

Ing. Tomáš Balogh

Autoreferát dizertačnej práce

PRIORITIZÁCIA PAKETOV V SYSTÉMOCH S PODPOROU QOS

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

v doktorandskom študijnom programe: **Telekomunikácie**

v študijnom odbore 5.2.15 telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, 30.05.2014

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

Ing. Tomáš Balogh

Autoreferát dizertačnej práce

PRIORITIZÁCIA PAKETOV V SYSTÉMOCH S PODPOROU QOS

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

v doktorandskom študijnom programe:

Telekomunikácie

Miesto a dátum: Bratislava, 30.05.2014

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme štúdia

Na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: Ing. Tomáš Balogh
Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Martin Medvecký, PhD.
Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: doc. Ing. Vít Novotný, Ph.D.
Ústav telekomunikácií, FEKT VÚT Brno

Ing. Peter Kvačkaj, PhD.
Orange Slovensko, a.s.

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná ohod.

v zasadacej miestnosti ÚT FEI STU v Bratislave,

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

.....
doc. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.
dekan FEI STU Bratislava
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Obsah

1	ÚVOD	4
2	SÚČASNÝ STAV RIEŠENIA PROBLEMATIKY	4
2.1	NÁHODNÉ PREMENNÉ	4
2.2	SYSTÉMY HROMADNEJ OBSLUHY	4
2.3	KVALITA SLUŽBY.....	5
2.4	SPÔSOBY PRIORITIZÁCIE PAKETOV	5
2.5	ALGORITMY QSD	6
3	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	6
4	NÁVRH NOVÉHO ALGORITMU QSD	7
4.1	NÁVRH MODELU ROZDEĽOVANIA KAPACITY VÝSTUPNEJ LINKY	7
4.1.1	<i>Predpoklady a označenie premenných</i>	<i>7</i>
4.1.2	<i>Model rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WRR.....</i>	<i>7</i>
4.1.3	<i>Modifikácie modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WFQ.....</i>	<i>8</i>
4.1.4	<i>Modifikácie modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WRRPQ.....</i>	<i>9</i>
4.1.5	<i>Modifikácie modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus LLQ.....</i>	<i>9</i>
4.2	NÁVRH ALGORITMU WEIGHTED ROUND ROBIN AND RATE LIMITER BASED FAIR QUEUING	10
4.3	OVERENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV	12
4.3.1	<i>Simulácie pre modely rozdeľovania kapacity výstupnej linky</i>	<i>12</i>
4.3.2	<i>Simulácie algoritmu WRRRLbFQ</i>	<i>13</i>
5	SÚHRN VÝSLEDKOV A NOVÝCH POZNATKOV	16
6	POUŽITÁ LITERATÚRA	17
7	PUBLIKÁCIE AUTORA.....	21
8	ÚČASŤ AUTORA NA PROJEKTOCH.....	23
9	OSTATNÉ AKTIVITY	23
10	RESUME.....	24

1 Úvod

Vlastnosti dát prenášaných cez informačné a komunikačné siete sa počas doby ich existencie výrazne zmenili. Siete, pôvodne navrhnuté na prenos dát nenáročných na oneskorenie, kolísanie oneskorenia, stratovosť, sa dnes využívajú na prenos širokej škály služieb od telefónnych hovorov, videokonferencií, vysielania televízie až po pôvodne prenášané dáta ako dokumenty, emailová komunikácia. Široké spektrum multimediálnych služieb kladie na siete nové požiadavky, pre ktoré pôvodne neboli konštruované. Preto sú stále vyvíjané nové nástroje zabezpečujúce v sieťach bez spojovej orientácie kvalitu služieb (QoS). Medzi takéto mechanizmy patrí napríklad Diffserv, ktorý pakety na vstupe do siete označuje na základe typu prenášaných údajov a následne umožňuje v rámci siete sa k jednotlivým tokom správať odlišne. Odlišná obsluha v sieťovom uzle môže byť docielená algoritmi QSD (Queue Scheduling Discipline), zabezpečujúcimi výber čakajúcich paketov z čakacích radov, schopnými rozlišovať pakety na základe ich priorit. Takéto algoritmy sú základným kameňom dnešných sietí s podporou QoS.

Pre správne nastavenie algoritmov QSD v smerovači je potrebné namodelovať výsledok použitých parametrov vzhľadom na predpokladaný tvar vstupujúcej prevádzky. Pomocou modelovania môžeme jednoducho, rýchlo a dostupne odhadnúť vplyv na výslednú prevádzku bez použitia špecializovaných nástrojov ako sú simulátory, prípadne generátory a merače prevádzky.

Ďalším problémom súčasných sietí a algoritmov v nich používaných je ich výpočtová náročnosť, čo môže nepriaznivo ovplyvniť ich nasadenie do vysokorýchlostných chrbticových smerovačov, ako aj problém s garantovaním férového radenia v rámci jedného prioritného radu.

Predložená práca sa sústreďuje na využitie algoritmov QSD v sieťach s podporou QoS. Cieľom práce bolo definovať model rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre rôzne algoritmy QSD a následne navrhnutý model využiť pre návrh nového algoritmu poskytujúceho férové radenie v rámci jedného prioritného radu vzhľadom na toky s rôznou intenzitou príchodov a dĺžkou paketov, a pritom zachovať nízku výpočtovú náročnosť daného algoritmu. Presnosť navrhnutého modelu a funkcionálna algoritmu sú následne porovnané pomocou simulácií.

2 Súčasný stav riešenia problematiky

Pri modelovaní telekomunikačných systémov nie je možné všetky parametre systému popísať pomocou deterministických veličín. Pre modelovanie telekomunikačných sietí sa v praxi využívajú matematické modely stochastických veličín. Pre správne pochopenie modelovania siete je preto potrebné pochopiť vlastnosti náhodných premenných a matematických modelov používaných pri modelovaní a simulovaní prenosových sietí a v nich nasadených algoritmov.

2.1 Náhodné premenné

Veličiny s náhodným charakterom, ako je napríklad doba obsluhy alebo intenzita príchodu požiadaviek, popisujeme pomocou ich charakteristík. Medzi tieto charakteristiky patrí aké hodnoty premenná nadobúda a s akou pravdepodobnosťou ich nadobúda. Funkcia definujúca túto charakteristiku sa nazýva distribučná funkcia.

Náhodné premenné je možné rozdeliť do dvoch kategórií na spojité (čas obsluhy, čas čakania v rade,...) a diskkrétne (počet požiadaviek v systéme,...). Pre diskkrétne náhodné premenné je distribučná funkcia skoková. Medzi diskkrétne náhodné rozdelenia patria napríklad Binomické rozdelenie, Poissonovo rozdelenie, Geometrické rozdelenie, Diskkrétne rovnomerné rozdelenie, Bernuliho rozdelenie a mnohé iné. K spojitým rozdeleniam radíme Normálne rozdelenie, Exponenciálne rozdelenie, Erlangovo rozdelenie, Spojité rovnomerné rozdelenie, Weibullovo rozdelenie a iné.

2.2 Systémy hromadnej obsluhy

Systémy s jedným alebo viacerými obslužnými kanálmi, kde požiadavky nemusia byť ihneď obslužené ale čakajú v rade, možno modelovať pomocou systémov hromadnej obsluhy (SHO).

Takýmito systémami sú aj sieťové uzly. Tieto systémy možno modelovať pomocou Markovovských modelov resp. reťazcov.

Model systému $M/M/1/\infty$ je jeden z najjednoduchších modelov systémov hromadnej obsluhy. Predstavuje systém s jedným serverom a nekonečne dlhým čakacím radom. Požiadavky predstavujú poissonovský vstup (čas medzi príchodom dvoch požiadaviek má exponenciálne rozdelenie a ich počet za časový interval má Poissonovo rozdelenie - λ) a doba ich obsluhy - x má exponenciálne rozdelenie. Prevrátená hodnota času obsluhy μ predstavuje počet obslužených požiadaviek za časový interval. Požiadavky sú obsluhované v takom poradí v akom do systému prišli (FIFO – First-in First-out).

Ďalšími modelmi systémov sú napríklad $M/M/1/K$, kde je obmedzený počet požiadaviek v systéme, $M/D/1$ s konštantným časom obsluhy, $D/D/1$ s konštantným časom príchodov aj obsluhy.

Markovskými reťazcami je možné modelovať aj systémy s prioritným radením. Vieme tak definovať priemerné oneskorenie systému a jednotlivých priorít. Je definovaný zákon zachovania oneskorenia a práce pre metódy radenia, ktorý dokazuje, že s použitím ľubovoľnej metódy nie je možné znížiť priemerné oneskorenie systému len ho inak rozdeliť medzi prioritné triedy.

Pomocou Markovovských modelov je možné popísať napríklad algoritmus priority queuing a iné systémy s časovo závislými prioritami. Problémom však býva zdefinovať časovo závislú funkciu priority pre konkrétny algoritmus (FIFO má vlastnosti ako systém s časovo závislou prioritou, kde stupeň prioritnej funkcie je nekonečno, zatiaľ čo PQ so striktnou prioritou má funkciu časovej závislosti priority nulovú).

2.3 Kvalita služby

V súčasnej dobe zákazníci požadujú čoraz viac služieb poskytovaných po spoločných prenosových cestách a technológiách. S nástupom NGN a IMS sa technológia IP stáva dominantou a prenáša okrem dát, pre ktoré bola pôvodne navrhnutá, aj údaje multimediálnych služieb ako telefónia, videokonferencie, prenos videa a mnohé iné. To kladie dôraz na rozvoj nových technológií na zabezpečenie kvality služby (QoS). Pre užívateľov už nie je dôležité ako je služba poskytovaná, ale ako kvalitnú službu dostanú. V súčasnosti neexistuje jednotné riešenie problému zabezpečenia kvality poskytovaných služieb v sieťach založených na princípe prepájania paketov. Každá služba má iné požiadavky na sieť. Napríklad prenos hlasu cez IP vyžaduje kvalitu porovnateľnú s telefónnou sieťou. Dôležité sú znalosti parametrov, ktoré určujú kvalitu prenosu. Výrazný vplyv na tieto parametre majú procesy, ku ktorým dochádza v aktívnych komponentoch ako sú prepínače (switch), smerovače (router) a brány (gateway). Preto sa musia použiť nové metódy, ktoré tieto procesy zmenia a optimalizujú.

