

**Ing. Michal Pištek**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**OPTIMALIZÁCIA ALOKÁCIE PRENOSOVEJ KAPACITY V SIEŤACH NGN**

**na získanie** akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe:** Telekomunikácie

**v študijnom odbore** 5.2.15 Telekomunikácie

**Miesto a dátum:** Bratislava, Máj 2015



**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA  
V BRATISLAVE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**Ing. Michal Pišteň**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**OPTIMALIZÁCIA ALOKÁCIE PRENOSOVEJ KAPACITY V SIEŤACH NGN**

**na získanie** akademického titulu doktor (philosophiae doctor, PhD.)

**v doktorandskom študijnom programe:**

5.2.15 Telekomunikácie

**Miesto a dátum:** Bratislava, Máj 2015

**Dizertačná práca bola vypracovaná** v dennej forme doktorandského štúdia

**Na** Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave

**Predkladateľ:** Ing. Michal Pištek  
Ústav telekomunikácií  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Ilkovičova 3  
812 19 Bratislava

**Školiteľ:** doc. Ing. Martin Medvecký, PhD.  
Ústav telekomunikácií  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Ilkovičova 3  
812 19 Bratislava

**Oponenti:**

meno: doc. Ing. Peter Počta, PhD.  
adresa: Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina  
pracovisko: Katedra telekomunikácií a multimédií, Elektrotechnická fakulta,  
Žilinská Univerzita

meno: Ing. Tomáš Balogh, PhD.  
adresa: Plynárenská 7/C, 821 09 Bratislava  
pracovisko: Accenture Delivery Center for Technology in Bratislava

**Autoreferát bol rozoslaný:** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná:** ..... o ..... **hod.**

v zasadacej miestnosti ÚT FEI STU v Bratislave,

Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava, B-blok, 6.p., miestnosť B602

.....  
**prof. Dr. Ing. Miloš Oravec**  
**dekan FEI STU Bratislava**  
**Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava**

## **Obsah**

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Siete novej generácie (NGN)</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Kvalita služby</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>MPLS</b>	<b>5</b>
4.1	Riadenie prevádzky	5
4.1.1	Smerovanie na základe obmedzení	5
4.1.2	Aplikovanie TE a CBR v MPLS	5
4.2	MPLS-TE s vnímaním služby (DS-TE)	6
<b>5</b>	<b>Mechanizmy alokovania prenosovej kapacity</b>	<b>6</b>
5.1	Modely obmedzenia prenosovej kapacity	7
5.2	CBR algoritmy	7
<b>6</b>	<b>Fuzzy logika</b>	<b>8</b>
<b>7</b>	<b>Ciele dizertačnej práce</b>	<b>8</b>
<b>8</b>	<b>Návrh nového modelu obmedzenia prenosovej kapacity</b>	<b>8</b>
8.1	Vyhodnotenie výkonnosti používaných BC modelov	8
8.2	Návrh nového BC modelu – A-MAR	9
8.2.1	Definovanie A-MAR	10
8.2.2	Overenie výkonnosti A-MAR	10
8.2.3	Výsledky simulácie	11
<b>9</b>	<b>Návrh nového algoritmu smerovania na základe obmedzení</b>	<b>13</b>
9.1	Návrh nového CBR algoritmu – FCBA	13
9.2	Overenie výkonnosti FCBA	15
9.2.1	Scenár 1	17
9.2.2	Scenár 2	19
9.2.3	Vyhodnotenie FCBA	20
<b>10</b>	<b>Záver a prínosy dizertačnej práce</b>	<b>21</b>
<b>11</b>	<b>Použitá literatúra</b>	<b>22</b>
<b>12</b>	<b>Publikácie autora</b>	<b>24</b>
<b>13</b>	<b>Účasť autora na výskumných projektoch</b>	<b>25</b>
<b>14</b>	<b>Resumé</b>	<b>26</b>

## 1 Úvod

Tempo rozvoja telekomunikačných služieb je veľmi vysoké. Kým v minulosti slúžili telekomunikačné siete výlučne na prenos hlasu, postupne sa pridávali ďalšie služby. S napredujúcou dobou sú nové služby vždy viac a viac náročné na prenosovú sieť. Dnešný telekomunikačný svet integruje všetky služby (hlas, video a internet) do jednej NGN siete. Základ NGN siete tvorí robustná chrbticová sieť, pričom v poslednom období je MPLS technológia základným stavebným kameňom takýchto sietí. MPLS sieť musí spĺňať prísne podmienky najmä na prenosovú kapacitu a oneskorenie, ktoré sú veľmi dôležité pri prenose informácií v reálnom čase. Je preto dôležité zaoberať sa otázkou kvality služby aj v dnešných moderných MPLS sieťach.

Jedným zo spôsobov ako zabezpečiť potrebnú kvalitu služby (QoS) v sieťach MPLS je implementovanie niektorého z mechanizmov alokovania prenosovej kapacity. Prostredníctvom týchto mechanizmov vieme efektívne prerozdeliť prostriedky danej siete, pričom sa vždy snažíme zvýhodňovať prevádzku vyššej priority ako je hlas, alebo video, ktoré sú náchylnejšie na degradáciu QoS parametrov (oneskorenie, kolísanie oneskorenia, stratovosť a pod.).

Optimalizovanie alokovania prenosovej kapacity môžeme vykonať na jednotlivých linkách implementovaním modelov obmedzenia prenosovej kapacity, ktorými sa prerozdeľuje prenosová kapacita na danej linke medzi jednotlivé prevádzkové triedy. Alokovanie prenosovej kapacity môžeme optimalizovať aj z pohľadu siete a teda ovplyvňovať akým spôsobom bude prevádzka prenášaná v rámci siete. Riadenie prevádzky a s ním spojené mechanizmy, ako smerovanie na základe obmedzení, slúžia na vyhodnotenie vhodných ciest v sieti a umožňujú aj rozhodnutie na základe požadovaných QoS parametrov.

Predložená práca sa zameriava na zefektívnenie sietí MPLS tak z hľadiska smerovania v sieti, ako aj z hľadiska alokovania prenosovej kapacity v jednotlivých uzloch siete. Cieľom práce teda bolo navrhnúť optimalizované riešenia modelov obmedzenia prenosovej kapacity, ako aj algoritmov smerovania na základe obmedzení v sieťach MPLS z hľadiska dosiahnutých QoS parametrov.

## 2 Siete novej generácie (NGN)

ITU-T v [1] definuje Sieť Novej Generácie (NGN) ako paketovo orientovanú sieť schopnú poskytovať telekomunikačné služby a schopnú používať viaceré širokopásmové transportné technológie s podporou QoS a v ktorej funkcii súvisiace so službami sú nezávislé od využívaných transportných technológií. Účastníkom ponúkajú neobmedzený prístup k rozličným sieťam, poskytovateľom služieb a službám podľa ich vôle. Podporuje všestrannú mobilitu, ktorá umožní trvalú a všeobecnú realizáciu služieb k účastníkom.

NGN by mala spĺňať náročnú úlohu efektívneho manažovania rôznych sieťových zdrojov pri garantovaní širokého rozsahu služieb citlivých na QoS cez viacero prenosových technológií. Preto je v NGN potrebné implementovať také technológie a mechanizmy, ktoré umožňujú poskytovať požadovanú úroveň QoS pre rôzne druhy služieb, ktoré sú v rámci NGN poskytované.

## 3 Kvalita služby

NGN siete musia podporovať rôzne druhy prevádzky s čoraz rozličnejšími požiadavkami. V minulosti boli použité oddelené siete pre hlas, video a dáta. V dnešnej dobe sú už však tieto služby skombinované do jednej multiservisnej siete. Pre mnoho aplikácií, ako prenos súborov, internetové prehliadanie, email a peer-to-peer komunikačné služby, môže byť postačujúci best effort charakter prevádzky. Ak sú však v sieti integrované služby ako VoIP alebo IPTV, je potrebné sa zaoberať aj otázkou kvality služby (QoS). Aby bolo možné poskytovať QoS v rámci siete, je potrebné poznať sieťové charakteristiky, ktoré formujú QoS a QoS požiadavky.

ITU-T v [2] definuje kvalitu služby (QoS) ako súhrn charakteristík telekomunikačnej služby, ktoré podporujú jej schopnosť uspokojiť určené a predpokladané potreby používateľa služby. Cieľom každej siete by mala byť minimalizácia parametrov ako oneskorenie, kolísanie oneskorenia a stratovosť paketov.

Pri dátovej prevádzke vieme najviac tolerovať oneskorenie, aj keď aj tu napríklad pri vzdialenom prístupe (telnet) sa snažíme oneskorenie čo najviac obmedziť. Pri dátovej prevádzke by sme sa mali zamerať najmä na stratovosť, ktorá je pri dátovom prenose prakticky netolerovateľná. Pri prenose

zvuku a videa dokážeme zas tolerovať istý stupeň stratovosti, no je snaha udržať oneskorenie pod odporúčaných 150 ms. [3]

Pre zabezpečenie požadovaných QoS parametrov treba v sieti implementovať niektorý z mechanizmov zabezpečujúci QoS. Jednotlivé mechanizmy potom pristupujú k prevádzke na základe jednotlivých dátových tokov, alebo dané toky agregujú na základe preddefinovaných prevádzkových tried. Spôsob akým sa zabezpečí QoS závisí najmä na použitých sieťových technológiách. Tie potom na základe svojich špecifikácií aplikujú konkrétny QoS mechanizmus. Na dané technológie sa možno pozerať aj na základe RM OSI vrstvy, na ktorej sú implementované

## **4 MPLS**

Multiprotokolové prepínanie návěstí (MPLS) predstavuje všestranné riešenie sieťových problémov ako rýchlosť, škálovateľnosť, QoS manažment a riadenie prevádzky. MPLS bolo vytvorené ako elegantné riešenie na splnenie požiadaviek manažmentu prenosovej kapacity a služieb pre novú generáciu chrbticových sietí založených na IP, pričom dokáže existovať aj nad ATM, alebo Frame Relay. [4]

V sieťach MPLS je prenos dát uskutočňovaný prostredníctvom Ciest s prepínaním návěstí (LSP – Label Switched Path). LSP predstavuje sekvenciu návěstí v každom uzle na ceste medzi zdrojom a cieľom. MPLS využíva návestia fixnej dĺžky vložené na začiatok paketu prostredníctvom ktorých sú pakety smerované sieťou, čo umožňuje vysokorýchlostné smerovanie dát.

Distribúcia návěstí môže byť zabezpečená viacerými spôsobmi. Existujúce smerovacie protokoly ako BGP boli modifikované, aby boli schopné prenášať návestia. Takisto aj RSVP bolo rozšírené pre podporu prenosu návěstí. IETF definovalo Protokol distribúcie návěstí (LDP) na explicitnú signalizáciu a manažment návěstí. Rozšírenie LDP, CR-LDP podporuje už aj smerovanie založené na QoS požiadavkách.

Na efektívnejšie využitie sieťových prostriedkov sa využíva MPLS v spojení s riadením prevádzky (TE – Traffic Engineering). Riadenie prevádzky je proces, ktorý zlepšuje celkové využitie siete. Výsledkom je aj obmedzenie zahltenia na všetkých cestách. TE nevyberá vždy tú najkratšiu cestu medzi dvoma zariadeniami takže je možné, že dva pakety dátového toku budú putovať dvoma rôznymi cestami. Tým sa zabezpečí, že menej využívané linky sa využijú viac a viac využité linky sa využijú menej.

### **4.1 Riadenie prevádzky**

Optimalizovanie alokovania prenosovej kapacity nemusí byť brané len ako optimálne využitie kapacity danej linky. Z pohľadu sieťového operátora je dôležitý aj celkový pohľad na danú sieť a spôsob ako sa v nej prevádzka prenáša. Riadenie prevádzky (TE) poskytuje skupinu mechanizmov, ktoré zabezpečujú optimalizovanie využitia prostriedkov danej siete. Cieľom TE je umožnenie efektívneho a spoľahlivého chodu siete s optimalizáciou využitia sieťových zdrojov a výkonnosti prevádzky. [5]

#### **4.1.1 Smerovanie na základe obmedzení**

Z hľadiska zabezpečenia QoS a optimálneho alokovania prenosovej kapacity zo sieťového pohľadu zohráva smerovanie a smerovacie algoritmy dôležitú úlohu. Smerovanie na základe cieľovej adresy využívajúce na rozhodnutie minimálny počet skokov nemusí byť už postačujúce. Administratívne stratégie, výkonnostné požiadavky, symetrizácia záťaže a škálovateľnosť naberajú čoraz väčšiu váhu pri smerovaní.

