

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

Ing. David Grenar

**MĚŘENÍ A MONITOROVÁNÍ
VÝKONNOSTNÍCH PARAMETRŮ SÍTÍ
NOVÉ GENERACE**

MEASUREMENT AND MONITORING PERFORMANCE
PARAMETERS OF NEXT GENERATION NETWORK

ZKRÁCENÁ VERZE DOKTORSKÉ PRÁCE

Specializace: Teleinformatika

Supervizor: prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

KEYWORDS

access networks, traffic intensity, traffic modelling, measurement methodology, NGA/N - next generation networks, VHCN - very high capacity networks, analysis, methodology, measurement, performance parameters, regulation, approximation, IP services, ITU, IETF.

KLÍČOVÁ SLOVA

přístupové sítě, intenzita provozu, modelování provozu, metodika měření, NGA/N – sítě nové generace, VHCN – sítě s velmi vysokou kapacitou, analýza, metodika, měření, výkonové parametry, regulace, aproximace, IP služby, ITU, IETF.

ARCHIVED IN

Dissertation is available at the Science Department of Dean's Office FEEC, Brno University of Technology, Technická 10, Brno, 616 00

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně, Technická 10, Brno, 616 00

© David Grenar, 2023

ISBN 80-214-

ISSN 1213-4198

Obsah

Úvod	5
1 Cíle disertační práce a jejich řešení	10
2 Vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě	12
2.1 Teoretické východisko k provozu v komunikačních sítích	13
2.2 Systémové řešení provozu hlasových služeb	13
2.2.1 Teorie pravděpodobnosti v provozu hlasových služeb	14
2.2.2 Měření provozní zátěže hlasových služeb prostřednictvím Centa Call-seconds	15
2.3 Intezita provozu dle <i>ITU-T E.500</i>	16
2.3.1 Metoda Time-Consistent Busy Hour – TCBH	17
2.3.2 Metoda Average Daily Peak Hour – ADPH	17
2.3.3 Metoda Fixed Daily Measurement Period – FDMP	17
2.4 Proces Traffic engineering dle <i>ITU-T E.600</i>	18
2.4.1 Fáze procesu Traffic engineering dle <i>ITU-T E.600</i>	18
2.4.2 Cíle procesu Traffic engineering dle <i>ITU-T E.600</i>	20
3 Analýza distribuce datového provozu v přístupové síti	21
3.1 Geografické a demografické parametry analyzované přístupové sítě	21
3.1.1 Agregace uživatelů přístupové sítě	23
3.2 Denní profil provozu přístupové sítě	24
3.2.1 Metoda vyrovnání časových změn v přístupové síti	26
3.3 Matematický model profilu datového provozu přístupové sítě	28
3.3.1 Aproximace pomocí Lagrangeových polynomů	30
3.3.2 Analýza kvality aproximace	35
4 Konstrukce metrik v přístupové síti	41
4.1 Využití matematického modelu intenzity datového provozu	43
5 Shrnutí výsledků disertační práce	49
5.1 Doporučený postup konstrukce modelu provozu v přístupové síti	50
5.2 Doporučené metriky pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti . .	51
Závěr	53
Literatura	56
Curriculum vitae	59
Abstrakt	61

Úvod

Ke kritériím posuzování životní úrovně, kvality životního prostředí a míry životního komfortu v dnešním světě náleží dostupnost informací včetně rychlosti přístupu k nim. Informace je nutno verifikovat, systematicky je doplňovat, zpřesňovat a průběžně aktualizovat. Tyto procesy jsou uplatňovány pro jednotlivé dílčí informace i pro celé informační databáze. Ke kritériím posuzování životní úrovně, kvality životního prostředí a míry životního komfortu v dnešním světě náleží dostupnost informací včetně rychlosti přístupu k nim. Informace je nutno verifikovat, systematicky je doplňovat, zpřesňovat a průběžně aktualizovat. Tyto procesy jsou uplatňovány pro jednotlivé dílčí informace i pro celé informační databáze.

Při určování hlavních vývojových směrů informačních komunikačních digitálních technologií je zapotřebí vedle zvyšujícího se růstu nároků na rychlost a skokového navyšování objemu přenášených dat zohlednit i úroveň a stav vysokorychlostní infrastruktury. Kontinuální tlak na zvyšování technické dokonalosti poskytovaných služeb v oblasti multimediálních IP přenosů a na okamžitou implementaci nejnovějších technologických systémů do běžného chodu jako přímého důsledku zkracování lhůty mezi vývojem a nasazením těchto největších technologických inovací do reálného provozu s sebou zákonitě přináší stále rozmanitější portfolio multimediálních služeb. Všechny tyto služby musí zároveň splňovat náročné požadavky na maximální míru využitelnosti modernizovaných stávajících i zcela nově budovaných přenosových systémů.

V roce 2021 Evropská komise představila modernizaci stávajícího dokumentu *Strategie v oblasti Broadbandu*, jejímž hlavním cílem je rozvoj širokopásmových sítí. V dokumentu je definován strategický přístup k výstavbě VHCN prostřednictvím cílené veřejné podpory a se zaměřením na páteřní a přístupové sítě.[12]

V současnosti naplňovaná strategie v rámci proklamovaného trvale udržitelného hospodářského růstu deklaruje rozvoj sociálních výhod založených na jednotném digitálním trhu, jenž je koncipován na snadné dostupnosti vysokorychlostního internetu a vzájemné prostupnosti a na kompatibilitě jednotlivých multikomunikačních struktur a soustav elektronických služeb. Jedním z hlavních cílů této *Strategie* je podpora rozvoje sítí s vysokorychlostními přenosy. Zároveň jsou zde definovány základní povinné parametry digitální agendy pro přenosové sítě nové generace. Jedná se zejména o tyto vlastnosti:

- spolehlivost doručení služby při velmi vysokých rychlostech;
- plná podpora IP služeb (video služby, hlas);
- vyšší rychlost s důrazem na symetrické rychlosti přípojek.

Z technického hlediska je možno sítě nové generace dle materiálu *Digitální agenda pro Evropu* provozovat prostřednictvím optických sítí, pokročilých kabelových a bezdrátových sítí. V přímé návaznosti na tento evropský dokument bylo v České republice přijato závazné stanovisko ohledně rychlostí internetového připojení do roku 2030, konkrétně:

- přístup k rychlosti stahování minimálně 100 Mb/s s možností upgradu na 1 Gb/s pro všechny domácnosti; [12],[13]
- přístup k minimálně gigabitové rychlosti, a to symetricky pro podnikatelské subjekty,

státní správu, místní samosprávu a socioekonomické subjekty [12],[13].

Na základě tohoto závazného stanoviska byl Ministerstvem průmyslu a obchodu (dále jen MPO) na národní úrovni v Česku sestaven *Národní plán rozvoje sítí nové generace*, jenž stanovil, že konkrétní jednotné parametry vysokorychlostních přístupových sítí pro Českou republiku, tj. kvalitativní parametry, metodiky pro měření včetně mezních hodnot, budou definovány českým národním regulátorem – Českým telekomunikačním úřadem (dále ČTÚ). Konkrétním výsledkem konání ČTÚ v této jemu příslušející gesční oblasti je dokument s názvem *Metodika pro měření a vyhodnocení datových parametrů pevných sítí elektronických komunikací*. *Metodika* kromě jiného jasně definuje hlediska a takto stanovuje postupy pro ověřování parametrů a vlastností sítí NGA:

- měření pevných sítí pro účely kontroly parametrů přístupu k sítí Internet – varianta měření v běžném síťovém provozu;
- měření a analýza pevné sítě pro účely kontroly parametrů sítě a schopnosti přenosu dat – aktivační a projektová analýza sítě;
- měření a analýza pevné sítě pro účely kontroly parametrů nově budovaných dotovaných NGA sítí;
- měření a analýza pevné sítě pro účely kontroly parametrů stávajících NGA sítí, jež jsou předmětem ochrany investic.

Dle výše uvedeného *Národního plánu rozvoje* a v rámci Operačního programu Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost (dále OP PIK) řízeného MPO bylo zahájeno řešení projektu *Vysokorychlostní internet*, jenž má za cíl podpořit výstavbu a modernizaci NGA v místech, kde došlo k selhání tržního modelu a tudíž i k nesplnění požadavků na sítě NGA na národní úrovni. Na základě dat získaných dotazovacím šetřením byla pro instituci MPO vypracována mapa tzv. intervenčních oblastí. K 31. 3. 2017 byl pak MPO vybrán způsob definování a vyhodnocování přenosových vlastností dle použité aplikace.

Hlavním cílem předkládané disertační práce je po provedení analýzy naměřených dat v dlouhodobém časovém intervalu v reálné přístupové síti navrhnout funkční matematický model pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě.

Z hlavního cíle disertační práce jsou odvozeny cíle parciální. K dalším, tj. parciálním, cílům patří tyto úkoly: ověřit mapování, monitorování a zaznamenávání reálných provozních dat provozu přenosových přístupových sítí, aby bylo možno následně kvalifikovaně navrhnout efektivní řešení provozních změn v sítích a jejich optimální korekci pro vyhodnocování datových sad; realizovat rozbor stávajících řešení pro provoz hlasového provozu v telekomunikačních sítích dle jednotlivých metod; provést charakteristiku datového typu provozu pro přístupové sítě, a to konkrétně pro pasivní optické, kabelové a radiové sítě; vytvořit funkční matematický analytický model pro vyhodnocování výkonových parametrů přenosových sítí nové generace na základě kritéria intenzita provozu jako jednoho z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě při zohlednění poznatků z jeho ověřování v reálné přístupové síti a při respektování současných požadavků na kvalitu poskytovaných služeb v rámci těchto sítí; sestavit

metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě; ověřit sestavené metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě pomocí výpočtů a jednotlivých dílčích zpracování; provést porovnání hodnot na základě aproximace dat provozního profilu s naměřenými hodnotovými charakteristikami v reálných přístupových sítích.

Vlastní disertační práce se skládá z teoretické a praktické části. Je členěna do osmi kapitol, přičemž kapitoly jsou dále uspořádány do jednotlivých podkapitol. Tento dokument je uspořádán do pěti kapitol s příslušnými podkapitolami, jeho kompletní obsah dotváří úvod, závěr, literatura, Curriculum vitae a abstrakt. Nedílnou součástí disertační práce je seznam odborné literatury a použitých elektronických zdrojů a pramenů. Je vybavena abstraktem a klíčovými slovy v českém a anglickém jazyce, seznamem obrázků s grafickými znázorněními a s vyhodnoceními získaných výsledků, dále pak seznamem tabulek, seznamem symbolů a zkratk. V disertační práci je k dispozici seznam příloh, jež obsahují procedury pro zpracování vstupních dat, konkrétně přípravu dat, matematické zpracování dat, provedení výpočtu hlavní provozní hodiny a provozního sedla a taktéž výsledky a výstupy zpracovaných dat.

Teoretická část disertační práce je věnována současnému stavu poznání, a představuje tak základní východiska pro naplnění hlavního cíle i s ním bezprostředně souvisejících cílů parciálních. Je zaměřena na stručný výklad k problematice sítí nové generace – NGN, a to včetně sítě s velmi vysokou kapacitou – VHCHN, a na popis přístupové sítě jako takové. Poté je krátce popsán legislativní rámec a regulace trhu. V dalších podkapitolách je pozornost obrácena na strukturu přístupové sítě, a to z hlediska uživatelského, distribučního a přípojného segmentu, strategie rozvoje uživatelského segmentu sítí a na stávající stav přístupových sítí a technologií. Dále se zabývá službami vysokorychlostního přístupu k internetu v pevném místě, měřicími a testovacími metodami přenosových parametrů dle referenčního modelu ISO/OSI a testováním přenosových parametrů dle *RFC 2544*, *ITU-T Y.1564 – Etnernet SAM*, dle doporučení *RFC 6349*. V závěru první kapitoly je podán výklad k vyhodnocování parametrů přístupu k internetu dle *Narižení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120*. Poté je proveden vhléd do tématu služby streamování video obsahu v přístupové síti. Postupně je popsána tematika prostupnosti a kapacity přístupové sítě, a to včetně komentářů změn v chování uživatelů přístupové sítě a jejich možných důsledků. Krátce je podán výklad k typům video přenosů v přístupové síti, k datové náročnosti streamovacích video služeb v přístupové síti a jako poslední v této podkapitole je proveden komentář vlivu degradace parametrů přenosového média v přístupové síti.

Následně je prezentován nezbytný odborný teoretický předstupeň pro sestavení návrhu funkčního matematického modelu pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jednoho z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě. Je podán stručný popis matematických metod, jež jsou použity pro zpracování dat z přístupové sítě. Postupně je provedena aproximace měřených dat prostřednictvím vybraných konkrétních polynomů, aproximace polynomem daného stupně, měření kvality aproximace. Disertační práce se taktéž zabývá stručným výkladem statistických metod a postupů. Nejprve krátce vymezeny statistické termíny jako je teorie pravděpodobnosti

číselné charakteristiky náhodných veličin. Následně je podána stručná charakteristika popisné neboli deskriptivní statistiky a inferenční neboli induktivní statistiky. Poté je přistoupeno ke krátkému popisu regrese, korelace a problematiky testování hypotéz. Většina z popisovaných statistických nástrojů předpokládá dostatečně početný statistický soubor, čímž je míněno zpravidla minimálně 30–40 pozorování. V rámci řešeného disertačního úkolu je prováděna analýza a vyhodnocení dat získaných měřeními v přístupové síti za časový interval v délce půl roku, přičemž pro každý den v týdnu je k dispozici 26 záznamů. Tato hodnota je mírně pod hranicí doporučené velikosti statistického souboru, a proto byly v praktické části disertační práce pro analýzu a vyhodnocování dat získaných dlouhodobým měřením po dobu půl roku použity metody numerické matematiky.