Procesy ovplyvňujúce kvalitu prenosu je možné rozdeliť na štyri skupiny, a to na vplyv kodeku, vplyv prostredia, vplyv zariadenia a vplyv siete.

Vplyvy siete sú z nášho pohľadu najzaujímavejšie a rozhodujúce pri posudzovaní siete a kvality prenosu. Sú to parametre ako oneskorenie (delay), kolísanie oneskorenia (jitter), stratovosť paketov (packet loss) a priepustnosť (throughput).

2.4 Spôsoby prioritizácie paketov

Aby bolo možné zabezpečiť kvalitu služby v paketovo orientovaných sieťach, je nutné zmeniť spôsob spracovania paketov v sieťových uzloch a rozlíšiť jednotlivé pakety alebo toky.

Metódy môžeme rozdeliť podľa toho, na ktorej vrstve RM OSI pracujú, podľa typu použitej technológie a podľa toho, či sú paketovo alebo tokovo orientované nasledovne:

- prioritizácia na MAC úrovni, IEEE 802.1p/Q [12], [13] na 2. vrstve RM OSI pre paketovo orientovanú prevádzku
- Multiprotocol Label Switching (MPLS) [14] prioritizácia prevádzky s ohľadom na najkratšiu cestu pracujúca medzi 2. a 3. vrstvou RM OSI pre paketovo orientovanú prevádzku
- prioritizácia prevádzky pomocou Diffserv [15] na 3. vrstve RM OSI pre paketovo orientovanú prevádzku
- rezervovanie pásma pomocou IntServ a RSVP na 3. vrstve RM OSI pre tokovo orientovanú prevádzku

2.5 Algoritmy QSD

Z metód prioritizácie paketov sa presadila metóda Diffserv, ktorá je implementovaná tiež v MPLS-Diffserv a principiálne aj v 802.1Q. Pakety prichádzajúce do smerovača sú v klasifikátore rozdelené na základe označenia priority, alebo príslušnosti k toku, do čakacích radov. Následne sa prevádzka tvaruje (Traffic shaping) pomocou mechanizmov ako sú Token bucket alebo Leaky bucket. Pakety v radoch sú spravované a zahadzované algoritmami Queue Memory Management (QMM), aby sa predišlo zaplneniu čakacích radov. Medzi algoritmy QMM patria Tail Drop, Random Early Detection alebo A-RIO (Adaptive RED with in/out). Z čakacích radov sú pakety vyberané na výstupov v poradí, o ktorom rozhodujú algoritmy QSD (Queue Scheduling Discipline). Použitím algoritmov QSD rozlišujúcich priority jednotlivých paketov je možné výrazne ovplyvniť parametre QoS.

Existuje mnoho algoritmov QSD. Medzi základné možno zaradiť algoritmy ako First-In First-Out (FIFO), Priority Queuing (PQ), Fair Queuing (FQ) a Round Robin (RR). Ďalej existuje mnoho ich experimentálnych ale aj v praxi využívaných modifikácií prípadne kombinácií ako sú WRR, WFQ, LLQ, WF²Q+ a mnohé iné.

Algoritmy QSD je možné okrem ich vplyvu na QoS hodnotiť a zatriediť aj na základe nasledujúcich vlastností:

- Garantovanie minimálnej prenosovej rýchlosti, kde minimálna prenosová rýchlosť je zlomok z celkovej výstupnej kapacity pridelenej čakaciemu radu nezávisle na prevádzke ostatných radov.
- Férové rozdelenie prebytočnej kapacity výstupnej linky je možné dosiahnuť jedným z nasledujúcich spôsobov:
 - o Proporčné zdieľanie, pri ktorom sa prebytočná prenosová kapacita rozdelí k aktívnym tokom v pomere k ich garantovanej minimálnej prenosovej rýchlosti.
 - o Zdieľanie závislé na stave systému, kde prebytočná kapacita je priradovaná na základe aktuálnej vyťaženia jednotlivých tokov a dĺžke čakacích radov.
- Worst-Case Fairness (Férovosť v najhoršom prípade): Pojem zahŕňa zachovanie pridelenej výstupnej kapacity nezávisle na počte a prevádzke ostatných tokov.
- Efektívne ladenie oneskorenia je možné dosiahnuť, ak na okraji siete upravíme prevádzku pomocou algoritmu „Leaky bucket“. Je tak možné garantovať prevádzkam v reálnom čase oneskorenie a prenosovú rýchlosť.
- Zložitosť implementácie algoritmov je obmedzujúca pri nasadzovaní komplexných algoritmov do vysokorýchlostných sietí, kde prenosové rýchlosti narastajú nad výpočtové a pamäťové kapacity zariadení. Vysoké výpočtové nároky kladú algoritmy označujúce jednotlivé pakety a sledujúce stav systému.

3 Ciele dizertačnej práce

Vzhľadom na uvedené a naštudované poznatky o súčasnom stave riešenia problematiky radenia paketov v sieťach s podporou QoS boli formulované ciele predloženej dizertačnej práce nasledovne:

1. Návrh modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WRR na základe priemernej intenzity príchodov paketov jednej prioritnej triedy, priemernej dĺžky paketov v danej prioritnej triede, nastavenia váh a kapacity výstupnej linky.
2. Modifikácia navrhnutého modelu pre výpočet rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmy WFQ, LLQ, WRRPQ so striktnou prioritou tak ako aj rate-controlled prioritou.
3. Návrh nového algoritmu QSD s nízkou výpočtovou náročnosťou, poskytujúceho férové radenie v rámci jednej prioritnej triedy vzhľadom na dĺžku paketov.
4. Overenie funkčnosti navrhnutých modelov pre výpočet rozdeľovania kapacity výstupnej linky pomocou simulácií.
5. Prezentácia a porovnanie funkčnosti navrhnutého algoritmu QSD s výsledkami ostatných štandardných algoritmov v dostupnom simulačnom prostredí.

4 Návrh nového algoritmu QSD

Samotnému návrhu nového algoritmu predchádzalo štúdium možností modelovania prideleného prenosového pásma algoritmov QSD, čo viedlo k návrhu nového matematického modelu, ktorý bol následne využitý pri návrhu nového algoritmu nazvaného Weighted Round Robin and Rate Limiter based Fair Queuing, poskytujúceho férové radenie v rámci jednej prioritnej triedy vzhľadom na rozlične dlhé pakety.

4.1 Návrh modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky

Väčšina existujúcich modelov pre výpočet výstupnej kapacity pre algoritmus WRR neuvažuje s variabilnou dĺžkou paketov (dĺžkou obsluhy v systéme) alebo neuvažuje nad prerozdelením nevyužitej kapacity medzi ostatné toky. Práve kvôli uvedeným zisteniam som sa rozhodol navrhnúť model počítajúci pridelenú kapacitu iteratívne a uvažujúceho s prerozdelením kapacity ako aj variabilnou dĺžkou paketov.

4.1.1 Predpoklady a označenie premenných

Pri popise navrhnutého modelu predpokladám sieťový uzol, v ktorom rozlišujeme P prioritných tried. Každá trieda má priradenú váhu w_i . Do radu i prideleného i -tej triede prichádzajú pakety so strednou veľkosťou L_i a intenzitou príchodu λ_i . Časť pridelenej prenosovej rýchlosti danej triede z celkovej kapacity linky T označíme B_i . Pre výpočet kapacity použijem iteratívnu metódu, kde k -ta iterácia výpočtu hodnoty B_i bude označená ako $B_{i,k}$.

4.1.2 Model rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WRR

Do každého radu vstupuje prevádzka, ktorej strednú vstupnú rýchlosť vypočítame ako:

$$I_i = \lambda_i L_i. \quad (1)$$

Pri návrhu modelu a jeho korektné matematické vyjadrenie musíme zanalyzovať všetky možnosti, ktoré môžu pri pridelovaní výstupnej prenosovej rýchlosti nastať. Algoritmus WRR pacuje na princípe vyslania počtu paketov zodpovedajúcich pridelenej váhe za jedno kolo plánovača. Výstupná kapacita pridelená danej triede teda zodpovedá váhe daného radu a priemernej dĺžke paketu v danom rade. Celková kapacita je teda rozdelená v nasledujúcom pomere:

$$T \frac{w_i L_i}{\sum_{j=1}^P w_j L_j}. \quad (2)$$

Prvá možnosť, ktorá môže nastať je, že každá trieda dostane takto pridelenú kapacitu a tú celú využije. Žiadne dodatočné prerozdelenie nevyužitej kapacity nenastane. Takáto situácia nastane ak:

$$T \frac{w_i L_i}{\sum_{j=1}^P w_j L_j} \leq \lambda_i L_i \quad i = 1, 2, \dots, P. \quad (3)$$

Druhý prípad je ak možnosť, ktorá môže nastať je ak prvotné priradenie pokryje všetky požiadavky tried v pozorovanom sieťovom uzle. V takomto prípade platí:

$$T \frac{w_i L_i}{\sum_{j=1}^P w_j L_j} \geq \lambda_i L_i \quad i = 1, 2, \dots, P. \quad (4)$$

V týchto dvoch prípadoch je pridelovanie kapacity ukončené počas prvej iterácie. Žiadnu časť nevyužitého pásma nie je potrebné ďalej prerozdeľovať medzi ostatné rady, ktorých požiadavky nie sú pokryté. Rad využije potrebnú kapacitu na pokrytie svojich potrieb (1) alebo časť výstupnej kapacity pridelenej na základe pravidla WRR (2):

$$B_{i,1} = \min \left(\lambda_i L_i, T \frac{w_i L_i}{\sum_{j=1}^P w_j L_j} \right). \quad (5)$$

Rovnica (5) taktiež predstavuje prvý krok iteratívneho výpočtu. Ak nie sú splnené podmienky uvedené v (3) alebo (4), je potrebné pokračovať s výpočtom nasledujúceho kroku iterácie. To znamená, že niektoré rady potrebujú viac výstupnej kapacity ako im bolo pridelené na základe vzorca (2) a niektoré iné využijú len potrebnú kapacitu uvedenú v (1). Zvyšok nevyužitej kapacity je dostupný a môže tak byť prerozdelený medzi ostatné rady. Kapacitu prerozdělíme iba medzi toky, ktorých požiadavky na prenosové pásmo ešte nie sú pokryté. Tie identifikujeme pomocou nasledujúceho výpočtu:

$$\lambda_i L_i - B_{i,k-1}. \quad (6)$$

Ak sú požiadavky daného toku pokryté výsledok bude nulový. Iná pozitívna hodnota indikuje, že tok potrebuje viac prenosového pásma ako mu bolo pridelené v predošlej iterácii.