Smerovanie na základe obmedzení (Constraint based routing - CBR) označuje skupinu smerovacích algoritmov, ktoré vykonávajú smerovacie rozhodnutia na základe niekoľkých požiadaviek a obmedzení. Obmedzenia vo forme administratívnych stratégií sa označujú ako strategické obmedzenia využívané v strategickom smerovaní. Obmedzenia vo forme QoS požiadaviek sa označujú ako QoS obmedzenia využívané v QoS smerovaní. [6]

#### **4.1.2 Aplikovanie TE a CBR v MPLS**

MPLS technológia sa ukázala ako vhodná pre aplikovanie TE. MPLS kombinuje schopnosť monitorovať point-to-point prevádzkové štatistiky medzi dvoma smerovačmi a schopnosť riadiť

prepínané cesty v rámci sieťovej topológie. To robí MPLS-TE atraktívnou pri vylepšovaní výkonu siete efektívnym mapovaním prevádzkových tokov na vhodné linky v rámci siete.[7]

Pri CBR v MPLS je vstupom do CBR algoritmu informácia o stave siete, ktorá je distribuovaná v reálnom čase smerovacími protokolmi. LSP sú dynamicky zostavované a zrušené príslušným signalizačným protokolom. Pre MPLS smerovače, ktoré by mali podporovať CBR bolo treba rozšíriť funkcionality smerovacích protokolov o možnosť niesť informácie o stavoch linky ako dostupná, resp. rezervovaná prenosová kapacita. Čo sa týka signalizačných protokolov, tak treba zvoliť také, ktoré podporujú indikácie explicitnej cesty, ako aj alokovanie zdrojov počas dynamického zostavenia LSP. [8]

Po prijatí požiadavky LER smerovačom, mechanizmus smerovacieho rozhodnutia vyberie vhodnú cestu. Daný mechanizmus zozbiera informácie o aktuálnej topológii a využití zdrojov v sieti interakciou so smerovacím protokolom (napr. OSPF-TE). Po vybratí vhodnej cesty je daná LSP dynamicky vybudovaná prostredníctvom signalizačného protokolu (napr. CR-LDP), ktorý vykoná riadenie prístupu v každom uzle, ako aj samotné alokovanie prenosovej kapacity na jednotlivých linkách danej cesty.

#### 4.2 MPLS-TE s vnímaním služby (DS-TE)

MPLS s riadením prevádzky (MPLS-TE) umožňuje rezerváciu zdrojov, toleranciu chýb a optimalizáciu prenášaných zdrojov. Aby mohli mechanizmy alokovania prenosovej kapacity v sieťach MPLS-TE robiť rozhodnutia aj na základe prevádzkovej triedy, bolo treba do MPLS implementovať DiffServ technológiu, ktorá umožňuje škálovateľný sieťový dizajn s viacerými triedami služieb.

MPLS-TE s DiffServ (DS-TE) kombinuje výhody DiffServ a riadenia prevádzky. Výsledkom je schopnosť poskytovať striktné garancie QoS pri optimalizovaní sieťových zdrojov. QoS poskytovaná prostredníctvom sietí DS-TE umožňuje operátorom poskytovať služby vyžadujúce striktné garancie výkonu ako zvuk a video, keďže dané služby môžu byť v sieti zvýhodnené oproti iným službám.

Základná požiadavka DS-TE je schopnosť vykonávať samostatné rezervácie prenosovej kapacity pre rôzne prevádzkové triedy. Z toho vyplýva potreba sledovania koľko prenosovej kapacity je dostupnej pre každý typ prevádzky na všetkých smerovačoch v sieti v každom čase. Pre to boli pre DS-TE definované pojmy ako typ triedy, TE trieda, obmedzenie prenosovej kapacity a modely obmedzenia prenosovej kapacity. [9]

CT predstavuje skupinu prevádzkových trunkov (prevádzkový trunk predstavuje agregáciu prevádzkových tokov patriacich do rovnakej triedy, ktoré sú posielané po rovnakej ceste [26]) na základe ich QoS hodnôt, aby zdieľali rovnakú rezerváciu prenosovej kapacity. Jeden CT môže reprezentovať viacero tried. TE-triedy reprezentujú kombináciu medzi CT a atribútmi prednostných priorít (priorita zostavenia a udržania LSP). Atribúty prednostných priorít si zachovávajú svoju pôvodnú funkcionality a nie sú ovplyvňované CT, môže sa stať teda, že LSP1 bude mať pred LSP2 prednostné právo zostavenia LSP, ak je jej priorita zostavenia LSP1 vyššia (číselne nižšia) ako priorita udržania LSP2 bez ohľadu na CT oboch LSP. BCM určuje vzťah medzi CT a Obmedzením prenosovej kapacity (BC – Bandwidth Constraint), kde BC predstavuje percentuálny limit prenosovej kapacity liniek, ktorý môže využívať daný CT. BC modely teda predstavujú mechanizmy alokovania prenosovej kapacity výstupnej linky v rámci sietí MPLS (DS-TE). DS-TE musí mať schopnosť podporovať viacero BCM. Na základe požadovanej implementácie musí vedieť podporovať jeden BCM v rámci celej siete, alebo viacero BCM na rôznych linkách. [10]

## 5 Mechanizmy alokovania prenosovej kapacity

Alokovanie prenosovej kapacity zahŕňa mechanizmy, ktoré prerozdeľujú dostupnú kapacitu  $C$  medzi  $x$  rôznych entít. Ako je táto kapacita rozdelená závisí od riadiaceho mechanizmu. Každá entita  $x \in \langle 0, X-1 \rangle$  obdrží časť  $C_x$  z  $C$ . Typicky (ak nie je dovolená nadmerná rezervácia, t.j. oversubscription) potom platí, že:

$$\sum_{x=0}^{X-1} C_x = C \quad (5)$$

Problematika alokovania prenosovej kapacity môže byť rozdelená do dvoch základných kategórií. Prvá kategória zahŕňa mechanizmy, ktoré alokujú prenosovú kapacitu v rámci jednej výstupnej linky sieťového zariadenia. Druhá kategória obsahuje mechanizmy, ktoré sa pozerajú na



problematiku alokovania prenosovej kapacity ako na globálny sieťový problém a pomocou vhodných metód smerovania sa snažia zefektívniť využitie celkovej dostupnej prenosovej kapacity v rámci siete.

Rôzne sieťové technológie používajú rôzne postupy pri alokovaní prenosovej kapacity. Táto práca sa zameriava na oba aspekty alokovania prenosovej kapacity v sieťach MPLS. Používané mechanizmy na optimalizovanie alokovania prenosovej kapacity v MPLS sieťach predstavujú smerovanie na základe obmedzení (CBR) a modely obmedzenia prenosovej kapacity (BCM).

### 5.1 Modely obmedzenia prenosovej kapacity

Ako bolo definované v kapitole 4.2, BC modely určujú vzťah medzi typom triedy (CT) a obmedzením prenosovej kapacity (BC). Pre MPLS siete sa vytvorilo niekoľko rôznych BC modelov. Mimo troch základných a IETF štandardizovaných modelov MAM [11], MAR [12] a RDM [13] sa vytvárajú ďalšie, ktoré sa snažia dosiahnuť optimálnejšiu výkonnosť. [14] [15] [16] [17] [18]

MAM (Maximum Allocation Model) je najintuitívnejší BC model, keďže mapuje jedno BC do jedného CT. Z praktického hľadiska je prenosová kapacita linky rozdelená medzi rôzne triedy.

MAR (Maximum Allocation with Reservation Model) je model podobný MAM v tom, že alokuje maximálnu prenosovú kapacitu pre každý CT. Avšak, CT môžu prekročiť túto hodnotu pri stave bez zahľtenia, pričom sa vrátia k pôvodnej alokovanej hodnote, ak zahľtenie nastane.

RDM (Russian Dolls Model) vylepšuje efektívnosť modelov MAM a MAR tým, že dovoľuje jednotlivým CT zdieľať prenosovú kapacitu. V tomto modeli je CT7 prevádzka s najstriktejšími QoS požiadavkami a CT0 je best effort prevádzka. Stupeň zdieľania sa nachádza medzi dvoma extrémami. Na jednej strane je BC7 fixné percento prenosovej kapacity linky, ktorá je rezervovaná len pre prevádzku z CT7. Na druhej strane BC0 reprezentuje celú prenosovú kapacitu linky a je zdieľaná medzi všetky CT. Medzi týmito dvoma extrémami je možný rôzny stupeň zdieľania. BC6 pojíma prevádzku z CT7 a CT6, BC5 z CT7. CT6 a CT5, atď.

### 5.2 CBR algoritmy

Smerovanie na základe obmedzení (popísané v kapitole 4.1.2) a prislúchajúce CBR algoritmy využíva rôzne obmedzenia (ako QoS parametre a administratívne požiadavky) ako základ svojich smerovacích rozhodnutí. Medzi základné takéto algoritmy patrí CSPF, ktorý predstavuje rozšírenie SPF používaného v OSPF, kde tento algoritmus najskôr vylúči všetky cesty, ktoré nevyhovujú prichádzajúcej požiadavke a následne určí najkratšiu cestu k cieľu. Okrem CSPF existuje niekoľko iných CBR algoritmov, v nasledujúcich podkapitolách definujem niektoré z nich.

WSP (Widest Shortest Path) algoritmus vyberá prijateľnú cestu s minimálnym počtom liniek, pričom pri viacerých takýchto cestách vyberá tú s najväčšou zostatkovou (nerезervovanou) prenosovou kapacitou, čiže nezaťažuje ďalej vysoko zaťažené linky. [19]

SWP (Shortest Widest Path) na rozdiel od WSP vyberá cestu najskôr na základe najväčšej zostatkovej (nerезervovanej) prenosovej kapacity a ak je takýchto ciest viacero vyberie tú, ktorá obsahuje najnižší počet skokov. [19]

MIRA (Minimum Interference Routing Algorithm) sa snaží smerovať nové spojenie takou cestou, ktorá čo najmenej zasahuje do možných budúcich požiadaviek. Algoritmus sa snaží pri vyberaní cesty obísť kritické linky, ktoré predstavujú linky, ktoré môžu obmedziť počet tokov jedného alebo viacerých párov vstupných a výstupných uzlov. [20]

DORA (Dynamic online routing algorithm) je odlišný od MIRA v tom, že MIRA sleduje počet tokov a DORA počet ciest vedúcich cez linku. [21]

PBR (Profile based Routing Algorithm) je CBR algoritmus založený na riadení prístupu na základe očakávaných tried tokov, pomenovaných profily, ktoré požadujú vstup do domény. PBR najskôr rozdeľuje zdroje domény medzi profily a potom prijíma toky na základe ich požiadaviek a zvyškovej kapacity ich profilu. Hlavným cieľom PBR je maximalizovať prijatie tokov. [22]

FRA (Fuzzy Routing Algorithm) využíva na svoju činnosť fuzzy logiku. Cieľom FRA je 1) maximalizovať zvyškovú prenosovú kapacitu na linke úzkeho hrdla, 2) maximalizovať zvyškovú prenosovú kapacitu na ostatných linkách, 3) minimalizovať dĺžku cesty. Algoritmus pomocou fuzzy logiky kombinuje tieto 3 kritéria do jedného na základe ktorého vyberá linky na zriadenie cesty začínajúc zo zdrojového uzla. [23]

## 6 Fuzzy logika

Fuzzy logika predstavuje techniku, ktorá sa snaží systematicky a matematicky emulovať ľudské myslenie a rozhodovanie. Umožňuje využiť empirické znalosti a heuristiku reprezentovanú v „AK/POTOM“ pravidlách a preniesť ju do funkčných blokov. Fuzzy logika tak ponúka intuitívnu cestu ako implementovať riadiace systémy, rozhodovacie a diagnostické systémy v rôznych priemyselných odvetviach. [24]

Za seminárnu prácu v tejto oblasti sa považuje [25], kde bola predstavená teória, ktorej objekty, fuzzy množiny, sú množiny, s ohraničeniami, ktoré nie sú presné. Príslušnosť k danej množine nie je daná potvrdením, alebo zamietnutím, ale je vecou miery. Fuzzy logika sa teda nespolieha na klasickú dvojstavovú logiku, kde ak A je fuzzy množina a x je relevantný objekt, tak tvrdenie, že x patrí do A množiny nemusí byť pravdivé ani nepravdivé ako pri klasickej logike, ale môže byť pravdivé len do určitej miery. Na vyjadrenie miery príslušnosti k fuzzy množine, ako aj miery pravdivosti sa potom využíva číselná hodnota v uzavretom intervale  $<0,1>$ . [26]

## 7 Ciele dizertačnej práce

Na základe naštudovanej problematiky alokovania prenosovej kapacity v sieťach MPLS z hľadiska modelov obmedzenia prenosovej kapacity, ako aj algoritmov smerovania na základe obmedzení boli ciele predloženej dizertačnej práce stanovené nasledovne:

- Návrh nového modelu obmedzenia prenosovej kapacity (BCM), ktorý optimalizuje alokovanie prenosovej kapacity výstupnej linky z hľadiska dosiahnutých QoS parametrov.
- Návrh algoritmu smerovania na základe obmedzení (CBR) s implementovaním fuzzy logiky v smerovacích rozhodnutiach s cieľom zefektívniť využitie prostriedkov siete a zabezpečenia QoS parametrov pre rôzne druhy prevádzky.
- Overenie funkčnosti navrhnutého BC modelu a CBR algoritmu prostredníctvom simulácií v niektorom z dostupných simulačných programov.
- Vyhodnotenie navrhnutého BC modelu a CBR algoritmu z hľadiska dosiahnutých výkonnostných parametrov v porovnaní s používanými BC modelmi, resp. CBR algoritmami.

