścieżek wirtualnych w ATM. Na podstawie dotychczasowych pakietów etykiet znajdujące się wewnątrz domeny MPLS

urządzenia podejmują decyzje o dalszej drodze przesyłanego pakietu. Zatem etykiety stanowią dla urządzeń sieciowych adresy wykorzystywane zamiast adresów znajdujących się wewnątrz nagłówka pakietu IP. Każde z urządzeń w domenie MPLS analizuje etykiety przychodzących pakietów i po podjęciu opartych na tych etykietach decyzji o kolejnym etapie drogi, zamienia je tak, aby kolejne z urządzeń mogło na podstawie nowej etykiety podjąć właściwą decyzję o wyborze następnego odcinka trasy. W przypadku, gdy pakiet z etykietą przychodzi do ostatniego punktu trasy (routera brzegowego), etykieta jest usuwana, a pakiet przekazywany dalej.

Pakiety wchodzące do sieci z różnych stron, mimo przynależności do tej samej klasy FEC, będą miały różne parametry nadawanych etykiet, ponieważ routery dokonują klasyfikacji FEC m.in. na podstawie ich adresów docelowych i wymagań QoS. Każdy pakiet jest raz klasyfikowany przy wejściu do sieci i ma przypisywaną etykietę jako przynależącą do ustalonej wcześniej klasy przenoszenia. Nadanie etykiety przy wejściu pakietu zapewnia, że w występujących po drodze węzłach nie będzie konieczna analiza nagłówka IP, a tylko etykiety. Wartości nadawanych etykiet pochodzą z podwarstwy łącza danych. Dla warstwy drugiej, np. ATM czy FR, etykietami mogą być bezpośrednio identyfikatory łącza danych (DLCI) – w przypadku FR – czy też identyfikatory ścieżek wirtualnych (VPI) lub kanałów wirtualnych (VCI) – w ATM.

W każdym węźle LER (*Label Edge Router*) każdemu wchodzącemu do sieci pakietowi zostaje nadana etykieta MPLS, czyli tzw. *Shim Header* („nagłówek klinowy”), umieszczany między nagłówkami warstw drugiej i trzeciej przesyłanego pakietu. Można stwierdzić, że jest on częścią zarówno warstwy łącza danych, jak i warstwy sieciowej i wykorzystuje informacje obu warstw. Składa się z czterech pól o łącznej długości 32 bitów.

Ogólny format etykiet w MPLS



Znaczenie poszczególnych pól MPLS *Shim Header* jest następujące:

- 20-bitowe pole etykiety;
- 3-bitowe pole EXP zarezerwowane dla przyszłych zastosowań, tj. do zdefiniowania klas ruchu (jest możliwych osiem klas ruchu);
- 1 bit BS sygnalizujący osiągnięcie dna stosu etykiet – przenosi informację o stosie; dla etykiety najwyższego poziomu przyjmuje wartość 1, w pozostałych przypadkach 0;
- 8-bitowe pole TTL (*Time To Live*) określające czas ważności pakietu – odpowiada polu o tej samej nazwie, przenoszonemu w nagłówku IP.

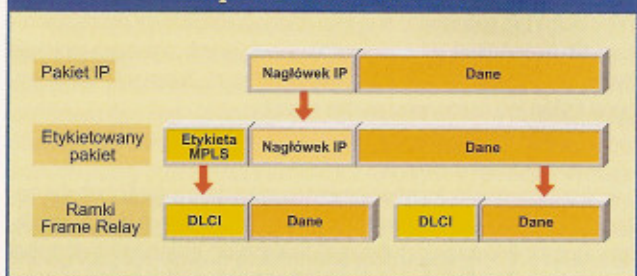
W technice MPLS istnieje możliwość dodawania pakietowi kolejnych etykiet, uporządkowanych w formie stosu. Do operacji na etykietach, wyko-

nywanych przez routery, należą: analiza, zamiana bądź usuwanie etykiet, przy czym operacje są wykonywane zawsze na etykiecie najwyższego poziomu. Wykorzystanie techniki stosu etykiet znajduje zastosowanie głównie w tunelowaniu pakietów. Stosowanie pola TTL w nagłówku ma w zamierzeniu projektowym zabezpieczyć przed powstawaniem zapętlenia, a funkcjonowanie tego pola jest identyczne z tym, jakie jest w przypadku protokołu IP.

W odniesieniu do implementacji MPLS w środowisku ATM etykieta może być umieszczona w nagłówku warstwy łącza danych jako wirtualne kanały i ścieżki VPI/VCI.

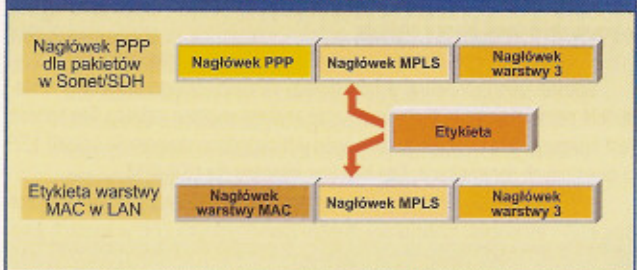
W przypadku sieci z protokołem FR (*Frame Relay*) etykieta może być przenoszona w polu DLCI.