Prerozdelenie kapacity môže, v najhoršom prípade, trvať maximálne $P-1$ iterácií. Nasledujúce iterácie vypočítame takto:

$$B_{i,k} = \min \left(\lambda_i L_i, B_{i,k-1} + \left(T - \sum_{j=1}^P B_{j,k-1} \right) \frac{w_i L_i}{\sum_{j=1}^P w_j L_j} \cdot \begin{cases} 0 & \text{ak } \lambda_j L_j - B_{j,k-1} = 0 \\ 1 & \text{inak} \end{cases} \right). \quad (7)$$

Uvedený vzorec použijeme pre výpočet všetkých nasledujúcich iterácií od $k=2$ až po $k=P$. Výpočet iterácií musíme zastaviť ak sú požiadavky všetkých tokov pokryté, v opačnom prípade nastane delenie nulou. Podmienky pre ukončenie výpočtu sú nasledujúce:

Celá výstupná kapacita linky je už rozdelená medzi toky:

$$T = \sum_{i=1}^P B_{i,k}. \quad (8)$$

Požiadavky všetkých tokov sú pokryté:

$$B_{i,k} = \lambda_i L_i \quad i = 1, 2, \dots, P. \quad (9)$$

4.1.3 Modifikácie modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WFQ

Model navrhnutý v kapitole 4.1.2 je možné jednoducho modifikovať aby bolo pomocou neho možné popísať algoritmus WFQ a iné pracujúce na podobnom princípe ako napríklad WF2Q+. Rozdiel oproti algoritmu WRR je, že algoritmus WFQ pri výbere paketu na odoslanie berie do úvahy aj veľkosť paketov. Pri sieťach s rozličnou dĺžkou paketov platí:

$$T \frac{w_i}{\sum_{j=1}^P w_j}. \quad (10)$$

Prípady, že je možné iteratívny výpočet ukončiť už v prvom kroku sú nasledujúce:

$$T \frac{w_i}{\sum_{j=1}^P w_j} \leq \lambda_i L_i \quad i = 1, 2, \dots, P. \quad (11)$$

$$T \frac{w_i}{\sum_{j=1}^P w_j} \geq \lambda_i L_i \quad i = 1, 2, \dots, P. \quad (12)$$

Prvú iteráciu tak vypočítame ako:

$$B_{i,1} = \min \left(\lambda_i L_i, T \frac{w_i}{\sum_{j=1}^P w_j} \right) \quad (13)$$

a ostatné iterácie potom budú:

$$B_{i,k} = \min \left(\lambda_i L_i, B_{i,k-1} + \left(T - \sum_{j=1}^P B_{j,k-1} \right) \frac{w_i}{\sum_{j=1}^P w_j} \cdot \begin{cases} 0 & \text{ak } \lambda_j L_j - B_{j,k-1} = 0 \\ 1 & \text{inak} \end{cases} \right). \quad (14)$$

4.1.4 Modifikácie modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WRRPQ

Model prideleného prenosového pásma pre algoritmus WRRPQ so striktnou prioritou pre prvý rad taktiež vychádza z modelu popísaného v kapitole 4.1.2. Na rozdiel od toho popisu musíme uvažovať s pevne priradenou kapacitou pre prvý tok najvyššej priority. Preto pre algoritmus WRRPQ so striktnou prioritou bude platiť:

$$B_{1,1} = B_{1,2} = \dots = B_{1,P} = B_1 = \min(\lambda_1 L_1, T) \quad (15)$$

Pre algoritmus WRRPQ, kde kapacitu pridelenú prvému toku vieme limitovať na maximálnu hodnotu B_{1lim} môžeme vzťah prepísať na:

$$B_{1,1} = B_{1,2} = \dots = B_{1,P} = B_1 = \min(\lambda_1 L_1, B_{1lim}, T) \quad (16)$$

Všetky iterácie tak budeme počítat' len pre rady 2 ... P. Keďže prvý rad už má pridelené prenosové pásmo bude pre prvú iteráciu platiť:

$$B_{i,1} = \min \left(\lambda_i L_i, (T - B_1) \frac{w_i L_i}{\sum_{j=2}^P w_j L_j} \right) \quad (17)$$

a pre ostatné iterácie platí:

$$B_{i,k} = \min \left(\lambda_i L_i, B_{i,k-1} + \left(T - \sum_{j=1}^P B_{j,k-1} \right) \frac{w_i L_i}{\sum_{j=2}^P w_j L_j} \cdot \begin{cases} 0 & \text{ak } \lambda_j L_j - B_{j,k-1} = 0 \\ 1 & \text{inak} \end{cases} \right). \quad (18)$$

kde $i=2 \dots P$.

Ostatné tvrdenia ostávajú v platnosti tak ako uvedené v kapitole 4.1.2.

4.1.5 Modifikácie modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus LLQ

Podobne ako v predchádzajúcej kapitole je možné upraviť model uvedený v 4.1.3 pre potreby opisu algoritmu LLQ, čo je kombinácia prioritného radenia a algoritmu WFQ. Opäť budeme uvažovať s pevne priradenou kapacitou prvému toku a budú tu platiť tiež vzťahy (15) a (16) pre prvú iteráciu. Pre toky 2 ... P potom bude platiť:

$$B_{i,1} = \min \left(\lambda_i L_i, (T - B_1) \frac{w_i}{\sum_{j=2}^P w_j} \right) \quad (19)$$

a pre ostatné iterácie platí:

$$B_{i,k} = \min \left(\lambda_i L_i \cdot B_{i,k-1} + \left(T - \sum_{j=1}^P B_{j,k-1} \right) \frac{w_i}{\sum_{j=2}^P w_j} \cdot \begin{cases} 0 & \text{ak } \lambda_j L_j - B_{j,k-1} = 0 \\ 1 & \text{inak} \end{cases} \right). \quad (20)$$

Ostatné tvrdenia opäť ostávajú v platnosti tak ako je uvedené v kapitole 4.1.3.

4.2 Návrh Algoritmu Weighted Round Robin and Rate Limiter based Fair Queuing

Vzhľadom na skutočnosť, že väčšina existujúcich algoritmov neposkytuje férové radenie v rámci jednej priority som sa rozhodol navrhnúť nový algoritmus pozostávajúci z viacerých funkčných blokov pracujúcich paralelne. Zároveň som sa ako základný kameň nového algoritmu rozhodol použiť algoritmus WRR, ktorý je z hľadiska implementácie veľmi jednoduchý a je možné ho implementovať aj hardvérovo. Tieto dve skutočnosti zaručujú veľmi nízke výpočtové nároky a tak aj možnosť aplikovať ho do vysokorýchlostných chrbticových sietí.

Za pomoci modelov uvedených v predchádzajúcej kapitole 4.1 tu navrhmem algoritmus Weighted Round Robin and Rate Limiter based Fair Queuing (WRRRLbFQ) poskytujúci lepšie správanie z hľadiska Worst-Case Fairness v rámci jedného radu. Pojem zahŕňa zachovanie pridelenej výstupnej kapacity nezávisle na počte a prevádzke ostatných tokov. Hlavnou myšlienkou tohto algoritmu je rozdeliť pakety v jednej prioritnej triede na základe dĺžky a predísť tak stavu, kde tok s dlhými paketmi (napr. P2P, FTP) a vysokou prenosovou rýchlosťou zahltí výstupnú linku a neumožní tak tokom s kratšími paketmi (napr. VoIP prevádzka, riadenie siete) prejsť daným sieťovým uzlom s dostatočnou pridelenou výstupnou kapacitou.

Navrhnutý algoritmus obsahuje viacero prvkov, z ktorých niektoré pracujú paralelne. Paralelné zapojenie ako aj použitie výpočtovo nenáročného algoritmu WRR, ktorý je možné implementovať hardwarovo, umožňuje dosiahnuť výsledky ako iné algoritmy (WFQ, WRR) a mať pritom nízke výpočtové požiadavky. Model algoritmu je zobrazený na Obr. 1.

Pakety vstupujúce do sieťového uzla sú v prvom kroku rozdelené *Klasifikátorom 1* tak ako pri klasických algoritmoch na základe priority a odoslané na ďalšie spracovanie do korku *II*.

V druhom kroku sú pakety opäť klasifikované na základe ich dĺžky pomocou *Klasifikátora 2*. Budeme využívať viacero intervalov pre dĺžku (napr. 0 – 200 B, 200 – 800 B a 800 – 1500 B).

V tomto kroku sú merané aj prevádzkové parametre jednotlivých prioritných tried. Namerané hodnoty sú použité ako vstup pre algoritmy výpočtu priradenej výstupnej kapacity popísané v predchádzajúcej kapitole. Pre dosiahnutie výsledkov na výstupe porovnateľných s algoritmom WFQ postačuje merať vstupujúcu prenosovú rýchlosť jednotlivých priorít. Pre algoritmus WRRR je potrebné detailnejšie meranie a to priemerná dĺžka paketov a ich priemerná intenzita príchodov.

V treťom kroku začína samotná logika navrhnutého algoritmu WRRRLbFQ. Je tu nasadený algoritmus WRR s pevne stanovenými váhami zodpovedajúcimi nepriamo úmerne dĺžkam paketov v jednotlivých radoch. Týmto nastavením dosiahneme rovnomerné rozdelenie výstupnej kapacity v rámci jednej priority medzi toky s rôznou dĺžkou paketov (napr. váha 10 pre pakety s dĺžkou 100 B a váha 1 pre pakety dĺžky 1000 B odošle v každom kole 1000 B z oboch radov). Príklad nastavenia váh pre 3 priority a 3 intervaly dĺžky paketov je zobrazený na Obr. 2.