V první kapitole, jež tvoří stěžejní jádro disertační práce, je na základě výše popsaných teoretických východisek a současného stavu poznání nejdříve stručně vymezeno zaměření předkládané disertační práce. Následně je stanoven hlavní cíl a v souladu s ním parciální cíle této práce.

Druhá kapitola tohoto dokumentu je plně věnována otázkám vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě. Po krátkém uvedení základních východisek k provozu v komunikačních sítích jsou v jednotlivých podkapitolách postupně analyzována odborná témata, a to nejprve otázka systémového řešení provozu hlasových služeb, jejíž součástí je teorie pravděpodobnosti v provozu hlasových služeb a měření provozní zátěže hlasových služeb prostřednictvím Centa Call-seconds. Poté je pozornost v dalších podkapitolách zaměřena na problematiku intenzity provozu z hlediska různých vybraných konkrétních metod dle *ITU-T E.500* a na řízení provozu, zejména pak na fáze procesu a na cíle procesu dle *ITU-T E.600*.

Předmětem odborného zájmu třetí kapitoly tohoto dokumentu je analýza distribuce datového provozu v přístupové síti. V jednotlivých podkapitolách jsou zkoumány geografické a demografické parametry analyzované přístupové sítě, kdy je provedena agregace uživatelů přístupové sítě. Ve shodě s předchozí podkapitolou je dále proveden rozbor denního profilu provozu přístupové sítě, a to s důrazem na zdůvodnění užití metody vyrovnání časových změn v přístupové síti. V závěru druhé kapitoly a v souladu s provedenou analýzou naměřených dat v dlouhodobém časovém intervalu, tj. během půl roku, v reálné přístupové síti je realizován návrh matematického modelu pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě, a to na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě. Nedílnou součástí tohoto návrhu je aproximace pomocí Lagrangeových polynomů a analýza kvality s využitím aproximace.

Ve čtvrté kapitole praktické části dokumentu je popsán proces konstrukce metrik v přístupové síti a poté je v podkapitole řešeno využití matematického modelu intenzity datového provozu.

Praktická část práce je uzavřena pátou kapitolou, v níž jsou představena shrnutí výsledků disertační práce, jež vyplývají s hlavního cíle i cílů parciálních. Zároveň jsou tyto dosažené výsledky diskutovány a porovnávány. V první podkapitole je prezentován doporučený postup konstrukce modelu provozu v přístupové síti a následně ve druhé podkapitole jsou uvedeny

doporučené metriky pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti. Je provedena argumentace o splnění hlavního cíle a parciálních cílů disertační práce a je doloženo, že hlavní cíl i cíle parciální disertační práce byly splněny.

V úplném závěru tohoto dokumentu jsou formulována zjištění a doporučení pro další vědecké bádání i pro praxi.

V následujících pěti kapitolách bude nyní představeno stěžejní jádro praktické části disertační práce, jehož obsahem jsou formulace hlavního cíle a cílů parciálních disertační práce, zejména pak vlastní postupy a řešení těchto cílů. Postupně bude prezentována problematika vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě, analýza distribuce datového provozu v přístupové síti, konstrukce metrik v přístupové síti, shrnutí výsledků předkládané disertační práce včetně doporučeného postupu konstrukce modelu provozu v přístupové síti a doporučených metrik pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti a závěr.

1 Cíle disertační práce a jejich řešení

V teoretické části disertační práce byla analyzována teoretická východiska jako nezbytný východní bod vědeckého bádání na dané téma. Nejprve byl stručně podán vhlad do problematiky sítí nové generace, v jehož rámci byla provedena definice přístupových sítí, a to včetně jejich struktury, popisu služeb vysokorychlostního přístupu k internetu v pevném místě, charakteristiky měřicích a testovacích metod přenosových parametrů dle *ISO/OSI*, dle *RFC 2544*, *ITU-T Y.1564b – Ethernet SAM* a taktéž podle *RFC 6349* a dle *Narižení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120*.

Požadavky na vysokou kvalitu a potřebnou garanci poskytovaných služeb prostřednictvím přístupové sítě ze strany koncových uživatelů se s ohledem na jejich intenzivní technologický rozvoj neustále zvyšují, zejména pak v oblasti streamování video obsahu. V teoretické části disertační práce byly krátce popsány služby streamování video obsahu v přístupové síti, zvláště pak problematika dostupnosti a kapacity přístupové sítě. Jak již bylo řečeno výše, vysokorychlostní sítě jsou regulovány a sledovány nadnárodním i národním regulátorem. Kvalitativní přenosové parametry pro připojení k internetu jsou často důležitým předmětem odborné diskuse, přičemž provoz v přístupové síti lze vyhodnocovat podle různých hledisek. V souladu s platnými regulačními nariženími Evropské Unie i ČTÚ je nutno uvést, že kritérium intenzita provozu přístupové sítě je jedním z hlavních kvalitativních charakteristických parametrů přístupové sítě, jehož prostřednictvím je možno elektronické komunikační služby měřit a vyhodnocovat. Na základě měřicích a testovacích metod přenosových parametrů dle v současnosti užívaných platných *Doporučení* je tak pozornost v této disertační práci soustředěna na parametr intenzita provozu přístupové sítě, poněvadž prostřednictvím užití tohoto parametru lze umožnit adekvátní kvalitativní sledování a potřebné vyhodnocování služeb vysokorychlostního přístupu k internetu v přístupové síti. Předmětem zájmu předkládané disertační práce je proto vypracování návrhu funkčního matematického modelu pro vyhodnocování datového provozu na základě kritéria intenzita provozu přístupové sítě.

V přímé návaznosti na teoretický výklad k matematickým metodám použitým pro zpracování dat z přístupové sítě, jenž byl zaměřen na aproximaci měřených dat, aproximaci polynomem daného stupně, na měření kvality aproximace i na základě stručného popisu teorie pravděpodobnosti, číselné charakteristiky náhodných veličin, popisné neboli deskriptivní statistiky, inferenční neboli induktivní statistiky a v jejím rámci problematiku regrese a korelace spolu s testováním hypotéz, bylo zdůvodněno, proč byly pro analýzu získaných dat použity metody numerické matematiky.

Teprve po provedení tohoto teoretického vhladu do stavu poznání, služby streamování video obsahu v přístupové síti, do matematických metod použitých pro zpracování dat z přístupové sítě v teoretické části práce je možno kvalifikovaně přistoupit ke stanovení hlavního cíle disertační práce a cílů parciálních. Tato kapitola a další na ni bezprostředně navazující kapitoly praktické části jsou stěžejní pro celou disertační práci, poněvadž jsou zde formulovány nejen hlavní cíl a z něj vyplývající cíle parciální, ale jsou v nich postupně prezentovány a diskutovány návrhy jednotlivých řešení disertačního úkolu, tj. konkrétní postupy, jak dosáhnout úspěšného

řešení vytčeného hlavního cíle a cílů parciálních, přičemž jsou zde reflektována i možná úskalí a reálné problémy, na něž je nutno při řešení stanovených cílů brát zřetel.

Hlavním cílem disertační práce je navrhnout funkční matematický model pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě.

Z hlavního cíle disertační práce jsou odvozeny cíle parciální. Další, tj. parciální, cíle si kladou za úkol:

- ověřit mapování, monitorování a zaznamenávání reálných provozních dat provozu přenosových přístupových sítí, aby bylo možno následně kvalifikovaně navrhnout efektivní řešení provozních změn v sítích a jejich optimální korekci pro vyhodnocování datových sad;
- realizovat rozbor stávajících řešení pro provoz hlasového provozu v telekomunikačních sítích dle jednotlivých metod;
- provést charakteristiku datového typu provozu pro přístupové sítě, a to konkrétně pro pasivní optické, kabelové a radiové sítě;
- vytvořit funkční matematický analytický model pro vyhodnocování výkonových parametrů přenosových sítí nové generace na základě kritéria intenzita provozu jako jednoho z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě při zohlednění poznatků z jeho ověřování v reálné přístupové síti a při respektování současných požadavků na kvalitu poskytovaných služeb v rámci těchto sítí;
- sestavit metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě;
- ověřit sestavené metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě pomocí výpočtů a jednotlivých dílčích zpracování;
- provést porovnání hodnot na základě aproximace dat provozního profilu s naměřenými hodnotovými charakteristikami v reálných přístupových sítích.

Nyní bude přistoupeno k řešení výše formulovaného hlavního cíle a cílů parciálních. Pozornost v praktické části disertační práci bude při řešení stanovených cílů plně soustředěna na problematiku vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě. Zvláštní pozornost bude věnována otázkám intenzity provozu, a to z hlediska různých vybraných konkrétních metod dle *ITU-T E.500*, a řízení provozu, zejména pak bude zaměřena na fáze a cíle procesu dle *ITU-T E.600*, konstrukci metrik v přístupové síti. Úspěšné řešení hlavního disertačního úkolu bude doloženo návrhem funkčního matematického modelu pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě. Následně bude provedeno shrnutí výsledků a závěrů, jejichž nedílnou součástí je doporučení postupu pro konstrukci modelu provozu v přístupové síti a doporučení vhodných metrik pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti.

2 Vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě

Poskytovateli internetových služeb jsou činěna mnohá rozhodnutí, jež jsou závislá na provozu v jejich sítích. Celkový objem přenášených dat a typ přenosu mezi vstupním a výstupním bodem v přístupové síti a v jejích jednotlivých částech je popisována dopravní maticí.

Je-li spolu s typem obsahu přenosu v přístupové síti a v jejích částech použita dopravní matice, je provozovateli přístupové sítě umožněno průběžně modelovat aktuální stav sítě. Takto jsou provozovateli přístupové sítě získávány cenné informace a aktuální data, takže dopravní matice je provozovateli nápomocná při provádění přenosového engineeringu, monitoringu a pro efektivní využití přenosové kapacity sítě.

Poskyvatelé internetových služeb jsou v současnosti nuceni čelit poměrně velkému tlaku, jenž je na ně vyvíjen ze strany nadnárodního i národního regulátora telekomunikačních služeb v oblasti celkové dostupnosti a funkčnosti internetových služeb, a to zejména u ukazatelů rychlost a kapacita přístupové sítě.

Jedním z významných regulačních nástrojů na evropské úrovni je sdružení evropských regulačních orgánů v oblasti elektronických komunikací, jenž je označován zkratkou BEREC [12]. BEREC přispívá k obecnému rozvoji, vzájemné synergii a zlepšení efektivity fungování interního trhu komunikačních sítí a internetových služeb v oblasti elektronických komunikací. Tyto aktivity jsou sdružením BEREC zajišťovány pomocí systematicky a důsledně uplatňovaného regulačního rámce EU na národních úrovních, čímž je potažmo podporován i rozvoj vnitřního trhu v telekomunikačních službách na dané národní úrovni. [1].

Měření datového provozu je zaměřeno především na testování výkonnosti. Testování výkonu se skládá z měření propustnosti, latence, rychlosti ztráty rámce, zátěžového testování, testování obnovení systému a jeho resetování. Výkonový test je zaměřen na vlastnosti paketu. Pro paketový test a jeho iterace jsou navrženy tabulky a grafy, v nichž jsou porovnávány závislosti na těchto naměřených hodnotách. K měření výkonnostních a kvalitativních parametrů jsou využívány pro datové přístupové sítě následující metodiky a doporučení *ITU (ITU-T Y.1564)* [4], *ITU (ITU-T Y.1731)* [6]) nebo *IETF (RFC 2544)* [3], *IETF (RFC 6349)* [5]. Ve výše uvedených metodikách a doporučeních není pracováno s proměnlivými charakteristikami, jakými je např. chování uživatelů, a to i přesto, že tyto charakteristiky mají přímý dopad na výkon a funkčnost komunikační přístupové sítě. Těmto charakteristikám dosud nebyla odbornými organizacemi a společnostmi věnována potřebná pozornost. Pro futurum bude zapotřebí odborně metodicky ošetřit také jejich testování a vyhodnocování.

2.1 Teoretické východisko k provozu v komunikačních sítích

Pro optimální provoz přístupových sítí a jejich stabilní funkčnost by bylo nanejvýš žádoucí, aby před vlastním budováním nebo při případné optimalizaci či inovaci stávající sítě, popř. během realizace skutečného provozu v přístupové síti, byla opakovaně zjišťována vytíženost přístupové sítě, a to z toho důvodu, že v průběhu dne se mění životní režim uživatelů, což se přímo projevuje v kolísavém zatížení dané přístupové sítě. Denní režim uživatelů se proměňuje taktéž v závislosti na pracovním rytmu (pracovní dny versus volné a víkendové dny) uživatelů, na ročních obdobích, částech roku i na životních etapách uživatelů. Bez znalosti těchto dat proto nelze správně dimenzovat, tudíž ani provozovat, přístupovou síť, a nelze tak garantovat potřebnou požadovanou rychlost a kvalitu připojení. Z výše uvedeného vyplývá, že provoz přístupových sítí a služeb na nich poskytovaných je ovlivňován řadou relativně náhodných prvků s proměnlivou povahou [15].

Na rozdíl od datových služeb na přístupových sítích je provoz telekomunikačních hlasových služeb jasně definován a pevně parametrizován.

V hlasovém telekomunikačním provozu je realizován pravidelný sběr dat, jenž je následně zpracován do analýz a ty jsou poté cyklicky vyhodnocovány. Tyto analýzy jsou statisticky zpracovávány. Zahrnují intenzitu provozu a její rozdělení podle typu účastníka a služby na každém spojení dle denní, týdenní a měsíční změny. Napomáhají optimalizaci architektury hlasových služeb. Je-li na základě statistického vyhodnocení indikováno přetížení určité části hlasové sítě, standardně je hlasový kanál přeměrován k uživatelům přes jinou přenosovou cestu. Vyhodnocovací aktivity jsou zaměřeny na kvalitu poskytované hlasové služby. Z dlouhodobých analýz statistických dat lze získat informace o provozu hlasové sítě, tj. o poddimenzování/předimenzování hlasové sítě nebo o jejím vhodně/nevhodně vyváženém provozu.