Mapowanie MPLS w FR



Etykiety mogą być również umieszczane między nagłówkami warstwy łącza danych (2.) i nagłówkiem warstwy sieciowej (3.).

Etykietowanie pomiędzy nagłówkami warstw: 2. i 3.



Tworzenie i dystrybucja etykiet MPLS

Istnieją trzy procedury tworzenia etykiet:

- metoda z uwzględnieniem topologii, wykorzystująca przetwarzanie z protokołami routingu, takimi jak OSPF i BGP (*Border Gateway Protocol*);
- metoda z uwzględnieniem wymagań, wykorzystująca przetwarzanie zapewniające spełnienie wymogów ruchu (takich jak protokół RSVP);
- metoda z uwzględnieniem ruchu, wykorzystująca rejestrowane pakiety w celu wywoływania procedur przydzielania i dystrybucji etykiet.

Metody z uwzględnieniem topologii i wymagań są przykładem sposobów działania sterowanego przypisywaniem etykiet (*control-driven label bindings*), metoda z uwzględnieniem ruchu natomiast jest przykładem przypisywania etykiet sterowanego danymi (*data-driven label bindings*).

Do zestawienia ścieżki LSP konieczne jest stworzenie powiązań danych klas FEC z etykietami i umieszczenie ich w tabeli kierowania każdego z wykorzystywanych na trasie routerów. W MPLS przydzielenie etykiety danej klasie FEC jest dokonywane w każdym przypadku przez router następny (*downstream router*) na trasie, a informacja o utworzonym przypisaniu jest przesyłana z powrotem do routera poprzedniego (*upstream router*). To element mechanizmu sygnalizacyjnego stosowanego do wymiany informacji między sąsiednimi routerami o powiązaniach klas FEC i przenoszonych w pakietach etykiet. Określenia routerów (poprzedni i następny) są umowne i przyjęte w odniesieniu do kierunku przenoszenia pakietów. Po otrzymaniu informacji router poprzedni określa, który router jest następny po nim na trasie, tzn. wie, do którego routera

będzie kierował pakiety. Przydzielanie etykiet pakietom odpowiedniej klasy FEC może się odbywać za pomocą dwóch metod:

- „niezapowiedzianej” (*unsolicited downstream*),
- „na żądanie” (*downstream on demand*).

Przydzielanie etykiet w przypadku metody „niezapowiedzianej” jest inicjowane przez ruter następny, a informacja o utworzonym powiązaniu klasy FEC z etykietą trafia do rutera poprzedniego. W metodzie tworzenia powiązań „na żądanie” ruter poprzedni wysyła do następnego żądanie utworzenia powiązania FEC, po czym ten tworzy powiązanie i z powrotem odsyła informację. W tym przypadku inicjowanie przypisania pochodzi od rutera poprzedniego (*upstream*), właściwe przypisanie natomiast od następnego (*downstream*).

W domenie MPLS mamy do czynienia z dystrybucją informacji sterującą przepływem pakietów wewnątrz sieci. Dane potrzebne do kierowania ruchem mogą być generowane w wyniku działania klasycznych protokołów routingu lub na podstawie informacji rozpowszechnianych za pomocą protokołu dystrybucji etykiet LDP (*Label Distribution Protocol*). Zatem w MPLS dystrybucja etykiet jest dokonywana na dwa sposoby:

- niezależny (*independent*),
- uporządkowany (*ordered*).

Niezależny sposób dystrybucji etykiet polega na tym, że każdy z routerów może dokonywać, niezależnie od innych, przypisań poszczególnych klas FEC etykietom i kierować informację o utworzonych powiązaniach do sąsiednich względem siebie routerów. To jednak może prowadzić do sytuacji, w której w sieci występują pewne fragmenty niezwiązanych ze sobą ścieżek LSP. Jednak w takim przypadku jest możliwe transportowanie pakietów, nawet jeszcze przed pełnym zestawieniem ścieżki LSP. W sposób uporządkowany ruter MPLS może samodzielnie dokonać przypisania klas etykietom tylko w jednym z dwu przypadków:

- gdy ma informacje od węzła następnego względem siebie (*downstream*)

o powiązaniu danej klasy z etykietą;

- gdy jest on brzegowym ruterem (*egress LSR*) dla danej klasy FEC.

Sposób uporządkowany w odróżnieniu od niezależnego umożliwia zestawienie pełnej ścieżki LSP zanim jeszcze zostaną wysłane pakiety. Ten sposób jest wykorzystywany w sytuacjach, gdy jest pożądane utworzenie ścieżki LSP o określonych parametrach. Taki tryb jest zalecany dla LSR ATM.

