

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

Ing. Matúš Kováčik

Autoreferát dizertačnej práce

Modelovanie prevádzkových parametrov QoS v NGN sieťach

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

v doktorandskom študijnom programe: 5.2.15 Telekomunikácie

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave telekomunikácií FEI STU v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Matúš Kováčik**
 Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **prof. Ing. Ivan Baroňák, CSc.**
 Ústav telekomunikácií FEI STU Bratislava
 Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: **Doc. Ing. Jiří Sýkora, CSc.**
 Katedra telekomunikační techniky
 ČVUT FEL
 Technická 2
 166 27 Praha 6
 Česká republika

Prof. Ing. Zdeněk Diviš, CSc.
vedoucí Institutu geoinformatiky
Institut geoinformatiky
VŠB-TU Ostrava
Třída 17. listopadu 15
708 33 Ostrava Poruba

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

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

[V3] 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.

[V4] 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.

11 RESUME

The object of this article is to research influences on the transmission of voice in NGN networks using VoIP technology (Voice over IP). Article analyzes and compares the protocol background of NGN networks and VoIP technology. It handles with standards: H.323 and SIP protocols. In the next part an analysis of unfavorable factors that have impact on the final quality of voice communication is made. These factors are delay, jitter, packet loss and echo. Further this work handles about QoS ensurance in NGN networks, including the process of packet queuing by priority in network routers. The end of this work handles about the methods of traffic load modeling in packet networks. Work describes a detailed way of the subcomponents of VoIP connection delay. Further is described designed mathematical model of VoIP connection delay, which is confronted with the measured values of the delay from the IxChariot software.

OBSAH

1	ÚVOD	2
2	PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY.....	2
3	CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE.....	3
4	NÁVRH MODELU PRE VÝPOČET PREVÁDZKOVÝCH PARAMETROV	4
5	REALIZÁCIA SIMULÁCIÍ.....	8
6	POROVNANIE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV	9
7	PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÍNOSY	10
8	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	17
9	PUBLIKÁCIE AUTORA.....	22
10	ÚČASŤ AUTORA NA PROJEKTOCH.....	23
11	RESUME.....	24

1 ÚVOD

Už od druhej polovice deväťdesiatych rokov sa v oblasti telekomunikácií hovorí o konvergencii dátových, telefónnych a multimedialných služieb do jednej univerzálnej siete, tzv. siete novej generácie NGN (Next Generation Network). NGN je všeobecne rozšírený termín vyjadrujúci kľúčovú evolučnú zmenu v architektúre telekomunikačných a prístupových sietí. Integrácia rôznych typov sietí, spolu s možnosťami, ktoré ponúkajú IP siete, umožňuje vytvárať nové riešenia rôznorodých požiadaviek dnes stále náročnejších užívateľov. Problémy pri integrácii tu však nastávajú, a to hlavne z dôvodu náročnosti aplikácií a služieb vyžadujúcich parametre spojenia v reálnom čase, teda nízke odozvy, vyhradené prenosové prostriedky a pod.

NGN architektúra oddelila transportnú vrstvu (transport layer) od vrstvy služieb (service layer) a urobila ich nezávislými. To so sebou prináša veľkú flexibilitu a rýchlosť reagovania operátorov hocikedy definovať nové služby za predpokladu zohľadnenia dopadu na transportnú vrstvu. V NGN je možné rýchlo zmeniť nižšie vrstvy bez zmeny architektúry a zasahovania do vrstiev vyšších.

V súčasnosti sa vo väčšine počítačových sietí používa IP protokol, a aj vývoj platformy pre NGN siete smeruje k využitiu IP protokolu na prenos dát vo forme paketov. K jeho širokému rozšíreniu vo svete došlo hlavne kvôli jeho schopnosti pracovať v prostredí rôznych sietí. Táto vlastnosť IP protokolu je významným faktorom, ktorý umožnil masívne rozšírenie internetu vo svete. Pri výbere vhodného prenosového protokolu pre telekomunikačné siete novej generácie hral potenciál širokého rozšírenia IP protokolu hlavnú rolu. Bohužiaľ však jedným zo závažných nedostatkov IP protokolu je jeho neschopnosť garantovať požadované vlastnosti prenosovej cesty v sieti.

Budovanie NGN sietí a prechod na novú architektúru využívajúcu prenosový potenciál IP protokolu je dôsledkom narastajúcej náročnosti požiadaviek užívateľov sietí. Dnešný užívateľ vyžaduje komplexnú ponuku služieb, čo v sebe zahŕňa okrem dátových prenosov aj obrazový prenos a telefonovanie. Práve otázkami vybraných parametrov kvality služby QoS pri telefonických spojeniach cez IP sieť sa zaoberá táto práca.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

Merania a pozorovania IP prevádzky ukázali, že niektoré charakteristiky IP prevádzky sú odlišné od dovtedy používaných modelov pre klasické telekomunikačné systémy, a teda klasické modely nemusia poskytovať presné výsledky pre popis IP prevádzky. Najdôležitejšími štatistickými ukazovateľmi, ktoré sa odlišujú od klasických hovorov, sú variancia a korelácia dátovej prevádzky. Navyše dátová prevádzka má vysoko stochastický charakter.

Modely IP prevádzky je možné rozdeliť na 2 skupiny: user-oriented a black-box. User-oriented modely sa zameriavajú na populáciu užívateľov a každého z nich explicitne modelujú vrátane jeho konkrétneho správania sa. Do tejto skupiny modelov patria napr. ON/OFF modely alebo klasické markovove modely.

Markovove modely sú založené na teórii Poissonových procesov vzniku a zániku. Sieťová prevádzka je potom chápaná ako náhodný proces príchodov požiadaviek s Poissonovým rozdelením, resp. exponenciálne rozdeleným časom medzi jednotlivými

- [7] CHROMÝ, E., WEBER, M., KOVÁČIK, M.: Admission Control Methods in Next Generation Networks. In: The 13th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2011, Techov, Czech Republic, September 7- 9, 2011. Brno: University of Technology, 2011. ISBN 978-80-214-4283-2, pp. 135-138. (ISI) (Chromý, E. 34%, Weber, M. 33%, Kováčik, M. 33%).
- [8] DROZD, M.; KYRBASHOV, B.; KOVÁČIK, M.; HALÁS, M.: QoS questions in the Open Source Communication Platform OpenIMSCore. 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. (ISI) (Drozd, M. 25%, Kyrbashov, B. 25%, Kováčik, M. 25%, Halás, M. 25%).
- [9] CHROMÝ, E. , BEHÚL , T., KOVÁČIK, M.: Admission Control Methods in IP Networks. In: The 14th International Conference on Research in Telecommunication Technologies 2012, Vratna, Slovakia, 12-14.9.2012. Brno: University of Technology, 2012. , ISBN 978-80-554-0569-8., pp. 93-97., (Chromý, E. 34%, Behúl, T. 33%, Kováčik, M. 33%).