Statistika dává základ, jehož prostřednictvím je možno predikovat hlasovou síť, a to podle zjištěných hodnot z minulých měřených období. Tato data jsou výchozí pro modelaci, z níž poté vychází predikce vývoje provozu hlasové služby.

Statistické údaje jsou získávány a periodicky automaticky zpracovávány, je možno zpracovat konkrétní vybrané období dle zadaného požadavku a dle potřebného filtru [19].

Pro obsluhu a pro potřebný výpočet hlasových telekomunikačních služeb jsou využívány modely, jež vycházejí z Erlangových vzorců 2.2.1, a taktéž metoda označovaná jako Call-seconds (CCS) 2.2.2.

2.2 Systémové řešení provozu hlasových služeb

U provozu hlasových služeb je během dne vykazováno v rámci tohoto provozu kolísání uskutečněných telefonických spojení, je dosahováno minima a maxima. V provozu dosažené maximum je označováno termínem **hlavní provozní hodina**, tj. časový interval s největším počtem realizovaných telefonních hovorů prostřednictvím hlasové telekomunikační sítě. Toto maximum je

ovlivňováno řadou faktorů, do nichž je promítána přímá závislost na chování uživatelů. Jedná se o faktory jako je role a vliv akciového trhu, účinek aktuálního počasí, působení momentální mezinárodní společenské, politické a ekonomické situace i dopad jejího dlouhodobého stavu na národní poměry. Průměrný počet probíhajících hovorů v hlasových službách je v daných časových intervalech různý. Je označován jako **intenzita provozu**. [16].

Telefonní provoz je možno definovat jako souhrn telefonních hovorů přes skupinu obvodů nebo linek, a to s ohledem na délku hovorů a na jejich počet. Pro tok provozu je zaveden symbol A , je vyjádřen níže uvedeným vztahem 2.1 a pomocí vzorce – viz níže: [16]

$$A = C \cdot T \quad (2.1)$$

kde:

C – je vyjádření počtu hovorů uskutečněných během časového intervalu 1 hodiny a

T – je označení průměrné doby obsazenosti linek hlasové služby v daném časovém intervalu, hodnota je udávána obvykle v hodinách.

Tento vztah 2.1 není určen žádnou jednotkou, tudíž se jedná o tzv. bezrozměrnou jednotku. V telekomunikačním provozu hlasových služeb jsou používány termíny hustota provozu a intenzita provozu.

Počet simultánních hovorů v aktuálním časovém okamžiku je označován jako hustota provozu. Intenzita hovoru je dána časovým intervalem 1 hodiny a je definována jako průměrná hustota provozu.

Intenzita provozu hlasových služeb je ve většině případů definována pomocí Erlangových vzorců. V aplikačním prostředí je vymezen 1 erlang jako obvod, jenž je obsazen po dobu časového intervalu 1 hodina. Pro skupinu okruhů je intenzita provozu v erlangích počítána v sekundách. Tento vzorec byl sestaven Agnerem Krarupem Erlangem, jenž se řadí k inovátorům v oborech jako je matematika, teorie dopravního inženýrství, zejména pak problematika řazení do front. [17]

2.2.1 Teorie pravděpodobnosti v provozu hlasových služeb

V roce 1909 byla publikována odborná kniha Agnera Krarupa Erlanga s názvem *The Theory of Probabilities and Telephone Conversations (Teorie pravděpodobnosti a telefonní hovory)*, v níž bylo autorem dokázáno, že náhodně rozdělené telefonní hovory jsou řízeny Poissonovým zákonem rozdělení [19].

V roce 1917 byla Erlangem vydána práce *Řešení některých problémů v teorii pravděpodobnosti významu v automatických telefonních ústřednách*, v níž byly autorem prezentovány vzorce pro provozní ztráty a čekací dobu. Tyto vzorce v teorii provozu hlasových služeb se staly všeobecně známými a taktéž jsou v praxi hojně využívány. Například vzorec Erlang-B lze použít k výpočtu počtu hlasových kanálů potřebných k provozu call centra. Tento vzorec je definován následujícím vztahem 2.2.

$$P_b = B(E, m) = \frac{\frac{E^m}{m!}}{\sum_{i=0}^m \frac{E^i}{i!}} \quad (2.2)$$

kde:

P_b – je pravděpodobnost zablokování,

m – je počet stejných paralelních zdrojů, jako jsou servery, telefonní linky atd.,

$E = \lambda h$ je normalizované vstupní zatížení (nabízený provoz uvedený v erlangu).

Vzorec Erlang-C lze použít k odhadu počtu agentů call centra potřebných pro daný objem hovorů. Je definován následujícím vztahem 2.3.

$$P_w = \frac{\frac{E^m}{m!} \frac{m}{m-E}}{\left(\sum_{i=0}^{m-1} \frac{E^i}{i!}\right) + \frac{E^m}{m!} \frac{m}{m-E}} \quad (2.3)$$

kde:

E – je celkový nabízený provoz v jednotkách erlangů,

m – je počet serverů,

P_w – je pravděpodobnost, že zákazník bude muset čekat na obsluhu.

Jeho práce byly zpracovány velmi stručným sofistikovaným stylem a bez potřebných znalostí v oboru mohou být obtížně srozumitelné [18],[19].

2.2.2 Měření provozní zátěže hlasových služeb prostřednictvím Centa Call-seconds

V telekomunikačních hlasových službách je sekunda používána jako jednotka pro měření hustoty komunikačního provozu – Centa Call-seconds (dále CCS), jež odpovídá jednomu hovoru o délce 1 sekundy.

Provoz hlasových služeb je měřen nezávisle na uživateli. Například jeden uživatel, jenž uskuteční dva 75sekundové hovory, je ekvivalentní dvěma uživatelům, z nichž každým je proveden jeden 75sekundový hovor, a tak v každém případě vznikne 150 CCS provozu.

Při výpočtu provozní hlasové zátěže CCS je často používán místo 1 sekundy substituovaný tvar pro 100sekundový hovor prostřednictvím hlasových služeb, tudíž 3600 sekund volání se rovná 36 CCS, což činí 1 hodinu hlasového hovoru.

V telekomunikačních hlasových sítích je možno přenášet hlasové služby pomocí spoje neboli trunku, jímž je umožněna realizace velkého množství souběžných hlasových volání pomocí multiplexování. Sekundami hlasového provozu je udávána míra průměrného počtu souběžných volání [20].

Provozní zatížení provozu hlasových služeb je definováno jako hustota provozu za jednotku času a je měřeno v erlangích. Jeden erlang je definován jako počet realizovaných hlasových

hovorů za 1 hodinu neboli 3 600 sekund volání za 1 hodinu. Je-li hustota komunikačního provozu měřena prostřednictvím CCS po dobu 1 hodiny, provozní zatížení činí 1/36 erlangů [21].

Modely, sestavené Erlangem, jsou hojně využívány v telekomunikacích v oblasti hlasových služeb.

Pokud je sdílené médium počtem realizovaných hovorů prostřednictvím hlasových sítí omezeno, vzniká tak tzv. **úzké hrdlo**, jež je možno vypočítat pomocí Erlangových rovnic. Jako možný příklad tohoto stavu lze uvést situaci, kdy počet obslužených účastnických zařízení je omezen kapacitou základnové stanice mobilního operátora (BTS). K případným omezením počtu hovorů prostřednictvím hlasových sítí patří v tomto případě přístupová síť nebo radiová část, popř. vliv obou těchto částí telekomunikační sítě.

2.3 Intezita provozu dle *ITU-T E.500*

Mezinárodní telekomunikační unií byl vydán standard *ITU-T E.500*, v němž je definován Grade of Service (dále GoS) a jehož nedílnou součástí jsou určující parametry pro kvalitu služby v telekomunikačních sítích (dále QoS). V *ITU-T E.500* je definován pracovní postup pro prováděná měření výkonnosti přístupové sítě na základě úrovně obsazenosti kanálů a intenzity provozu a jejich následná vyhodnocování.

V dokumentu *ITU-T E.500* je vymezena intezita provozu jako poměr průměrného výkonu přenášeného signálu k maximálnímu výkonu přenášeného signálu, jež mohou být přenášeny daným kanálem. Tuto definici lze aplikovat do prostředí pro přenos prostřednictvím protokolu TCP/IP sítě, a to pro určení šířky pásma sítě.

Ve shodě s výše uvedeným standardem *ITU* je intezitu provozu TCP/IP sítí možno vyjádřit jako poměr mezi průměrnou vytižeností sítě a její maximální kapacitou sítě v daném časovém intervalu. Maximální kapacita sítě je omezena hodnotami parametrů – šířka pásma, rychlost přenosu dat, počet připojených zařízení. Z toho vyplývá, že konkrétní hodnoty intenzity provozu jsou v přímé závislosti na konkrétních parametrech dané přístupové sítě, přičemž tyto parametry mohou zahrnovat počet připojených zařízení, typ provozu, velikost datových paketů a další charakteristické vlastnosti sítě. V aplikačním prostředí se měřením získané hodnoty intenzity provozu pohybují v rozmezí od několika procent až do několika desítek procent maximální kapacity přístupové sítě.

Pro stanovení konkrétní úrovně intenzity provozu TCP/IP sítě podle standardu *ITU-T E.500* je nutno specifikovat další parametry sítě a taktéž je nezbytné použít příslušné výpočetní metody.

Na základě analýzy dat prováděných měření provozu přístupových sítí a znalostní základny těchto sítí je možno účinně řídit, efektivně provozovat a systematicky plánovat tranzitní návrhy přístupových a transportních sítí. Zároveň je třeba podotknout, že v praxi mohou existovat

různé aplikační nástroje pro obdobná měření provozu [22] a mohou být využívány různé metody výpočtu. Jejich stručná charakteristika je provedena níže.

2.3.1 Metoda Time-Consistent Busy Hour – TCBH

V rámci doporučené standardní metody výpočtu denního průměru – Time-Consistent Busy Hour (dále TCBH) je vyžadováno provádění průběžného měření všech čtvrt hodin pro všechny dotčené dny s výběrem maxim hodinových intervalů v průměrném profilu pro všechny dny. Metoda TCBH je řazena k nejcennějším metodám, jež jsou využívány v rámci potřeby stabilizace dopravních profilů. Denními kontinuálními měřeními jsou tak získávány údaje pro potvrzování stability profilu. [22]

2.3.2 Metoda Average Daily Peak Hour – ADPH

Další způsob, jak je možno získat konkrétní data o reprezentativní průměrné hlavní provozní hodině, je dán metodou ADPH. Metoda zahrnuje průběžné měření všech čtvrt hodin, pro zprůměrování je však zachována pouze hlavní provozní hodina každého dne, přičemž tato hodina je charakterizována vztahem k vrcholu provozu a je provázána poměrem výsledků ADPH k TCBH.

Ze vzájemného porovnání metod TCBH a ADPH lze vyvodit výhody ADPH, jež spočívají v tom, že metoda vyžaduje oproti metodě TCBH méně ukládání a manipulaci s daty. Další výhoda metody ADPH spočívá v průběžném získávání reprezentativnější hodnoty v situaci nestabilních provozních profilů. [22]

2.3.3 Metoda Fixed Daily Measurement Period – FDMP

V některých situacích není měřen provoz přístupové sítě během celého dne, ale měření je realizováno pouze po dobu jedné hodiny nebo po dobu dvou hodin, a to konkrétně u těch hodin, u nichž je očekávána největší vytíženost. Tato metoda FDMP je česky označována jako denní doba měření nebo pevná denní doba měření.

Metoda FDMP je blíže popsána usouvztažením získaných výsledků k výsledkům měření TCBH v denní době měření.

Výhodou metody FDMP je, že je vyžadováno méně finančních prostředků na měření, než je tomu u metod TCBH nebo ADPH. Nevýhoda metody FDMP spočívá v tom, že v jednotlivých situacích se rozdíl mezi výsledky FDMP a TCBH může značně lišit. V některých situacích v síti lze dosáhnout významných úspor při vícehodinovém dimenzování (např. pomocí clusteru inženýrství, rozdílů v časových pásmech aj.). To vyžaduje každodenní průběžné měření provozu přístupové sítě [22].

V IP síti je intenzita provozu definována vztahem:

$$\rho = \frac{a \cdot L}{R} \quad (2.4)$$

kde:

a – je průměrná rychlost příchodu paketů (např. v paketech za sekundu),

L – je průměrná délka paketu (např. v bitech) a

R – je přenosová rychlost (např. v bitech za sekundu).

Intenzitou provozu větší než 1 erlang je vyjádřena rychlost, jíž jsou přenášeny bity a jež převyšuje rychlost, s jakou je možno přenos bitů zpracovat aktivním prvkem. Tímto může dojít k vytváření fronty, jejímž přímým důsledkem je zpoždění provozu na sítích. Je-li intenzita provozu menší než 1 erlang, pak aktivním prvkem je obslužen provoz větší než průměrný.

Intenzita provozu je významným ukazatelem, jež je mapována všemi telekomunikačními operátory, a to z toho důvodu, že intenzitou provozu je zároveň určován potřebný počet zařízení, jejichž prostřednictvím je vlastní provoz sítě realizován.

2.4 Proces Traffic engineering dle *ITU-T E.600*

Proces Traffic engineering – Směrování a řízení provozu (dále TE) je zaměřen na různé aspekty sítě, jako jsou topologie, směrování, řízení přetížení, přidělování zdrojů, zabezpečení sítě a další.