LDP jako protokół przeznaczony do dystrybucji informacji o powiązaniach klas FEC z etykietami funkcjonuje między równorzędnymi LDP w węzłach sieci MPLS, wymieniając następujące informacje:

- o bieżącym stanie LSR w sieci – informacje rozgłoszeniowe i utrzymaniowe;
- o połączeniu – informacje o nawiązaniu, zarządzaniu i zakończeniu połączenia pomiędzy pracującymi LDP;
- rozgłaszane – tworzenie, zmiany i usuwanie przypisań etykiet klasom FEC;

● powiadamiające – informacje pomocnicze i sygnały informacji o błędach. Architektura MPLS nie dostarcza pojedynczej metody sygnalizacji do dystrybucji etykiet. Możliwości wykorzystania istniejących protokołów dystrybucji etykiet są następujące:

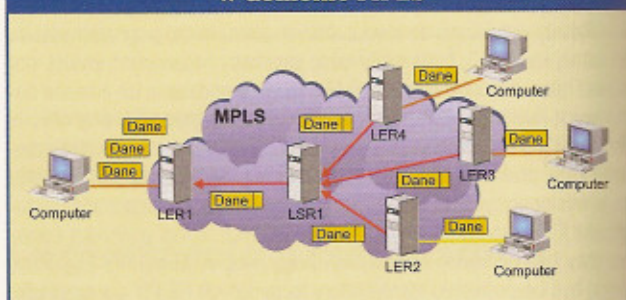
- LDP – odwzorowuje unicastowe adresy docelowe IP w etykiety;
- RSVP, CR-LDP (*Constraint-based Routing Label Distribution Protocol*) – są używane do zarządzania ruchem i rezerwacji zasobów;
- niezależny protokół multicastowy (PIM – *Protocol Independent Multicast*) – używany do stanu wielopointowego odwzorowywania etykiet;
- BGP – cechują go rozszerzone etykiety; jest wykorzystywany głównie na potrzeby VPN.

Agregacja ruchu, łączenie i stos etykiet

MPLS dopuszcza tworzenie ścieżek LSP o strukturze wielopunkt-punkt, czyli tzw. odwróconego drzewa, gdzie wiele kierunków ruchu jest łączonych w jeden wspólny. Dzięki temu kierunki strumienia z różnych obszarów mogą być połączone razem i przelączone z użyciem wspólnych etykiet. Ta możliwość jest stosowana w przypadku, gdy strumień informacji wchodzi do

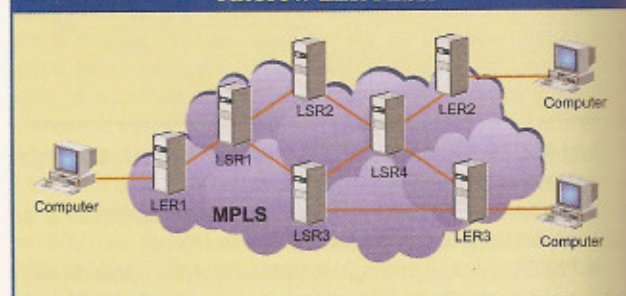
domeny MPLS przez różne węzły sieci mogą być jednoznacznie sklasyfikowane i przypisane tej samej klasie FEC, a ponadto strumienie te są kierowane do tego samego węzła wyjściowego sieci (LER). Sposób ten jest określany jako łączenie strumieni lub ich agregacja. Dzięki takiemu rozwiązaniu pakiety wchodzące do sieci mogą być nierozróżnialne i w związku z tym można również zwiększyć liczbę dostępnych w sieci etykiet.

Przykład połączenia typu wielopunkt-punkt w domenie MPLS



Mechanizm stosu etykiet pozwala na hierarchiczną pracę w domenie MPLS. Dopuszcza się możliwość nadawania pakietowi kolejnych etykiet, uporządkowanych w formie stosu. Gdy pakiet ma wyłącznie jedną etykietę, staje się ona etykietą pierwszego poziomu. Dodawane kolejno etykiety tworzą dalsze poziomy (drugi, trzeci itd.), przy czym routery dokonują analizy i operacji (np. zamiana bądź usunięcie) zawsze na etykiecie najwyższego poziomu. Mechanizm ten pozwala protokołowi MPLS na pracę symultaniczną i kierowanie ruchem na poziomach o dużym stopniu rozdrobnienia, np. między indywidualnymi wewnętrznymi routerami dostawców usług internetowych (ISP), jak również na poziomie pomiędzy domenami. Każdy poziom w stosie etykiet odnosi się do pewnych określonych poziomów w hierarchii sieci, a wykorzystanie techniki stosu etykiet znajduje szczególne zastosowanie w tunelowaniu pakietów, które odbywa się w domenie MPLS.

Przykład domeny MPLS z lokalizacją routerów LER i LSR



W domenie MPLS można wyróżnić dwa obszary funkcjonalne: szkielet sieci, określany mianem rdzenia (*core*), i brzeg sieci (*edge*), wyznaczane przez routery brzegowe LER. Są to urządzenia, które obsługują styk sieci dostępowej i sieci z protokołem MPLS. Obsługują też połączenia do innego typu sieci, takich jak FR, ATM i Ethernet. Etykietowy ruter brzegowy LER odgrywa bardzo ważną rolę w przypisywaniu i usuwaniu etykiet pakietom odpowiednio wchodzącym i wychodzącym z sieci MPLS.