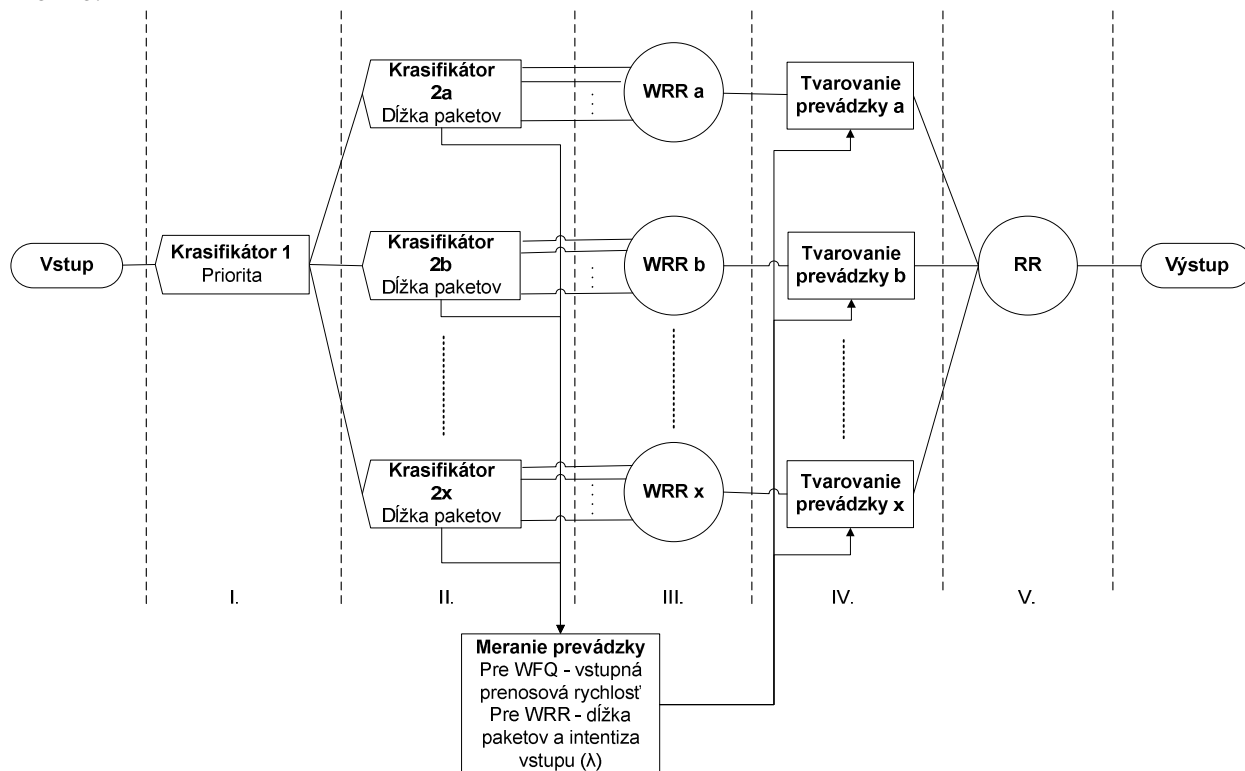
V štvrtom kroku sú nasadené algoritmy na tvarovanie prevádzky. Môžeme použiť algoritmy ako napríklad Token Bucket pre úpravu výstupnej kapacity jednotlivých prioritných tokov. Ich limit je nastavený na základe výsledkov nameraných v kroku 2 a výpočtu priradenej výstupnej kapacity. V tomto kroku pomocou tvarovačov prevádzky je dosiahnuté priradenie výstupnej kapacity medzi jednotlivé priority ako pri klasických algoritmoch (WRR, WFQ, ...).

V poslednom kroku je nasadený ďalší plánovač. Je tu možné použiť RR alebo aj FIFO, keďže krok má za úlohu len prevod paketov z paralelného prenosu priorít opäť na sériový výstup.

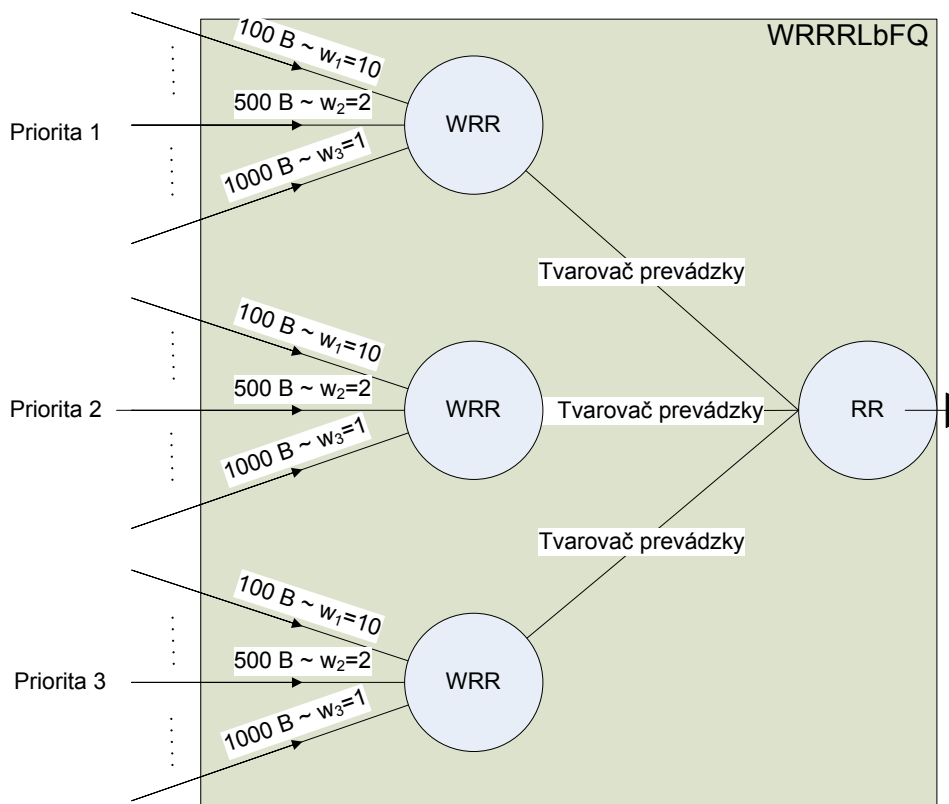
Navrhnutý algoritmus je možné upraviť aj pre využitie pripomínajúce správanie algoritmov WRRPQ a LLQ. V oboch prípadoch pre tieto algoritmy je možnosť implementácie striktnnej priority alebo rate-controlled priority. Pri rate-controlled priority môžeme zjednodušiť model algoritmu tak, že

v štvrtom kroku, kde sa tvaruje prevádzka nastavíme fixne (podľa nastavenia algoritmu) priepustnosť tvarovača a a nie je potrebné ju počas prevádzky meniť.

V prípade striktnej priority dochádza k ďalšiemu zjednodušeniu algoritmu odobratím tvarovača a , keďže pri striktnej prioritě sú všetky pakety najvyššej priority preposielané ihneď ako je možné.



Obr. 1. Schéma algoritmu WRRRLbFQ pre WFQ/WRR



Obr. 2. Príklad nastavenia algoritmu WRRRLbFQ

4.3 Overenie dosiahnutých výsledkov

Pre overenie výsledkov navrhnutého matematického modelu a algoritmu QSD boli použité simulácie v simulačnom prostredí Network simulator 2 (NS2). V simuláciách som používal 2 typy zdrojov. Jeden reprezentoval systém D/D/1, kde boli generované pakety konštantnej dĺžky a konštantným intervalom medzi nimi. Takto môžeme generovať tok s presnými parametrami, ktoré potrebujeme pre dokázanie teoretických vlastností modelu. Druhý použitý zdroj predstavoval systém M/M/1. Keďže simulátor NS2 priamo nepodporuje takýto typ prevádzky, bol použitý On/Off zdroj, ktorý generoval pakety náhodnej dĺžky s exponenciálnym rozdelením. Interval medzi generovaním jednotlivých paketov bol tiež náhodný a mal exponenciálne rozdelenie pravdepodobnosti.

4.3.1 Simulácie pre modely rozdeľovania kapacity výstupnej linky

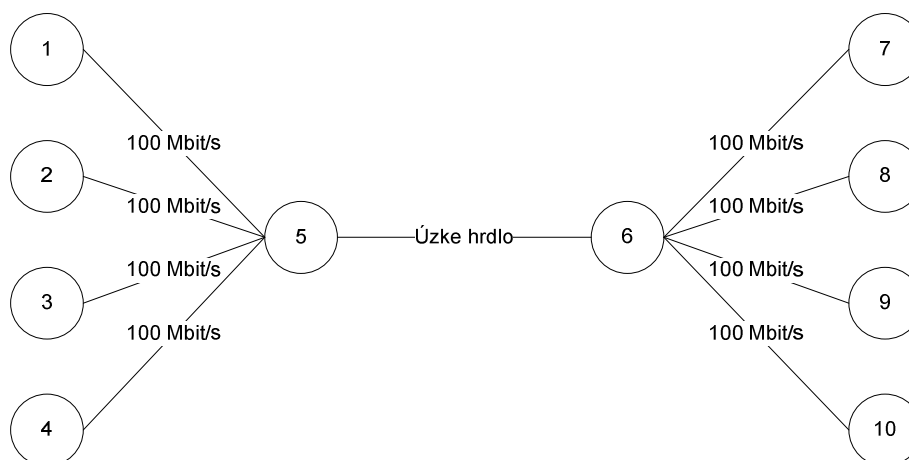
Pre porovnanie výsledkov modelov modely rozdeľovania kapacity výstupnej linky uvedených v kapitole 4 sme použili jednoduchý model siete so 4 uzlami generujúcimi prevádzku a so 4 uzlami ako prijímačmi. Medzi vysielacími a prijímačmi je medzi uzlami 4 a 5 jedna linka predstavujúca úzke hrdlo, kde budeme nastavovať kapacitu pre jednotlivé simulácie. Ostatné linky majú nastavenú rýchlosť 100 Mbit/s a nedochádza v nich k zdržaniu alebo zahodeniu paketov. V uzle 5 bude nasadený pozorovaný algoritmus a meraná priepustnosť. Čakacie rady v tomto uzle majú dostatočnú dĺžku a nedochádza v nich k zahadzovaniu paketov. Model siete je zobrazený na Obr. 3.

Priepustnosť uzla je meraná 20 s od začatia simulácie, čím je dosiahnutý ustálený stav siete a čakacie rady sú naplnené paketmi. Celá simulácia trvala 200 s, okrem prípadov s extrémne nízkymi intervalmi príchodu, kde bola dĺžka simulácie predĺžená na 1000 s. Simulácie boli vykonané pre algoritmy WRR, WFQ, WF²Q+, WRRPQ so striktnou prioritou ako aj limitovanou a pre LLQ so striktnou prioritou.