AFD - Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [10] BAROŇÁK, I., KOVÁČIK, M., JANATA, V., JANATA, J.: Virtual Network with MPLS Support. In: Digital Technologies 2009 : 6th International Workshop. Žilina, Slovak Republic, 12.-13.11.2009. - Žilina : Žilinská univerzita, 2009. ISBN 978-80-554-0150-8. - CD-Rom. (in English) (Mišuth, T. 50%, Baroňák, I. 50%). (Baroňák, I. 25%, Kováčik, M. 25%, Janata, V. 25%, Janata, J. 25%).
- [11] HALÁS, M. , KYRBASHOV, B., KOVÁČIK, M.: Security of VoIP calls. In: ELITECH '10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. - Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2010. ISBN 978-80-227-3303-8. - CD-Rom (Halás, M. 34%, Kyrbashov, B. 33%, Kováčik, M. 33%).
- [12] KOVÁČIK, M., BAROŇÁK, I.: Delay in VoIP networks. In: ELITECH '12 : 14th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 22.5.2012. – Bratislava : STU v Bratislave FEI, 2012. ISBN 978-80-227-3705-0. – CD-Rom (Kováčik, M. 50%, Baroňák, I. 50%)

10 ÚČASŤ AUTORA NA PROJEKTOCH

- [V1] Projekt AV-015-Bar - Optimalization Multimedia Traffic in NGN Network. Katedra telekomunikácií, Fakulta Elektrotechniky a informatiky, Slovenská technická univerzita v Bratislave. 2007 – 2009.
- [V2] 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.

9 PUBLIKÁCIE AUTORA

ADE - Vedecké práce v zahraničných nekarentovaných časopisoch

- [1] CHROMÝ, E., SURAN, J., KOVACIK, M., KAVACKY, M.: Usage of Erlang Formula in IP Networks. In: Communications and Network, Scientific Research Publishing, Vol. 3, No. 3. August 2011. ISSN 1949-2421, pp. 161-167. (ISI) (Chromý, E. 25%, Suran, J. 25%, Kováčik, M. 25%, Kavacký, M. 25%).
- [2] KYRBASHOV, B., BAROŇÁK, I., KOVÁČIK, M., JANATA, V.: Evaluation and investigation of the delay in VoIP networks. In: Radioengineering, , Volume 20, Number 2. June 2011. ISSN 1210-2512, pp. 540-547 (ISI, SCOPUS) (Kyrbashov, B. 25%, Baroňák, I. 25%, Kováčik, M. 25%, Janata, V. 25%).

ADF - Vedecké práce v domácich nekarentovaných časopisoch

- [3] KYRBASHOV, B., BAROŇÁK, I., KOVÁČIK, M., JANATA, V.: Vyhodnotenie oneskorenia v sieťach VoIP. In: ELOSYS2010: 16. ročník medzinárodného veľtrhu elektrotechniky, elektroniky, energetiky a telekomunikácií. Trenčín. 5.10. - 8.10.2010 – Bratislava : STU v Bratislave, 2010. ISSN 1335-2547, pp.152-159 (Kyrbashov, B. 25%, Baroňák, I. 25%, Kováčik, M. 25%, Janata, V. 25%).

AFC - Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [4] CHROMÝ, E., DIEZKA, J., KOVACIK, M., KAVACKY, M.: Traffic Analysis in Contact Centers. In: Proceedings of the 11th International Conference KTTO 2011, Szczyrk, Poland. June 22-24, 2011. VSB - Technical University of Ostrava, ISBN 978-80-248-2399-7, pp. 19-24 (ISI) (Chromý, E. 25%, Diežka, J. 25%, Kováčik, M. 25%, Kavacký, M. 25%).
- [5] HALÁS, M., KYRBASHOV, B., KOVÁČIK, M.: Influence of Encryption on VoIP Connection Quality. In: RTT 2008. Research in Telecommunication Technology : 9th International Conference. Vyhne, Slovak Republic, 10.-12.9.2008. - Bratislava : STU v Bratislave, 2008. ISBN 978-80-227-2939-0, pp. 50-53 (Halás, M. 34%, Kyrbashov, B. 33%, Kováčik, M. 33%).
- [6] TISOVSKÝ, A., KLÚČIK, S., KOVÁČIK, M.: Modelling the Throughput of Mixed Traffic for a Computationally Intensive IPsec Process. In RTT 2010. Research in Telecommunication Technologies: 12th International Conference. Velké Losiny. Czech Republic, 8.-10.9.2010. – Bratislava : STU v Bratislave, 2010. ISBN 978-80-248-2261-7, pp. 76-81 (ISI) (Tisovský, A. 34%, Klúčik, S. 33%, Kováčik, M. 33%).

príchodmi. Typickým predstaviteľom tejto skupiny modelov používaným v klasickej telefónii je model M/G/m/m, kde požiadavky od účastníkov, teda volania, tvoria Poissonovský proces s frekvenciou príchodov λ , priemerný čas obsluhy požiadavky je $1/\mu$, a celkové prevádzkové zaťaženie $A = \lambda/\mu$. K dispozícií majú m transportných vedení, resp. kanálových intervalov. Jeho špeciálnym typom je Erlang B model M/M/m/m, kde sú časy obsluhy exponenciálne rozdelené. Ak sú všetky linky (agenti a pod.) obsadené, dochádza k blokovaniu volania a ide teda o systém s blokovaním. Pravdepodobnosť blokovania (a teda aj straty paketov v prípade IP sietí) je daná

$$P(n, A) = \frac{A^m}{\sum_{i=0}^m \frac{A^i}{i!}} \quad (1)$$

Druhým príkladom je model M/G/∞/∞. Aj v tomto prípade sú jednotlivé spojenia vytvárané ako Poissonovský vstupný prúd s frekvenciou λ a zostávajú vytvorené náhodný čas s priemernou hodnotou $1/\mu$. Potom pre n.p vyjadrujúcu okamžitý počet spojní i v systéme platí

$$P(i) = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}{i!} e^{-\frac{\lambda}{\mu}} \quad (2)$$

Z hľadiska dátovej prevádzky predpokladáme, že počas trvania spojenia dochádza ku generovaniu dátovej prevádzky s rýchlosťou r . Ak však prevádzka generovaná všetkými aktívnymi spojeniami prekročí kapacitu linky, resp. dôjde k naplneniu vyrovnávacích pamätí, bude dochádzať k strácaniu prenášaných dát.