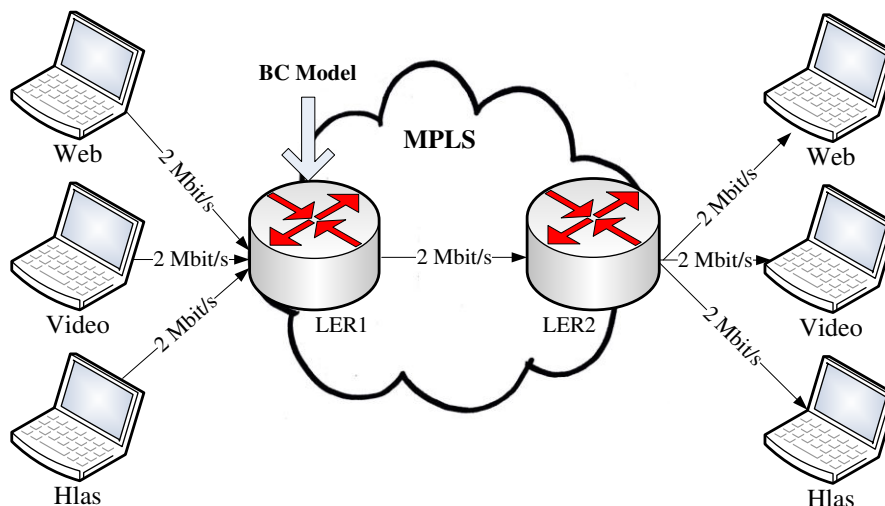
## 8 Návrh nového modelu obmedzenia prenosovej kapacity

Cieľom tejto kapitoly je návrh nového modelu obmedzenia prenosovej kapacity (BCM) na základe optimalizovania jedného zo štandardizovaných BC modelov. Pred samotným návrhom boli tieto modely porovnané a vyhodnotené z hľadiska dosiahnutých parametrov. Na základe týchto výsledkov bol potom určený najlepší model, ktorý bol ďalej optimalizovaný.

### 8.1 Vyhodnotenie výkonnosti používaných BC modelov

Ako bolo spomenuté v kapitole 4.1, IETF definuje tri BC modely a to MAM, RDM a MAR. MAM definuje pre každý CT jeho vlastné BC, čím výstupnú kapacitu presne segmentuje na časti patriace rozličným CT, pričom tieto CT ale nemôžu využívať prípadnú nevyužitú prenosovú kapacitu iných CT. RDM umožňuje zdieľanie prenosovej kapacity a to takým spôsobom, že nevyužitá kapacita vyšších priorít môže byť využitá tými nižšími. MAR model zas umožňuje jednotlivým CT prekročiť ich BC, ak to umožňuje prednastavená prahová hodnota prenosovej kapacity (9).

Dané tri modely boli porovnané prostredníctvom NS-2 (Network Simulator 2) na topológii znázornenej na Obr. 1.



**Obr. 1.** Topológia siete.

Úzke hrdlo siete je vytvorené na vstupnom LER1, na ktorom bude implementovaný konkrétny BC model. V sieti sú použité tri CT pre webovú, video a hlasovú prevádzku, pričom hlasová prevádzka má najvyššiu prioritu (CT2), video prevádzka strednú (CT1) a webová prevádzka najnižšiu (CT0). Webová prevádzka je generovaná prostredníctvom ON/OFF generátora s exponenciálnym rozdelením. Video a hlasová prevádzka je generovaná generátorom konštantnej prevádzky. Zo simulácií vyplynulo nasledovné.

MAM model je najjednoduchší model, ktorý izoluje jednotlivé CT v presne určených medziach svojho BC, pričom neumožňuje zdieľanie dostupnej prenosovej kapacity medzi CT. Tým pádom môže aj pri nezahľtených sieťach dochádzať k zbytočným stratám a oneskoreniu. Výkonnosť MAM modelu by mohla byť lepšia, napr. pri implementovaní nadmerného prerozdelenia zdrojov (oversubscription), t.j. suma všetkých BC by presahovala maximálnu kapacitu linky. Potom by mohli jednotlivé CT využívať väčšie BC a nemuselo by dochádzať k degradácii QoS parametrov. Takýto prístup má ale zlý vplyv na prevádzku CT0 pri vysokom zaťažení, kde tá môže byť na úkor prívysokých BC CT vyšších priorít potláčaná.

RDM umožňuje lepšie využívanie dostupnej prenosovej kapacity ako MAM. CT nižších priorít môžu využívať zostatkovú prenosovú kapacitu od CT vyšších priorít, keď ju tie nevyužívajú. Čím nižšiu prioritu má daný CT, tým teda môže teoreticky využívať väčšiu prenosovú kapacitu. RDM však neumožňuje požičiavanie prenosovej kapacity v opačnom smere a teda CT najvyššej priority môže využívať prenosovú kapacitu, ktorá je určená jeho BC. Tak ako pri MAM, aj pri RDM by sa mohol tento problém pri niektorých situáciách zmenšiť nadmerným prerozdeľovaním zdrojov, najmä pre najvyššie priority.

MAR ponúka väčšiu flexibilitu pri definovaní BC jednotlivých CT. Oproti MAM, tu BC neurčuje maximálnu prenosovú kapacitu, ktorú daný CT môže využívať, ale BC tu určuje hranicu, po ktorú daný CT má garantovanú prenosovú kapacitu, pričom prenosovú kapacitu mimo tejto hranice môže využívať, ak to umožňuje aktuálne nerezervovaná kapacita a prednastavená hodnota  $B_{prah}$ . Hodnotou  $B_{prah}$  MAR teda obmedzuje tie CT, ktoré prekročia svoje BC. Oproti RDM, teda aj CT najvyššej priority má možnosť využiť kapacitu mimo svojho BC.

Z týchto dôvodov bol určený MAR ako najlepší z týchto troch BC modelov a bol ďalej optimalizovaný v novom A-MAR modeli.

## 8.2 Návrh nového BC modelu – A-MAR

MAR dokáže prekonať MAM a RDM v dosiahnutí požadovaných QoS parametrov. Problém pri MAR môže spôsobiť optimálne nastavenie hodnoty prahovej prenosovej kapacity ( $B_{prah}$ ) ako aj fakt, že okrem CT<sub>0</sub> sú všetky CT obsluhované za rovnakých podmienok. Na adresovanie týchto problémov som vytvoril nový BCM, nazvaný Adaptive Maximum Allocation with Reservation Model (A-MAR). A-MAR má dva hlavné ciele:

1. Urobiť  $B_{prah}$  hodnotu flexibilnou.

## 2. Diverzifikovať CT vyšších priorít.

Prvý cieľ by mal odstrániť problém s rozhodovaním, akú hodnotu nastaviť pre  $B_{prah}$ . Pri nastavení malej hodnoty  $B_{prah}$  sa znižuje rozdiel medzi CT s vyššou a nižšou prioritou, čo môže mať za následok zamietnutie dôležitejších tokov na úkor menej dôležitých. Ak sa ale nastaví vysoká hodnota  $B_{prah}$ , môže nastať k zbytočnému odmietnutiu prístupu tokov s nízkou prioritou, aj keď je v sieti ešte dostatok prostriedkov.

Druhý cieľ adresuje skutočnosť, kde so všetkými CT, až na  $CT_0$ , je zaobchádzané rovnako. Pri klasickom MAR môžu tieto CT prekročiť ich BC za rovnakých podmienok a pri rovnakej  $B_{prah}$  hodnote. Je preto na mieste zvýhodniť CT vyšších priorít od tých nižších.

### 8.2.1 Definovanie A-MAR

Nová požiadavka  $B_{pož}$ , patriaca do  $CT_i$  na linke  $k$  je pripustená, ak sú splnené nasledujúce podmienky:

Pre LSP s vysokou a normálnou prioritou  $CT_i$ :

- Ak  $B_{rez,i,k} \leq BC_{i,k}$ , potom pripusti, ak:

$$B_{pož} \leq B_{nerez,k} \quad (1)$$

- Ak  $B_{rez,i,k} > BC_{i,k}$ , potom pripusti, ak:

$$B_{pož} \leq B_{nerez,k} - B_{prah,i} \quad (2)$$

Pre LSP s nízkou prioritou:

- Pripusti, ak:

$$B_{pož} \leq B_{nerez,k} - B_{prah} \quad (3)$$

Kde  $B_{prah}$  hodnota je definovaná nasledovne:

$$B_{prah} = \begin{cases} 0, & \text{ak } \mu < \mu_1 \\ (\mu - \mu_1) \frac{B_{prah,max}}{(\mu_2 - \mu_1)}, & \text{ak } \mu_1 < \mu < \mu_2 \\ B_{prah,max}, & \text{if } \mu_2 < \mu \end{cases} \quad (4)$$

$$B_{prah,max} = C - \sum_{i=0}^{N-1} BC_{i,k} \quad (5)$$

$$B_{prah,i} = \frac{B_{prah}}{i} \quad (6)$$

$B_{prah}$  hodnota sa teda odvíja od hodnoty aktuálneho využitia výstupnej linky  $\mu$ , namiesto jednej preddefinovanej hodnoty. Pri nízkom využití linky je táto hodnota nastavená na  $B_{prah} = 0$  bit/s, aby nedochádzalo k zbytočnému blokovaniu tokov, aj keď je ešte dostatok voľnej kapacity. Táto hodnota začína postupne narastať, pri minimálnom využití  $\mu_1$  až kým nedosiahne maximálnu hodnotu  $B_{prah,max}$  pri maximálnom využití  $\mu_2$ .

Hodnota  $B_{prah,max}$  je zvolená tak, aby suma všetkých BC spočítaná s  $B_{prah,max}$  bola rovná kapacite linky  $C$ . S takouto flexibilnou hodnotou  $B_{prah}$  dokáže sieť ochrániť CT s vyššou prioritou pri vysokom využití linky, ale pri nízkom využití zbytočne neblokuje toky najnižšej priority, čo predstavuje prvý cieľ A-MAR.

Riešenie druhého cieľa A-MAR, definované v (54), hovorí o tom, že výsledná hodnota  $B_{prah,i}$  závisí takisto od priority daného CT. CT s najnižšími dvoma prioritami,  $CT_0$  a  $CT_1$  používajú rovnakú hodnotu  $B_{prah}$ , pretože  $CT_1$  je zvýhodnená oproti  $CT_0$  v tom, že pri neprekročení  $BC_1$  podmienka prijatia nepočíta s  $B_{prah}$  ( $BC_0 = 0$  bit/s, takže podmienka prijatia  $CT_0$  ráta vždy aj s  $B_{prah}$ ).  $CT_i$  s vyššou prioritou ( $i = 2, \dots, 7$ ) používajú potom len  $i$ -tinu z vypočítanej hodnoty  $B_{prah}$ , čím sa zabezpečí, že so zvyšujúcou sa prioritou CT sa znižuje hodnota  $B_{prah}$ , s ktorou musia dané CT rátať pri prekročení BC.

### 8.2.2 Overenie výkonnosti A-MAR

Navrhnutý A-MAR BC model bol odsimulovaný v NS-2 na rovnakej topológii, ako na Obr. 1. Znovu sú použité tri CT,  $CT_2$  pre hlas,  $CT_1$  pre video a  $CT_0$  pre webovú prevádzku. Kvôli lepšej vizualizácii výsledkov boli pre všetky druhy prevádzky použité generátory konštantnej prevádzky. Prenosové rýchlosti, ako aj začiatok a koniec jednotlivých tokov je znázornený v Tab. 1.

**Tab. 1.** Špecifikácie prevádzkových tokov použitých v simulácii.

Tok	Prenosová rýchlosť [kbit/s]	Čas príchodu [s]	Koniec [s]
Web1	250	1	40
Web2	250	10	40
Web3	300	22	40
Web4	500	31	40
Video1	805	4	28
Video2	300	13	40
Video3	400	37	40
Hlas1	405	7	19
Hlas2	300	16	40
Hlas3	450	25	40
Hlas4	400	34	40

Pre simuláciu boli nastavené nasledovné parametre A-MAR:

- $BC_0 = 0$  bit/s
- $BC_1 = 800$  kbit/s
- $BC_2 = 400$  kbit/s
- $\mu_1 = 50$  %
- $\mu_2 = 90$  %
- $B_{prah,max} = 2000 - (800 + 400) = 800$  kbit/s

A-MAR je porovnaný s klasickým MAR modelom pri troch rôznych nastaveniach  $B_{prah}$  hodnoty. Porovnané BC modely a nastavenia ich  $B_{prah}$  hodnôt sú znázornené v Tab. 2.

**Tab. 2.** Použité BC modely a ich korešpondujúce  $B_{prah}$  hodnoty.

BCM	$B_{prah}$ [kbit/s]
MAR1	0
MAR2	800
MAR3	400
A-MAR	0 – 800

### 8.2.3 Výsledky simulácie

Jednotlivé MAR modely s rôzne nastavenou hodnotou  $B_{prah}$  sú porovnané s navrhnutým A-MAR na základe prijatia/blokovania prichádzajúcich tokov. Najskôr sú predstavené simulačné výsledky MAR modelov a následne A-MAR modelu s hlbším priblížením funkcionality A-MAR.