Na základě zkoumání těchto aspektů je možno formulovat opatření, jež jsou nápomocna při zajišťování efektivity, škálovatelnosti a spolehlivosti přenosu dat a hlasových služeb v sítích a jež jsou zároveň nezbytným základním předpokladem realizace moderní vysokorychlostní sítě.

Traffic Engineering je doporučením *ITU-T E.600* vymezen jako proces, jímž je řízeno přidělování a řízení síťových zdrojů (např. šířka pásma) tak, aby byly splněny požadavky na QoS a zároveň byla optimalizována využitelnost přístupové sítě.

Konkrétně TE je umožněna optimalizace směrování datového toku v přístupové síti tak, aby byly minimalizovány ztráty paketů, vzniklá zpoždění a další aspekty, jimiž může být QoS negativně ovlivněny. Vlastní optimalizace směrování datového toku v přístupové síti je prováděna prostřednictvím různých způsobů nastavení přístupové sítě, a to technikami, jako je přidělování šířky pásma, směrování provozu, přepínání okruhů a další.

Hlavním cílem TE je maximalizování využitelnosti přístupové sítě spolu se zajištěním splnění požadavků na QoS pro různé typy služeb, tj. např. hlasové služby, streamování video služeb, datové přenosy a další. Tento proces lze hodnotit jako vysoce komplexní, v jehož rámci jsou vyžadovány pokročilé metody a nástroje pro monitorování, analýzu získaných dat a pro následnou optimalizaci sítí.

2.4.1 Fáze procesu Traffic engineering dle *ITU-T E.600*

Traffic engineering je definován jako iterativní model o čtyřech fázích procesního modelu, v jehož rámci se jednotlivé fáze neustále opakují. Konkrétně se jedná o tyto fáze:

- **Analýza** – první fází procesního modelu jsou definovány příslušné řídicí ukazatele, jimiž je řízen provoz přístupové sítě. Tyto ukazatele mohou být závislé na mnoha faktorech,

jako je např. převládající obchodní model, struktura nákladů na vybudování přístupové sítě, finanční náročnost jejího provozu, zohlednění nejrůznějších provozních omezení, modelů užitečnosti a ziskovosti, optimalizačních parametrů apod. [24].

- **Plánování** – druhou fází procesního modelu je vymezen mechanismus zpětné vazby, v níž je zahrnuto získávání naměřených údajů z provozní sítě. Nejsou-li empirická provozní data ze sítě snadno dostupná, lze místo nich použít generovaná simulovaná provozní zatížení, jež svou charakteristikou odpovídají převládajícímu nebo očekávanému zatížení sítě. Generované simulované provozní zatížení je možno odvodit odhadem nebo extrapolací dat na základě předchozích empirických provozních dat. Jejich odvození je možno provést pomocí matematických modelů provozních charakteristik, případně i jinými postupy [24].
- **Implementace** – jako třetí fáze procesního modelu je označována analýza stavu sítě a charakteristika dopravního zatížení sítě. Analýzu výkonnosti je možno členit na aktivní a reaktivní. Aktivní analýzou výkonnosti jsou identifikovány potenciální problémy, jež sice ještě neexistují, tudíž dosud nebyly identifikovány, ale jež by se mohly projevit pro futurum. Reaktivní analýzou výkonnosti jsou rozpoznány již existující, tj. aktuálně se vyskytující, problémy, jejichž příčina je zjišťována prostřednictvím diagnostických nástrojů a dle případné potřeby jsou vyhodnocovány alternativní přístupy k nápravě těchto problémů. V procesu analýzy lze použít řadu kvantitativních a kvalitativních technik, včetně analýzy založené na modelování a simulaci. V rámci analytické fáze procesního modelu je zkoumána koncentrace a distribuce provozu v síti nebo v příslušných podmnožinách sítě, identifikace charakteristik nabízeného provozního zatížení, rozpoznávání stávajících nebo potenciálních úskalí – např. hrozby úzkého hrdla a dalších patologických jevů v síti – např. neefektivního rozmístění spojů, jednotlivých míst selhání atd. Síťové patologie mohou vznikat v důsledku mnoha faktorů, a to včetně nevyhovující architektury sítě, neuspokojivého návrhu sítě, konfiguračních problémů a dalších. Nedílnou součástí procesu analýzy může být sestavení matice provozu. Analýzu sítě je možno posuzovat jako popisnou či normativní [24].
- **Monitorování** – ve čtvrté fázi procesního modelu je prováděna optimalizace výkonnosti sítě. Do fáze optimalizace výkonnosti je zahrnován rozhodovací proces, v jehož rámci je zvolen a následně do praxe zaváděn soubor opatření, jenž je vybrán z možných alternativních postupů. Optimalizací je realizováno použití vhodných technik a postupů, jimiž je zajišťováno řízení poskytovaného provozu sítě, nebo je jimi manažováno rozložení provozu v dané síti. Optimalizační aktivity se taktéž mohou sestávat z přiřazení dalších spojů nebo ze zvýšení jejich kapacity, z nasazení dalšího hardwaru, tj. aktivních prvků – směrovačů, prepínačů aj. či ze systematické úpravy dalších ukazatelů [24].

2.4.2 Cíle procesu Traffic engineering dle *ITU-T E.600*

Procesní model *ITU-T E.600* je označován jako cyklický. Jeho prostřednictvím je umožňována kontinuální optimalizace sítě v souladu s požadavky na QoS a s provozními změnami v sítích.

V tomto doporučení jsou formulovány definice a termíny pro použití v oblasti TE, jež zahrnuje monitorování a měření provozu, predikování, plánování a dimenzování výkonnosti přenosových parametrů.

Hlavním cílem TE je zajistit realizaci maximálních výkonnostních parametrů provozuschopnosti telekomunikačních služeb.

Vybrané parciální cíle TE v IP sítích jsou:

- **Optimalizace směrování** – prostřednictvím TE je usilováno o zajištění směrovacích protokolů v síti tak, aby bylo správně prováděno rozhodování o nejvýhodnějším směrování přenosu dat. K tomuto účelu je možno využít různé metriky, a to s cílem dosáhnout optimálního směrování pro každý datový tok.
- **Řízení přetížení** – pozornost TE je věnována taktéž řízení přetížení v síti. Tato aktivita může zahrnovat používání různých ukazatelů, jako je distribuce zátěže, přesměrování provozu nebo omezení přenosové propustnosti pro určité datové toky.
- **Přidělování zdrojů** – pomocí TE je provozována optimální distribuce zdrojů sítě, do nichž jsou zahrnovány přenosové trasy, a požadavek na optimální využití aktivních prvků – směrovačů a prepínačů tak, aby byly využívány co nejefektivněji. To může zahrnovat dynamické rozdělování zdrojů mezi různými datovými toky na základě aktuálních síťových potřeb.
- **Zajištění kvality služeb** – TE je zaměřena na zajištění kvality služeb pro různé typy provozu v síti. V rámci procesu TE mohou být použity různé techniky, jako je např. prioritizace síťového provozu, garantovaná přenosová rychlost nebo omezení zpoždění pro určité datové toky.

Jinými slovy a v souladu s výše uvedeným hlavním i parciálními cíli je procesem TE v IP sítích zajišťováno optimální využití sítě, spolehlivost, maximální výkon přenosu dat a zajištění kvality služeb pro různé typy provozu sítě [23].

3 Analýza distribuce datového provozu v přístupové síti

Hlavním cílem disertační práce je navrhnout matematický model distribuce provozu v přístupové síti v závislosti na provozních časových intervalech. Hlavní přínos navrženého matematického modelu distribuce provozu v přístupové síti v závislosti na různých časových provozních intervalech spočívá v sofistikovanějším průběžném vyhodnocování behaviorálního chování uživatelů těchto sítí, jež umožňuje objektivnější, efektivnější a zároveň i adresnější a individualizovanou reakci na předpokládané potřeby, aktuální požadavky a na momentální nároky uživatelů těchto sítí. V rámci přípravy i během následné realizace návrhu tohoto modelu byly zohledněny definice vycházející z *ITU-T E.500* [22] a *ITU-T E.600* [23]. Filozofie návrhu vychází taktéž z Average Daily Peak Hour – ADPH a Time-Consistent Busy Hour – TCBH, jimž byla věnována pozornost v podkapitole 2.3.

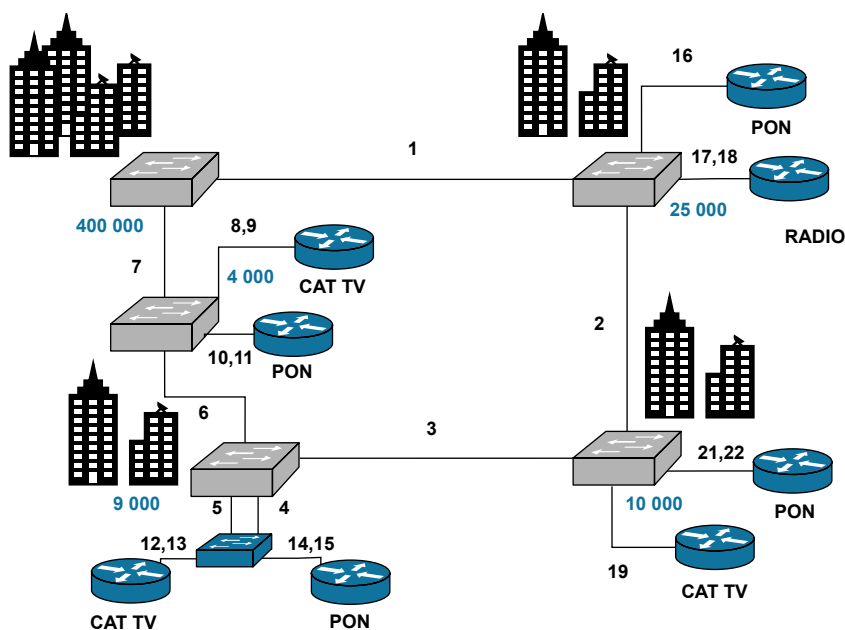
Dále je zapotřebí vzít v úvahu skutečnost, že v případě datové komunikace nelze využít všechny principy, jež jsou běžně aplikovány v klasickém telefonním provozu. Termíny jako počet připojení a doba připojení nenabývají v přístupových IP sítích takového významu, tj. nenaplňují roli klíčových identifikátorů.

Pro konstrukci metrik vycházejících z ADPH a TCBH [26], [27] byla provedena analýza provozních statistik přístupové sítě středně velkého poskytovatele internetových služeb, v jejímž rámci bylo analyzováno procentuální rozložení provozu v průběhu dne v závislosti na jednotlivých dnech v týdnu. Na základě provedených rozborů a analýz byl sestaven matematický model rozložení datového provozu v čase. Tento model byl následně využit pro konstrukci metrik popisujících dobu provozní špičky a provozního sedla, obdobně jako je tomu u metriky ADPH a TCBH v případě telefonního provozu.

3.1 Geografické a demografické parametry analyzované přístupové sítě

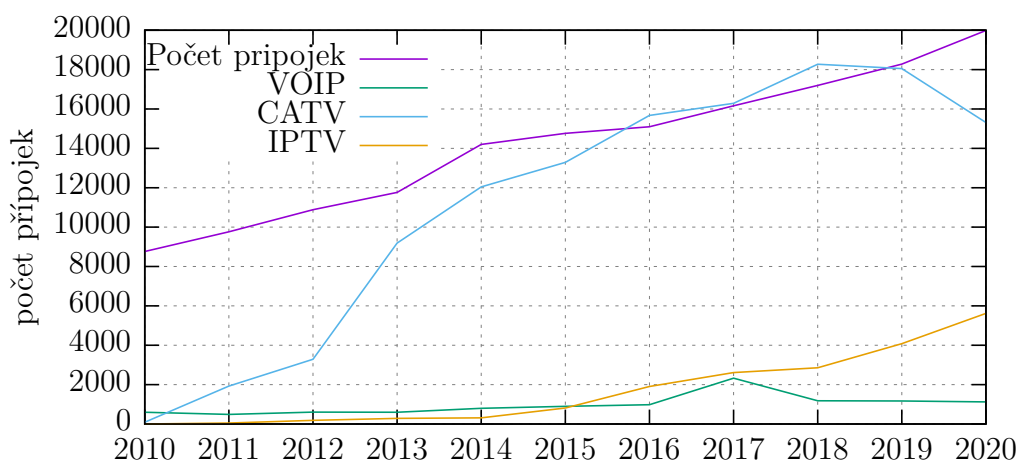
Pro analytickou část práce byly použity provozní statistiky středně velkého ISP operátora. Distribuční síť se skládá ze čtyř uzlů, jimiž jsou propojovány jednotlivé typy přístupových sítí. Struktura blokového schématu analyzované sítě je zachycena na obrázku 3.1 a počet přípojek podle jednotlivých technologií je uveden v grafu na obrázku 3.2. Přehled jednotlivých rozhraní, jež jsou použity pro analýzu datového provozu, je uveden v tabulce 3.1.

Sběr provozních údajů sítě byl prováděn na síťových rozhraních v jednotlivých segmentech sítí s velmi vysokou kapacitou. Získané údaje byly postupně ukládány do centrálního monitorovacího systému a byly zaznamenávány v intervalu každých 30 sekund. Měřeními získaná data jsou nedílnou součástí dlouhodobého měření na přístupovém rozhraní lokalit, jejichž minimální městská populace činí 9 000 obyvatel a maximální 400 000 obyvatel. Data byla snímána po dobu půl roku ze všech bodů přístupové sítě. V části pro přístup k distribuci sítě je na poslední



Obr. 3.1: Blokové schéma analyzované topologie sítě s velmi vysokou kapacitou – VHCN.

míli používána pasivní optická síť a bezdrátové rádiové systémy. Na obrázku 3.1 je zobrazena topologie měřené sítě.