Použitie Markovovských modelov v tvare, v akom boli platné pre klasické telekomunikačné siete (teda Erlang B a Erlang C model) je možné pri využití konceptu tokov. To znamená, že každé komunikačné spojenie dvoch uzlov IP siete (jednoznačne definované pomocou zdrojovej a cieľovej IP adresy a zdrojového a cieľového portu) predstavuje jeden tok s určitým dátovým objemom, ktorý závisí od konkrétneho typu prevádzky.

Druhú skupinu modelov IP prevádzky tvoria „black-box“ modely. Ich základnou črtou je zameranie sa na agregovanú prevádzku, teda prevádzku prichádzajúcu z veľkého množstva zdrojov. V tomto prípade teda jednotliví užívatelia a ich konkrétne vlastnosti a správanie nehrajú príliš dôležitú úlohu. Modely agregovanej prevádzky najčastejšie vychádzajú z Gaussovských procesov.

3 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

V dnešnej dobe je v telekomunikačných a dátových sieťach tendencia spájania týchto sietí do komplexných celkov. Konvergencia rôznorodých typov sietí vedie postupne k ich vzájomnému prepojeniu z pohľadu ponuky služieb. Ako najvhodnejší spoločný prvok sa ukázal praxou overený a veľmi rozšírený IP protokol a na ňom založená paketová sieť. Moderné koncepcie NGN sietí umožňujú vytvárať lepšie riešenia a spôsoby uspokojovania požiadaviek stále viac a viac náročnejším užívateľom.

Práca sa zaoberá protokolovou podstatou technológie VoIP. Popisuje jednotlivé protokoly nevyhnutné pre prevádzku IP sietí, koncepciu NGN sietí a štandardy pre IP telefóniu H.323 a SIP.

V ďalšej časti práce je popísaná problematika existencie viacerých faktorov, ktoré v paketových sieťach majú nepriaznivý vplyv na výslednú kvalitu hlasovej komunikácie (oneskorenie, jitter, stratovosť a iné). Zaoberá sa problematikou zabezpečenia QoS v IP sieťach, akými sú aj NGN siete, vrátane problematiky radenia prioritných dát do radov v smerovačoch siete.

Po našťudovaní danej problematiky som sformuloval ciele mojej dizertačnej práce do nasledujúcich bodov :

1. Navrhnuť všeobecný model pre konkrétnu topológiu siete zohľadňujúci kvalitatívne parametre VoIP hlasovej komunikácie.
2. Navrhnuť matematický model oneskorenia a vyjadriť analyticky celkové oneskorenie VoIP hlasovej komunikácie pre konkrétnu topológiu siete.
3. Experimentálne overiť získané informácie z navrhnutého matematického modelu.
4. Zovšeobecniť poznatky nadobudnuté z experimentu aj pre rôzne topológie v komunikačných sieťach.

4 NÁVRH MODELU PRE VÝPOČET PREVÁDZKOVÝCH PARAMETROV

Smerovač s nastaveným PQ (Priority Queuing) radením do front prednostne obsluhuje pakety v prioritnej hlasovej PQ fronte. Pri zanedbaní vplyvu serializačného oneskorenia dátových paketov s nižšou prioritou je z hľadiska modelovania prevádzkového zaťaženia a oneskorenia postačujúce sledovať oneskorenie iba hlasových paketov v prioritnej fronte. Z nej sú pakety obsluhované ako v modeli hromadnej obsluhy M/D/1/k, pričom k je veľkosť vyrovnávacej pamäte. Pri vytváraní analytického modelu oneskorenia v smerovači zanedbáme veľkosť vyrovnávacej pamäte a budeme uvažovať nekonečne veľkú vyrovnávaciu pamäť, čiže nemôže dôjsť k strate paketov prioritnej fronty. Tým pádom môžeme model M/D/1/k nahradiť modelom. Následne vieme vytvoriť analytické vyjadrenie pravdepodobnosti obsadenia vyrovnávacej pamäte smerovača. Z toho je možné získať analytický model oneskorenia paketov v smerovači. Pre M/D/1/∞ model hromadnej obsluhy platí, že prechod z jedného stavu je možný len do stavu bezprostredne najbližšieho. Tomu odpovedá príchod paketu do smerovača alebo odoslanie paketu smerovačom.

Použiteľnosť takéhoto modelu je podmienená nasledovnými predpokladmi:

- intervaly medzi príchodmi jednotlivých požiadaviek zodpovedajú Poissonovmu rozdeleniu pravdepodobnosti príchodov,
 - za predpokladu, že do smerovača vstupuje len hlasová prevádzka z M zdrojov, pričom každý má Poissonovo rozdelenie pravdepodobnosti, tak aj ich zlúčenie bude mať Poissonovo rozdelenie pravdepodobnosti [42],
- $\lambda(t)$ – hustota pravdepodobnosti vzniku požiadavky na obsluhu je konštantná,
 - ak uvažujeme o modeli oneskorenia, do ktorého vchádza M vstupných hlasových tokov, ktoré v čase nevnikajú a ani nezanikajú, je aj táto podmienka splnená,

<<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>>

- <<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 Program on Electrical Engineering, Centro Politecnico, Curitiba, Parana, Brazília, 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 MIEGHEEN, 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:

- spôsob obsluhy je typu „prvý dnu prvý von“ - FIFO (First In First Out),
 - spôsob práce smerovača v PQ fronte zodpovedá typu obsluhy FIFO,
- doba obsluhy je konštantná veličina,
 - za predpokladu, že M vstupných hlasových tokov používa rovnaký komprimačný kodek a generuje pakety rovnakej dĺžky, potom bude doba vyslania každého paketu na výstupnú linku konštantná, a tým aj doba obsluhy paketu bude konštantná.

Za týchto predpokladov vieme pomocou vzťahu [10-1] vypočítať zaťaženie systému, čiže zaťaženie výstupnej linky hlasovými paketmi.