Výsledky simulácií pre algoritmus WRR sú zobrazené v Tab. 1. Ako je vidieť v priloženej tabuľke výsledky matematického modelu korešponujú s výsledkami simulácií. Väčšie rozdiely je možné pozorovať len pri simuláciách s extrémne nízkymi hodnotami dĺžky paketov, kde nejde o chybu modelu ale o chybu pri generovaní paketov napr. so strednou dĺžkou 1 B čo nie je možné, keďže všetky vygenerované pakety boli dlhé minimálne 1 B alebo väčšie.

Väčšia stredná kvadratická odchýlka pri simuláciách so zdrojom prevádzky M/M/1 je spôsobená nízkou výslednou priepustnosťou, kde aj veľmi malá zmena nameranej hodnoty spôsobí nárast odchýlky.

Obe odchýlky môžu byť aj spôsobené chybou merania ak zastavíme simuláciu tesne pred alebo tesne po prijatí veľkého paketu môže to výrazne ovplyvniť výsledok pri malej intenzite vstupov a tak aj celkovej generovanej prevádzke.



Obr. 3. Simulačný model siete

Tab. 1. Porovnanie výsledkov simulácie a výpočtu modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WRR

Číslo simulácie [#]	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Priemerná dĺžka paketov [B]	100	100	375	375	375	1000	1000	1000	1000
	1000	1000	375	375	375	100	1000	100	1000
	1000	1000	375	375	375	10	1000	1000	1000
	1500	1500	375	375	375	1	1000	100	1000
Intenzita príchodu paketov [paket/s]	100	100	1000	1000	1000	100	1	1000	100
	10	10	1041,67	1000	1000	100	10	100	100
	10	10	1000	750	750	100	100	1000	100
	1	1	416,67	500	750	100	1000	100	100
Vstupná prenosová rýchlosť [Mbit/s]	0,08	0,08	3	3	3	0,8	0,008	8	0,8
	0,08	0,08	3,125	3	3	0,08	0,08	0,08	0,8
	0,08	0,08	3	2,25	2,25	0,008	0,8	8	0,8
	0,012	0,012	1,25	1,5	2,25	0,0008	8	0,08	0,8
Nastavenie váh	4	4	4	4	4	1	4	4	40
	3	3	3	3	3	1	3	3	3
	2	2	2	2	2	1	2	2	2
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Kapacita linky [Mbit/s]	100	0,05	10	10	10	0,5	4	8	1,6
Výsledok modelu [Mbit/s]	0,08	0,0029	3	3	3	0,45	0,008	5,22	0,8
	0,08	0,0217	3,099	3	3	0,045	0,08	0,08	0,4
	0,08	0,0145	2,65	2,25	2,25	0,0045	0,8	2,61	0,266
	0,012	0,0108	1,248	1,5	1,75	0,00045	3,112	0,08	0,133
Výsledky simulácie pre D/D/1 [Mbit/s]	0,0800	0,0029	3,0002	3,0003	2,9992	0,4501	0,0079	5,2265	0,7979
	0,0797	0,0217	3,1278	3,0025	3,0003	0,0450	0,0799	0,0801	0,4010
	0,0801	0,0145	2,6209	2,2492	2,2513	0,0045	0,7999	2,6133	0,2674
	0,0122	0,0109	1,2512	1,4998	1,7492	0,0005	3,1123	0,0802	0,1337
Výsledky simulácie pre M/M/1 [Mbit/s]	0,08±0,79%	0,003±4,04%	3,01±0,18%	3,001±0,27%	3,004±0,35%	0,449±0,12%	0,008±9,17%	5,206±0,14%	0,805±0,66%
	0,08±2,9%	0,022±2,82%	3,125±0,27%	3,003±0,28%	3±0,26%	0,045±1,17%	0,079±2,13%	0,08±0,87%	0,398±0,67%
	0,08±1,47%	0,015±2,06%	2,613±0,29%	2,251±0,35%	2,251±0,27%	0,005±1,01%	0,8±0,77%	2,633±0,27%	0,264±1,34%
	0,012±5,91%	0,011±5,24%	1,252±0,25%	1,502±0,33%	1,746±0,75%	0,001±0,56%	3,113±0,15%	0,08±0,75%	0,133±1,35%

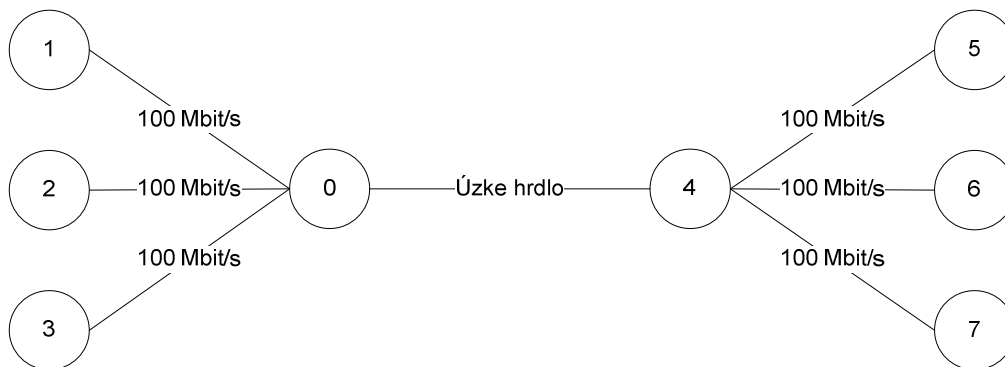
4.3.2 Simulácie algoritmu WRRRLbFQ

Pre prezentáciu funkcionality resp. overenie funkčnosti navrhnutého algoritmu WRRRLbFQ uvedeného v kapitole 4.2 som použil model siete s 3 uzlami generujúcimi prevádzku a s 3 prijímacími uzlami. Podobne ako v predchádzajúcom prípade boli tieto uzly prepojené linkou, kde som nastavoval potrebnú priepustnosť pre prezentovanie výsledkov. Použitý model je zobrazený na Obr. 4. Čakacie rady majú opäť dostatočnú dĺžku a nedochádza v nich k zahadzovaniu paketov ako aj rýchlosť liniek je nastavená na 100 Mbit/s takže v ostatných uzloch nedochádza k zdržaniu paketov a skresleniu výsledkov. K uzlu číslo 1 sú pripojené vždy toky najvyššej priority, k druhému uzlu toky druhej priority a k 3. uzlu toky najnižšej priority. Nastavenie váh bolo pre najvyššiu prioritu 4, pre druhú 2 a pre poslednú 1.

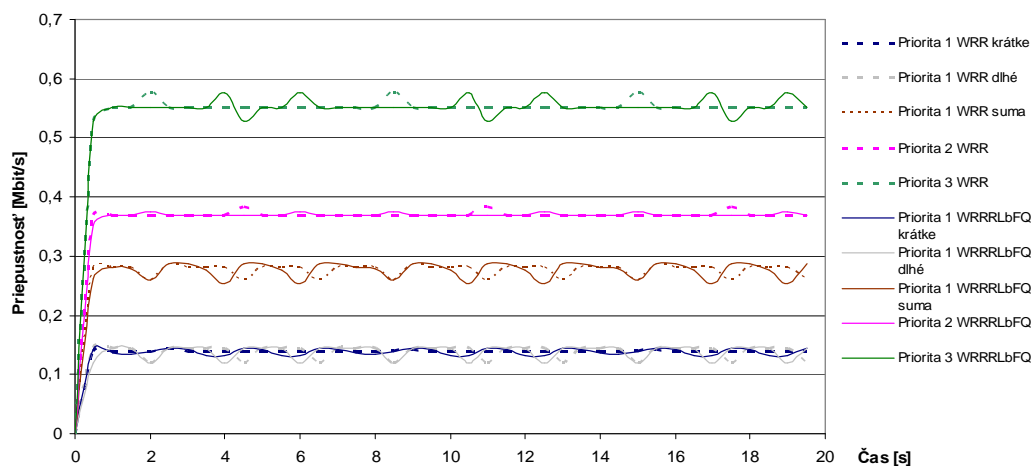
Bolo vykonaných viacero simulácií pre rôzne nastavenia prevádzky a linky medzi uzlami 0 a 4. Simulácie bežali v oboch prípadoch 20 s a počas nich bolo pre každý paket merané oneskorenie. Priepustnosť bola meraná v 0,5 s intervale pre jednotlivé prioritné toky ako aj intervaly dĺžky paketov.

Intervaly na základe, ktorých sme delili pakety podľa dĺžky boli nastavené nasledovne: 0 – 200 B, 201 – 800 B a pakety väčšie ako 800 B. Pakety takto zadelené do tokov podľa ich dĺžky boli aj sledované z hľadiska priepustnosti a oneskorenia.

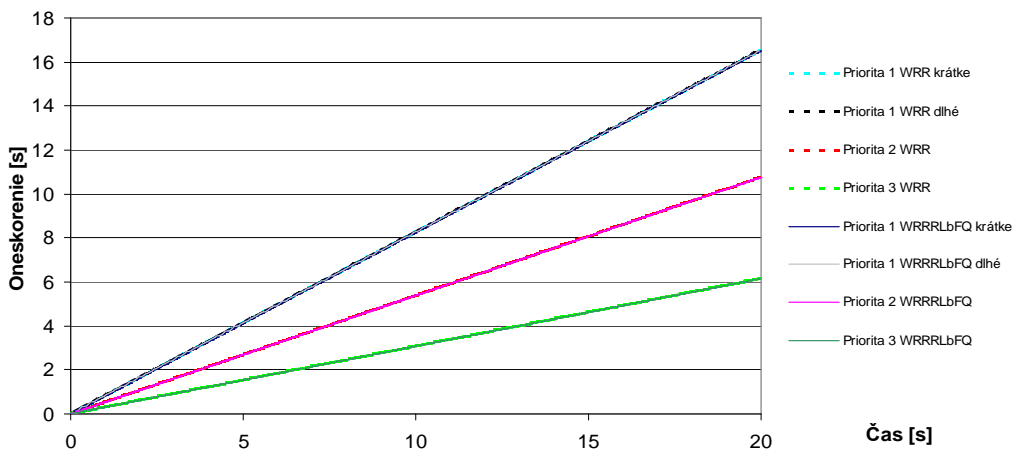
Počas simulácií boli porovnávané výsledky algoritmu WRRRLbFQ s výsledkami algoritmov WRR, WFQ, WRRPQ so striktnou prioritou, WRRPQ s rate-controlled prioritou a LLQ so striktnou prioritou.