#### 8.2.3.1 MAR modely

Čím nižšia je  $B_{prah}$  nastavená, tým viac pomáhame CT s najnižšou prioritou, čiže pri nastavení  $B_{prah} = 0$  kbit/s môžeme očakávať najviac prijatých tokov webovej prevádzky a takisto žiadne obmedzenia pre toky z CT, ktoré už prekročili svoje BC. Pri MAR1, všetky toky webovej prevádzky boli prijaté. To je vďaka tomu, že môžu využívať všetku dostupnú kapacitu bez  $B_{prah}$  hodnoty, ktorá by ich pri tom obmedzovala. Dôsledkom ich prijatia je potom blokovanie tokov vyšších priorít, menovite Video2, Video3, Hlas2 a Hlas3, ktoré síce tiež mohli využívať všetku dostupnú kapacitu, ale prijatie tokov webovej prevádzky spôsobilo zvýšenie záťaže, ktorá neumožňovala ich prijatie. Čím je nastavená vyššia hodnota  $B_{prah}$ , tým viac „trestáme“ prekračovanie BC a takisto viac obmedzujeme CT s najnižšou prioritou.

Oproti MAR1 sú pri MAR2 prijaté toky Video3 a Hlas3, keďže vysoká hodnota  $B_{prah}$  mala za následok blokovanie troch tokov webovej prevádzky, aj keď bolo v sieti dostatok voľnej kapacity. Napríklad, v 31. Sekunde, Web4 tok bol blokovaný pri aktuálne voľnej kapacite takmer 1300 kbit/s, ale po odrátaní 800 kbit/s, ktoré daný tok nemohol využiť a pri jeho požiadavkách 500 kbit/s, bol daný tok blokovaný.

MAR3 využíva strednú hodnotu nastavenia  $B_{prah}$ . Daná hodnota predstavuje kompromis medzi MAR1 a MAR2 a mal by predstavovať optimálne riešenie, ktoré zachováva preferenčné zaobchádzanie CT vyšších priorít, pričom zbytočne neblokuje toky z CT<sub>0</sub>. MAR3 oproti MAR1 prijíma navyše Video3

tok za cenu blokovania Web2 toku. Oproti MAR2 zase dokáže prijať o dva toky webovej prevádzky navyiac za cenu blokovania Hlas4 toku.

### 8.2.3.2 A-MAR

A-MAR začína, tak ako je popísané v (4), s  $B_{prah} = 0$  bit/s. Vďaka tomu sú toky Web1 a Video1 prijaté bez problémov, pričom po prijatí Video1 toku došlo k prekročeniu  $BC_1$ , takže nasledujúce video toky musia splniť (2) podmienku, aby mohli byť pripustené. Takisto po prijatí Video1 toku sa zvýšilo využitie linky nad minimálne využitie  $\mu_1 = 50\%$ , čo spôsobilo zvýšenie  $B_{prah}$  hodnoty.

Nasledujúci Hlas1 tok je rovnako prijatý, čím sa zvýši  $B_{prah}$  hodnota na 460 kbit/s. Táto hodnota má potom za následok blokovanie tokov Web2 (štart v 10. sekunde) a Video2 (štart v 13. sekunde). Nasledujúci tok Hlas2 má síce rovnako veľké požiadavky ako Video2 tok (300 kbit/s) a takisto musí prejsť podmienkou (2) (keďže Hlas1 prekročil  $BC_2$ ), ale keďže pri danej podmienke používa polovičnú hodnotu  $B_{prah}$  (6), je Hlas2 tok prijatý. Po jeho prijatí sa zvýši  $B_{prah}$  na 760 kbit/s a následne, po skončení vysielania Hlas1 toku (v 19. sekunde), sa zníži na 355 kbit/s. Táto hodnota spôsobí blokovanie Web3 toku (štart v 22. sekunde).

Hlas3 tok je prijatý, lebo v čase jeho príchodu je hlasová prevádzka v medziach  $BC_2$  a jeho prijatie teda nezávisí od  $B_{prah}$  hodnoty. Po jeho prijatí sa  $B_{prah}$  zvýši na  $B_{prah,max}$  hodnotu, 800 kbit/s, a následne sa táto hodnota zníži na  $B_{prah} = 0$  bit/s po skončení vysielania Video1 toku. Vďaka nízkemu využitiu a korešpondujúcej nulovej hodnote  $B_{prah}$  je prijatý Web4 tok, ktorým sa zvýši  $B_{prah}$  na 500 kbit/s.

Hlas4 tok (štart v 34. sekunde) je blokovaný, lebo predchádzajúce hlasové toky prekročili  $BC_2$  a musí teda splniť podmienku (2) na pripustenie.  $CT_2$ , do ktorého patrí hlasová prevádzka síce používa polovičnú hodnotu,  $B_{prah,2} = 250$  kbit/s, no aj táto hodnota neumožňuje prijatie Hlas4 toku. Ďalší prichádzajúci tok, Video3 má rovnaké požiadavky ako Hlas4 tok (400 kbit/s), ale keďže video toky neprekročili  $BC_1$ , tak Video3 tok musí splniť len podmienku (1), ktorá má za následok jeho prijatie.

### 8.2.3.3 Vyhodnotenie výsledkov simulácie a A-MAR modelu

A-MAR a tri odsimulované MAR modely boli porovnané na základe prijatia tokov v Tab. 3, kde 'áno' značí prijatie prichádzajúceho toku a 'nie' značí blokovanie prichádzajúceho toku. I keď bolo v kapitole 8.1 naznačené, že MAR model dokáže výkonnostne prekonať modely MAM a RDM, sú v Tab. 3 zahrnuté aj dosiahnuté výsledky pre modely MAM a RDM.

**Tab. 3.** Porovnanie BC modelov na základe prijímania prevádzkových tokov.

Tok	MAR1	MAR2	MAR3	A-MAR	MAM	RDM
Web1	áno	áno	áno	áno	áno	áno
Web2	áno	nie	nie	nie	áno	áno
Web3	áno	nie	áno	nie	áno	áno
Web4	áno	nie	áno	áno	nie	áno, do 37. s
Video1	áno	áno	áno	áno	nie	áno
Video2	nie	nie	nie	nie	áno	áno, do 16. s
Video3	nie	áno	áno	áno	áno	áno
Hlas1	áno	áno	áno	áno	nie	nie
Hlas2	nie	nie	nie	áno	áno	áno
Hlas3	nie	áno	áno	áno	nie	nie
Hlas4	áno	áno	nie	nie	nie	nie

Aby mohli byť dané modely porovnateľné z hľadiska prijatia/blokovania tokov, sú implementované prednostné priority v modeloch MAM a RDM a teda dochádza k blokovaniu tokov, ak príslušné BC nedokáže garantovať kapacitu toku z príslúchajúceho CT. Nastavenie  $BC_2$  a  $BC_1$  pre MAM a RDM je rovnaké, ako pri MAR modeloch, t.j.  $BC_2 = 400$  kbit/s a  $BC_1 = 800$  kbit/s,  $BC_0$  je nastavené na 800 kbit/s, aby súčet všetkých BC dosahoval maximálnu prenosovú kapacitu linky. Pri RDM modeli môže dochádzať k situáciám, kde tok z CT nižšej priority po požiadaní prenosovej kapacity, musí túto kapacitu uvoľniť po príchode toku z CT vyššej priority. V Tab. 3 je prijatie takýchto tokov označené aj časom, kedy musela byť táto kapacita uvoľnená.

Najlepší BC model by mal byť schopný prijať čo najviac tokov so zameraním sa na CT s vyššími prioritami. Na vyhodnotenie daných modelov som využil nasledovný vzťah popisujúci váhu prijatých tokov daným BC modelom:

$$W_{BCM} = \sum_{i=0}^N T_i(i+1) \quad (7)$$

Kde  $T_i$  predstavuje počet prijatých tokov z  $CT_i$  ( $i = 0, \dots, N$ ). Pre použité modely sa táto hodnota vypočíta nasledovne:

$$W_{MAR1} = 4 * 1 + 1 * 2 + 2 * 3 = 12 \quad (8)$$

$$W_{MAR2} = 1 * 1 + 2 * 2 + 3 * 3 = 14 \quad (9)$$

$$W_{MAR3} = 3 * 1 + 2 * 2 + 2 * 3 = 13 \quad (10)$$

$$W_{A-MAR} = 2 * 1 + 2 * 2 + 3 * 3 = 15 \quad (11)$$

$$W_{MAM} = 3 * 1 + 2 * 2 + 1 * 3 = 10 \quad (12)$$

$$W_{RDM} = 4 * 1 + 3 * 2 + 1 * 3 = 12 \quad (13)$$

Najvyššiu hodnotu dosiahol A-MAR, keďže sa síce zameriava na vyššie priority, ale pri zníženom využití linky umožňuje využiť dostupnú kapacitu aj tokom s najnižšou prioritou. Takáto úroveň adaptability sa s klasickým MAR modelom dosiahnuť nedá, kde ten je buď benevolentný k prekračovaniu BC a nelimituje prevádzku najnižšej priority (MAR1), alebo je striktné zameraný na prevádzku vysokej priority, kde podmienka prijatia tokov najnižšej priority je obmedzená veľkou hodnotou  $B_{prah}$  (MAR2). MAR3 ponúka najlogickejšie nastavenie  $B_{prah}$ , ale takisto nedokáže reagovať na meniace sa zaťaženie linky.

MAM model dosahuje najhoršie výsledky kvôli striktnej separácii dostupnej kapacity medzi CT bez možnosti akéhokoľvek zdieľania dostupnej kapacity. RDM model síce prijal najvyšší počet tokov (osem), ale dva z nich museli byť časom blokováné kvôli tokom z CT s vyššou prioritou (Video2 kvôli Hlas2 a Web4 kvôli Video3). V porovnaní s MAR modelmi a A-MAR si takisto možno všimnúť, že MAM a RDM nedokážu reagovať na neoptimálne nastavenie jednotlivých BC, čo má za následok blokovanie tokov s najvyššou prioritou.

## 9 Návrh nového algoritmu smerovania na základe obmedzení

Cieľom tejto kapitoly je návrh nového algoritmu smerovania na základe obmedzení (CBR), ktorý by zbytočne nezahľcoval preťažované linky v sieti, pričom by vykonával smerovacie rozhodnutie s ohľadom na rôzne požiadavky rôznych druhov prevádzky. Daný algoritmus by mal pracovať s viacerými obmedzeniami a aby ich mohol súčasne použiť pri výpočte najlepšej cesty, implementuje navrhnutý CBR algoritmus fuzzy logiku v smerovacích rozhodnutiach.

### 9.1 Návrh nového CBR algoritmu – FCBA

Nový CBR algoritmus, nazvaný Fuzzy Class Based Algorithm (FCBA) má nasledovné ciele:

- Normalizovanie vybraných obmedzení (metriek) do jedného smerovacieho rozhodnutia.
- Smerovacie rozhodnutia na základe požiadaviek prevádzkovej triedy a/alebo samotnej siete.

Fuzzy logika predstavuje ideálny prostriedok, ako vykonať smerovacie rozhodnutia pri použití viacerých obmedzení. Dané obmedzenia sú prostredníctvom príslušných členských funkcií normalizované v intervale  $\langle 0, 1 \rangle$  a môžu teda byť použité v jednom smerovacom rozhodnutí na základe preddefinovaného fuzzy pravidla. Podobný princíp bol použitý v FRA algoritme.

FCBA však vykonáva smerovacie rozhodnutia na základe triedy pridelením rôznych váh obmedzení jednotlivým členským funkciám definujúce dané obmedzenia. Týmto spôsobom možno ovplyvniť dôležitosť jednotlivých obmedzení pre rôzne druhy prevádzky.

FCBA využíva nasledovné tri obmedzenia (metriky) pri smerovacom rozhodnutí:

1. **Počet skokov:** Udáva počet skokov ku koncovému uzlu siete MPLS. Cieľom by malo byť vybrať čo najkratšie cesty.
2. **Dostupná prenosová kapacita linky úzkeho hrdla:** Udáva aktuálnu prenosovú kapacitu linky s najnižšou dostupnou kapacitou danej cesty. Takéto linky, ktoré majú nízku prenosovú kapacitu by mali byť obídene.
3. **Využitie cesty:** Udáva percentuálne využitie danej cesty. Pre efektívne využívanie zdrojov siete by mali byť vybrané cesty s nízkym využitím.

Na rozdiel od WSP a SWP algoritmov, FCBA nevykonáva smerovacie rozhodnutie najskôr na základe jednej metriky a potom zo zvyšnej množiny ciest urobí smerovacie rozhodnutie na základe druhej a tretej metriky. Namiesto toho sú tieto tri metriky skombinované prostredníctvom fuzzy logiky v jednom smerovacom rozhodnutí.

Každá metrika je definovaná svojou členskou funkciou, ktorá konvertuje reálne hodnoty (percentuálne využitie cesty) na ich zodpovedajúce fuzzy hodnoty (v intervale  $\langle 0, 1 \rangle$ ). Vďaka tomu FCBA nemusí rátať s rôznymi jednotkami daných metrík a ráta iba s ich normalizovanými hodnotami. Pre všetky definované členské funkcie platí, že čím vyššiu hodnotu daná funkcia dosiahne, tým sa aktuálna cesta javí optimálnejšie z pohľadu aktuálnej metriky.