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad [10-1]$$

kde :

λ – intenzita príchodov požiadaviek

μ – rýchlosť obsluhy požiadaviek

ρ – zaťaženie systému

Pre stabilitu systému musí platiť, že $0 \leq \rho < 1$.

Intenzitu príchodov požiadaviek pre jeden zdroj prevádzky s konštantnou bitovou rýchlosťou C_{BW} a konštantnou veľkosťou dátovej časti paketu P_s vyjadríme nasledovne:

$$\lambda = \frac{C_{BW}}{P_s} \quad [s^{-1}] \quad [10-2]$$

Rýchlosť obsluhy požiadaviek :

$$\mu = \frac{1}{T_{\text{ser}} + T_s} \quad [s^{-1}] \quad [10-3]$$

kde :

T_{ser} – serializačné oneskorenie výstupnej linky [s]

T_s – doba spracovania paketu v smerovači [s]

Potom pre pravdepodobnosť, že v systéme bude čakať k požiadaviek platí nasledovný vzťah.

$$\rho_k = (1 - \rho) \sum_{j=1}^k \frac{(-1)^{k-j} (j \cdot \rho + k - j) e^{j \cdot \rho}}{(k - j)!} \quad \text{pre } k \geq 2$$

$$\rho_k = (1 - \rho)(e^{\rho} - 1) \quad \text{pre } k=1 \quad [10-4]$$

$$\rho_k = (1 - \rho) \quad \text{pre } k=0$$

Pre stredný čas, ktorý požiadavka strávi v systéme platí vzťah [10-5].

$$T = \frac{1}{\mu} + \frac{\rho}{2(1 - \rho)\mu} \quad [s] \quad [10-5]$$

kde $\frac{1}{\mu}$ je čas obsluhy jednej požiadavky.

Z čoho pre stredný počet požiadaviek v systéme N platí vzťah [10-6].

$$N = T \cdot \lambda \quad [-] \quad [10-6]$$

Predpokladajme, že do smerovača vstupuje M hlasových tokov. Využitím vlastnosti Poissonovho rozdelenia, kde zlúčením viacerých hlasových tokov s Poissonovým rozdelením pravdepodobnosti, dostávame tok rovnako s Poissonovým rozdelením pravdepodobnosti, ktorého parameter λ zodpovedá súčtu parametrov λ_i jednotlivých hlasových tokov, môžeme potom vyjadriť intenzitu príchodov:

$$\lambda = \sum_{i=1}^M \frac{C_{BWi}}{P_{Si}} \quad [s^{-1}] \quad [10-7]$$

Ďalej predpokladajme, že všetky hlasové toky vstupujúce do smerovača používajú ten istý kodek a sú prenášané rovnakým prenosovým prostredím, potom vieme vzťah [10-7] zjednodušiť na:

$$\lambda = M \frac{C_{BW}}{P_S} \quad [s^{-1}] \quad [10-8]$$

Z prenosovej rýchlosti výstupnej linky a doby spracovania paketu pre konkrétny smerovač dokážeme po dosadení vzťahov [9-7] a [9-8] do vzťahu [10-3] určiť rýchlosť obsluhy daného systému :

$$\mu = \frac{L_S}{P_S + H_L + L_S \cdot T_S} \quad [s^{-1}] \quad [10-9]$$

kde :

H_L - veľkosť hlavičky paketu [b]

P_S - veľkosť dátovej časti paketu [b]

L_S - rýchlosť výstupnej linky [kbit/s]

T_S - doba spracovania paketu v smerovači [ms]

Po dosadení vzťahov [10-8], [10-9] do vzťahu [10-1] dostávame zaťaženie systému:

$$\rho = \frac{M \cdot C_{BW} (P_S + H_L + L_S \cdot T_S)}{P_S \cdot L_S} \quad [-] \quad [10-10]$$

Ďalej dosadením vzťahov [10-8], [10-9] a [10-10] do vzťahu [10-5] získame vyjadrenie stredného času obsluhy:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_S + H_L + L_S \cdot T_S}{L_S} \cdot \frac{2P_S \cdot L_S - C_{BW} \cdot M (P_S + H_L + L_S \cdot T_S)}{P_S \cdot L_S - C_{BW} \cdot M (P_S + H_L + L_S \cdot T_S)} \quad [s] \quad [10-11]$$

Obdobne po dosadení [10-8], [10-9] a [10-10] do vzťahu [10-4] platí pre pravdepodobnosť, že v systéme bude práve k požiadaviek vzťah:

- [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:

- 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.: *Signalizačný protokol pro prenos 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/>

$$p_k = \left(1 - M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right)^k \sum_{j=0}^{k-j-1} \left((-1)^{(k-j)} \cdot \left(j \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right)^{k-j-1} \cdot \left(j \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right)^j \cdot \frac{j! \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s}}{(k-j)!} \right)$$

pre $k \geq 2$

$$p_k = \left(1 - M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right) \cdot \left(e^{j \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s}} - 1 \right)$$

pre $k=1$

$$p_k = \left(1 - M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right) \quad \text{pre } k=0$$

[10-12]

Následne, ak vyjadríme čas obsluhy pomocou vzťahu [10-9] pre rýchlosť obsluhy, získame pre pravdepodobnosť oneskorenia vzťah:

$$p_{T_k} = p_k \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s} \quad \text{pre } k = <0, \infty >$$

[10-13]

Vzťah [10-11] vyjadruje priemerný čas oneskorenia paketu v smerovači. Vzťah [10-13] vyjadruje pravdepodobnostné rozdelenie uvedeného oneskorenia. Spolu tvoria matematický model oneskorenia v smerovači. S jeho pomocou dokážeme vypočítať oneskorenie paketov v smerovači pre konkrétnu konfiguráciu vstupných parametrov.

Treba zdôrazniť, že tento model oneskorenia paketov v smerovači má v sebe započítané serializačné oneskorenie výstupnej linky. Teda vo výslednom oneskorení získanom z tohto modelu smerovača, je priamo započítané aj serializačné oneskorenie jeho výstupnej linky.

4.1 VÝSLEDNÝ MODEL ONESKORENIA

Pre vyjadrenie modelu výsledného oneskorenia v sieti som využil poznatky z predchádzajúcich kapitol. Štruktúra siete je zobrazená na Obr. 9.1. Dva koncové body spolu komunikujú cez 6 smerovačov a 7 rôznych liniek. V sieti prebieha hlasová a dátová prevádzka a predpokladáme, že všetky hlasové toky využívajú ten istý komprimačný algoritmus s rovnakými nastaveniami.