Obr. 3.2: Složení dle typů služeb v přístupové síti.

Ke geografickým parametrům je nutno uvést, že z geografického hlediska je kombinováno složení uživatelů z různých území, tj. jsou zastoupeny městské aglomerace, města středního rozsahu i venkovní a odlehlé lokality s rozdílným řešením technologického připojení na poslední míli, čímž bylo dosaženo zastoupení všech potenciálních uživatelských skupin. Uživatelský segment je tak tvořen rezidenčními, komerčními uživateli i uživateli, jež zastupují veřejné a státní organizace.

Tab. 3.1: Rozpis použitých rozhraní v analyzované přístupové síti.

Port	Typ používané technologie
1	Transportní síť
16 17,18	Pasivní optická síť (PON) Bezdrátová síť (Radio)
2	Transportní síť
19 20,21	Pasivní optická síť (PON) Kabelová televize (CATV)
3,(4,5)	Transportní síť
14,15 12,13	Pasivní optická síť (PON) Kabelová televize (CATV)
6,7	Transportní síť
10,11 8,9	Pasivní optická síť (PON) Kabelová televize (CATV)

3.1.1 Agregace uživatelů přístupové sítě

Termín agregace je obecně užíván jako technický parametr pro proces shlukování či seskupování. V našem případě je prováděna agregace internetového připojení. Takto uchopená agregace v přímé souvislosti s internetovým prostředím dokládá počet uživatelů přístupové sítě, již mohou v jednom okamžiku sdílet maximální vyhrazenou rychlost. Agregací je tak umožňováno sdílení kapacity internetových linek mezi více uživateli. Toto technologické řešení je pro poskytovatele internetových služeb výhodné, a to z toho důvodu, že díky němu může poskytovatel nabízet připojení za výrazně nižší cenu.

Z výše uvedených důvodů představuje agregace nutný a logický proces při postupném slučování toků od jednotlivých uživatelů směrem k páteřní síti a dále do internetu. Agregace je přímým důsledkem koncentrace provozu a zároveň i nutným předpokladem pro ekonomicky efektivní výstavbu a následné provozování sítí. S ohledem na charakter služeb musí být nastaven tzv. agregační poměr (tj. koncentrační poměr). Jeho výše je závislá na těchto proměnných:

- charakter toků (tj. např. jsou-li uživateli poskytovány služby televizního a rádiového vysílání – IPTV);
- celkový objem přenášených dat;
- charakter provozu (řadou služeb jsou generovány poloduplexní toky apod.);
- aktivita příslušných uživatelů (např. webovými službami jsou generovány krátké dávky dat s dlouhými pauzami, v nichž je uživatelem prohlížen obsah);
- přítomnost uživatele v domácnosti (při nepřítomnosti uživatele je logicky koncentrace komunikace nižší, např. udržování spojení speciálních M2M aplikací, stahování na pozadí apod.);
- počet zdrojů dat (větším počtem zdrojů dat je připouštěn vyšší agregační poměr);
- skutečnost, zda se jedná o dávkový režim či kontinuální tok.

Z hlediska kvality provozu je žádoucí, aby byl průběžně provozovatelem sítě monitorován

objem a kvalita datového provozu v síti. V případě potřeby musí být provozovatelem sítě navýšena kapacita s ohledem na problematické ukazatele části sítě včas a se zřetelem na požadavek, aby nedocházelo k omezování přístupových rychlostí a kvality poskytovaných služeb na straně koncových uživatelů.

Hodnota agregace, jež je představována výše zmíněným počtem uživatelů sdílejících jednu linku, je vždy uvedena jako poměr 1 : X. V tomto číselném vyjádření je písmeno X nahrazeno počtem sdílejících uživatelů. Ve smlouvě o poskytování služeb mezi poskytovatelem služeb a jejich uživatelem je vždy uváděn údaj o maximální rychlosti v kolokaci se slovem „až“, čímž je de facto vyjádřena maximální rychlost, kterou lze na dané lince přístupové sítě dosáhnout. Podle počtu aktivních uživatelů v daný časový moment se však tato maximální rychlost může snížit.

V případě dlouhodobého měření jsou všechny získané údaje vyhodnocovány v již agregovaném režimu. Takto je docíleno toho, že přístupová síť je v rámci měření agregována, a to s ohledem na různý typ chování uživatelů. Analýza je provedena se zřetelem na behaviorální chování uživatelů a s cílem dosáhnout co nejvyšší míry objektivnosti.

3.2 Denní profil provozu přístupové sítě

Realizovaný absolutní objem datového provozu závisí na denní době, konkrétním dnu v týdnu, na prodloužených víkendech o státní svátky a významné dny, na ročním období a dalších časových proměnných faktorech. Dalším významným prvkem, jenž ovlivňuje objem datového provozu, je např. možnost práce z domova, sdílená pracovní místa aj. Lze konstatovat, že konkrétní den a čas v kalendáři významně ovlivňuje celkový objem datového provozu za daný den.

Záznamy měření v provozních statistikách analyzované sítě byly prováděny v intervalech 30 sekund. Pro účely stanovení doby provozní špičky neboli hlavní provozní hodiny se jeví toto časové rozlišení jako příliš jemné. Z toho důvodu byla provedena agregace měřených dat do časových intervalů 15 minut. Tímto způsobem byl časový interval jednoho dne rozdělen na 96 úseků neboli 96 časových intervalů. Jeden úsek tak představuje 1/96, tj. přibližně 1 % denní doby. Tato granularita se ukazuje jako odpovídající potřebám práce.

V jednotlivých dnech týdne jsou vykazována velmi podobná rozložení objemu provozu v závislosti na dané části dne v rámci režimu dne, týdne a ročního období, celkový objem provozu v jednotlivých dnech se však liší. Z tohoto důvodu bude při numerickém modelování operováno s relativním objemem datového provozu. V této a následující kapitole budou indexem i označovány jednotlivé časové intervaly v délce 15 minut v průběhu dne a během měřeného období, symbolem Y_i je vyjádřen objem datového provozu v i -tém časovém úseku a symbolem y_i relativní objem datového provozu v i -tém časovém úseku. Relativní objem datového provozu je definován vztahem 3.1.

$$y_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^{96} Y_i} \quad (3.1)$$

kde:

Y_i – je objem datového provozu v i -tém časovém úseku,

y_i – je relativní objem datového provozu v i -tém časovém úseku.

Touto metodou je umožněno kompenzovat nerovnoměrný objem provozu, jenž je zapříčiněn nahodilými výkyvy v relativním objemu datového provozu v jednotlivých specifických dnech či jejich částech v kalendáři za celý rok. V profilu datového provozu každého dne jsou tak vykazovány určité odchylky, tj. nárůsty a propady, způsobené behaviorálním chováním uživatelů. V jeho rámci je např. uživatelem provedena volba času, kdy je jeho pozornost soustředěna na profesní výkon a další pracovní povinnosti, nebo je uživatelem dle vlastní preference zvolen čas pro volnočasové aktivity, popř. je vybrán čas pro odpočinek, spánek apod. Těmito projevy behaviorálního chování, promítajícími se do nárůstů a propadů v objemu datového provozu, jsou narušovány algoritmy pro přizpůsobení vhodné spojité funkce naměřeným datům.

Pro účely kompenzace náhodných výkyvů bylo provedeno vyhlazení dat váženým klouzavým průměrem. Řada hodnot y_i tak byla nahrazena řadou x_i podle vztahu 3.2, kde váhová funkce w_j nabývá postupně hodnot 0, 1; 0, 2; 0, 4; 0, 2; 0, 1.

$$x_i = \sum_{j=i-2}^{i+2} w_j y_j \quad (3.2)$$

kde:

y_i – je relativní objem datového provozu v i -tém časovém úseku.

Pro stanovení měřeného intervalu 1 den v rámci numerického modelování datového provozu jsou využity časové intervaly 15 minut, tj. celkem je pro časový interval 1 den zaznamenáno 96 výpočtem zpracovaných hodnot.

Začátek a konec po sobě jdoucích dnů je vždy striktně oddělen, tj. končící a navazující den je jednoznačně určen – viz tabulka 3.2. Dle této tabulky jsou skriptem kontrolovány údaje v razítku. Jak vyplývá ze záznamu datového provozu a je uvedeno v tabulce, poslední časový interval pro výpočet datového objemu v rámci 1 dne je konkrétní čas 23:59:46. Pro zahájení nového měření v navazujícím dni je stanovena hodnota prvního intervalu konkrétním časem 00:00:16.

V provedené analýze profilu datového provozu na základě numerického modelování byla zpracována data získaná měřením za období půl roku. Měření bylo prováděno v intervalech 15 minut za 1 den, tj. 96 výpočtem získaných hodnot, a to po dobu 26 týdnů. Tak byly získány konkrétní údaje pro 26 jednotlivých relací dnů v týdnu. Následně byla v rámci relativního objemu datového provozu provedena analýza nahodilých výkyvů v jednotlivých specifických dnech a jejich částech dle kalendáře. Analýzou bylo prokázáno, že získané naměřené hodnoty je nutno zpracovat bez zohledňování denních odchylek, tj. nárůstů a propadů v objemu datového

Tab. 3.2: Vytvoření intervalů pro určení začátku a konce dne.

Datum	Den	Čas	hodnota
14.09.2020	Pondělí	23:57:46	1553599064
14.09.2020	Pondělí	23:58:16	1483790656
14.09.2020	Pondělí	23:58:46	1580107408
14.09.2020	Pondělí	23:59:16	1638942296
14.09.2020	Pondělí	23:59:46	1644781064
15.09.2020	Úterý	00:00:16	1704899992
15.09.2020	Úterý	00:00:46	1450893448
15.09.2020	Úterý	00:01:16	1650637400
15.09.2020	Úterý	00:01:46	1573587664
15.09.2020	Úterý	00:02:16	1422483032

provozu v 1 dni. Byl proto vypočten průměr relativních objemů datového provozu v daném časovém úseku 1 dne, tj. např. za všechna pondělí, soboty atd., v období 26 týdnů.

3.2.1 Metoda vyrovnání časových změn v přístupové síti

V rámci prováděného zpracování dat je nutno vzít do úvahy periodické provádění časových změn, tj. změny času příslušného časového pásma na tzv. letní čas, jež je od roku 1996 v rámci Evropské unie sjednocen. Je určen začátek a konec letního času – začátek letního času je stanoven na noc poslední neděle v březnu, konec pak na noc poslední neděle v říjnu. Pro tyto účely je v numerickém zpracování dat aplikován doplňkový skript, v jehož rámci jsou pro tyto dva stavy provedeny potřebné korekce, a to s cílem zabránit vzniku anomálií při zpracování měření získaných hodnot. Tato korekce je v souladu s prováděnou cyklickou změnou času příslušného časového pásma na letní čas a poté zpět do příslušného časového pásma, jež je realizována vždy v intervalu 2:00 až 3:00 hodiny.

Pro kompenzaci pro návrat z letního času do příslušného časového pásma je využit skript, v jehož rámci je provedena korekce dat pro vyhodnocování numerického modelování. Jak bylo uvedeno výše, tato cyklická změna času nastává v noci poslední neděle v říjnu a v numerickém modelování je provedeno odebrání hodinového záznamu. Tato operace je realizována v dílčích krocích. Nejprve jsou provedeny dva záznamy a následující čtyři intervaly v délce 15 minut jsou vynechány. Poté jsou následující hodnoty již zaznamenány. Princip provedené kompenzace je zobrazen v tabulce 3.3. Kompenzace hodnot pro návrat z letního času do příslušného časového pásma.

Přechod z příslušného časového pásma do letního času je cyklicky realizován v noci poslední neděle v březnu. Taktéž u této změny je nutno provést úpravu numerického modelování. Pro zajištění korektního vyhodnocení je provedena kompenzace. Data k časovému intervalu 2:00 až 3:00 hodin poslední neděle v březnu zcela chybějí, proto je zapotřebí tyto údaje ve shodě s příslušnými konkrétními údaji doplnit. Pro tento úkon je zvolena metoda substituce a to

Tab. 3.3: Kompenzace hodnot pro návrat z letního času do příslušného časového pásma.

Časový interval	Aplikované data	Popis
2:00 - 2:15	2:00 - 2:15	Zpracované hodnoty ze záznamu
2:15 - 2:30	2:15 - 2:30	Zpracované hodnoty ze záznamu
2:30 - 2:45	-	Odstranění hodnoty ze záznamu
2:45 - 3:00	-	Odstranění hodnoty ze záznamu
2:00 - 2:15	-	Odstranění hodnoty ze záznamu
2:15 - 2:30	-	Odstranění hodnoty ze záznamu
2:30 - 3:45	2:30 - 3:45	Zpracované hodnoty ze záznamu
2:45 - 3:00	2:45 - 3:00	Zpracované hodnoty ze záznamu

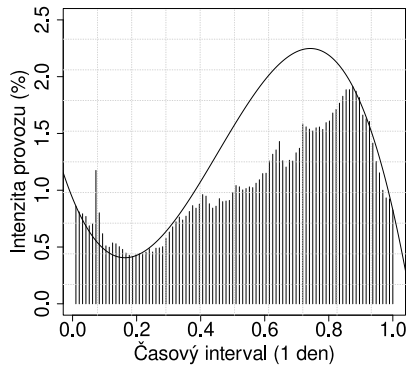
tak, že tyto čtyři intervaly jsou substituovány z předchozích a navazujících časových záznamů. Časové intervaly (2:00-2:15) a (2:15-2:30) jsou substituovány z předchozího intervalu (1:45-2:00) a pro intervaly (2:30-2:45) a (2:45-3:00) jsou aplikována data z následujícího intervalu (3:00-3:15). Tento mechanismus je zaznamenán v tabulce 3.4 pro kompenzace hodnot pro přechod z příslušného časového pásma do letního času.