Z kolei przełączający ruter etykietowy LSR jest szybkim ruterem działającym wewnątrz szkieletu sieci MPLS, który z założenia uczestniczy w wymianie właściwych informacji sygnalizacyjnych (zestawianie LSP, wymiana lub nadawanie pakietom etykiet) oraz przelączeniu strumienia ruchu z dużą szybkością, opartych na ustalonych ścieżkach pakietów określonego rodzaju.

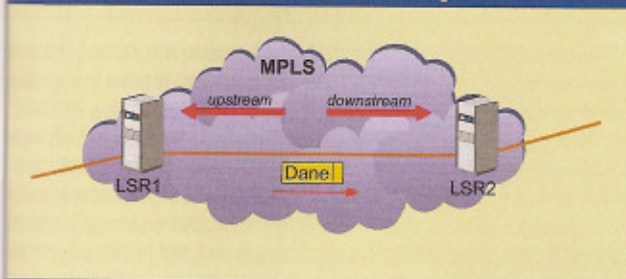
Zarządzanie ruchem

W domenie MPLS ścieżki LSP (*Label-Switched Path*) są zestawiane między sąsiednimi routerami na podstawie powiązań klas FEC z etykietami. Ciąg takich powiązań dla danej klasy FEC stanowi ścieżkę komutowaną etykietowo.

którą są przenoszone pakiety należące do tej samej klasy. Każda ścieżka jest utworzona z łańcucha ruterów, w którym dwa są brzegowymi LER, a wszystkie pomiędzy nimi są pośrednimi LSR. Zestawiane ścieżki LSP dla każdej z klas FEC są jednokierunkowe. Tworzone są na wzór wirtualnych łączy (ścieżek i kanałów wirtualnych) w ATM. W związku z tym ruch w drugim kierunku może przebiegać fizycznie inną trasą, a do obsługi ruchu w obydwu kierunkach są wymagane dwie wirtualne ścieżki LSP. Między ruterami, z punktu widzenia odcinka ścieżki LSP, są możliwe dwa kierunki przepływu informacji sygnalizacyjnej:

- kierunek w dół (*downstream*), tj. od rutera poprzedniego do następnego (kierunek zgodny z ruchem pakietów),
- kierunek w górę (*upstream*), tj. od rutera następnego do poprzedzającego go (kierunek przeciwny do kierunku przenoszenia pakietów).

Kierunki przenoszenia informacji sygnalizacyjnej – strumienie *downstream* i *upstream*



Technika MPLS dostarcza następujących możliwości doboru zestawianych ścieżek LSP:

- **rutowanie punkt-punkt** – każdy LSR niezależnie wybiera następny punkt na podstawie otrzymanej klasy FEC pakietu. Ta metoda jest podobna do obecnie wykorzystywanej w sieciach IP. LSR używa dostępnych protokołów rutujących, takich jak OSPF, ATM PNNI (*Private Network To Network Interface*) itp.;
- **ustalone kierowanie** – jest ono podobne do kierowania z miejsca źródłowego. Wejściowy LSR (czyli pierwszy dla strumienia danych wchodzących do sieci) wyszczególnia listę węzłów, przez które zostanie wyznaczona trasa. Wyszczególniona trasa może nie być optymalną, ale wzdłuż niej mogą być zarezerwowane zasoby, spełniające wymagania QoS dla przesyłanych danych. Łatwość zarządzania ruchem w całej sieci i zróżnicowane usługi mogą zapewnić wykorzystanie metod zarządzania siecią lub kontroli przepływu w sieci.

W MPLS zasoby sieci rdzeniowej operatora są współdzielone przez wielu klientów/abonentów, stąd pojawia się potrzeba optymalizacji wykorzystania zasobów zgromadzonych w rdzeniu sieci. Kryterium optymalizacji to równomierne obciążenie poszczególnych fragmentów sieci, by uniknąć sytuacji, w której część sieci jest niedopuszczalnie przeciążona, zaś inne jej części pozostają niedociążone. O ile dość łatwo daje się opisać ogólne kryterium optymalizacji, o tyle techniczna implementacja tego rozwiązania w warstwie sprzętowej jest dość kłopotliwa. Wymaga to oczywiście zbierania informacji o poziomie wykorzystania zasobów łączy i urządzeniach oraz posiadaniu odpowiednich mechanizmów, które pozwolą sterować ruchem w odniesieniu do aktualnego stanu wykorzystania zasobów. Koncepcję optymalizacji wykorzystania zasobów rdzenia sieci opisuje inżynieria ruchu (*Traffic Engineering*). Implementowana w środowisku MPLS umożliwia sterowanie ścieżkami przesyłania informacji w pewnym stopniu niezależnie od informacji na temat osiągalności sieci podawanych w tablicach rutingu.

Idea realizacji TE w środowisku MPLS polega na wytyczaniu określonych ścieżek przesyłania informacji LSP na podstawie informacji o aktualnym stanie wykorzystania zasobów oraz parametrów zadanych przez administratora. Do tego celu są wykorzystywane protokoły typu stan łącza (*Link State*) – takie jak OSPF oraz IS-IS (*Intermediate System to Intermediate System*) – pozwalające przekazywać informacje na temat dostępności zasobów oraz parametrów zadanych przez administratora. Przesyłanie informacji dotyczących wartości etykiet definiujących LSP odbywa się z wykorzystaniem protokołu RSVP.