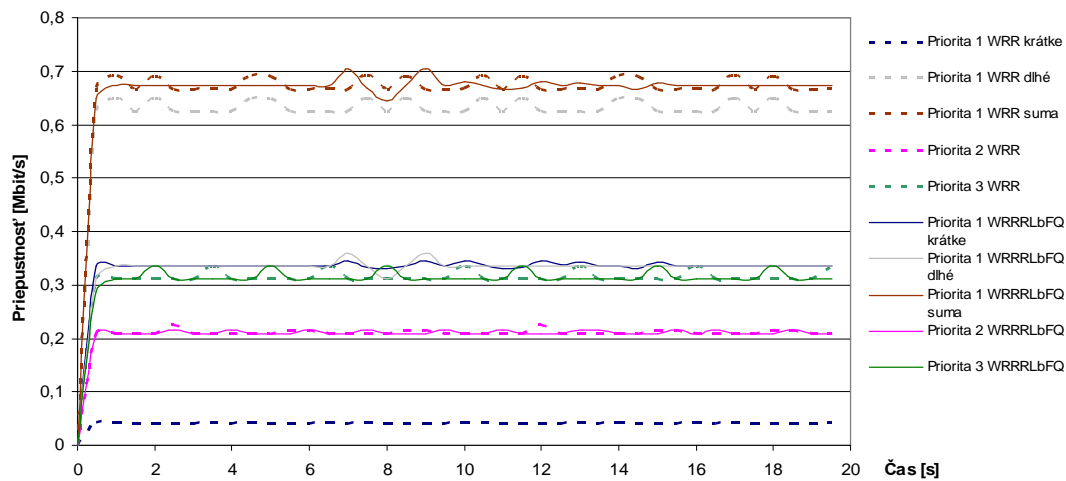
Obr. 4. Simulačný model siete pre WRRRLbFQ



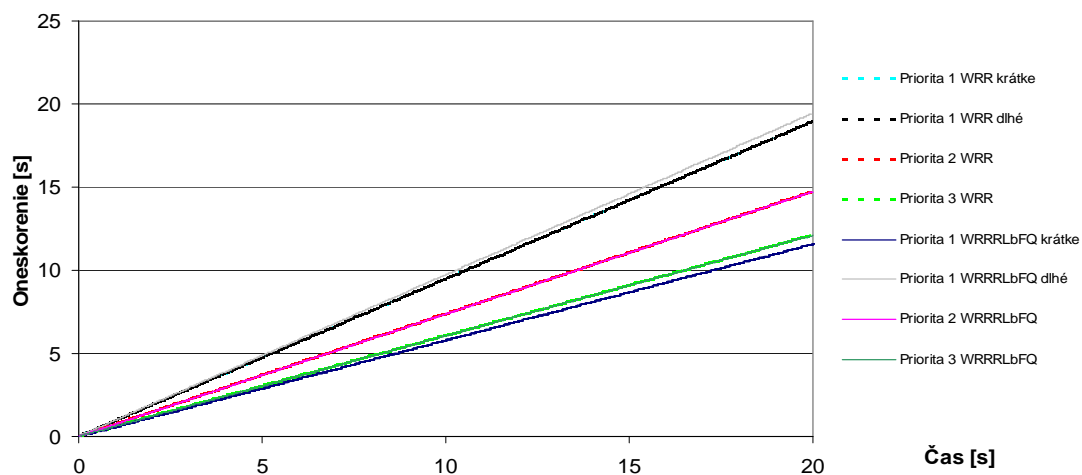
Obr. 5. Porovnanie priepustnosti WRR a WRRRLbFQ pre toky s rovnakou intenzitou vstupov



Obr. 6. Porovnanie oneskorenia WRR a WRRRLbFQ pre toky s rovnakou intenzitou vstupov



Obr. 7. Porovnanie priepustnosti WRR a WRRRLbFQ pre toky s rôznou intenzitou vstupov



Obr. 8. Porovnanie oneskorenia WRR a WRRRLbFQ pre toky s rôznou intenzitou vstupov

Ako je možné sledovať na Obr. 5. a Obr. 6. pri zachovaní rýchlosti vstupujúcich tokov, dosahuje navrhnutý algoritmus výsledky ako model rozdeľovania kapacity výstupnej linky, použitý na nastavenie tvarovačov.

Avšak pri tokoch s rozličnou dĺžkou paketov a intenzitou vstupov nedochádza k zvýhodneniu toku s väčšou vstupnou prenosovou rýchlosťou, ale pakety rôznej dĺžky dostanú pridelenú rovnakú výstupnú kapacitu. Je tak možné čiastočne garantovať férovosť radenia v rámci jednej prioritnej triedy vzhľadom na toky s rôznou dĺžkou paketov. V sume však toky jednej prioritnej triedy dosahujú rovnaký výsledok ako referenčný algoritmus.

Na Obr. 7. priepustnosti pre algoritmus WRR vidíme, že oba algoritmy dosahujú v sume pre prioritu 1 rovnakú priepustnosť. Rozdiel je však vo vnútri danej priority. Kým pri algoritme WRR je krátkym paketom vysielajúcim menej intenzívne pridelené výrazne menej výstupnej kapacity ako dlhým paketom algoritmus WRRRLbFQ pridelí obom rovnaký podiel výstupnej kapacity.

Rozdiel možno pozorovať aj pri oneskorení na Obr. 8. Pri algoritme WRR krátke aj dlhé pakety dosahujú rovnaké oneskorenie v prioritne 1, čo je spôsobené čakaním v jednom rade, v rámci ktorého sú obsluhované na základe FIFO. Pri algoritme WRRRLbFQ dosahuje tok s nižšou intenzitou a krátkymi paketmi nižšie oneskorenie, dlhé pakety naopak vyššie oneskorenie. To je spôsobené vyšším percentom odoslaných krátkych paketov oproti dlhším.

5 Súhrn výsledkov a nových poznatkov

Práca sa zaoberala spôsobmi prioritizácie paketov v systémoch s podporou QoS. Bližšie pozornosť je venovaná algoritmom QSD, ktoré rozhodujú o výbere čakajúcich paketov z radov. Rozhodujú tak o poradí, oneskorení, pridelenej výstupnej kapacite a iných parametrov prevádzky na výstupe zo sieťového uzla. Pre korektné nastavenie parametrov, týchto algoritmov je potrebné poznať ako sa ich zmena prejaví na správaní sa siete. Algoritmy pracujú na rôznych princípoch a každý z nich má určité kladné ale aj záporné vlastnosti. Tieto skutočnosti ma priviedli k sformulovaniu cieľov práce a jej hlavným prínosom, ktoré sú nasledovné:

1. Bol navrhnutý matematický model pre výpočet rozdeľovania kapacity výstupnej linky pre algoritmus WRR. Tento model zohľadňuje prerozdelenie nevyužitej výstupnej kapacity, ako aj rôznu dĺžku paketov v jednotlivých čakacích radoch. Ako vstup pre výpočet je použitá priemerná dĺžka paketov v jednotlivých radoch, ich priemerná intenzita príchodov do sieťového uzla, počet čakacích radov a kapacita výstupnej linky. Model počíta pridelenú kapacitu iteratívnym spôsobom, kde počet iterácií je rovný maximálnej počtu čakacích radov.
2. Navrhnutý matematický model bol modifikovaný pre nasledovné algoritmy:
 - a. WFQ,
 - b. WRRPQ so striktnou prioritou,
 - c. LLQ so striktnou prioritou,
 - d. WRRPQ s rate-controlled prioritou,
 - e. LLQ s rate-controlled prioritou.
3. Princíp fungovania navrhnutého modelu rozdeľovania kapacity výstupnej linky bol prezentovaný na modelových príkladoch. Pre overenie bolo realizované veľké množstvo simulácií s rôznymi parametrami v simulačnom prostredí NS2. Realizácii simulácií predchádzalo rozšírenie simulátora o algoritmus WRRPQ so striktnou aj rate-controlled prioritou.
4. Bol navrhnutý nový QSD algoritmus Weighted Round Robin and Rate Limiter based Fair Queuing, pozostávajúci z dvojúrovňovej klasifikácie paketov, paralelne zapojených čakacích radov obsluhovaných algoritmom WRR a tvarovačov prevádzky. Prínosom navrhnutého algoritmu je garancia férového pridelenia výstupnej kapacity vo vnútri jedného prioritného toku medzi toky s rôznou dĺžkou paketov a intenzitou príchodov. Navrhnutý algoritmus využíva pre nastavenie tvarovačov prevádzky model výpočtu rozdeľovania kapacity výstupnej linky a je tak pomocou neho možné, z pohľadu jednej prioritnej triedy, dosiahnuť zhodné výsledky ako pri algoritmoch WRR, WFQ, WRRPQ a LLQ.
5. Pomocou simulácií v prostredí NS2 bol na zvolených simulačných scenároch prezentovaný navrhnutý algoritmus WRRRLbFQ a bola overená jeho funkčnosť a výhody. Výsledky simulácií boli porovnané so simuláciami algoritmov WRR, WFQ, WRRPQ a LLQ.