Tab. 3.4: Kompenzace hodnot pro přechod z příslušného časového pásma do letního času.

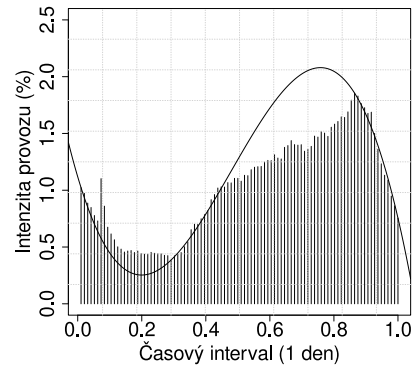
Časový interval	Aplikované data	Popis
1:45 - 2:00	1:45 - 2:00	Zpracované hodnoty ze záznamu
2:00 - 2:15	1:45 - 2:00	Substituce z předchozího záznamu
2:15 - 2:30	1:45 - 2:00	Substituce z předchozího záznamu
2:30 - 2:45	3:00 - 3:15	Substituce z následujícího záznamu
2:45 - 3:00	3:00 - 3:15	Substituce z následujícího záznamu
3:00 - 3:15	3:00 - 3:15	Zpracované hodnoty ze záznamu

Na základě grafů zobrazujících numerické vyhodnocení relativních objemů provozu za jednotlivé pracovní dny je možno verifikovat zjištění, že u jednotlivých pracovních dnů je vykazována vysoká charakteristická podobnost. Totéž zjištění je doloženo i pro charakteristiku víkendových, tj. volných, dnů. Tato zjištění vedla logicky k navržení smysluplného pracovního postupu, v jehož rámci je vytvořen agregovaný profil rozložení provozu pro pracovní dny a pro víkendové dny.

Profily rozložení objemu datového provozu za jednotlivé dny v týdnu a agregované profily rozložení provozu v pracovních dnech a ve víkendových dnech jsou výstupem této analýzy. Grafy vyhlazených relativních objemů provozu pro jednotlivé dny v týdnu a jednotlivá rozhraní jsou uvedeny v příloze B. Příklady rozložení relativních objemů datového provozu v pracovních dnech a o víkendových dnech na výstupu rozhraní 10 sítě PON jsou graficky znázorněny na obrázcích 3.3a a 3.3b.

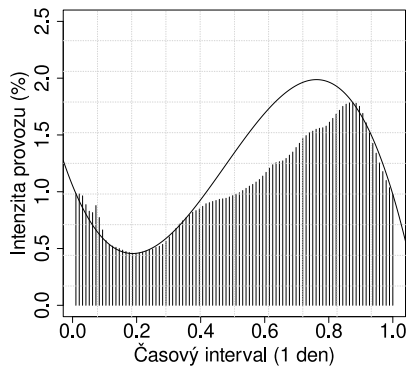


(a) Pracovní den (pondělí)

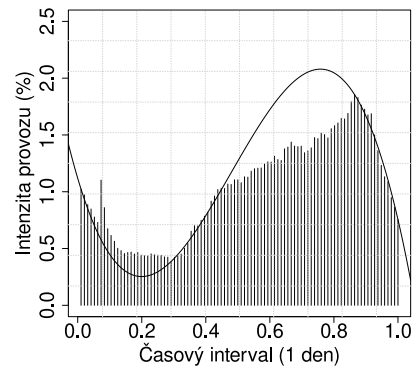


(b) Víkendový den (neděle)

Obr. 3.3: Vyhledávání bodů polynomů denního datového provozu v pracovních a ve víkendových dnech na portu 10 v PON síti pomocí numerických metod.



(a) Pracovní dny



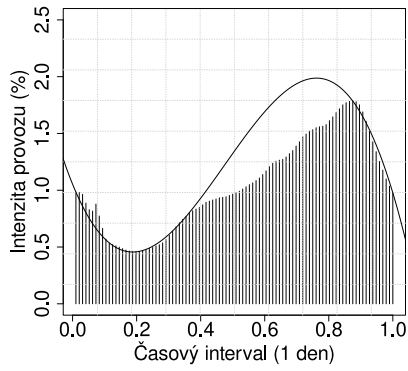
(b) Víkendové dny

Obr. 3.4: Vyhledávání bodů polynomů denního datového provozu v pracovních a ve víkendových dnech na portu 10 v PON síti pomocí numerických metod.

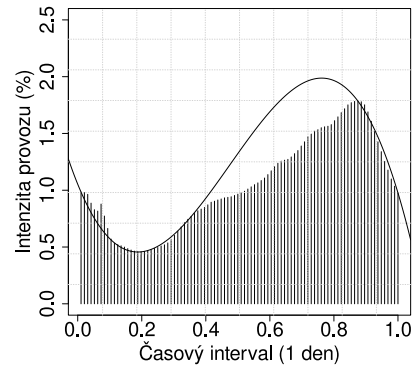
3.3 Matematický model profilu datového provozu přístupové sítě

Pro vytvoření matematického modelu profilu datového provozu byl použit softwarový statistický nástroj Projekt R [28]. Nejprve byla provedena analýza rozložení datového provozu v jednotlivých dnech týdne pro každé rozhraní, pro něž jsou k dispozici provozní statistiky. Následně byla vyhledána vhodná polynomiální funkce, jež aproximuje měřená data. Poté byla tato funkce využita pro konstrukci metrik obdobných ADPH a TCBH.

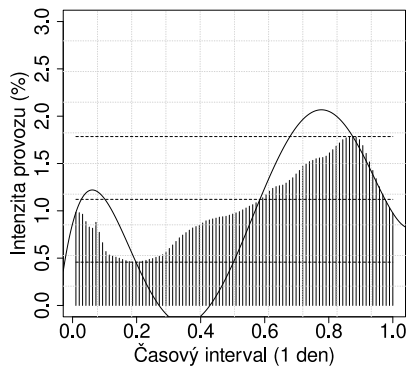
Denní doba je rozdělena na posloupnost 96 časových intervalů o délce 15 minut $T_1 = \langle 00 : 00 - 00 : 15 \rangle$, $T_2 = \langle 00 : 15 - 00 : 30 \rangle$, ..., $T_{96} = \langle 23 : 45 - 00 : 00 \rangle$. Pro numerické modelování závislosti relativního objemu datového provozu x_i na denní době je použito relativní pořadí časového intervalu T_i , jež je označeno jako $t_i = i/96$. Tímto postupem je docíleno lepší



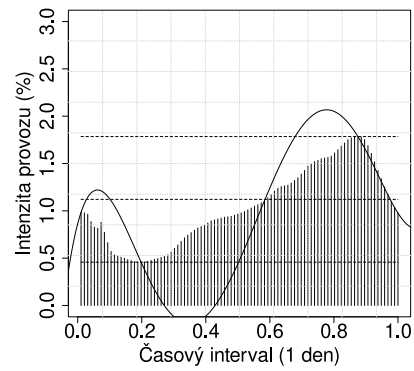
(a) P0 IN



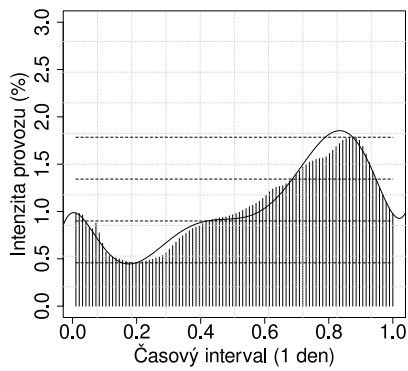
(b) P0 OUT



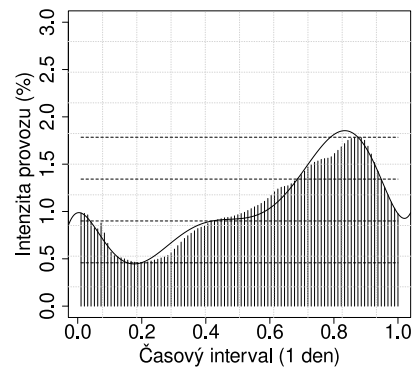
(c) P1 IN



(d) P1 OUT



(e) P2 IN



(f) P2 OUT

Obr. 3.5: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy P0, P1 a P2.

numerické stability výpočtů, neboť je operováno se srovnatelně velkými hodnotami nezávislé proměnné t_i a závislé proměnné x_i . Pokud by se v budoucnosti ukázala jako potřebná změna granularity rozdělení denní doby, a to směrem k větším či menším časovým úsekům, postup analýzy zůstane zachován.

Následující procedury jsou provedeny pro každé rozhraní a pro směr přenosu dat, k nimž

jsou k dispozici potřebné údaje. Pro každý den v týdnu a pro každý časový úsek T_i jsou vypočteny statistiky uvedené ve vztahu 3.3, 3.4 a 3.5.

Výběrová směrodatná odchylka:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum (x_i - X_i)^2} \quad (3.3)$$

Relativní odchylka:

$$r_i = \frac{s_i}{X_i} \quad (3.4)$$

Průměrný relativní objem datového provozu v intervalu T_i :

$$X_i = \frac{1}{n_i} \sum x_i \quad (3.5)$$

kde:

n_i – počet měření v intervalu i ,

x_i - relativní objem provozu v intervalu T_i .

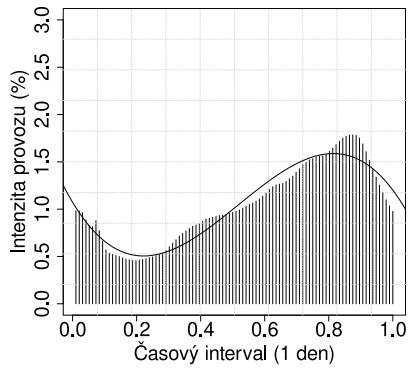
Tyto statistiky jsou uvedeny v příloze B. Při analýze objemu datového provozu nebyly zohledněny státní svátky a významné dny, zejména pak svátky připadající na první či poslední pracovní den týdne, jež jsou v práci souhrnně označovány jako prodloužený víkend. Při podrobné analýze objemu datového provozu jsou provedeny koeficienty nejmenšího možného stupně. Pro tento účel byly nalezeny koeficienty aproximačních polynomů stupně 3, 5 a 7. Pro nalezení koeficientů aproximačních polynomů byla použita metoda nejmenších čtverců v implementaci dostupné v systému R. Příslušné aproximační polynomy pro jednotlivá rozhraní jsou k dispozici v příloze B. Grafy aproximačních polynomů P_0, P_1, P_2 stupně 0, 1, resp 2 pro jsou graficky znázorněny na obrázku 3.5 pro pracovní dny.

3.3.1 Aproximace pomocí Lagrangeových polynomů

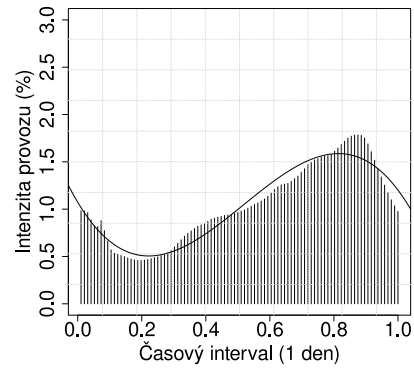
Pro aproximaci funkce pomocí Lagrangeova polynomu je třeba stanovit množinu tzv. uzlových bodů, tj. množinu dvojic (t_i, x_i) , v nichž bude hodnota Lagrangeova polynomu P_K dosahovat přesné hodnoty aproximované funkce, tedy $P_K(t_i) = x_i$. Stupeň polynomu K je v tomto případě určen počtem uzlových bodů. Jako vhodné uzlové body je použito minimum a maximum funkce $x = f(t)$ a hodnoty v krajních bodech, tj. (t_0, x_0) a (t_{96}, x_{96}) .