Istotną cechą MPLS TE jest możliwość konstruowania nowych ścieżek przesyłania ruchu w trakcie, gdy wykorzystywana jest stara ścieżka. Taki sposób działania pozwala przełączać przesyłanie danych na nową ścieżkę bez konieczności wstrzymywania transmisji na czas wyznaczania nowej trasy. Aby umożliwić szybkie przełączanie na ścieżkę awaryjną, MPLS TE wykorzystuje mechanizmy ochrony ścieżek (*Path Protection*) oraz łączy (*Link Protection*). Dzięki monitorowaniu ścieżki LSP (mechanizm ochrony ścieżki), realizowanemu przez rutery-punkty końcowe LSP, oraz połączeń poprzez rutery LSR, obsługujące dane połączenie, po wykryciu nieprawidłowości działania LSP lub łącza może nastąpić natychmiastowe przełączenie komutowanego ruchu na ścieżkę obejściową (awaryjną). Uruchomienie ścieżki obejściowej odbywa się przez prostą zmianę wartości w tablicy etykiet MPLS opisującej komutację pakietów.

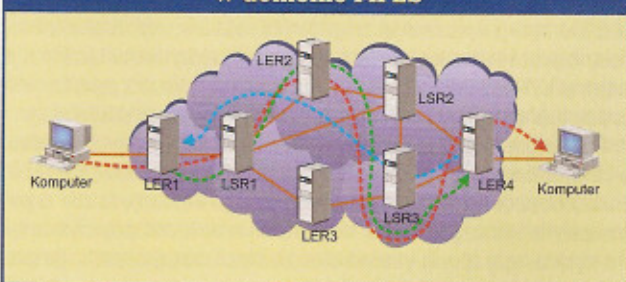
Inną metodą jest wprowadzenie rutingu z ograniczeniami (*Constraint-based Routing*), co zwiększa efektywność transportu danych przez sieć pod względem parametrów, takich jak charakterystyka łączy (przepustowość, opóźnienia itp.) i jakość obsługi QoS. Ścieżki LSP, które są ustalone, mogą stanowić CR-LSP – ścieżki z ograniczeniami. Ograniczeniami mogą być ustalone punkty przełączania strumienia lub też ogólnie narzucone wymagania QoS. Punkty przełączania narzucają, które ścieżki mogą być użyte. Wymogi QoS narzucają z kolei, które łącza i jakie mechanizmy kolejowania lub obsługi mają być używane do strumienia napływającego ruchu. W przypadku używania CR możliwe jest wybieranie dłuższych, ale mniej dociążonych ścieżek. Jednak to rozwiązanie powoduje, że ze wzrostem wykorzystania sieci rośnie złożoność obliczeniowa wybieranej trasy.

Sposób działania MPLS

MPLS odpowiada za wykonanie kolejno operacji na pakietach danych, tak aby mogły być przesyłane w obrębie domeny MPLS:

- utworzenie etykiety i jej dystrybucja do LSR,
- utworzenie tabeli w każdym routerze,
- utworzenie/zarezerwowanie ścieżek LSP kierowanych etykietami,
- wstawianie etykiet i przeglądanie ich tabeli,
- przesyłanie pakietów na podstawie etykiet.

Tworzenie ścieżek LSP i przenoszenie pakietów w domenie MPLS



Działanie MPLS podczas przesyłania pakietów można przedstawić następująco (rys. powyżej):

Utworzenie etykiety i jej dystrybucja:

- przed rozpoczęciem transmisji router LER1 podejmuje decyzję o przypisaniu etykiety określonej klasie ruchu FEC i tworzy całą ich tablicę;
- LDP wysyłającego rutera rozpoczyna dystrybucję etykiet skojarzonych z FEC;
- poprzez LDP są negocjowane dodatkowo zależności ruchowe i możliwości MPLS;
- użycie niezawodnego protokołu transportowego na rzecz protokołu sygnalizacyjnego (LDP używa TCP).

Tworzenie tabeli etykiet:

- po otrzymaniu powiązań klas do etykiet, każdy LSR tworzy wpisy we własnej bazie informacji etykietowych (LIB);
- wartość tabeli wyszczególnia odwzorowanie pomiędzy etykietą a klasą FEC;

- odwzorowanie pomiędzy portem wejściowym a tabelą etykiet wejściowych i między portem wyjściowym a tabelą etykiet wyjściowych;
- uaktualnianie wpisów przy wystąpieniu jakiegokolwiek renegotiacji przypisania etykiet.

Tworzenie ścieżek przełączanych na podstawie etykiet (jak pokazuje niebieska linia na rysunku, LSP są tworzone w kierunku odwrotnym do tworzonego w tablicy LIB).

Wstawianie etykiet, przeglądanie tabeli:

- pierwszy ruter (LER1 na rysunku) używa tablicy LIB do znalezienia następnego punktu i żąda etykiety dla wyszczególnionej klasy FEC;
- dalsze routery używają wyłącznie etykiet do znalezienia kolejnych punktów na trasie;
- gdy pakiet osiągnie wyjściowy LSR (LER4), etykieta zostaje usunięta i pakiet jest dostarczany do miejsca przeznaczenia.