Oba koncové body sú špecifikované použitým kodekom a veľkosťou dátovej časti paketu, ktorý generujú. Každá linka je definovaná svojou prenosovou rýchlosťou, použitým prenosovým protokolom, konkrétnou prenosovou technológiou a svojou dĺžkou. Jednotlivé smerovače spracúvajú M_i súčasných spojení smerovaných na rovnakú výstupnú linku a sú špecifikované svojim oneskorením spracovania paketov. Na strane prijímača sa nachádza vyrovnávací pamäť kvôli kompenzácii jitteru. Je definovaná svojou veľkosťou.

Pre tento konkrétny prípad vieme teda vyjadriť celkové oneskorenie v tvare:

$$T = (N+1)T_{\chi CDalg} + T_{\chi CDcomp} + T_{\pi PD} + \sum_{i=1}^7 T_{\delta seri} + \sum_{i=1}^7 T_{\omega PROPi} + \sum_{i=2}^7 T_{\beta ODi} + \sum_{i=2}^7 T_{\epsilon PRI} + T_{\Delta DJ} + T_{\pi DPDP} + T_{\chi v DCD} \quad [\text{ms}] \quad [10-14]$$

Po dosadení získame matematický model oneskorenia v sieti:

$$T = (1+0,1 \cdot N)(N+1)T_{\chi CDalg} + T_{\chi CDcomp} + \frac{8 \cdot P_s}{C_{BW}} + \sum_{i=1}^7 \frac{L_i}{V} + T_{ser1} + T_{DDJ} + T_{ruDPD} \quad [\text{ms}] \quad [10-15]$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^7 \left[\frac{P_s + H_{Li} + L_{Si} \cdot T_{Si}}{L_{Si}} \cdot \frac{2P_s \cdot L_{Si} - C_{BW} \cdot M_i(P_s + H_{Li} + L_{Si} \cdot T_{Si})}{P_s \cdot L_{Si} - C_{BW} \cdot M_i(P_s + H_{Li} + L_{Si} \cdot T_{Si})} \right]$$

kde :

N – zvolený počet hlasových blokov v pakete

T_{CDalg} – algoritmické oneskorenie kódera [ms]

T_{CDcomp} – komprimačné oneskorenie kódera [ms]

P_s – payload size - zvolená veľkosť dátového bloku v jednom pakete [b]

C_{BW} – codec bandwidth – prenosová rýchlosť kodeku [kbit/s]

H_{Li} – header length – veľkosť hlavičky paketu pre linku i [b]

L_{Si} – line speed i – prenosová rýchlosť i-tej linky [kbit/s]

L_i – line length i – dĺžka i-tej prenosovej linky [m]

v – rýchlosť šírenia signálu daným prostredím [ms^{-1}]

T_{DDJ} – dejitter delay – oneskorenie dejitter buffera - veľkosť dejitter buffera [ms]

M_i – počet súčasných VoIP spojení smerovaných na i-tu výstupnú linku [-]

T_{ser1} – oneskorenie prístupu na sériovú linku pre linku č.1 (na smerovač R1) [ms]

T_{ruDPD} – oneskorenie dekódovania hlasových dát z paketov [ms]

T_{Si} – doba spracovania paketu v i-tom smerovači

Vzťah [10-15] vyjadruje matematický model oneskorenia v IP sieti konkrétnej definovanej topológie. Model sa dá zovšeobecniť na akúkoľvek topológiu siete a pri znalosti prevádzky v sieti následne použiť pre výpočet priemerného oneskorenia hlasového spojenia.

5 REALIZÁCIA SIMULÁCIÍ

Experimentálne pracovisko bolo vytvorené na Ústave telekomunikácií, v miestnosti B 515, FEI STU v Bratislave, s podporou projektu VEGA-1/0186/12, a umožnilo vykonať navrhované merania. Obr. 11.1 zobrazuje vytvorené meracie pracovisko. Topológiu pracoviska znázorňuje Obr. 11.8.

Základ pracoviska tvorili dva stolové počítače (PC1,PC2) a šesť smerovačov (R1-R6). Na dvoch PC boli nainštalované koncové body systému IxChariot (IxChariot endpoint). Endpoint v PC1 generoval počas merania zadefinovanú prevádzku a tá bola posielaná cez smerovače do endpointu v PC2. Po skončení každého merania odoslali endpointy namerané informácie do centrálnej konzoly, ktorá bola nainštalovaná a bežala vo virtuálnom PC na fyzickom stroji PC1.

8 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [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.323-200912-1!!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.

4. Zovšeobecnil som poznatky nadobudnuté z experimentu aj pre rôzne topológie v komunikačných sieťach.

Pri zachovaní predpokladov uvedených v kap.10, a pri topológii siete, v ktorej sú jednotlivé uzly zapojené v sérii za sebou, je možné použiť navrhnutý model pre výpočet celkového oneskorenia v sieti. Dá sa predpokladať, že s narastajúcim počtom uzlov bude presnosť navrhnutého modelu klesať.

Z porovnávaných výsledkov vyplýva, že v 80% prípadoch porovnaní, prezentovaný matematický model poskytuje odhad oneskorenia v rozsahu $\pm 10\%$.

Okrem nastudovania vplyvov jednotlivých faktorov ovplyvňujúcich kvalitu hlasového spojenia som sa v práci sústredil na jeden z nich, na oneskorenie a na jeho jednotlivé komponenty.

Podrobnejšie som identifikoval čiastkové komponenty oneskorenia a aj ako vplyvajú na konečnú kvalitu VoIP spojenia. Popísal som mechanizmy ich vzniku a prezentoval ich matematické vyjadrenie.

Využitím čiastkových komponentov oneskorenia som vytvoril Matematický model celkového oneskorenia vo VoIP sieti.

Matematický model som experimentálne overil na vybudovanej reálnej sieti.

Z výsledkov meraní pre dané vstupné parametre vychádza, že navrhnutý model poskytuje dostatočne presné hodnoty overovaného oneskorenia.

Vo väčšine prípadov Matematický model poskytuje odhad oneskorenia v rozsahu $\pm 10\%$.