Pro získání přesnějších výsledků aproximace byly testovány i polynomy vyšších stupňů. Další uzlové body byly stanoveny následujícím postupem:

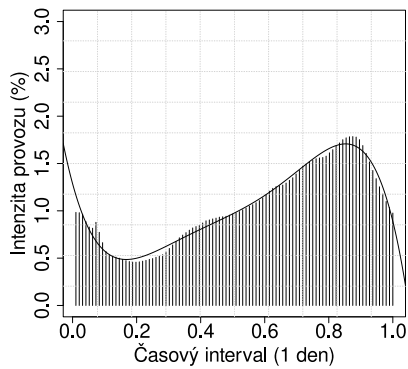
- interval $\langle x_{min}, x_{max} \rangle$ mezi nejnižším a nejvyšším relativním denním objemem provozu je rozdělen na $k > 1$ subintervalů stejné šířky, čímž jsou získány $k - 1$ hodnot



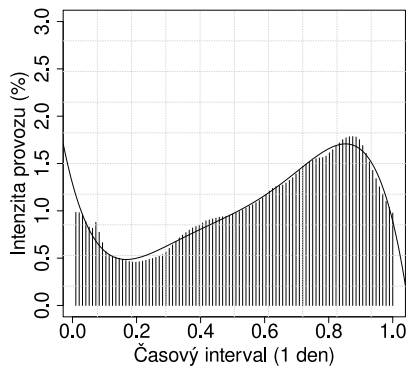
(a) PS3 IN



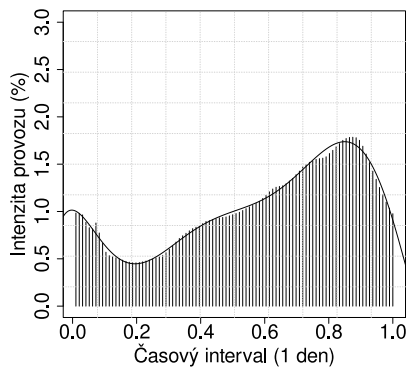
(b) PS3 OUT



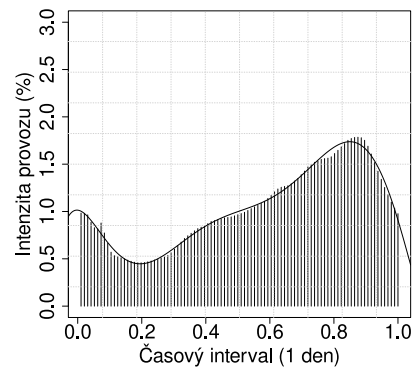
(c) PS5 IN



(d) PS5 OUT



(e) PS7 IN



(f) PS7 OUT

Obr. 3.6: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy PS3, PS5 a PS7.

$$\langle x_{i_1}, \dots, x_{i_k-1} \rangle$$

- k této množině hodnot jsou nalezeny hodnoty $\langle t_{i_1}, \dots, x_{i_k} - 1 \rangle$, v nichž proměnná $x(t_j)$ nabývá hodnot nejbližších (nemusí nastat rovnost) hodnotám $\langle x_{i_1}, \dots, x_{i_k-1} \rangle$
- množina dvojic $\langle (t_{i_1}, x(t_{i_1})), \dots, (t_{i_k} - 1, x(t_{i_k} - 1)) \rangle$ je přidána k výše popsaným čtyřem uzlovým bodům (t_1, x_1) , (t_{min}, x_{min}) , (t_{max}, x_{max}) a (t_{96}, x_{96})

Princip získání uzlových bodů je znázorněn na obrázku 3.6. Pro hodnotu $k = 2$ tak je k dispozici celkem 6 uzlových bodů, a u aproximačního polynomu je tak dosaženo stupně 5. Pro hodnotu $k = 3$ je možno mít k dispozici 8 uzlových bodů, a konstruovat tak polynom stupně 7. Pro vyšší hodnoty k už bude sestaven zpravidla polynom příliš velkého stupně, což není pro praktické použití příliš vhodné. Navíc při jemnějším dělení intervalu $\langle x_{min}, x_{max} \rangle$ se může stát, že jeden z nově získaných uzlových bodů bude zároveň krajním bodem zkoumaného časového intervalu, tj. $x_j = 1$, nebo $x_j = 96$. V takovém případě bude vykázán lichý počet uzlových bodů a algoritmus konstrukce Lagrangeova polynomu povede ke konstrukci polynomu sudého stupně, jenž se však pro aproximaci měřených dat nejeví jako příliš vhodný.

Pro vyhledávání koeficientů aproximačních polynomů byla použita implementace “poly_fit” z knihovny PolynomF [29], jež je dostupná v systému R. Příslušné aproximační polynomy pro jednotlivé rozhraní jsou k dispozici v příloze A. Grafy aproximačních polynomů PS_3, PS_5, PS_7 stupně 3, 5, resp 7 pro rozhraní 10 sítě PON jsou na obrázcích 3.6a, 3.6c a 3.6e.

Aproximační polynomy získané výše uvedenými metodami pro jednotlivé typy přístupových sítí jsou uvedeny v příloze A a B.

Tab. 3.5: Aproximační polynomy portu 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech – úplný výpis pro jednotlivé polynomy.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
10	IN	P0	$1.05341 - 6.936891 * x + 23.04396 * x^2 - 16.18384 * x^3$
10	IN	P1	$0.864216 + 12.85053 * x - 137.1014 * x^2 + 387.4848 * x^3 - 409.1918 * x^4 + 146.0703 * x^5$
10	IN	P2	$0.9865596 + 0.7285135 * x - 105.1931 * x^2 + 821.2019 * x^3 - 2576.28 * x^4 + 3952.814 * x^5 - 2935.584 * x^6 + 842.3024 * x^7$
10	IN	PS3	$1.073494 - 5.634605 * x + 16.16476 * x^2 - 10.40224 * x^3$
10	IN	PS5	$1.287236 - 12.43973 * x + 66.90853 * x^2 - 152.4127 * x^3 + 165.6619 * x^4 - 68.11659 * x^5$
10	IN	PS7	$1.014106 - 0.3758807 * x - 74.09889 * x^2 + 548.647 * x^3 - 1591.564 * x^4 + 2266.802 * x^5 - 1570.302 * x^6 + 420.7862 * x^7$
10	OUT	P0	$1.140586 - 9.462605 * x + 29.89699 * x^2 - 20.52366 * x^3$
10	OUT	P1	$0.9062292 + 15.10427 * x - 174.0036 * x^2 + 494.8966 * x^3 - 521.0669 * x^4 + 185.2147 * x^5$
10	OUT	P2	$1.101376 - 4.618199 * x - 82.53879 * x^2 + 847.4088 * x^3 - 2870.082 * x^4 + 4526.135 * x^5 - 3382.85 * x^6 + 966.4954 * x^7$
10	OUT	PS3	$0.8877295 - 5.118699 * x + 15.59818 * x^2 - 9.945105 * x^3$
10	OUT	PS5	$1.41983 - 20.35172 * x + 121.5466 * x^2 - 292.5454 * x^3 + 318.3343 * x^4 - 127.4595 * x^5$
10	OUT	PS7	$1.100219 - 6.501653 * x - 37.10758 * x^2 + 480.5081 * x^3 - 1581.149 * x^4 + 2347.539 * x^5 - 1632.806 * x^6 + 429.3556 * x^7$

Na základě výše získaných polynomů byl zvolen aproximační polynom PS7. Aproximační

polynomy PS7 aplikované pro jednotlivé typy přístupových sítí jsou uvedeny v tabulkách pro pracovní 3.6, 3.8, 3.10 a víkendové 3.7, 3.9, 3.11 dny.

Tab. 3.6: Aproximační polynomy pro přístupové sítě CATV v pracovních dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
8	IN	PS7	$1.113348 - 5.06458 * x - 27.86964 * x^2 + 338.0837 * x^3 - 1077.574 * x^4 + 1581.734 * x^5 - 1102.873 * x^6 + 293.4296 * x^7$
8	OUT	PS7	$1.116893 - 9.400472 * x - 2.427045 * x^2 + 300.8572 * x^3 - 1118.505 * x^4 + 1720.414 * x^5 - 1199.541 * x^6 + 308.4131 * x^7$
9	IN	PS7	$1.072321 - 3.644949 * x - 52.60142 * x^2 + 505.6748 * x^3 - 1615.428 * x^4 + 2446.715 * x^5 - 1774.533 * x^6 + 493.7156 * x^7$
9	OUT	PS7	$1.083611 - 9.385713 * x - 2.310776 * x^2 + 304.2147 * x^3 - 1134.872 * x^4 + 1750.449 * x^5 - 1224.222 * x^6 + 315.9441 * x^7$
12	IN	PS7	$1.144651 - 7.266616 * x - 19.78535 * x^2 + 361.4636 * x^3 - 1252.641 * x^4 + 1926.001 * x^5 - 1383.658 * x^6 + 375.6548 * x^7$
12	OUT	PS7	$1.103654 - 8.205142 * x - 14.4733 * x^2 + 352.4189 * x^3 - 1232.805 * x^4 + 1859.634 * x^5 - 1289.034 * x^6 + 332.2715 * x^7$
13	IN	PS7	$1.017888 - 4.378191 * x - 46.89687 * x^2 + 492.7583 * x^3 - 1584.811 * x^4 + 2371.425 * x^5 - 1684.839 * x^6 + 456.5994 * x^7$
13	OUT	PS7	$1.069771 - 7.876845 * x - 22.79534 * x^2 + 413.8948 * x^3 - 1422.566 * x^4 + 2146.017 * x^5 - 1498.598 * x^6 + 391.7426 * x^7$

Tab. 3.7: Aproximační polynomy pro přístupové sítě CATV ve víkendových dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
8	IN	PS7	$0.8273465 + 3.568275 * x - 114.2572 * x^2 + 692.4246 * x^3 - 1756.439 * x^4 + 2210.692 * x^5 - 1359.013 * x^6 + 323.1046 * x^7$
8	OUT	PS7	$0.7766616 + 3.098379 * x - 132.247 * x^2 + 844.7036 * x^3 - 2174.707 * x^4 + 2712.139 * x^5 - 1615.506 * x^6 + 362.5755 * x^7$
9	IN	PS7	$0.7379983 + 5.131877 * x - 126.6921 * x^2 + 740.071 * x^3 - 1856.342 * x^4 + 2330.014 * x^5 - 1434.227 * x^6 + 342.1406 * x^7$
9	OUT	PS7	$0.7573799 + 2.943126 * x - 133.6579 * x^2 + 868.2998 * x^3 - 2266.924 * x^4 + 2870.503 * x^5 - 1742.151 * x^6 + 401.0527 * x^7$
12	IN	PS7	$0.7887184 + 3.928858 * x - 127.0736 * x^2 + 772.7561 * x^3 - 1962.876 * x^4 + 2468.64 * x^5 - 1511.814 * x^6 + 356.4858 * x^7$
12	OUT	PS7	$0.7378819 + 4.334689 * x - 142.097 * x^2 + 885.2006 * x^3 - 2270.22 * x^4 + 2838.799 * x^5 - 1702.28 * x^6 + 386.3246 * x^7$
13	IN	PS7	$0.6883845 + 5.54052 * x - 140.2244 * x^2 + 848.8022 * x^3 - 2196.824 * x^4 + 2833.388 * x^5 - 1788.052 * x^6 + 437.5017 * x^7$

13	OUT	PS7	$0.7300646 + 4.513613 * x - 151.7093 * x^2 + 963.8345 * x^3 - 2525.457 * x^4 + 3237.338 * x^5 - 2002.016 * x^6 + 473.5829 * x^7$
----	-----	-----	--

Tab. 3.8: Aproximační polynomy pro přístupové sítě PON v pracovních dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
10	IN	PS7	$1.014106 - 0.3758807 * x - 74.09889 * x^2 + 548.647 * x^3 - 1591.564 * x^4 + 2266.802 * x^5 - 1570.302 * x^6 + 420.7862 * x^7$
10	OUT	PS7	$1.100219 - 6.501653 * x - 37.10758 * x^2 + 480.5081 * x^3 - 1581.149 * x^4 + 2347.539 * x^5 - 1632.806 * x^6 + 429.3556 * x^7$
14	IN	PS7	$0.9471476 - 1.439981 * x - 78.30347 * x^2 + 648.7413 * x^3 - 2000.052 * x^4 + 2961.822 * x^5 - 2101.912 * x^6 + 571.0451 * x^7$
14	OUT	PS7	$1.054223 - 5.47942 * x - 46.88419 * x^2 + 523.0007 * x^3 - 1686.196 * x^4 + 2492.799 * x^5 - 1732.748 * x^6 + 455.3357 * x^7$
16	IN	PS7	$1.04415 - 2.570664 * x - 66.71647 * x^2 + 558.831 * x^3 - 1658.307 * x^4 + 2354.377 * x^5 - 1606.847 * x^6 + 421.0594 * x^7$
16	OUT	PS7	$1.127225 - 8.847893 * x - 11.52769 * x^2 + 366.3698 * x^3 - 1327.429 * x^4 + 2051.641 * x^5 - 1459.581 * x^6 + 389.1956 * x^7$
21	IN	PS7	$1.036204 - 6.396439 * x - 11.24634 * x^2 + 275.8657 * x^3 - 963.7453 * x^4 + 1465.777 * x^5 - 1036.083 * x^6 + 275.6359 * x^7$
21	OUT	PS7	$1.057119 - 9.472574 * x + 9.004241 * x^2 + 220.7459 * x^3 - 877.9402 * x^4 + 1367.61 * x^5 - 954.427 * x^6 + 244.292 * x^7$

Tab. 3.9: Aproximační polynomy pro přístupové sítě PON ve víkendových dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
10	IN	PS7	$0.8577941 + 4.106299 * x - 105.4489 * x^2 + 581.6013 * x^3 - 1355.816 * x^4 + 1549.436 * x^5 - 838.2221 * x^6 + 164.3583 * x^7$
10	OUT	PS7	$0.7411976 + 5.722373 * x - 156.9102 * x^2 + 945.2845 * x^3 - 2394.597 * x^4 + 2988.136 * x^5 - 1805.858 * x^6 + 418.3403 * x^7$
14	IN	PS7	$0.7573593 + 3.590537 * x - 115.2158 * x^2 + 724.1291 * x^3 - 1908.362 * x^4 + 2493.531 * x^5 - 1588.048 * x^6 + 390.4366 * x^7$
14	OUT	PS7	$0.741224 + 5.132566 * x - 149.4975 * x^2 + 917.4032 * x^3 - 2350.696 * x^4 + 2951.012 * x^5 - 1782.18 * x^6 + 408.8938 * x^7$
16	IN	PS7	$0.7617677 + 6.097584 * x - 153.2053 * x^2 + 904.7766 * x^3 - 2287.038 * x^4 + 2877.221 * x^5 - 1766.935 * x^6 + 419.1226 * x^7$
16	OUT	PS7	$0.7794732 + 4.429634 * x - 151.1244 * x^2 + 960.5634 * x^3 - 2521.026 * x^4 + 3242.645 * x^5 - 2017.881 * x^6 + 482.4723 * x^7$

21	IN	PS7	$0.7171541 + 3.829314 * x - 105.0249 * x^2 + 618.933 * x^3 - 1524.754 * x^4 + 1855.656 * x^5 - 1096.357 * x^6 + 247.8159 * x^7$
21	OUT	PS7	$0.735891 + 2.495166 * x - 117.8136 * x^2 + 770.9356 * x^3 - 2015.483 * x^4 + 2558.7 * x^5 - 1563.388 * x^6 + 364.6253 * x^7$