6 Použitá literatúra

- [1] BAROŇÁK, I. *Spojovacie systémy II*. [Prednášky.] [Bratislava] : FEI STU, 2004. 280. s.
- [2] DOSTÁLEK, L., KABELOVÁ, A. *Velký průvodce protokoly TCP/IP a systémem DNS*. Praha (Česká republika) : Computer Press. 2002. 542. s. ISBN 80-7226-675-6.
- [3] Cisco Systems - *Internetworking Technology Handbook - Internet Protocols (IP)*; [Internetworking]. [online]. [cit. 2010-07-13]. Dostupné na internete: <http://docwiki.cisco.com/wiki/Internet_Protocols >
- [4] SCHULZRINNE, H., et. al. *RTP : A Transport Protocol for Real-Time Applications*. [online]. Network Working Group, The Internet Society, 2003. [cit. 2010-02-18]. Dostupné na internete: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc3550.txt>>. Dokument RFC 3550.
- [5] RSVP: *Resource Reservation Protocol* [online]. [cit. 2010-03-03]. Dostupné na internete:<<http://www.javvin.com/protocolRSVP.html>>
- [6] International Telecommunication Union: *Packet Based Multimedia Communication Systems, Recommendation ITU-T H.323*. [online]. [cit. 2010-04-12]. Dostupné na internete:<http://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-H.323-200912-I!!PDF-E&type=items>
- [7] VOZNAK, M.: *Comparison of H.323 and SIP Protocol Specification*. [online]. In: RTT 2003: The 5th International Conference on Research in Telecommunication Technologies, STU Bratislava, September 2003. [cit. 2010-04-13]. ISBN 80-227-1934-X, pp. 45-47. Dostupné na internete: <http://homel.vsb.cz/~voz29/files/voz_29.pdf>
- [8] KUMAR, V., KORPI, M., SENGODAN, S.: *IP Telephony with H.323*. Hoboken, New Jersey, USA. Wiley Publishing, Inc., 2001. 605. p. ISBN 0-471-39343-6.
- [9] International Telecommunication Union: *Definition of Next Generation Network*. [online]. [cit. 2010-06-19]. Dostupné na internete: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com13/ngn2004/working_definition.html>
- [10] WÓJCIK, R.: *Next Generation Networks architecture by ITU-T*. [online]. [cit. 2010-06-22]. Dostupné na internete: <http://www.kt.agh.edu.pl/~pacyna/lectures/advances_in_mobility_and_security/slides/ngn.pdf >
- [11] GONZALES SOTO, O.: *Network Architecture Migration towards NGN*. [online]. [cit. 2010-06-25]. Dostupné na internete: <<http://www.docstoc.com/docs/10151950/Network-Architecture-Migration-towards-NGN>>
- [12] BAROŇÁK, I., HALÁS, M.: *H.323 Versus SIP*. In: RTT 2005: 6th International conference on Research in Telecommunication Technology : Proceedings. Hradec nad Moravicí, Czech Republic. 12.- 14. Sep. 2005. - Ostrava (Česká republika) : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0897-8.
- [13] NICHOLS, K., BLAKE, S., BAKER, F., BLACK, D. *Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers*. [online]. Network Working Group, The Internet Society, 1998. [cit. 2011-02-06]. Dostupné na internete: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc2474.txt>>. Dokument RFC 2474.
- [14] POLEC, J., KARLUBÍKOVÁ, T. *Stochastické modely v telekomunikáciách 1*. 1. vyd. [Bratislava] : Fond Jozefa Murgaša pre telekomunikácie n.f. vo vydavateľstve FABER, 1999. 128 s. ISBN 80-968125-0-5.
- [15] DAVIDSON, J., PETERS, J., BHATIA, M., KALIDINDI, S., MUKHERJEE, S. *Voice over IP Fundamentals*, Second Edition. Indianapolis, Indiana, USA : Cisco Press. 2006. 372. s. ISBN 978-1-58705-257-6
- [16] VOZŇÁK, M.: *Optimalizace hlasového provozu s ohledem na kvalitu hovoru v sítích s technologií VoIP*. [Dizertačná práca]. FEI TU Ostrava. Ostrava. 2002. 100. s.

- [17] JANATA, J.: *Zabezpečenie QoS multimediálnych tokov v MPLS sieťach*. [Diplomová práca]. FEI STU Bratislava. Bratislava. 2010. 80. s.
- [18] SOUMAR, M.: *Signalizační protokol pro přenos hlasu přes datové sítě – SIP*. [online]. [cit. 2010-04-13]. Dostupné na internete: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/03003/index.html>>
- [19] DOCSIS : *Data Over Cable Service Interface Specifications* [online]. [cit. 2010-06-20]. Dostupné na internete: <<http://docsis.org>>
- [20] Propagation delay and delay skew [online]. 2012. [cit. 2012-01-14]. Dostupné na internete: <http://www.siemon.com/us/white_papers/97-06-03-delayskew.asp>
- [21] BHATIA, M., DAVIDSON, J., KALIDINDI, S., MUKHERJEE, S., PETERS, J.: *VoIP: An In-Depth Analysis*. [online]. Indianapolis, Indiana, USA : Cisco Press. 2006. [cit. 2011-04-07]. Dostupné na internete: <<http://media.techtarget.com/searchVoIP/downloads/VoIP%5B1%5D.In.Depth.Analysis.Ch7.pdf>>
- [22] GREENE, N., RAMALHO, M., ROSEN, B.: *Media Gateway Control Protocol Architecture and Requirements*. [online]. Network Working Group, The Internet Society, 2000. [cit. 2010-06-21]. Dostupné na internete: <<http://tools.ietf.org/html/rfc2805/>>. Dokument RFC 2805.
- [23] ITU-T Recommendation G.114. *One way transmission time*. (2003). [cit. 2011-05-08] Dostupné na internete: <<http://www.cs.columbia.edu/~andrea/new/documents/other/T-REC-G.114-200305.pdf>>
- [24] Ixia IxChariot [online].2012.[cit. 2011-09-12] Dostupné na internete: <<http://www.ixchariot.com/>>
- [25] CARLSSON, P.; et al.: *Delay performance in IP routers*. In: Proceedings of HET-NETs'04, Ilkley, UK, 2004. [cit. 2012-03-15]. Dostupné na internete:<http://researchwebshelf.com/uploads/137_P15.pdf>
- [26] GROVES, C., PANTALEO, M., ANDERSON, T., TAYLOR, T.: *Gateway Control Protocol Version 1*. Network Working Group, The Internet Society, 2003. [cit. 2010-07-02]. Dostupné na internete: <<http://tools.ietf.org/html/rfc3525.txt>>
- [27] HOHN, N.;et al.: *Bridging Router Performance and Queuing Theory*. In Proc. Of ACM SIGMETRICS '04. June 2004. [cit. 2012-04-19]. Dostupné na internete: <http://www.cubinlab.ee.unimelb.edu.au/~darryl/Publications/full_router_camera.pdf>
- [28] HAYES, J. F., GANESH BABU, T. V. J.: *Modeling and Analysis of Telecommunications Networks*. 1st. ed. Hoboken, New Jersey, USA) : John Wiley, 2004. 399 s. ISBN 0-471-34845-7.
- [29] GRIMM, Ch., SCHLÜCHTERMANN, G.: *IP Traffic Theory and Performance*. Berlin; Heidelberg : Springer, 2008. 487. s. ISBN 978-3-540-70603-8.
- [30] MANDJES, M. R. H., ZURANIEWSKI, P.: *M/G/infinity transience, and its applications to overload detection*. [online]. Amsterdam : Centrum Wiskunde & Informatica, 2009. [cit. 2011-11-15]. 22 s. Dostupné na internete: <<http://oai.cwi.nl/oai/asset/14082/14082D.pdf>>. ISSN 1386-3711.
- [31] MANDEJS, M., MEENT, R., QUEIJA, S. N.: *A classification of IP traffic models*. [online]. Enschede (Holandsko) : University of Twente, 2003. [cit. 2011-10-29]. Dostupné na Internete: <<http://arch.cs.utwente.nl/projects/m2c/m2c-D21.pdf>>
- [32] POPESCU, A., CONSTANTINESCU, D.: *Measurement of One-Way Transit Time in IP Routers*. [online]. Karlskrona (Švédsko) : Blekinge Institute of Technology, School of Engineering, Dept. of Telecommunication Systems, 2005. [cit. 2011-9-29]. Dostupné na Internete:<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.101.729&rep=rep1&type=pdf>>
- [33] CONSTANTINESCU, D., POPESCU, A.: *Modeling of One-Way Transit Time in IP Routers*. [online]. In: IEEE Advanced International Conference on Telecommunications (AICT '06),

- Guadeloupe, French Caribbean, 2006. [cit. 2011-10-19]. Dostupné na Internete: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10670/33674/01602148.pdf>>.
- [34] HERNANDEZ, A., MAGANA, E.: *One-way Delay Measurement and Characterization*. [online]. In: IEEE ICNS '07, p.114, Washington, DC, USA. 2007. [cit. 2011-11-12]. Dostupné na Internete: <<http://origin-www.computer.org/plugins/dl/pdf/proceedings/icns/2007/2858/00/25580114.pdf>>
- [35] KLEMM, A., LINDEMANN, Ch., LOHMANN, M.: *Modeling IP traffic using the batch Markovian arrival process*. [online]. In: Performance Evaluation, Vol. 54, Issue 2, Elsevier Science Publishers, B. V. Amsterdam, The Netherlands, 2003. pp. 149 – 173. [cit. 2011-10-15]. Dostupné na Internete: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.14.5777&rep=rep1&type=pdf>>.
- [36] XI, B., CHEN, H., CLEVELAND, W. S., TELKAMP, T.: *Statistical analysis and modeling of Internet VoIP traffic for network engineering*. [online]. In: Electronic Journal of Statistics, Vol. 4, Institute of Mathematical Statistics, 2010, pp. 58 – 116. [cit. 2011-12-02] Dostupné na internete: <http://projecteuclid.org/DPubS/Repository/1.0/Disseminate?view=body&id=pdfview_1&handle=euclid.ejs/1264775213>. ISSN 1935-7524.
- [37] De MATTOS, C. I., RIBEIRO, E. P., PEDROSO, C. M.: *A New Model for VoIP Traffic Generation*. [online]. In: The 7th International Telecommunications Symposium: ITS 2010. Federal University of Parana, Graduate Programm on Electrical Engineering, Centro Politecnico, Curitiba, Parana, Brazilia, 2010. [cit. 2011-12-15]. Dostupné na internete: <http://www.eletrica.ufpr.br/pedroso/Artigos/artigo_its_final_temp_its.pdf>
- [38] GUSTAFSON, F., LINDAHL, M.: *Evaluation of Statistical Distributions for VoIP Traffic Modelling*. [online]. Trollhättan (Švédsko): University West, 2008, p.48. [cit. 2011-12-17]. Dostupné na internete: <<http://www2.bibliotek.hv.se/exarb/T08-117.pdf>>
- [39] IPSUPERMARKET.COM *Multimedia – Codecs*. [online]. [Bangalore (India); Stuttgart]: DMC, 2010. [cit. 2011-01-15]. Dostupné na internete: <<http://www.ipsupermarket.com/Multimedia-Codecs/dynamic/group/1.htm>>
- [40] SCHULZRINNE, H.: *Audio codecs*. [online]. New York (USA): Columbia University, 2008. [cit. 2011-01-18]. Dostupné na internete: <<http://www.cs.columbia.edu/~hgs/audio/codecs.html>>
- [41] VoIP THINK. *Codec Summary Table*. [online]. [cit. 2011-01-25]. Dostupné na internete: <<http://www.en.voipforo.com/codec/codecs.php>>
- [42] VAN MIEGHEN, P.: *Performance Analysis of Communications Networks and Systems*. [online]. 1st ed. Cambridge; New York; Melbourne; Madrid; Cape Town; Singapore; São Paulo: Cambridge University Press, 2006. 542 s. [cit. 2011-11-07]. Dostupné na internete: <http://www.nas.ewi.tudelft.nl/people/Piet/CUPbookChapters/PACUP_Poisson.pdf> ISBN 978-0-521-10873-7. Kapitola 7, Poissonov process, pp. 122 – 124.
- [43] SINCLAIR, B.: *Solving Discrete-Time Markov Chains*. [online]. Verzia 2.3. Houston, USA, Connexions, 2005. [cit. 2012-01-20]. Dostupné na internete: <<http://cnx.org/content/m10835/2.3/?format=pdf>>
- [44] KIST, A.: *Erlang B as a Performance Model for IP Flows*. In: *15th IEEE International Conference on Networks, ICON 2007*. Adelaide: IEEE, 19-21 November 2007. ISBN 1-4244-1230-7. pp. 37 – 41.
- [45] HAYES, J. F.; et al.: *Modeling and Analysis of Telecommunications Networks*. Wiley Interscience, 2004. 416. s. ISBN 978-0-471-34845-0.
- [46] Cisco Systems, Inc. *Routing Performance*. [Product Sheet, online]. Dostupné na Internete: <<http://www.cisco.com/web/partners/downloads/765/tools/quickreference/routerperformance.pdf>>
- [47] KAMALJIT, I.: *Study, analysis and modeling of ip multimedia systems on next generation networks providing mobile and fixed multimedia services*. [online]. India, University