Počet skokov je reprezentovaný členskou funkciou  $a_p$  nasledovne:

$$a_p = 1 - \frac{h_{max} + 1}{h} \quad (14)$$

Kde  $h$  reprezentuje aktuálny počet skokov cesty  $p$ . Táto členská funkcia dosahuje najvyššiu hodnotu ( $= 1$ ) pri jedinom skoku ku koncovému uzlu siete MPLS (čiže vstupný LER a výstupný LER sú priamo spojené). Funkcia lineárne klesá, až do hodnoty  $h_{max} + 1$ , kde  $h_{max}$  reprezentuje počet skokov najdlhšej cesty medzi vstupným a výstupným uzlom siete.

Dostupná prenosová kapacita linky úzkeho hrdla je reprezentovaná členskou funkciou  $b_p$  nasledovne:

$$b_p = b \frac{1}{b_{max}} \quad (15)$$

Kde  $b$  predstavuje aktuálne dostupnú prenosovú kapacitu linky úzkeho hrdla pre cestu  $p$ . Funkcia lineárne stúpa, až po  $b_{max}$ , ktoré predstavuje maximálnu možnú dostupnú kapacitu linky v danej sieti. Hodnota  $b_p$  je vypočítavaná vždy pre linku s najnižšou kapacitou danej cesty a najvyššiu hodnotu ( $= 1$ ) nadobúda pre tie cesty, ktoré pozostávajú z liniek, ktoré majú najvyššiu prenosovú kapacitu z liniek v danej sieti.

Využitie cesty je popísané členskou funkciou  $c_p$ , kde:

$$c_p = \begin{cases} 0, ak c'_p < 0 \\ \frac{c'_p}{L}, inak \end{cases} \quad (16)$$

$$c'_p = \sum_{l_\mu \in p} l_\mu \quad (17)$$

$$l_\mu = \begin{cases} 1, ak \mu_l < \mu_{min} \\ 1 - \frac{\mu_l - \mu_{min}}{\mu_{avg} - \mu_{min}}, ak \mu_{min} < \mu_l < \mu_{avg} \\ -1 + \frac{\mu_l - \mu_{max}}{\mu_{avg} - \mu_{max}}, ak \mu_{avg} < \mu_l < \mu_{max} \\ 0, ak \mu_l > \mu_{max} \end{cases} \quad (18)$$

$$\mu_{avg} = \frac{\sum_{l=1}^L \mu_l}{L} \quad (19)$$

FCBA najskôr vypočíta priemerné využitie,  $\mu_{avg}$ , všetkých liniek v sieti a následne normalizuje využitia jednotlivých liniek,  $\mu_l$ , funkciou  $l_\mu$ . Kladná hodnota  $l_\mu$  znamená, že daná linka má nižšie využitie ako je priemerné využitie linky v sieti a teda záporná hodnota značí, že daná linka má využitie vyššie ako je  $\mu_{avg}$ . Pre každú cestu je vypočítaná hodnota  $c'_p$ , ktorá dosahuje najvyššiu hodnotu, keď všetky linky danej cesty majú nižšie využitie ako je preddefinované minimálne využitie,  $\mu_{min}$ . Konečná hodnota  $c_p$  je potom normalizovaná hodnota  $c'_p$  v intervale  $\langle 0, 1 \rangle$ . Cieľom  $c_p$  je smerovanie prevádzky cez slabo využívané cesty v sieti.

Pre každú metriku (t.j. jej zodpovedajúcu členskú funkciu) je definovaná váha metriky  $w_{i,c}$ , ktorá pre prevádzkovú triedu s prioritou  $c$  definuje dôležitosť príslušnej metriky  $i$ , pričom platí:

$$\sum_{i=1}^3 w_{i,c} = 1 \quad (20)$$

Pre použité metriky a ich členské funkcie sú teda definované tri váhy metrík:

- $w_{1,c}$ : udáva dôležitosť metriky počtu skokov ( $a_p$ ) pre prevádzkovú triedu s prioritou  $c$ .
- $w_{2,c}$ : udáva dôležitosť metriky dostupnej prenosovej kapacity linky úzkeho hrdla ( $c_p$ ) pre prevádzkovú triedu s prioritou  $c$ .
- $w_{3,c}$ : udáva dôležitosť metriky využitia cesty ( $b_p$ ) pre prevádzkovú triedu s prioritou  $c$ .



Váha  $w_{1,c}$  by mala byť vysoká pre tie prevádzkové triedy, ktoré požadujú nízke hodnoty oneskorenia (napr. hlasová prevádzka). Pre takéto triedy by mala byť váha  $w_{2,c}$  nízka, čo umožní daným triedam využiť krátke cesty s nízkou prenosovou kapacitou linky úzkeho hrdla a na druhej strane limituje prevádzku s toleranciou vyššieho oneskorenia v používaní takýchto ciest. Váha  $w_{3,c}$  by mala byť vysoká pre prevádzkové triedy s toleranciou vyššieho oneskorenia (webová prevádzka), čím sa zabezpečí, že daná prevádzka bude viac využívať dlhšie a málo využívané cesty v sieti, čím sa lepšie distribuuje zaťaženie v sieti.

FCBA vykonáva smerovacie rozhodnutia na základe vypočítanej váhy  $cost_p$ , ktorá kombinuje tri použité metriky prostredníctvom modifikovaného OWA operátora zjednotenia. Hodnota  $cost_p$  sa vypočítava pre všetky cesty medzi vstupným a výstupným uzlom siete, pričom je vybratá cesta, ktorá dosiahne najvyššiu hodnotu. Hodnota  $cost_p$  sa na základe vypočítaných členských funkcií a preddefinovaných váh metrik vypočíta nasledovne:

$$cost_p = \beta \max(w_{1,c}a_p, w_{2,c}b_p, w_{3,c}c_p) + (1 - \beta)(w_{1,c}a_p + w_{2,c}b_p + w_{3,c}c_p) \quad (21)$$

$$\beta = \begin{cases} 1, & \text{ak } \mu_{avg} < \mu_1 \\ 1 - \frac{\mu_{avg} - \mu_1}{\mu_2 - \mu_1}, & \text{ak } \mu_1 < \mu_{avg} < \mu_2 \\ 0, & \text{ak } \mu_{avg} > \mu_2 \end{cases} \quad (22)$$

Parameter  $\beta$ , ako bolo spomenuté v kapitole 5.2 predstavuje mieru, ktorou sa OWA operácia podobá na logický OR, alebo AND, pričom čím je  $\beta$  hodnota vyššia, tým sa daná operácia viac podobá na logický OR.

Týmto spôsobom je pri nízkom využití siete viac využívaná ľavá strana rovnice (21) a pri jeho zvyšovaní sa začína viac využívať pravá strana rovnice. Pri nízkom využití siete je prevádzka smerovaná na základe najlepšej metriky (krát váha metriky) a teda každá prevádzková trieda by mala byť smerovaná na základe metriky, ku ktorej má nastavenú najvyššiu váhu metriky. Pri vyššom využití siete sa potom začnú brať viac do úvahy všetky tri metriky a výsledná cesta je najlepším kompromisom medzi nimi.

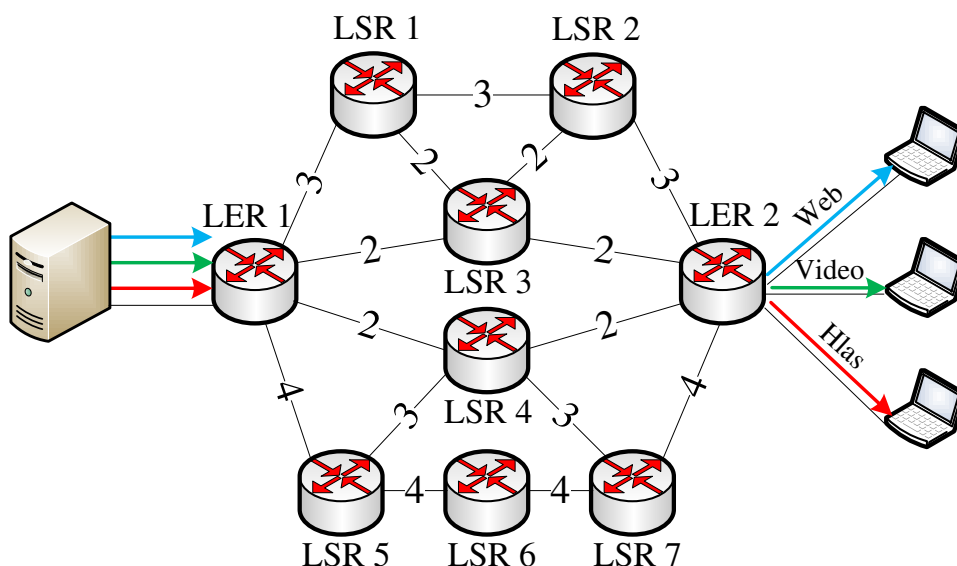
Pri použití ľavej strany (21) môže dochádzať k situácii, keď viacero ciest vykazuje rovnakú hodnotu  $cost_p$ . Pri takejto situácii sa nastaví  $\beta$  na 0, pričom, ak je stále viacero rovnakých ciest z hľadiska  $cost_p$ , tak je výsledná cesta vybraná na základe SPF algoritmu.

Pri veľkom zaťažení siete môže zase nastať situácia, kde FCBA najskôr nenájde žiadnu cestu, ktorá by vyhovovala požiadavkám prichádzajúceho toku. FCBA nevykonáva riadenie prístupu a teda neblokuje takéto toky. Cieľom FCBA pri takýchto situáciách je výber cesty, ktorá neovplyvňuje prevádzkovú triedu s najvyššou prioritou, aby tá mohla byť prenášaná bezstratovo a iba triedy nižších priorit budú ovplyvnené. FCBA teda zo zoznamu ciest vylúči tie, ktoré sa aktuálne aspoň jednou linkou podieľajú na prenose prevádzky s najvyššou prioritou. Zo zvyšných ciest potom FCBA určí tú, ktorá má najvyššiu nerezervovanú prenosovú kapacitu linky úzkeho hrdla, aby prevádzkové triedy nižších priorit boli čo najmenej ovplyvnené. Ak je takýchto ciest viac, potom sa vyberie cesta na základe SPF.

## 9.2 Overenie výkonnosti FCBA

Navrhnutý CBR algoritmus, FCBA, bol vyhodnocovaný prostredníctvom simulácií, vykonaných v simulačnom prostredí NS-2. Sieťová topológia použitá pri simuláciách je znázornená na Obr. 2.

Daná sieť pozostáva z dvoch okrajových LER a siedmich LSR, ktoré spolu tvoria 14 možných ciest medzi zdrojom prevádzky a prijímačom prevádzky. Dané cesty sú spísané v Tab. 4 kvôli referenciám na čísla jednotlivých ciest v nasledujúcich kapitolách. Jednotlivé cesty sa od seba líšia z pohľadu rôznych kapacít liniek (od 2 Mbit/s do 4 Mbit/s), ktoré sú indikované číslami na linkách v Obr. 2, ako aj z pohľadu rôzneho počtu skokov.



**Obr. 2.** Použitá sieťová topológia pri simuláciách.

**Tab. 4.** Možné cesty v sieti.

Uzly medzi LER1 a LER2	Označenie cesty
LSR3	C1
LSR4	C2
LSR1 – LSR2	C3
LSR1 – LSR3	C4
LSR3 – LSR2	C5
LSR4 – LSR7	C6
LSR5 – LSR4	C7
LSR1 – LSR2 – LSR3	C8
LSR1 – LSR3 – LSR2	C9
LSR3 – LSR1 – LSR2	C10
LSR5 – LSR4 – LSR7	C11
LSR5 – LSR6 – LSR7	C12
LSR4 – LSR5 – LSR6 – LSR7	C13
LSR5 – LSR6 – LSR7 – LSR4	C14

V simuláciách boli použité tri rôzne prevádzkové triedy reprezentujúce hlasovú, video a webovú prevádzku, kde hlasová prevádzka má najvyššiu prioritu a webová prevádzka najnižšiu. Pre hlasovú a video prevádzku je použitý generátor konštantnej prevádzky a pre webovú prevádzku je použitý generátor prevádzky s exponenciálnym rozdelením. Každá prevádzková trieda generuje tri dátové toky, ktorých špecifikácie sú zhrnuté v Tab. 5.

Za pozornosť stojí fakt, že poradie, v ktorom toky prichádzajú je vždy web, potom video a nakoniec hlas. Takýmto spôsobom by malo byť pre hlasovú prevádzku najzložitejšie nájsť optimálnu cestu. Ale implementovaním FCBA a patričných váh metrik by sa malo predísť degradácii QoS parametrov hlasovej prevádzky.