Vzhľadom na dostatočne presný odhad oneskorenia v sieti je možné uvedený model v praxi využiť pri projektovaní VoIP sietí a pri riadení prevádzky v sieti.

Z prezentovaného matematického modelu sa dá získať výsledný odhad situácie v sieti, ktorá by mohla nastať po prijatí VoIP hovoru sieťou, už pred prijatím a vytvorením takéhoto spojenia. Takto získané informácie dokážu byť základom pre možné riadenie prevádzky v sieti.

Celé pracovisko bolo izolované od iných sietí, prenášali sa len dáta generované koncovými bodmi. Medzi PC1 a PC2 bola sieť vytvorená pomocou šiestich smerovačov značky CISCO. Smerovače R1 a R2 boli prepojené pomocou sériového rozhrania RS 232C s nastavenou rýchlosťou 2Mbit/s.

Ďalšie segmenty siete medzi smerovačmi boli prepojené krútenou dvojlinkou typu Ethernet, so štandardnou rýchlosťou 100Mbit/s. Na počítači PC1 (vo virtuálnom stroji) bola nainštalovaná centrálna ovládacia konzola systému IxChariot. Z grafického rozhrania tejto konzoly boli definované parametre generovaných spojení medzi koncovými bodmi a zaznamenávané namerané výsledky.

Pomocou centrálnej konzoly sa jednotlivé merania spúšťali a po ukončení sa skompletizovali nahromadené informácie z koncových bodov IxChariotu. Informácie sa z koncových bodov na centrálnu konzolu prenášali až po ukončení daného merania, takže samotné meranie nimi nebolo ovplyvnené. Školská licencia na softvér IxChariot dovoľuje použitie maximálne 50 súčasných tokov – spojení.

V experimente boli systémom IxChariot generované hlasové toky pomocou kodeku G.711 alebo G.726 a vždy aj jeden video tok prenášaný UDP/RTP protokolom. Šírka pásma generovaného video toku bola nastavená na 800kbit/s (na aplikačnej vrstve). Počet simultánne generovaných hlasových tokov sa pre kodek G.711 menil od 2 až po 8 tokov. Keďže kodek G.726 generuje polovičnú šírku pásma (32kbit/s) oproti G.711 (64kbit/s), pre merania s kodekom G.726 sa generovalo 4,6,8,10,12,14 a 16 súčasných VoIP spojení. Vykonali sa postupne merania prenosu štyroch, šiestich, ... atď. simultánne generovaných hlasových tokov. Pre oba kodeky sa uskutočnili merania pre hodnoty periódy rámcovania 20, 30, 40 ms.

Trvanie každého z meraní bolo nastavené na 2 minúty a sledované parametre boli zaznamenávané v trojsekundových intervaloch. Program IxChariot následne zo zaznamenaných hodnôt vypočítal aj priemer pre každý tok. Sledovaná bola hodnota One Way Delay (average) – priemerné jednocestné oneskorenie.

Z dôvodu minimalizácie odchýlky bolo dané meranie vždy vykonané 3x s rovnakými nastaveniami. Z týchto 3 meraní sa potom vypočítal aritmetický priemer nameraných hodnôt.

Počet simultánne generovaných VoIP spojení bol nastavený tak, aby sériová linka medzi R1 a R2 bola zaťažená v rozmedzí 60-90%. Pre viac spojení program IxChariot vykazoval chybu a nechcel spustiť meranie. V smerovači R1 bola nastavená prioritizácia VoIP paketov (Priority Queuing). V programe IxChariot bolo nastavené, aby VoIP pakety mali v hlavičke v poli ToS/DSCP nastavené EF (expedited forwarding). V smerovači R1 bolo nastavené pre takto označené pakety prednostné spracovanie (vysoká priorita odoslania).

Pre určenie výsledných hodnôt oneskorenia z matematického modelu bolo nutné zvoliť parameter T_s pre každý zo smerovačov použitých pri meraniach. Podľa [25] a [27] sa minimálna doba spracovania paketu pohybuje obvykle v rozmedzí 100-150 μ s, maximálna vo výnimočných prípadoch v rozmedzí 800-2000 μ s. Preto som zvolil hodnotu T_s pre smerovač R1 rovnú 0,6 ms a pre smerovače R2-R6 rovnú 0,2 ms.

6 POROVNANIE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV

Hodnoty získané z jednotlivých meraní boli zaznamenané, spriemerované a následne porovnávané s vypočítanými hodnotami získanými z navrhovaného matematického modelu oneskorenia.

Cieľom bolo overiť použiteľnosť modelu a určiť interval vstupných parametrov VoIP spojení, v ktorých uvedený model poskytuje uspokojivé výsledky.

Porovnávané boli výsledky meraní z programu IxChariot a z matematického modelu:

$$T = T_{ser1} + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^7 \left[\frac{P_S + H_{Li} + L_{Si} \cdot T_{Si}}{L_{Si}} \cdot \frac{2P_S \cdot L_{Si} - C_{BW} \cdot M_i \cdot (P_S + H_{Li} + L_{Si} \cdot T_{Si})}{P_S \cdot L_{Si} - C_{BW} \cdot M_i \cdot (P_S + H_{Li} + L_{Si} \cdot T_{Si})} \right] \quad [\text{ms}] \quad [11-1]$$

Pre kodek G.711 a hodnotu rámcovania 20ms model poskytuje uspokojivé výsledky v rozmedzí 4 až 8 simultánnych VoIP spojení. Relatívna chyba merania je do 2%. Pre dve VoIP spojenia je to však až 25%.

Pre kodek G.711 a rámcovanie 30ms sú výsledky modelu pre 2,3,4 VoIP spojenia dosť neuspokojivé. V rozmedzí 5 až 8 VoIP spojení sa relatívna chyba merania pohybuje do 8%.

Pre kodek G.726 a hodnotu rámcovania 20ms poskytuje matematický model opäť relatívne uspokojivé výsledky. Relatívna chyba merania pre 4,6,8,10,12,14 a 16 VoIP spojení sa pohybuje do 8,5%.

Pre kodek G.726 a rámcovanie 40ms poskytuje prezentovaný model uspokojivé výsledky. Relatívna chyba merania neprekračuje 5%.

Pre kodek G.726 a hodnotu rámcovania 40ms poskytuje prezentovaný matematický model uspokojivé výsledky. Relatívna chyba merania dosahuje maximálne 5,5%.