Przesyłanie pakietów:

- zgodnie z rysunkiem trasa pakietu, jaką podąża od miejsca dostarczenia ze źródła, prowadzi od routera wejściowego (Ingress LSR – LER1) do miejsca przeznaczenia, czyli routera wyjściowego (Egress LSR – LER4);

• LER1 może nie mieć żadnych etykiet dla pakietu, który zażądał przydziału etykiety dla klasy FEC; w sieci IP jest znajdowany najdłuższy, zgodny z dostarczoną, adres następnego punktu na trasie pakietu (LSR1 jest następnym punktem dla LER1);

• LER1 rozpoczyna żądanie przydzielenia etykiet do LSR1, żądanie zostaje przeniesione wzdłuż sieci (czarna, przerywana linia);

• każdy pośredni ruter odbiera etykietę ze swojego routera wysyłającego (*upstream*): poczynając od LER2 i idąc dalej aż do LER1, jest zestawiana ścieżka LSP (zaznaczona za pomocą przerywanej niebieskiej linii) z użyciem LDP lub innych protokołów sygnalizacyjnych; jeżeli zaimplementowane są mechanizmy zarządzania ruchem, CR-LDP może być użyty do określenia zestawianej aktualnie ścieżki spełniającej wymagania QoS;

• LER1 wstawia etykietę i przesyła pakiet do LSR1;

• każdy dalszy LSR, np. LSR2 i 3, sprawdza etykietę w odebranym pakiecie, zastępuje ją etykietą wyjściową i przesyła pakiet dalej;

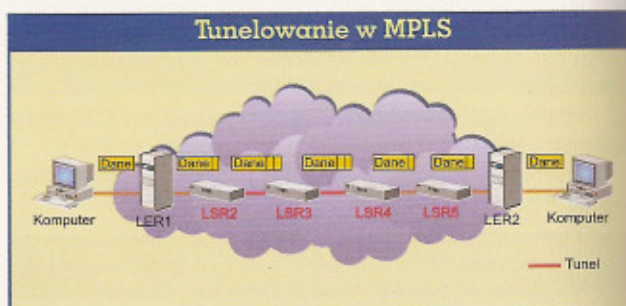
• kiedy pakiet osiąga LER4, zostaje usunięta etykieta, ponieważ pakiet jest wyprowadzany z domeny MPLS do miejsca lub sieci docelowej (zestawiona ścieżka LSP jest zaznaczona przerywaną czerwoną linią).

Jedną z cech MPLS jest możliwość zestawiania tuneli na wybranych fragmentach trasy przesyłanych pakietów. Dzięki tworzeniu tuneli poprzez routery pośredniczące jest możliwe łączenie różnych obszarów sieci. Zestawione tunele mogą być traktowane jako łącza wirtualne pomiędzy dwoma łączącymi je routerami LSR, stanowiącymi dla tego tunelu końce. Idea ta z powodzeniem została zaadaptowana do tworzenia wirtualnych sieci prywatnych (VPN).

Utworzony tunel jest specyficzną ścieżką LSP komutowaną etykietowo, w której przenoszone pakiety są traktowane jak należące do jednej klasy FEC. Funkcjonowanie tuneli polega na opisanu danego fragmentu ścieżki za pomocą etykiet wyższego poziomu, tak jak każdej innej ścieżki, przy czym ta sama etykieta może obowiązywać na kilku odcinkach między routerami. Przenoszenie pakietów przez taki tunel odbywa się podobnie jak wzdłuż zwykłej LSP. Na wejściu pakietów do pierwszego routera, stanowiącego początek tunelu, do nadanej etykiety jest dodawana dodatkowa etykieta wyższego poziomu, będąca podstawą przenoszenia danego pakietu przez tunel. Wprowadzony do tunelu pakiet jest następnie przenoszony do kolejnego routera, który na podstawie analizy nagłówka etykiety zmienia jej wartość i przesyła pakiet dalej. Następny ruter, jeśli nie jest końcowym, dokonuje tej samej operacji. Gdy pakiet dotrze do ostatniego routera stanowiącego tunel, etykieta wyższego poziomu jest usuwana i pakiet na podstawie swej pierwotnej etykiety jest wysyłany do następnego węzła lub poza domenę MPLS. Dzięki takiej metodzie etykietowania pakietów przez etykiety wyższego rzędu można łatwo łączyć wybrane obszary sieci. Wykorzystując technikę tunelowania i agregacji ścieżek, można zrealizować agregację klas FEC pakietów na danym odcinku trasy. Ten sposób łączenia klas sprzyja efektywniejszemu zarządzaniu etykietami w sieci.

Tunelowanie pakietów wymusza wprowadzenie kolejnej etykiety w tunelu, przez co wydłuża się przesyłany pakiet. Zmniejsza to oczywiście wydaj-

ność sieci, ze względu nawet na nadmiarowość informacji (oprócz danych użytkowych musi być przesłany nagłówek, bez którego nie byłoby możliwe komutacja w domenie MPLS i prawidłowe przesłanie do miejsca docelowego). Na rysunku poniżej tworzony stos etykiet zaznaczono w postaci dłuższych etykiet pakietów.