**Tab. 5.** Špecifikácie prevádzkových tokov.

Prevádzkový tok	Začiatok vysielania [s]	Prenosová rýchlosť – scenár 1 [kbit/s]	Prenosová rýchlosť – scenár 2 [kbit/s]
Web1	1	1000	1000
Video1	2	1500	1500
Hlas1	3	500	850
Web2	4	1000	1000
Video2	5	1500	1500
Hlas2	6	500	850
Web3	7	1000	1000
Video3	8	1500	1500
Hlas3	9	500	850

V simuláciách je pre webovú prevádzku nastavené najvyššia hodnota váhy metriky pre využitie cesty, čím by toky danej triedy mali byť s väčšou pravdepodobnosťou smerované cestami s nižším využitím. Pre hlasovú prevádzku je najvyššia váha metriky použitá pre počet skokov, čím by sa malo obmedziť oneskorenie hlasových tokov. Pre video prevádzku sú použité rovnaké váhy metrik pre všetky metriky. Konkrétne nastavenia váh metrik sú nasledovné:

- $w_{1,hlas} = 0,5$
- $w_{2,hlas} = 0,167$
- $w_{3,hlas} = 0,333$
- $w_{1,video} = 0,333$
- $w_{2,video} = 0,333$
- $w_{3,video} = 0,333$
- $w_{1,web} = 0,167$
- $w_{2,web} = 0,333$
- $w_{3,web} = 0,5$

Posledné nastavovateľné parametre FCBA predstavujú intervaly využitia, kde  $\mu_{min}$  a  $\mu_{max}$  využíva  $l_{\mu}$  reprezentované rovnicou (18) a  $\mu_1$  a  $\mu_2$  využíva  $\beta$  reprezentované rovnicou (22):

- $\mu_{min} = 10 \%$
- $\mu_{max} = 90 \%$
- $\mu_1 = 15 \%$
- $\mu_2 = 40 \%$

### 9.2.1 Scenár 1

Scenár 1 predstavuje situáciu, kde je pre každý toky nájdená cesta s dostatočnou zostatkovou kapacitou, aby mohla vyhovieť požiadavkám daného toku na prenosovú kapacitu. FCBA je tu porovnaný s CBR algoritmi.

FCBA oproti SWP a WSP nerobí dvojkrokové rozhodnutia, ale snaží sa nájsť cestu s najlepšou kombináciou zvolených metrik a teda s najvyššou hodnotou  $cost_p$ . Hodnoty  $a_p$  členskej funkcie pre cesty s rôznym počtom skokov sa pre danú sieť pohybuje od 0,2 pre cesty C13 a C14 po 0,8 pre cesty C1 a C2. Hodnoty ďalších členských funkcií,  $b_p$  a  $c_p$  sa pre každú cestu menia podľa zmeny záťaže liniek, pričom pri danej sieti využívajú  $h_{max} = 5$  skokov (14) a  $b_{max} = 4$  Mbit/s (15).

Na začiatku simulácie je teda hodnota  $cost_p$  rôzna pre webovú, video a hlasovú prevádzku (viď Tab. 6). Tab. 6 ako aj nasledovné tabuľky obsahujú len tie cesty, ktoré sú vybrané niektorým tokom.

**Tab. 6.** Hodnoty  $cost_p$  na začiatku simulácie pre webovú, video a hlasovú prevádzku.

Označenie cesty	$cost_p$ (Web)	$cost_p$ (Video)	$cost_p$ (Hlas)
C1	0,800	0,767	<b>0,817</b>
C12	<b>0,900</b>	<b>0,799</b>	0,700

Ako možno z Tab. 6 vidieť, pred príchodom prvého toku sa javí ako najlepšia cesta C1 pre hlasovú prevádzku a cesta C12 pre webovú a video prevádzku, čiže s príchodom prvého Web1 toku je vybraná cesta C12, čím sa následne znížia hodnoty  $b_p$  a  $c_p$  nielen pre C12, ale aj pre C6, C7, C11, C13 a C14.

Hodnoty  $cost_p$ , vypočítavané na základe (21) závisia od parametra  $\beta$ , ktorý závisí od priemerného využitia linky ( $\mu_{avg}$ ), čiže na začiatku simulácie je  $\beta = 1$  ( $\mu_{avg} = 0\%$ ). Keďže na začiatku majú všetky linky v sieti nulové využitie, tak výsledok  $b_p$  členskej funkcie je rovný 1 pre všetky cesty, čo spôsobuje, že  $cost_p$  všetkých ciest na základe ľavej strany (21) určí  $b_p$  ako najlepšiu metriku a  $cost_p$  všetkých ciest by bolo rovnaké. Pri takýchto situáciách, FCBA prepočítava  $cost_p$  hodnotu s  $\beta = 0$  a tým pádom je použitá pravá strana (21), čiže všetky členské funkcie sa podieľajú na výpočte. Tab. 7 zobrazuje pôvodné a prepočítané  $cost_p$  hodnoty pri prvých troch prichádzajúcich prevádzkových tokoch.

**Tab. 7.** Pôvodné a prepočítané hodnoty  $cost_p$  pre prvé tri toky.

Označenie cesty	Pôvodné $cost_p$ (Web1)	Prepočítané $cost_p$ (Web1)	Pôvodné $cost_p$ (Video1)	Prepočítané $cost_p$ (Video1)	Pôvodné $cost_p$ (Hlas1)	Prepočítané $cost_p$ (Hlas1)
C1	0,5	0,800	0,333	0,766	0,371	<b>0,817</b>
C3	0,5	0,850	0,333	<b>0,783</b>	0,085	-
C12	0,5	<b>0,900</b>	0,249	-	0,141	-

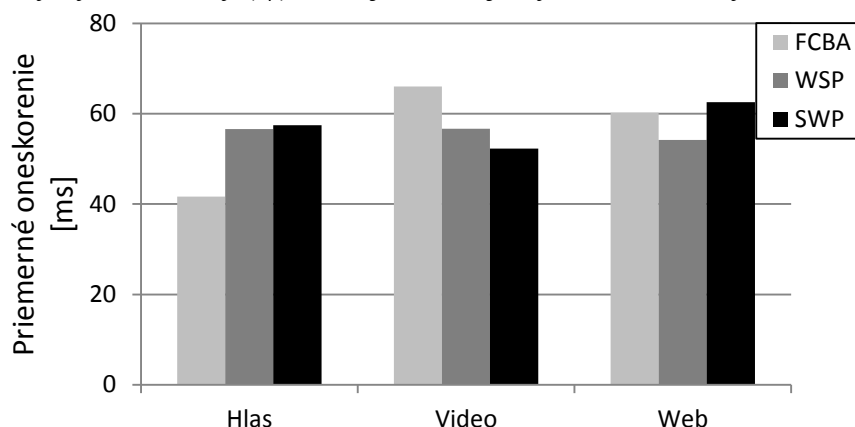
Pri ďalších tokoch už nedochádza k prepočítavaniu  $cost_p$ , pričom keďže sa postupne zvyšuje priemerné zaťaženie liniek, klesá hodnota  $\beta$ , čím sa zväčšuje vplyv pravej strany (21) a teda výsledná hodnota  $cost_p$  je výsledkom väčšieho kompromisu medzi metrikami. Tab. 8 zahŕňa hodnoty parametra  $\beta$ , ktoré sú použité pri aktuálne prichádzajúcom toku.

**Tab. 8.** Priemerné využitie linky a korešpondujúca hodnota  $\beta$  parametra pre scenár 1.

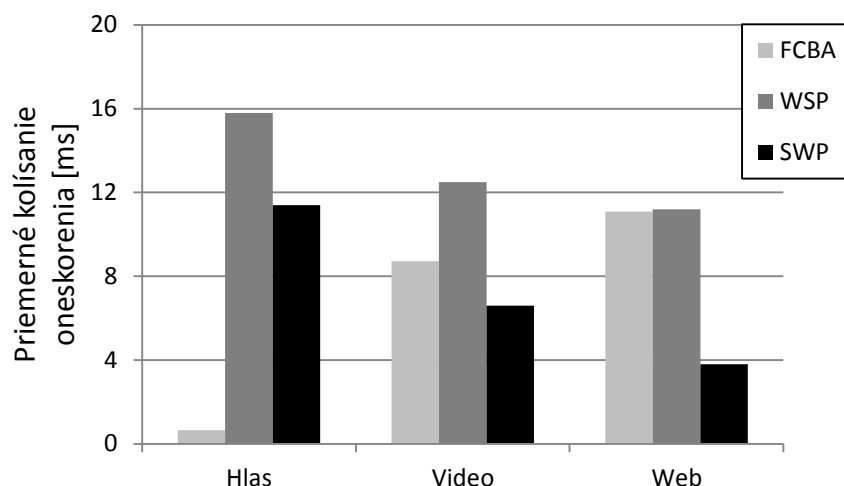
Prevádzkový tok	Priemerné využitie linky [%]	$\beta$
Web1	0	1
Video1	6,74	1
Hlas1	16,55	0,922
Web2	20,04	0,800
Video2	19,92	0,803
Hlas2	32,45	0,302
Web3	39,99	0
Video3	26,65	0,534
Hlas3	43,6	0

FCBA algoritmus bol porovnaný s WSP a SWP algoritmi z pohľadu dosiahnutých QoS parametrov, oneskorenia a kolísania oneskorenia. Ako možno vidieť z Obr. 3 a 4, FCBA dosiahlo najlepšie výsledky pre prevádzkovú triedu s najvyššou prioritou, hlasovú prevádzku, aj napriek tomu, že jej toky prichádzali vždy ako posledné v každom cykle.

Takéto výsledky boli dosiahnuté vďaka tomu, že pre video a webovú prevádzku boli nastavené nižšie hodnoty váhy metriky pre počet skokov ( $a_p$ ), takže hlasová prevádzka mohla viac využívať kratšie cesty. Takisto platilo, že čím nižšia priorita prevádzkovej triedy, tým vyššia bola nastavená hodnota váhy metriky využitia cesty ( $c_p$ ), ktorej cieľom je využívať málo využívané cesty v sieti.



**Obr. 3.** Porovnanie FCBA s WSP a SWP na základe priemerného oneskorenia.



**Obr. 4.** Porovnanie FCBA s WSP a SWP na základe priemerného kolísania oneskorenia.

### 9.2.2 Scenár 2

Tento scenár predstavuje situáciu, keď CBR algoritmy nedokážu nájsť pre každý tok cestu, ktorá dokáže splniť požiadavky daného toku na prenosovú kapacitu. Ako vyplýva z Tab. 5, toky webovej a video prevádzky sú nezmenené, avšak toky hlasovej prevádzky majú požiadavky zvýšené na 850 kbit/s.

Výber ciest prostredníctvom FCBA je rovnaký ako pri scenári 1, až po Video 2 tok (vrátane). Výber ciest zvyšných tokov je zobrazený v Tab. 9.

**Tab. 9.** Výber ciest založený na hodnote  $cost_p$ , alebo nerezervovanej prenosovej kapacite linky úzkeho hrdla (NPKLÚH).

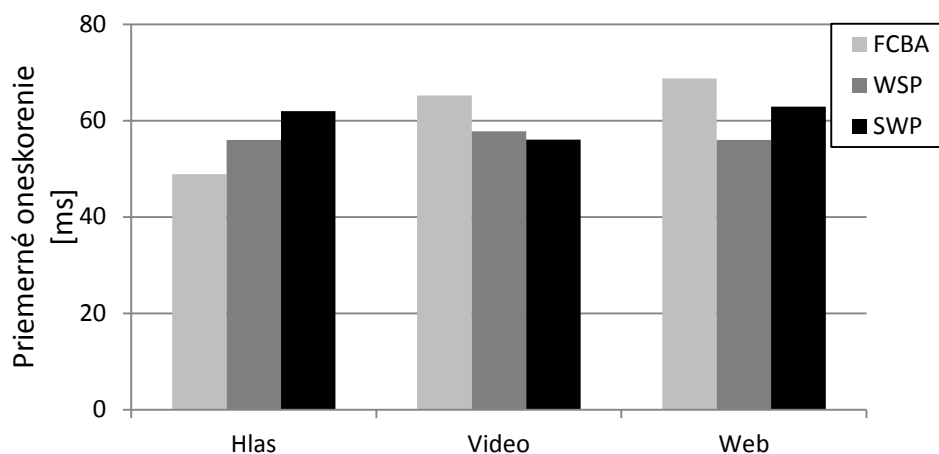
Označenie cesty	$cost_p$ Hlas2	$cost_p$ Web3	NPKLÚH [kbit/s] Video3	$cost_p$ Hlas3
<b>C1</b>	0,364	0,271	1150*	<b>0,450</b>
<b>C2</b>	0,357	0,219	<b>1000</b>	0,419
<b>C9</b>	0,332	<b>0,414</b>	500	0,401
<b>C11</b>	<b>0,384</b>	0,245	650*	0,304

Pri príchode Video3 toku, FCBA nedokáže nájsť takú cestu, ktorá by spĺňala požiadavky na prenosovú kapacitu vo výške 1500 kbit/s. FCBA potom zo všetkých ciest vyradí tie, ktoré sa podieľajú na prenose prevádzkovej triedy s najvyššou prioritou (označené “\*” v Tab. 9). Zo zvyšných ciest sa výsledná cesta už neurčí výpočtom  $cost_p$ , ale jej výber je daný najvyššou nerezervovanou prenosovou kapacitou linky úzkeho hrdla, čím sa minimalizuje degradácia QoS pre tie prevádzkové toky, ktoré danú cestu, resp. linky danej cesty využívajú.