Vykonané merania ukázali, že vo väčšine prípadov poskytuje prezentovaný matematický model výsledky s presnosťou do 10% pre vybrané kodeky, počty VoIP spojení a súbežne generovanú doplnkovú UDP/RTP prevádzku.

7 PÔVODNÉ VEDECKÉ PRÍNOSY

Popis hlasovej VoIP prevádzky vhodným matematickým modelom rozhodne nie je jednoduchá záležitosť.

Pre zvládnutie zadaných úloh, ktoré boli stanovené v tézach dizertačnej práce, som potreboval:

1. naštudovať a rozobrať aktuálne trendy vo VoIP technológiách, ktoré sú v dnešnej dobe už štandardom NGN sietí. (Problematika spracovaná v kapitole 3 a 4).

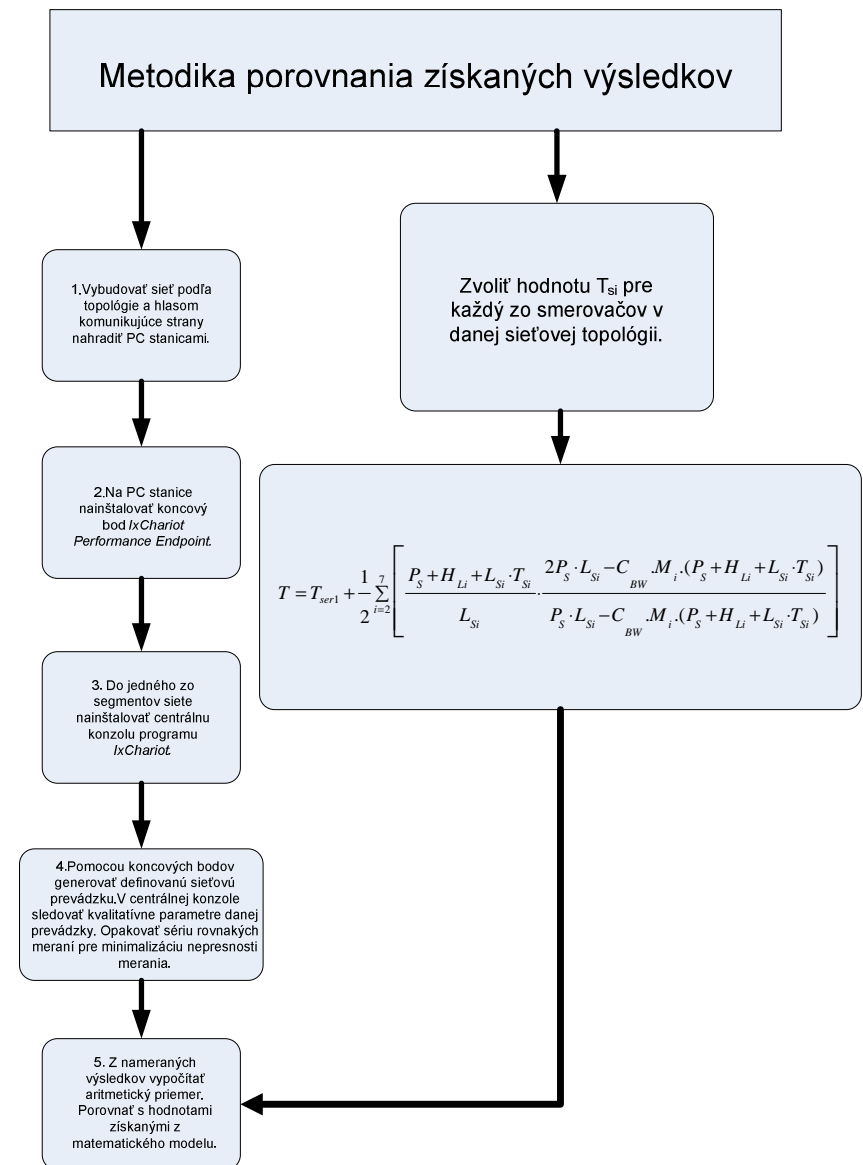
2. po naštudovaní metód zabezpečenia QoS v sieťach IP, som vybral najvhodnejšiu metódu riadenia paketov vo frontách, a tú som aplikoval v smerovačoch na vybudovanom experimentálnom pracovisku. (Problematika spracovaná v kapitole 6).

3. popísal som individuálne negatívne faktory, mechanizmy ich vzniku a ich vplyvu na finálnu kvalitu spojenia VoIP. (Problematika spracovaná v kapitole 5)

4. širšie som popísal jeden z hlavných negatívnych faktorov vplyvujúcich na kvalitu, a to faktor oneskorenia a navrhol som jeho všeobecný model. (Problematika spracovaná v kapitolách 9 a 10).

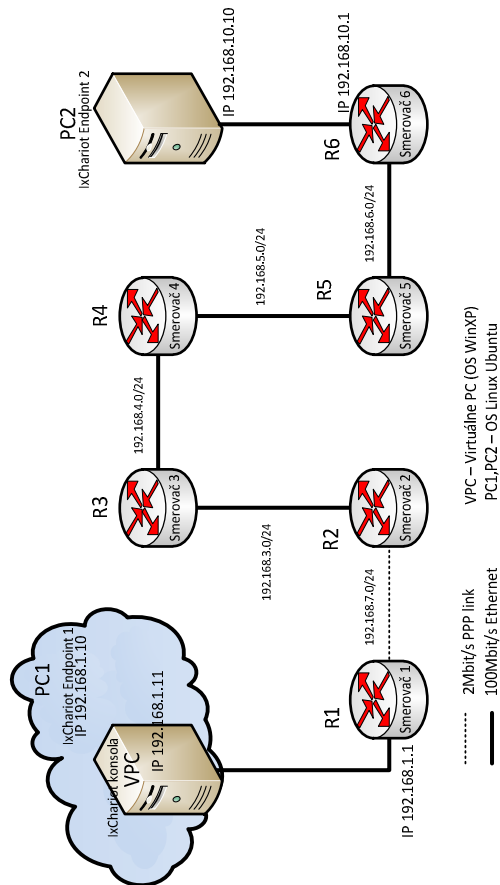
Ďalej, pre modelovania zdroja prevádzky a pre analytické definovanie oneskorenia v smerovačoch som naštudoval a vybral z modelovania systémov s hromadnou obsluhou vhodný model, ktorý zodpovedá prevádzke v smerovačoch s PQ (Priority Queuing) metódou radenia paketov do frontov. (Problematika spracovaná v podkapitole 6.4.2).