Saurashtra, 2010. 344. s. Dostupné na internete:
<<http://ietd.inflibnet.ac.in/handle/10603/734>>

- [48] NUGROHO, H.: *Deep Diving Router Architecture*. [online]. 2009. Dostupné na internete:
<<http://brokenpipes.blogspot.com/2009/03/deep-diving-router-architecture-part-i.html>>
- [49] AWEYA, J.: *IP Router Architectures: An Overview*. [online]. In: *International Journal of Communication Systems*, Vol. 14, Issue 5, John Wiley & Sons, Ltd., 2001. pp. 447–475. [cit. 2011-09-07] Dostupné na internete:< <http://www.cs.virginia.edu/~cs757/papers/awey99.pdf> >
ISSN 1099-1131.
- [50] HARDY, W. C.: *QoS: Measurement and Evaluation of Telecommunications Quality of Service*. [online]. John Wiley & Sons, Ltd, 2001. ISBN: 0-470-84591-0. [cit. 2011-08-12]. Dostupné na internete:< <http://www.kcci.com.pk/portals/0/doc/%28ebook%29%20Wiley%20-%20QoS%20-%20Measurement%20and%20Evaluation%20of%20Telecomm.pdf>>

7 Publikácie autora

ADE Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

- [1] Balogh, T. and Medvecký, M: Average Delay and Queue Length Model for WRRPQ. In: WSEAS Transactions on Communications. - ISSN 2224-2864. - Vol. 13, (2014), p. 186-194
- [2] Balogh, Tomáš - Medvecký, Martin: Average Bandwidth Allocation Model of WFQ. In: Modelling and Simulation in Engineering. - ISSN 1687-5605. - Vol. 2012 (2012), Art. No. 301012 [7] p.
- [3] Balogh, Tomáš - Medvecký, Martin: Comparison of Priority Quauing Based Scheduling Algorithms. In: Elektrov revue. - ISSN 1213-1539. - Roč. 15, 16.11.2010 (2010), art. no 93
- [4] Balogh, Tomáš [50%] - Medvecký, Martin [50%]: Weighted Round Robin and Rate Limiter based Fair Queuing for WFQ. In: Advances in Electrical and Electronic Engineering (**Článok odoslaný 25.4.2014**)
- [5] Balogh, Tomáš [50%] - Medvecký, Martin [50%]: Weighted Round Robin and Rate Limiter based Fair Queuing for WRR. In: ETRI Journal (**Článok odoslaný 27.4.2014**)

ADF Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

- [6] Medvecký, Martin - Balogh, Tomáš: Prioritizácia paketov v sieťach s podporou QoS. In: EE časopis pre elektrotechniku a energetiku. - ISSN 1335-2547. - Roč. 13, mimoriadne č (2007), s. 208-211

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [7] Balogh, Tomáš - Luknárová, Denisa - Medvecký, Martin: Performance of Round Robin-Based Queue Scheduling Algorithms. In: CTRQ 2010 : The Third International Conference on Communication Theory, Reliability, and Quality of Service. Athens, Greece, 13.-19.6.2010. - Los Alamitos : IEEE Computer Society, 2010. - ISBN 978-0-7695-4070-2. - S. 156-161
- [8] Balogh, Tomáš - Medvecký, Martin: Performance Analysis of Priority Quauing Based Scheduling Algorithms. In: Telecommunications and Signal Processing TSP-2010 : 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Baden near Vienna, Austria, 17.-20.8.2010. - Budapest : Asszisztencia Szervező Kft., 2010. - ISBN 978-963-88981-0-4. - S. 228-233
- [9] Balogh, Tomáš - Medvecký, Martin: Performance Evaluation of WFQ, WF2Q+ And WRR Queue Scheduling Algorithms. In: Telecommunications and Signal Processing TSP-2011 : 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing. Budapest, Hungary, 18.-20.8.2011. - Brno : VUT v Brně, 2011. - ISBN 978-1-14577-1409-2. - S. 136-140
- [10] Balogh, Tomáš - Medvecký, Martin: Delay Analysis of PQ and WFQ Using Markovian Queuing Models. In: RTT 2011. Research in Telecommunication Technology : 13th International Conference. Techov, Czech Republic, September 7- 9, 2011. - Brno : University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-214-4283-2. - S. 1-5
- [11] Luknárová, Denisa - Medvecký, Martin - Balogh, Tomáš: Efficiency of Neural Network based QMM Algorithms. In: RTT 2011. Research in Telecommunication Technology : 13th International Conference. Techov, Czech Republic, September 7- 9, 2011. - Brno : University of Technology, 2011. - ISBN 978-80-214-4283-2. - S. 148-151
- [12] Balogh, Tomáš - Medvecký, Martin: Mean Bandwidth Allocation Model of WRR for IP Networks. In: Telecommunications and Signal Processing TSP-2012 : 35th International

Conference on Telecommunications and Signal Processing. Prague, Czech Republic, July 3-4, 2012. - Brno : VUT v Brně, 2012. - ISBN 978-1-4673-1116-8. - S. 156-160

AFD Publikované příspěvky na domácích vědeckých konferencích

- [13] Balogh, Tomáš - Medvecký, Martin: Packet Prioritization in Qos Supporting. In: ELITECH'11 : 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. - Bratislava : Nakladateľstvo STU, 2011. - ISBN 978-80-227-3500-1. - S. 1-5

8 Účasť autora na projektoch

- [V1] Projekt *VEGA 1/0565/09* - Modelling of traffic parameters in NGN telecommunication systems and networks. Ústav telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2009 – 2011.
- [V2] Projekt *ITMS 26240120005, OPVaV - 2008/4.1/01–SORO* - Operating program research and development. Center of excellence – SMART technologies, networks and Services I. (IMS Platform for NGN). Ústav telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2009 – 2011.
- [V3] 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.

9 Ostatné aktivity

Cvičenia z predmetu Riadenie telekomunikačných systémov – ZS akad. rokov 2009/10, 2010/11, 2011/12

- Cvičenia z predmetu Komunikačné a informačné siete – LS akad. rokov 2009/10
- Oponovanie bakalárskych a diplomových prác
- Tajomník komisie fakultnej prehliadky ŠVOČ 2011
- Tajomník komisie štátnych záverečných skúšok v inžinierskom študijnom odbore Telekomunikácie (akad. roky 2009/10, 2010/11 a 2011/12)
- Tajomník komisie štátnych záverečných skúšok v bakalárskom študijnom odbore Telekomunikácie (akad. rok 2010/11)
- Člen kolektívu recenzentov konferencie Research in Telecommunication Technology RTT 2011
- Člen kolektívu recenzentov konferencie Telecommunications and Signal Processing TSP 2012, 2013 a 2014

10 Resume

The scope of this thesis is focused on queue scheduling algorithms in packet oriented systems with QoS support. The primary objective was to propose a new queue scheduling algorithm.

First of all a brief introduction to random variables, queuing theory and Markovian models is given, followed by the description of Quality of Service parameters, possibilities to prioritize packets in networks and scheduling algorithms.

The main part of the work focuses on the design of an iterative mathematical bandwidth allocation model for the WRR algorithm. The proposed model is then modified to fit also to other algorithms like WFQ, LLQ, and WRRPQ with strict and rate-controlled priority. The proposed mathematical model considers variable utilization and packet size in different queues and packet redistribution in the calculations.

The proposed model was used to propose a new scheduling algorithm called Weighted Round Robin and Rate Limiter based Fair Queuing providing in-queue fairness between flows with different packet size by achieving low computing requirements. The proposed model is based on parallel usage of multiple WRR schedulers, rate limiters and output bandwidth calculation. The output of the model in case of flows with same packet size or arrival rate is the same as for the reference scheduler used for the bandwidth allocation calculation. When flows with higher input rate and larger packets enter the queue they are not preferred and get the same output as flows with lower input rate and small packets while the sum of all flows in one queue is the same as for the reference scheduling algorithm. This behaviour can help us to guarantee QoS parameters to voice traffic contains small packets even if somebody manipulates the flows and transmits high volume data traffic with high priority.

The verification and presentation of the proposed model and algorithm is done using extensive simulations in The Network simulator 2 (NS2) with various input parameters combinations.