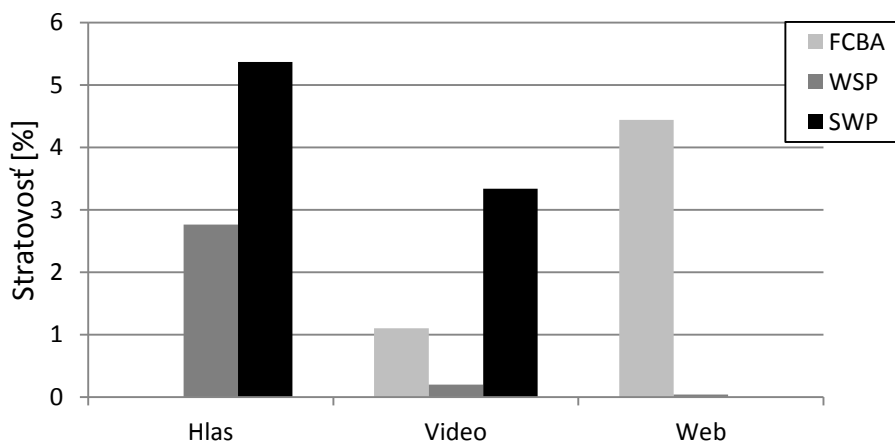
V danej situácii cesty C2, C3 a C9 vyhovujú podmienke, aby sa cesty nepodieľali na prenose prevádzky s najvyššou prioritou. Z nich je potom určená cesta C2, keďže má najvyššiu nerezervovanú prenosovú kapacitu linky úzkeho hrdla (1000 kbit/s v porovnaní s 500 kbit/s ciest C3 a C9).

Podobne ako pri scenári 1, je FCBA porovnané s WSP a SWP. Dané algoritmy vyberajú tie isté cesty ako pri predchádzajúcom scenári, s tým rozdielom, že pri WSP nebolo dostatok zdrojov pri príchode Hlas3 toku a pri SWP pri príchode Video3 toku. Keďže pri každom algoritme nastala situácia nedostatku zdrojov v sieti, sú dané algoritmy porovnané, okrem priemerného oneskorenia, aj na základe stratovosti. Porovnanie algoritmov sú znázornené na Obr. 5 a Obr. 6.

Pretože sa FCBA pri zahľtení vyhýba cestám, ktoré sa podieľajú na prenose hlasovej prevádzky, dosiahla stratovosť hlasovej prevádzky 0 %, pričom so znižujúcou sa prioritou prevádzky sa stratovosť zvyšovala. WSP a SWP dosiahli opačné výsledky, lebo nevykonávajú rozhodnutia založené na triedy a keďže toky hlasovej prevádzky prichádzajú v každom cykle ako posledné, sú smerované menej optimálnymi cestami ako webová, alebo video prevádzka.



**Obr. 5.** Porovnanie FCBA s WSP a SWP na základe priemerného oneskorenia.



**Obr. 6.** Porovnanie FCBA s WSP a SWP na základe stratovosti.

### 9.2.3 Vyhodnotenie FCBA

Výsledky simulácií naznačujú, že FCBA algoritmus umožňuje efektívne využívanie prostriedkov siete, pričom sa snaží spĺňať výkonnostné požiadavky rôznych druhov prevádzky.

Jednou z výhod FCBA je fakt, že aj keď sú definované tri metriky a k nim prislúchajúce členské funkcie, vďaka váham metrick možno dosiahnuť rôzne implementácie FCBA, ktoré môžu brať do úvahy dve, alebo len jednu metriku. Od rôznej použitej kombinácie metrick sa možno odlišne zamerať na výkonnostné parametre prevádzky, resp. na efektívne využívanie prostriedkov siete.

Ak pre správcu siete nie je dôležité využívať čo najefektívnejšie prostriedky siete, napr. keď sa neočakáva vysoké využitie siete, je na mieste nastaviť prislúchajúcu váhu  $w_{3,c}$  na 0, čím bude prevádzka v sieti smerovaná už len na základe počtu skokov a dostupnej prenosovej kapacity linky úzkeho hrdla (DPKLÚH) a FCBA nebude prevádzku smerovať cez dlhšie a menej využívané cesty. Čím vyššie sa však očakáva zaťaženie siete, tým by mala byť hodnota  $w_{3,c}$  vyššia, najmä pre tie triedy  $c$ , ktoré môžu byť potencionálne využívané na smerovanie dlhšími a menej využívanými cestami.

Kritická prevádzka by mala byť smerovaná vždy čo najkratšou cestou, aby sa obmedzilo oneskorenie. Nastavením vysokej hodnoty  $w_{1,c}$  bude FCBA uprednostňovať kratšie cesty pre takéto druhy prevádzky. Aby mohla byť aj prevádzka s nižšou prioritou smerovaná cez kratšie cesty, možno rovnako použiť vysokú hodnotu  $w_{1,c}$ , s tým rozdielom, že oproti kritickej prevádzke sa nastaví aj vysoká hodnota  $w_{2,c}$  ( $w_{2,c} > w_{1,c}$ ) čo bude mať za následok, že pri krátkych cestách s nízkou DPKLÚH sa takáto nekritická prevádzka bude smerovať s väčšou pravdepodobnosťou dlhšími cestami s vyššou DPKLÚH. Vďaka tomu budú krátke cesty s nízkou DPKLÚH ušetrené pre kritickú prevádzku.

Oproti iným CBR algoritmom sa FCBA líši aj tým, že popri vstupných hodnotách metrick a ich váh je výsledná cesta ovplyvnená aktuálnym priemerným zaťažením liniek v sieti vďaka adaptívnej povahe OWA operácie, ktorá určuje výslednú cestu. Pri nezaťaženej sieti je tak prevádzková trieda smerovaná na základe preferovanej metriky, pričom pri vysokom zaťažení sa berú do úvahy všetky metriky, aby sa pri menšej celkovej dostupnej prenosovej kapacite vybrala najoptimálnejšia cesta z pohľadu všetkých metrick.

## 10 Záver a prínosy dizertačnej práce

Na základe návrhu nového A-MAR modelu a FCBA algoritmu a prezentovaných výsledkov ich výkonnosti prostredníctvom vykonaných simulácií možno konštatovať, že siete MPLS môžu profitovať z ich implementácie tak z hľadiska alokovania prenosovej kapacity výstupnej linky, ako aj optimálneho smerovania prevádzky v sieti.

Hlavné vedecké prínosy predloženej dizertačnej práce možno zhrnúť nasledovne:

1. Bol navrhnutý nový BC model Adaptive Maximum Allocation with Reservation Model (A-MAR), ktorý optimalizuje alokovanie prenosovej kapacity medzi viacerými triedami prevádzkových tried prispôbovaním sa aktuálnemu zaťaženiu výstupnej linky.
2. Boli analyzované vlastnosti navrhnutého A-MAR modelu a používaných BC modelov z hľadiska QoS parametrov s cieľom prezentovať výhody A-MAR modelu a obmedzenia používaných BC modelov v porovnaní s A-MAR modelom.
3. Porovnaním navrhnutého A-MAR modelu s používanými BC modelmi z hľadiska prijímania prevádzkových tokov boli prostredníctvom simulácií dokázané nasledovné výhody A-MAR modelu:
  - a) A-MAR zbytočne neblokuje prevádzkové toky tried s nižšou prioritou pri nízkom zaťažení linky,
  - b) A-MAR dokáže zabezpečiť ochranu prevádzkových tokov tried vyššej priority pri vyššom zaťažení linky,
  - c) A-MAR zaobchádza rôzne s prevádzkou medzi najvyššími prioritami vďaka závislosti prahovej prenosovej kapacity od priority prevádzky.
4. Bol navrhnutý nový CBR algoritmus Fuzzy Class-based Algorithm (FCBA), ktorý implementuje fuzzy logiku v smerovacích rozhodnutiach s cieľom optimalizovania alokovania prenosovej kapacity liniek v sieti pri zohľadnení výkonnostných parametrov prevádzky.
5. Boli analyzované vlastnosti navrhnutého FCBA algoritmu s cieľom prezentovať rôzne možnosti implementácie FCBA pri rôznych požiadavkách na výkonnosť siete. Z analýzy vyplýva, že:
  - a) v závislosti od očakávaného zaťaženia siete, alebo od potreby zvýhodnenia niektorých prevádzkových tokov možno vhodným nastavením váh metrík využívať len niektoré metriky pre prevádzkové toky všetkých, resp. len vybraných tried,
  - b) modifikovaná OWA fuzzy operácia umožňuje adaptívny výber cesty na základe prednastaveného intervalu priemerného využitia liniek v sieti.
6. Porovnaním navrhnutého FCBA algoritmu s používanými CBR algoritmi na základe dosiahnutých výkonnostných parametrov boli prostredníctvom simulácií dokázané nasledovné výhody FCBA algoritmu:
  - a) FCBA umožňuje optimalizovať využitie siete tokmi nižších priorít, pričom umožňuje optimalizovanie výkonnostných parametrov tokov vyšších priorít.
  - b) FCBA dokáže efektívne minimalizovať vplyv nadmerného zahltenia siete na prevádzkové toky najvyššej priority.

V ďalšom pokračovaní predloženej práce navrhujem zamerať sa na otázku adaptívneho nastavenia jednotlivých parametrov A-MAR modelu na základe aktuálnej situácie v sieti. V oblasti FCBA navrhujem implementovanie vhodného link state smerovacieho protokolu rozšíreného o funkciu riadenia prevádzky, ktorý by bol potrebný pre nasadenie FCBA v reálnom prostredí a následné skúmanie vplyvu intervalu šírenia informácie potrebných pre FCBA (ako napr. aktuálna dostupná prenosová kapacita) na jeho výkonnosť.

Hoci FCBA a A-MAR boli navrhnuté pre siete MPLS, princíp, ktorý používajú umožňuje ich využitie aj pri iných NGN sieťových technológiách, preto ďalším pokračovaním práce môže byť overenie ich výkonnosti v sieťach IP, IPv6, alebo PBB-TE.

## 11 Použitá literatúra

- [1] ITU-T RECOMMENDATION Y.2001: *General overview of NGN functions and characteristics*, Telecommunication Standardization Sector of ITU , December 2004.
- [2] ITU-T RECOMMENDATION E.800: *Terms and Definitions related to Quality of Service and Network Performance including Dependability*. Telecommunication Standardization Sector of ITU, 1994.
- [3] CISCO SYSTEMS: *Enterprise QoS Solution Reference Network Design Guide*. [online]. 2005 [cit. 10.3.2015]. Dostupné na internete: < [http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/WAN\\_and\\_MAN/QoS\\_SRND/QoS-SRND-Book.pdf](http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/WAN_and_MAN/QoS_SRND/QoS-SRND-Book.pdf) >.
- [4] RFC 3031: ROSEN, E. – VISWANATHAN, A. – CALLON, R.: *Multiprotocol Label Switching Architecture*, IETF, Január 2001.
- [5] RFC 3272: AWDUCHE, D. – CHIU, A. – ELWALID, A. – WIDJAJA, I. – XIAO, X.: *Overview and Principles of Internet Traffic Engineering*. IETF, Máj 2002.
- [6] YOUNIS, O. – FAHMY, S.: *Constraint-Based Routing in the Internet: Basic Principles and Recent Research*. In: IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2003, S. 2-13. ISSN: 1553-877X.
- [7] RFC 3346: BOYLE, J. – GILL, V. – HANNAN, A. – COOPER, D. – AWDUCHE, D. – CHRISTIAN, B. – LAI, W.: *Applicability Statement for Traffic Engineering with MPLS*. IETF, August 2002.
- [8] SALSANO, S. – BOTTA, A. – IOVANNA, P. – INTERMITE, M. – POLIDORO, A.: *Traffic Engineering with OSPF-TE and RSVP-TE: flooding reduction techniques and evaluation of processing cost*. Computer Communication, Júl 2006, Vol 29 Issue 11, S. 2034-2045, Elsevier Science, ISSN: 0140-3664.
- [9] MINEI, I.: *MPLS DiffServ-aware Traffic Engineering. White Paper*, [online] Juniper Networks, 2004 [cit. 10.12.2013]. Dostupné na internete: < <http://mp3king.froggyawns.com/Tcm266HassanMarzouk/pdfs/MPLS-TEcorrectonetostudy.pdf> >
- [10] ONALI, T. – ATZORI, L.: *Traffic Classification and Bandwidth Management in DiffServ-Aware Traffic Engineering Architectures*. In: ICC 2008, Máj 2008. S. 70-74. ISBN: 978-1-4244-2075-9.
- [11] RFC 4125: LE FAUCHEUR, F. – LAI, W.: *Maximum Allocation Bandwidth Constraints Model for Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering*, IETF, Jún 2005.
- [12] RFC 4126: ASH, J.: *Max Allocation with Reservation Bandwidth Constraints Model for Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering & Performance Comparisons*. IETF, Jún 2005.
- [13] RFC 4127: LE FAUCHEUR, F.: *Russian Dolls Bandwidth Constraints Model for Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering*. IETF, Jún 2005.
- [14] ADAMI, D. – C. CALLEGARI – S. GIORDANO – M. PAGANO – M. TONINELLI: *G-RDM: A New Bandwidth Constraints Model for DS-TE networks*. In: GLOBECOM 2007, November 2007. S. 2472-2476. ISBN: 978-1-4244-1043-9.
- [15] GOLDBERG, J. B. – DASGUPTA, S. – CAVALCANTE DE OLIVEIRA, J.: *Bandwidth Constraint Models: A Performance Study with Preemption on Link Failures*. GLOBECOM 2006, November 2006. S. 1-5. ISSN: 1930-529X.
- [16] PINTO NETO, W. – MARTINS, J.: *Adapt-RDM - A Bandwidth Management Algorithm suitable for DiffServ Services Aware Traffic Engineering*. In: IEEE/IFIP Network Operations & Management Symposium, Apríl 2008. ISSN: 1542-1201.
- [17] REALE, R. F. – NETO, W. DA C. P. – Martins, J. S. B.: *AllocTC-sharing: A new bandwidth allocation model for DS-TE networks*. In: LANOMS 2011, Október 2011. S. 1-4. ISBN: 978-1-4577-1790-1.
- [18] REALE, R. F. – BEZERRA, R. M. S. – MARTINS, J. S. B.: *G BAM: A Generalized Bandwidth Allocation Model for IP/MPLS/DS-TE Networks*. International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications. v. 6, S. 635-643, ISSN: 21507988, 2014.