Routery LSR2 i LSR4 stanowią routery brzegowe tunelu. Ruter LER1 jest wejściowym dla domeny MPLS, a LER2 – wyjściowym. W takiej konfiguracji pakiet wchodzący jest oznaczany etykietą przez LER1 i przesyłany do LSR2. Tam następuje zamiana etykiety wejściowego poziomu i dodanie etykiety wyższego poziomu. Po tym następuje wprowadzenie pakietu do tunelu LSP i przesłanie go do następnego w kolejności LSR3. Ten ruter nie jest końcowym tunelu, dokonuje więc przetworzenia etykiety wyłącznie wyższego poziomu i pakiet jest kierowany do LSR4. Ze względu na to, że LSR4 jest końcowym routerem tunelu, zachodzi w nim usunięcie etykiety wyższego i przesłanie pakietu z etykietą niższego poziomu dalej do LSR5. Ten ruter standardowo dokonuje translacji etykiet i przesyła pakiet do LER2. Ten z kolei jest routerem wyjściowym (tzw. brzegowy – Egress LSR), który usuwa etykietę i wyprowadza pakiet poza domenę MPLS.

Przy realizacji sieci VPN w domenie MPLS na routerze brzegowym są przypisywane dwie etykiety: pierwsza (bardziej zagnieżdżona), identyfikująca interfejs wyjściowy (lub grupę interfejsów) pracujący w określonej sieci VPN na docelowym routerze brzegowym, oraz druga – wskazująca ścieżkę LSP do docelowego routera brzegowego. Idea wirtualnych sieci prywatnych zakłada możliwość zapewnienia wielu użytkownikom komunikacji opartej na jednej współużytkowanej infrastrukturze urządzeń i połączeń, w sposób gwarantujący logiczną separację między grupami użytkowników z poszczególnych sieci. Podstawowe cechy charakteryzujące MPLS-VPN to:

- obsługa komunikacji „każdy z każdym” w ramach sieci VPN, bez definiowania połączeń;
- łatwość konfigurowania nowych użytkowników sieci VPN,
- elastyczność definiowania komunikacji pomiędzy sieciami VPN,
- ruting pomiędzy sieciami VPN,
- nakładanie sieci VPN (*overlapping VPN*),
- wysokie parametry skalowalności,
- obsługa dużej liczby sieci VPN i klientów,
- elastyczność w doborze technologii dostępowych.

Klasyczna realizacja sieci VPN opiera się na wydzieleniu separowanych kanałów komunikacji (przez podział pasma transmisji lub utworzenie połączeń wirtualnych w ramach współdzielonego pasma, np. w sieciach Frame Relay). Niedogodnością takiej realizacji jest brak wbudowanych mechanizmów gwarantujących możliwość komunikacji w relacjach „każdy z każdym” w ramach sieci wirtualnej. Ponieważ tak tworzona sieć wirtualna stanowi zbiór połączeń (najczęściej w relacjach punkt-punkt), organizacja komunikacji „każdy z każdym” wymaga bądź utworzenia pełnej siatki połączeń (co z reguły jest kosztowne), bądź zorganizowania routingu uwzględniającego aktualnie utworzone kanały transmisji. Ze względu na to, że organizacja routingu jest realizowana na urządzeniach użytkownika sieci VPN, dostawca usługi jest w praktyce pozbawiony możliwości kontrolowania i weryfikowania poprawności działania routingu wewnątrz sieci VPN oraz zaoferowania usługi gwarantującej komunikację „każdy z każdym”. Realizacja sieci wirtualnych VPN przy użyciu MPLS pozwala znieść m.in. to ograniczenie.

Specyfika obsługi QoS w sieci MPLS

Wraz z rozwojem telekomunikacji współczesne sieci muszą świadczyć coraz bardziej zróżnicowane usługi – od przenoszenia głosu czy danych do usług multimedialnych. Różne usługi mają różne wymagania. Niektóre są wrażliwe na opóźnienie, inne na utratę danych lub zmienne opóźnienie w ich dostarczaniu. Z tego powodu zagadnienie QoS ma coraz większy wpływ na oblicze systemów teleinformatycznych. Definicja QoS opracowana w zaleceniu ITU-T E.800 mówi, że „QoS jest zbiorowym efektem wykonania usługi, który determinuje stopień zadowolenia użytkownika tej usługi”.

Problemy związane z określeniem jakości usługi QoS wynikają z:

- różnych interpretacji QoS ze względu na subiektywność,
- definiowania w rekomendacjach QoS dla każdej warstwy, ale braku zdefiniowania relacji QoS pomiędzy warstwami,
- braku jasnego określenia relacji pomiędzy usługą w modelu OSI i usługą postrzeganą przez użytkownika, a subiektywne aspekty nie są przedstawione w rekomendacjach.