Okrem vyššie uvedeného som navrhol a zrealizoval experimentálne pracovisko na Ústave Telekomunikácií, FEI STU v Bratislave, s podporou projektu VEGA-1/0186/12,



Obr. 12.3 Metodika porovnania získaných výsledkov

3. Navrhol a zrealizoval som experimentálne pracovisko (Obr. 12.2 Topológia experimentálneho pracoviska) a navrhol som metodiku experimentálneho overenia získaných výsledkov modelu (Obr. 12.3 Metodika porovnania získaných výsledkov) kvôli overeniu presnosti navrhnutého matematického modelu.



Obr. 12.2 Topológia experimentálneho pracoviska

ktoré mi umožnilo vykonať navrhované merania. (Problematika spracovaná v podkapitole 11.2).

V dizertačnej práci som sa vedecky venoval identifikácii jednotlivých faktorov, ktoré vplyvajú na výslednú kvalitu hlasového spojenia v paketovej IP sieti.

Po podrobnom preštudovaní problematiky som sa zameril na vplyv oneskorenia na výslednú kvalitu VoIP hlasového spojenia.

Identifikoval som čiastkové komponenty oneskorenia a podrobne som sa venoval popisu mechanizmov ich vzniku a spôsobom, ako vplyvajú na výslednú celkovú kvalitu komunikačného spojenia. Matematicky som vyjadril ich vplyv na celkové oneskorenie vo VoIP sieti.

Z nadobudnutých informácií a znalostí som vypracoval *exaktný matematický model* vyjadrujúci oneskorenia hlasového spojenia vo VoIP sieti. Údaje získané z navrhnutého matematického modelu boli konfrontované s experimentálne získanými výsledkami.

Vedecké prínosy predkladanej dizertačnej práce som zhrnul do nasledujúcich štyroch bodov:

1. Navrhol som *všeobecný model* (Obr.12.1 *Jednotlivé komponenty oneskorenia v IP prostredí*.) *zohľadňujúci kvalitatívne parametre VoIP spojenia a nasledovné faktory vplyvajúce na jeho výslednú kvalitu:*

1. Oneskorenie kódera v IP prostredí.
2. Oneskorenie, ktoré vzniká pri paketizácii hlasových dát.
3. Oneskorenie vznikajúce pri radení paketov do výstupnej fronty.
4. Oneskorenie prístupu na sériovú linku.
5. Oneskorenie vznikajúce prenosom dát dátovou linkou.
6. Oneskorenie vznikajúce elimináciou jitteru vo vyrovnávacej pamäti.
7. Oneskorenie spracovania.
8. Oneskorenie, ktoré vzniká pri dekódovaní hlasových dát z paketov.
9. Algoritmické oneskorenie dekóderu.

(Problematika spracovaná v kapitole 9)

2. *Vypracoval som matematický model oneskorenia v smerovači pre potreby stanovenia výsledného modelu oneskorenia. Model smerovača využívajúceho PQ radenie paketov je založený na aplikácii Markovských procesov v teórii radov.*

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_s + H_L + L_s \cdot T_s}{L_s} \cdot \frac{2P_s \cdot L_s - C_{BW} \cdot M(P_s + H_L + L_s \cdot T_s)}{P_s \cdot L_s - C_{BW} \cdot M(P_s + H_L + L_s \cdot T_s)} \quad [\text{ms}] \quad [10-11]$$

pre $k \geq 2$

$$p_k = \left(1 - M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right)^k \sum_{j=1}^k \left[\frac{(-1)^{(k-j)} \cdot \left(j \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right)^{(k-j-1)}}{\left(j \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right) \cdot \frac{j \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s}}{(k-j)!}} \right]$$

pre $k=1$

$$p_k = \left(1 - M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right) \cdot \left(e^{j \cdot M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s}} - 1 \right)$$

pre $k=0$

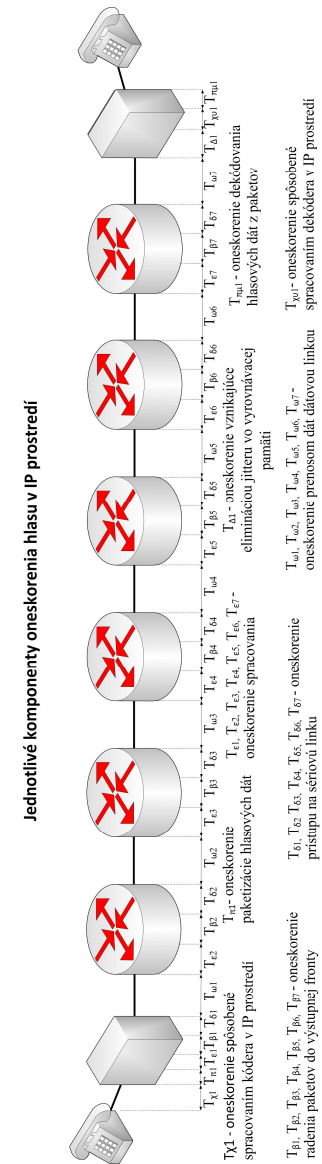
$$p_k = \left(1 - M \cdot C_{BW} \cdot \frac{P_s + H_s + L_s \cdot T_s}{L_s \cdot P_s} \right) \quad [10-12]$$

Okrem toho som analyticky vyjadril výsledný matematický model oneskorenia celej VoIP siete.

$$T = (1 + 0,1 \cdot N)(N + 1)T_{\chi CDalg} + T_{\chi CDcomp} + \frac{8 \cdot P_s}{C_{BW}} + \sum_{i=1}^7 \frac{L_i}{v} + T_{ser1} + T_{\Delta DJ} + T_{\eta IDPD} \quad [\text{ms}] \quad [10-15]$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{i=2}^7 \left[\frac{P_s + H_{L_i} + L_{S_i} \cdot T_{S_i}}{L_{S_i}} \cdot \frac{2P_s \cdot L_{S_i} - C_{BW} \cdot M_i(P_s + H_{L_i} + L_{S_i} \cdot T_{S_i})}{P_s \cdot L_{S_i} - C_{BW} \cdot M_i(P_s + H_{L_i} + L_{S_i} \cdot T_{S_i})} \right]$$

(problematika spracovaná v kapitole 10)



Obr. 12.1 Jednotlivé komponenty oneskorenia v IP prostredí