- [19] MA, Q. – STEENKISTE, P.: On Path Selection for Traffic with Bandwidth Guarantees. Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols, S. 191-202, Október 1997.
- [20] KODIALAM, M.S. – LAKSHMAN, T.V.: *Minimum Interference Routing with Applications to MPLS Traffic Engineering*. In INFOCOM (2), 2000, S. 884–893.
- [21] HUNG, T.C. – THANH, N.H. – THANG, N.D. – JUNG, H.W. – KIM, T. – KIM, S.H. – YANG, W.J.: *Advanced Routing Algorithms and Load Balancing on MPLS*, In: Proc. 9th ICACT, Február 2007, vol. 3. S. 1886 –1891. ISSN: 1738-9445.
- [22] KARAMAN, A.: *Constraint-Based Routing in Traffic Engineering..* In: ISCN : IEEE, 2006, S. 49-54.
- [23] KHAN, J. A. – ALNUWEIRI, H. M.: *A Fuzzy Constraint-Based Routing Algorithm for Traffic Engineering*. IEEE/Globecom, Dallas, USA, 2004.
- [24] CARR, D. – SHEARER, J.: *Nonlinear Control and Decision Making using Fuzzy Logic in Logix*. Rockwell Automation, Inc., August 2007.
- [25] ZADEH, L.A.: *Fuzzy Sets, Information and Control*. 1965, S. 338-353.
- [26] KLIR, G. J. – YUAN, B.: *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1995.
- [27] DAME, A. – GUETTLER, J.H. – LEESON, K. – SCHULTZ, M. – JENSEN, T.B.: *Regulatory implications of the introduction of next generation networks and other new developments in electronic communications*. Sitilcom & Cullen International Publishing, Brusel, Máj 2003,
- [28] CISCO SYSTEMS: *CCNP Self-Study: Understanding and Implementing Quality of Service in Cisco Multilayer Switched Networks*. [online] Máj 2004. [cit. 10.12.2013]. Dostupné na internete: <<http://www.ciscopress.com/articles/article.asp?p=170743>>.
- [29] CHEN, Y. – FARLEY, T. – YE, N.: *QoS requirements of network applications on the internet*. Information, Knowledge, Systems Management, Január 2004. S. 55-76. ISSN: 1389-1995.
- [30] RFC 5462: ANDERSSON, L. – ASATI, R.: *Multiprotocol Label Switching (MPLS) Label Stack Entry: "EXP" Field Renamed to "Traffic Class" Field*, IETF, Február 2009.
- [31] RFC 3564: LE FAUCHEUR, F. – LAI, W.: *Requirements for Support of Differentiated Services-aware MPLS Traffic Engineering*, IETF, Júl 2003.
- [32] UPADHYAYA, S. – DEVI, G.: *Mingling Multipath Routing With Quality Of Service*. In: International Journal of Computer Science Issues (IJCSI), vol. 8, Issue 5, September 2011. S. 156-161. ISSN: 1694-0784.
- [33] SHIGANG CH. – KLARA N.: *An Overview of Quality-of-Service Routing for the Next Generation High-Speed Networks: Problems and Solutions*, IEEE Network Magazine, Special Issue on Transmission and Distribution of Digital Video, vol. 12, No. 6, November-December 1998. S. 64-79. ISSN: 0890-8044.
- [34] DASGUPTA S. – PAPADIMITRIOU C.H. – VAZIRANI U.V.: *Algorithms*. McGraw-Hill Higher Education, September 2006. ISBN: 0073523402.
- [35] RFC 3630: KATZ, D. – KOMPELLA, K. – YEUNG, D.: *Traffic Engineering (TE) Extensions to OSPF Version 2*. IETF, September 2003.
- [36] RFC 7471: GIACALONE, S. – DRAKE, J. – ATLAS, A. – PREVIDI, S.: *OSPF Traffic Engineering (TE) Metric Extensions*. IETF, Marec 2015.
- [37] RFC 4124: LE FAUCHEUR, F.: *Protocol Extensions for Support of Diffserv-aware MPLS Traffic Engineering*. IETF, Jún 2005.
- [38] RFC 3212: JAMOSSI, B. – ANDERSSON, L. – CALLON, R. – DANTU, R. – WU, L. – DOOLAN, P. – FELDMAN, N. – FREDETTE, A. – GIRISH, M. – GRAY, E. – HEINANEN, J. – KILTY, T. – MALIS, A.: *Constraint-Based LSP Setup using LDP*. IETF, Január 2002.
- [39] THAKER, R. – SHAWL, R.Q.: *Analysis of Routing and Signaling Protocols in MPLS*. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, vol.4, iss. 1, Január 2014. ISSN: 2277 128X.
- [40] RFC 3209: AWDUCHE, D. – BERGER, L. – GAN, D. – LI, T. – SRINIVASAN, V. – SWALLOW, G.: *RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels*. IETF, December 2001.

- [41] RFC 3270: LE FAUCHEUR, F. – WU, L. – DAVIE, B. – DAVARI, S. – VAANANEN, P. – KRISHNAN, R. – CHEVAL, P. – HEINANEN, J.: *Multi-Protocol Label Switching (MPLS) Support of Differentiated Services*. IETF, Máj 2002.
- [42] RFC 2702: AWDUCHE, D. – MALCOLM, J. – AGOGBUA, J. – O'DELL, M. – MCMANUS, J.: *Requirements for Traffic Engineering Over MPLS*, IETF, September 1999.
- [43] BISIO, I. – MARCHESE, M.: *Design and Evaluation Guidelines for Bandwidth Allocation Solutions in Satellite Environments*. Proc. IEEE Global Communications Conference, Globecom 2009, Honolulu, HI, USA, November 2009. S. 1-6. ISSN: 1930-529X.
- [44] KHALIFEH, A.F. – EL-MOUSA, A.H.: *QoS Routing of VoIP using a Modified Widest-Shortest Routing Algorithm*, In: IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, 2007 (AICCSA '07), Máj 2007. S. 166-123. ISBN: 1-4244-1030-4
- [45] YANG, Y. – LUNG, CH.: *The role of traffic forecasting in QoS routing - a case study of time-dependent routing*, In: IEEE International Conference on Communications (ICC 2005), vol. 1, Máj 2005. S. 224- 228. ISBN: 0-7803-8938-7.
- [46] KULKARNI, S. – SHARMA, R. – SHARAN, P. – GOWD, R.B.R.: *New Dynamic QoS Routing Algorithm for Optical Networks Based on MPLS With Delay And Bandwidth as Constraints*. In: 2012 International Conference on Optical Engineering (ICOE), Belgaum, Júl 2012. S. 1-6. ISBN: 978-1-4673-2462-5.
- [47] LAL, S.B.: *Fuzzy Logic* [online]. [cit. 20.2.2015]. Dostupné na internete: <[http://iasri.res.in/ebook/win\\_school\\_aa/notes/FuzzyLogic.pdf](http://iasri.res.in/ebook/win_school_aa/notes/FuzzyLogic.pdf)>.
- [48] ZHAO, J. – BOSE, B. K.: *Evaluation of membership functions for fuzzy logic controlled induction motor drive*. IEEE IECON Conf., 2002.
- [49] ZIMMERMANN, H.J.: *Fuzzy Set Theory*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2(3), 2010, S. 317-332.
- [50] KHAN, J.A. – SAIT, S.M.: *Fuzzy Aggregating Functions For Multiobjective Vlsi Placement*. In: IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2002.
- [51] Mendel, J. M.: *Fuzzy Logic Systems For Engineering: A Tutorial*. IEEE Proc., vol. 83, S. 345–377, Marec 1995.

## 12 Publikácie autora

- [P1] PIŠTEK, M. – MEDVECKÝ, M.: *Advanced Fuzzy Class-Based Routing in MPLS-TE Networks*. In: WSEAS Transactions on Communications (**Článok odoslaný 11.5.2015**)
- [P2] PIŠTEK, M. – MEDVECKÝ, M.: *Class-Based Constraint-Based Routing with Implemented Fuzzy Logic in MPLS-TE Networks*. In: Journal of Computer Networks and Communications. Vol. 2014, (2014), Art. ID 237810, p. ISSN 2090-7141.
- [P3] PIŠTEK, M – MEDVECKÝ, M. – KLUČIK, S.: *A-MAR: A new bandwidth constraint model for DS-TE networks*. In: TSP 2014 Telecommunications and Signal Processing: 37th International Conference on Telecommunications and Signal Processing; Berlin, Germany; 1-3 Júl 2014. S. 105-109. ISBN 978-80-214-4983-1.
- [P4] PIŠTEK, M. – MEDVECKÝ, M.: *Constraint-based routing using fuzzy logic in MPLS-TE networks*. In: ELITECH'14: 16th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovakia, 4 Jún 2014. ISBN 978-80-227-4171-2.
- [P5] PIŠTEK, M. – MEDVECKÝ, M.: *Bandwidth allocation methods in MPLS-TE networks*. In: Posterus: Internetový časopis, vol.6, iss.:10, 2013. ISSN 1338-0087.
- [P6] PIŠTEK, M. – MEDVECKÝ, M.: *Performanace Evaluation of Maximum Allocation with Reservation Model*. In RTT 2013. Research in Telecommunication Technology: 15th International Conference. Senec, Slovensko, September 11-13, 2013. S. 99-110. ISBN 978-80-227-4025-8.
- [P7] PIŠTEK, M. – MEDVECKÝ, M.: *Performanace Evaluation of Maximum Allocation Model*. In RTT 2013. Workshop popri konferencii Research in Telecommunication Technology: Senec, Slovensko, September 11-13, 2013. S. 99-110. ISBN 978-80-227-4025-8.

- [P8] PIŠTEK, M. – MEDVECKÝ, M.: Comparison of Standardized Bandwidth Constraint Models. In ELITECH'13: 15th Conference of Doctoral Students; Bratislava, Slovensko, 5 Jún 2013. S. 6. ISBN 978-80-227-3947-4.
- [P9] PIŠTEK, M.: Využitie metód riadenia prístupu v sieťach IMS. Diplomová práca. Bratislava: FEI STU, 2012. 72 s.
- [P10] PIŠTEK, M. – KAVACKÝ, M.: Využitie metód riadenia prístupu v IP sieťach. In: ŠVOČ 2012: Zborník vybraných prác, Bratislava, 25 Apríl 2012. S. 531-536.
- [P11] PIŠTEK, M.: Metódy riadenia prístupu v sieťach IP - MBAC. Bakalárska práca. Bratislava: FEI STU, 2010. 33 s.

### **13 Účasť autora na výskumných projektoch**

1. Projekt VEGA No. 1/0106/11 – Analýza a návrh pokročilých optických prístupových sietí v konvergovanej infraštruktúre NGN využívajúcich pevné prenosové médiá pre podporu multimedialných služieb, Ústav telekomunikácií, Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave, 2011 – 2013.
2. Projekt ITMS 26240120029, OPVaV - 2008/4.1/02–SORO - Operating program research and development. Center of excellence – SMART technologies, networks and Services II. (IMS Platform for NGN). Ústav telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2010 – 2013.
3. Program na podporu mladých výskumníkov na STU – Optimalizovanie využitia prostriedkov sietí MPLS, 2015. Zodpovedný riešiteľ: Ing. Michal Pištek, FEI STU.

## 14      **Resumé**

The PhD thesis is within the scope of guaranteeing of quality of service in multimedia NGN networks and deals with bandwidth allocation in MPLS networks which are used as a core network technology in NGN networks. The aim of the thesis is the optimization of bandwidth allocation in MPLS in terms of bandwidth constraint models and constraint based routing algorithms.

The first outcome of the thesis is the proposal of the new BC model named Adaptive Maximum Allocation with Reservation Model, whose adaptability consists in adjusting of the tunable parameters to the actual network load which enables for more effective admission of the flows belonging to the various traffic types. It was proved that the network can benefit from implementing A-MAR because it does not unnecessarily block traffic flows during low utilization and it protects the higher priority flows during higher utilization. A-MAR's performance was compared to the standard BC models in NS-2 based on the admission of the traffic flows.

The second outcome is the proposal of the new CBR algorithm named Fuzzy Class-Based Algorithm, which implements fuzzy logic in the routing decisions and thanks to the application of the metric weights, it makes these decisions based on the various requirements of the various traffic types. FCBA enables network operator to use lower priority flows for underutilized paths whereas it can focus on providing required QoS parameters for higher priority flows. FCBA's performance was compared to the used CBR algorithms in NS-2 based on the achieved QoS parameters.