Przekazywanie danych (pakietów) w rozległej sieci wiąże się z podejmowaniem określonych w środowisku sieci MPLS działań: poczynając od przesyłania informacji o dostępności sieci oraz stowarzyszeniu z określonymi sieciami etykiet, przez obróbkę pakietu na wejściu do sieci MPLS i przesyłanie oznaczonych etykietami pakietów we wnętrzu sieci, kończąc na operacjach wykonywanych na pakiecie w momencie opuszczania sieci MPLS. Stąd też realizacja spójnej kontroli QoS w sieci tego rodzaju wymaga przeprowadzania wielu operacji na przesyłanych pakietach w różnych miejscach sieci.

W generalnej koncepcji systemu jakości usług można wyróżnić następujące elementy:

- kontrola dostępu do sieci,
- klasyfikacja wejściowa,
- obsługa kolejowania na wejściu,
- weryfikacja wielkości ruchu,
- reklasyfikacja,
- kolejowanie wyjściowe.

Obsługa parametrów QoS w środowisku MPLS odbywa się w dwóch trybach pracy: *frame-mode* – MPLS w sieci ruterów lub *cell-mode* – MPLS w sieci ATM. W pierwszym przypadku zapewnienie jakości usług QoS gwarantują routery obsługujące przełączanie MPLS, wykorzystując kolejowanie np. CB-WFQ (*Class Based – Weighted Fair Queuing*), sterowane trzema bitami pola etykiety – *experimental bits*. Umożliwia to obsługę do 8 klas ruchu. Obecnie są analizowane i rozważane rozwiązania pozwalające skojarzyć klasę obsługi z wartością etykiety, co umożliwia wyeliminowanie ograniczenia liczby obsługiwanych klas.

Dla sieci MPLS pracującej na warstwie ATM (*cell-mode MPLS*) realizacja obsługi klas ruchu może się odbywać przez utworzenie wielu niezależnych połączeń wirtualnych odwzorowujących klasy ruchu lub w ramach jed-

nego połączenia obsługiwanego jako ruch ABR (*Available Bit Rate*) z sygnalizacją dostępnego pasma. W pierwszym przypadku zapewnienie odpowiedniej obsługi jest realizowane na każdym z przełączników ATM przez przypisanie parametrów jakości obsługi konkretnym połączeniom wirtualnym. W drugim – sieć ATM zapewnia wystarczające zasoby dla przeniesienia całości ruchu, zaś o rozróżnieniu poszczególnych klas obsługi decydują routery brzegowe.

Podsumowanie

Zaprezentowana technika MPLS stanowi, na podstawie oferowanych możliwości, skuteczne narzędzie zarządzania ruchem i jakością parametrów QoS sieci z protokołem IP. MPLS nie jest przy tym protokołem powstałym w zupełnym oderwaniu od technik sieciowo-transportowych, lecz jest ściśle związany zarówno z IP jak i ATM. Tak więc MPLS jako docelowy protokół w sieciach transportowych stanowi połączenie zalet IP i ATM:

- pozwala rozszerzać możliwości IP o mechanizmy kontroli jakości QoS;
 - oferuje mechanizmy zabezpieczania przed przeciążeniami i zarządzania ruchem (*Traffic Engineering*);
 - realizuje koncepcje doboru trasy IP i uproszczoną obsługę pakietów w węzłach przełączających, charakterystyczną dla ATM;
 - pakiet wchodzący do sieci jest przydzielany klasie równoważności przekazywania FEC (*Forwarding Equivalence Class*), otrzymując jednocześnie etykietę pozwalającą na uproszczenie decyzji o kierowaniu pakietu w poszczególnych węzłach sieci;
 - routery LSR (*Label Switching Router*) na podstawie etykiety podejmują decyzję o kierowaniu pakietu, po czym zamieniają „starą” etykietę i zastępują ją nową, podobnie jak w ATM;
 - może zapewnić uproszczenie sterowania przepływem strumieni w sieci oraz przyspieszyć procesy komutacyjne w routerach;
 - umożliwia rozszerzenie protokołu MPLS na sieci DWDM (MPλS, GMPLS), w których ścieżka wirtualna jest utożsamiana z nośną systemu WDM;
 - MPLS można stosować w połączeniu z protokołami wyboru trasy lub bez nich;
 - MPLS umożliwia kierowanie pakietów poprzez dowolnie wybrane węzły sieci, nie tylko dla ruchu pojedynczych połączeń, ale i dla ruchu zagregowanego (tworzenie wirtualnych sieci prywatnych VPN).
- Można się spodziewać, że w najbliższym czasie, przy użyciu produkowanych przełączników ATM/MPLS/IP, nastąpi rozbudowa sieci i wdrażanie techniki MPLS. Jednak należy zdawać sobie sprawę, że rozwój nie nastąpi gwałtownie, gdyż jak pokazuje praktyka, wdrożenie nowej techniki odbywa się zawsze w drodze ewolucji istniejących rozwiązań, a jest to przedsięwzięcie wymagające olbrzymich środków finansowych, przy relatywnie długim okresie amortyzacji. Adaptacja techniki MPLS do istniejącej infrastruktury sieciowej w wielu przypadkach będzie się wiązać z modyfikacją oprogramowania routerów IP lub przełączników ATM albo też z wymianą urządzeń na nowe, co przy ogromnej rozległości sieci nie będzie łatwe.