Tab. 3.10: Aproximační polynomy pro rádiové přístupové sítě v pracovních dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
17	IN	PS7	$0.7821026 - 6.866706 * x - 22.22463 * x^2 + 491.0475 * x^3 - 1858.189 * x^4 + 3010.603 * x^5 - 2238.299 * x^6 + 623.767 * x^7$
17	OUT	PS7	$0.6529055 - 3.622501 * x - 68.23173 * x^2 + 728.4029 * x^3 - 2432.251 * x^4 + 3732.814 * x^5 - 2697.607 * x^6 + 740.2753 * x^7$
18	IN	PS7	$0.6996917 + 10.20528 * x - 183.5401 * x^2 + 1041.646 * x^3 - 2616.056 * x^4 + 3280.248 * x^5 - 2010.844 * x^6 + 478.2251 * x^7$
18	OUT	PS7	$0.8829705 - 4.057637 * x - 48.30004 * x^2 + 531.2859 * x^3 - 1734.933 * x^4 + 2585.354 * x^5 - 1805.201 * x^6 + 475.6086 * x^7$

Tab. 3.11: Aproximační polynomy pro rádiové přístupové sítě ve víkendových dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
17	IN	PS7	$0.2021877 + 16.43612 * x - 289.3339 * x^2 + 1778.943 * x^3 - 4924.64 * x^4 + 6847.883 * x^5 - 4672.018 * x^6 + 1242.951 * x^7$
17	OUT	PS7	$0.4267667 + 5.405585 * x - 173.0497 * x^2 + 1211.433 * x^3 - 3437.352 * x^4 + 4718.691 * x^5 - 3113.386 * x^6 + 788.196 * x^7$
18	IN	PS7	$0.5330739 + 7.592589 * x - 122.8327 * x^2 + 636.9947 * x^3 - 1415.478 * x^4 + 1483.917 * x^5 - 674.3207 * x^6 + 84.09506 * x^7$
18	OUT	PS7	$0.5188911 + 12.18892 * x - 277.193 * x^2 + 1801.502 * x^3 - 5122.769 * x^4 + 7292.195 * x^5 - 5105.66 * x^6 + 1400.101 * x^7$

3.3.2 Analýza kvality aproximace

Pro všechny aproximační polynomy zkonstruované v kapitolách 3.3 a 3.3.1 je proveden výpočet RMSE. Relativní RMSE v případě této práce nedává smysl. Je pracováno s relativním objemem provozu za daný časový interval vztažený k souhrnu provozu za jeden den. Hodnota Relative RMSE by tak byla pouze hodnota RMSE násobená koeficientem $1/96$.

Tab. 3.12: Analýza aproximačních polynomů portu 10 v přístupové síti PON – výpis polynomů.

Port	Pracovní dny	Víkendové dny
------	--------------	---------------

10	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
	Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.
P0	3	0.2884222	3	0.3709621	3	0.2448502	3	0.2205395
P1	5	0.4903669	5	0.7751031	5	0.2314143	5	0.3624534
P2	7	0.07712971	7	0.1095871	7	0.1217024	7	0.2153574
PS3	3	0.1017292	3	0.1636596	3	0.1166743	3	0.1638027
PS5	5	0.0530982	5	0.05803223	5	0.1013019	5	0.1121555
PS7	7	0.03506391	7	0.03424031	7	0.06288095	7	0.04580523

V rámci zpracování byl vybrán pro další výpočty polynom sedmého stupně, proces jeho výběru je vypsán v následujících tabulkách pro jednotlivé přístupové technologie pro CATV 3.13, síť PON 3.17 a pro síť radiové 3.21.

Tab. 3.13: Analýza aproximačních polynomů pro přístupové síť CATV.

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.02699115	7	0.03672566	7	0.03587698	7	0.04556715

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.03242594	7	0.03953598	7	0.04134039	7	0.04560206

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.03629899	7	0.0393064	7	0.05010552	7	0.04711789

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.03765775	7	0.04204083	7	0.05010552	7	0.04776549

Tab. 3.17: Analýza aproximačních polynomů pro přístupové síť PON.

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
------	--------------	--	--	--	---------------	--	--	--

10	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.03506391	7	0.03424031	7	0.06288095	7	0.04580523

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
14	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.04016152	7	0.04122978	7	0.04496753	7	0.04990303

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
16	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.04082469	7	0.03793646	7	0.04876052	7	0.04114731

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
21	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.03583431	7	0.03665383	7	0.0392055	7	0.03921834

Tab. 3.21: Analýza aproximačních polynomů pro rádiové přístupové sítě.

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
17	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.08771386	7	0.1004237	7	0.1280988	7	0.1211532

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
18	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.0966361	7	0.1213562	7	0.1080277	7	0.09086603

Při výběru nejvhodnějšího aproximačního polynomu jsou zohledňovány dva parametry: minimální hodnota RMSE a stupeň polynomu. Jako nejvhodnější model aproximace se jeví polynom PS_7 .

Rozložení relativního objemu provozu pro jednotlivé přístupové sítě je velmi podobné, a to jak u sítí typu CATV, PON, rádiové spoje, tak i pro všechny přístupové sítě obecně. Nabízí se proto otázka, zda je možné najít aproximační polynom, který poskytne dostatečně dobrý

matematický model pro všechny přístupové sítě. Proto byl zkonstruován polynom PS_7 odpovídající průměrnému modelu sítí CATV, PON a rádiových přístupových sítí. Tyto polynomy jsou označeny po řadě PS_{CATV} , PS_{PON} a PS_{Radio} . Polynomy PS_{CATV} , PS_{PON} a PS_{Radio} jsou uvedeny v tabulce 3.23. Hodnoty RMSE těchto polynomů a rozdíl hodnot RMSE těchto polynomů a polynomů konstruovaných „na míru“ jednotlivým přístupovým sítím je v tabulkách 3.24, 3.25 a 3.26.

Tab. 3.23: Aproximační polynomy společné pro danou přenosovou technologii.

Tech.	Směr	Den	Polynom
CATV	IN	PD	$1.087052 - 5.088584 * x - 36.78832 * x^2 + 424.4951 * x^3 - 1382.614 * x^4 + 2081.469 * x^5 - 1486.476 * x^6 + 404.8498 * x^7$
CATV	OUT	PD	$1.093482 - 8.717043 * x - 10.50162 * x^2 + 342.8464 * x^3 - 1227.187 * x^4 + 1869.129 * x^5 - 1302.849 * x^6 + 337.0928 * x^7$
PON	IN	PD	$0.9902029 - 2.720126 * x - 59.03705 * x^2 + 528.2702 * x^3 - 1637.528 * x^4 + 2417.848 * x^5 - 1712.045 * x^6 + 465.0818 * x^7$
PON	OUT	PD	$1.081054 - 8.144749 * x - 14.08134 * x^2 + 356.8413 * x^3 - 1257.427 * x^4 + 1907.994 * x^5 - 1334.077 * x^6 + 348.7112 * x^7$
Radio	IN	PD	$0.7408972 + 1.669286 * x - 102.8824 * x^2 + 766.3468 * x^3 - 2237.122 * x^4 + 3145.426 * x^5 - 2124.572 * x^6 + 550.996 * x^7$
Radio	OUT	PD	$0.767938 - 3.840069 * x - 58.26589 * x^2 + 629.8444 * x^3 - 2083.592 * x^4 + 3159.084 * x^5 - 2251.404 * x^6 + 607.942 * x^7$
CATV	IN	VD	$0.7606119 + 4.542383 * x - 127.0618 * x^2 + 763.5135 * x^3 - 1943.12 * x^4 + 2460.684 * x^5 - 1523.276 * x^6 + 364.8082 * x^7$
CATV	OUT	VD	$0.750497 + 3.722452 * x - 139.9278 * x^2 + 890.5096 * x^3 - 2309.327 * x^4 + 2914.695 * x^5 - 1765.488 * x^6 + 405.8839 * x^7$
PON	IN	VD	$0.7397714 + 4.713253 * x - 122.8278 * x^2 + 726.1943 * x^3 - 1828.823 * x^4 + 2296.033 * x^5 - 1409.627 * x^6 + 334.4135 * x^7$
PON	OUT	VD	$0.7530034 + 3.610802 * x - 132.906 * x^2 + 839.4811 * x^3 - 2160.421 * x^4 + 2708.593 * x^5 - 1632.527 * x^6 + 374.2405 * x^7$
Radio	IN	VD	$0.3676308 + 12.01435 * x - 206.0833 * x^2 + 1207.969 * x^3 - 3170.059 * x^4 + 4165.9 * x^5 - 2673.169 * x^6 + 663.523 * x^7$
Radio	OUT	VD	$0.4728289 + 8.797252 * x - 225.1213 * x^2 + 1506.468 * x^3 - 4280.06 * x^4 + 6005.443 * x^5 - 4109.523 * x^6 + 1094.148 * x^7$

Tab. 3.24: Analýza aproximačních polynomů společných pro sítě CATV.

Port	Směr	Den	RMSE pol. PS_7	RMSE pol. PS_{CATV}	Rozdíl
8	IN	PD	0.02365253	0.06416256	-0.04051003
8	OUT	PD	0.03672566	0.03825943	-0.001533767

9	IN	PD	0.03242594	0.04380017	-0.01137423
9	OUT	PD	0.03953598	0.04180535	-0.002269365
12	IN	PD	0.03629899	0.04870736	-0.01240837
12	OUT	PD	0.0393064	0.04268738	-0.003380986
13	IN	PD	0.03765775	0.04809799	-0.01044023
13	OUT	PD	0.04204083	0.04355663	-0.001515802
8	IN	VD	0.03587698	0.05122772	-0.01535074
8	OUT	VD	0.04556715	0.04623199	-0.000664839
9	IN	VD	0.04134039	0.04519217	-0.003851777
9	OUT	VD	0.04560206	0.04783597	-0.00223391
12	IN	VD	0.05010552	0.05822611	-0.008120595
12	OUT	VD	0.04711789	0.04887765	-0.001759754
13	IN	VD	0.04218069	0.04877482	-0.006594132
13	OUT	VD	0.04776549	0.04857573	-0.0008102436

Tab. 3.25: Analýza aproximačních polynomů společných pro sítě PON.

Port	Směr	Den	RMSE pol. PS7	RMSE pol. PS_{CATV}	Rozdíl
10	IN	PD	0.03506391	0.07994501	-0.04488111
10	OUT	PD	0.03424031	0.04919299	-0.01495268
14	IN	PD	0.04016152	0.08917547	-0.04901396
14	OUT	PD	0.04122978	0.05570161	-0.01447184
16	IN	PD	0.04082469	0.05263545	-0.01181076
16	OUT	PD	0.03793646	0.04195421	-0.004017745
21	IN	PD	0.03583431	0.05243045	-0.01659614
21	OUT	PD	0.03665383	0.04464372	-0.007989895
10	IN	VD	0.04569906	0.09193534	-0.04623629
10	OUT	VD	0.04580523	0.0497194	-0.003914162
14	IN	VD	0.04496753	0.06162242	-0.01665489
14	OUT	VD	0.04990303	0.06340798	-0.01350495
16	IN	VD	0.04876052	0.0588365	-0.01007597
16	OUT	VD	0.04114731	0.04807313	-0.00692582
21	IN	VD	0.0392055	0.05249203	-0.01328653
21	OUT	VD	0.03921834	0.04660302	-0.007384675

Tab. 3.26: Analýza aproximačních polynomů společných pro rádiové přístupové sítě.

Port	Směr	Den	RMSE pol. PS7	RMSE pol. PS_{CATV}	Rozdíl
17	IN	PD	0.08771386	0.224563	-0.1368492

17	OUT	PD	0.1004237	0.1241457	-0.02372195
18	IN	PD	0.0966361	0.2308013	-0.1341652
18	OUT	PD	0.1213562	0.144218	-0.02286182
17	IN	VD	0.1280988	0.1569831	-0.02888421
17	OUT	VD	0.1211532	0.1372826	-0.01612938
18	IN	VD	0.1080277	0.1410755	-0.03304773
18	OUT	VD	0.09086603	0.1114955	-0.02062944

4 Konstrukce metrik v přístupové síti

Pro popis rozložení intenzity provozu v průběhu dne je vhodné použít model obdobný výpočtu ADPH a TCBH po vzoru doporučení *ITU-T E.500* [22], tj. je zapotřebí nalézt interval o délce 60 minut, v němž je přenesen procentuálně největší objem dat za daný den. Tento interval je konstruován tak, že jeho začátek a konec je stanoven v konkrétním časovém intervalu, jenž je určen násobkem 15 minut. Interval je definován jednak způsobem zpracování měřených dat, především je však tento model přizpůsoben očekávání jedince uvažujícího v intencích tohoto časového měřítka.

U přístupových sítí s běžným rozložením provozu, u nichž nedochází k saturaci, je výpočet tohoto časového intervalu přímočarý: vychází se z intervalu s největším podílem na denním provozu a jsou přidávány sousední 3 intervaly, a to s druhým, třetím a čtvrtým nejvyšším podílem na celkovém objemu denního provozu přenesených dat.

V případě, že dojde k saturaci dané přístupové sítě, může nastat stav, kdy více než 4 sousední 15minutové intervaly mají shodný a přitom i maximální podíl na denním objemu přenesených dat. V takovém případě označení **hlavní provozní hodina** odpovídá časovému intervalu 60 minut, v němž je realizován největší objem přenesených dat denního provozu.

Další možnou ekvivalentní variantou pro popis rozložení intenzity provozu v průběhu dne je použití dvouhodinových intervalů s maximálním provozem. Tato varianta pro účely popisu rozložení intenzity provozu v průběhu dne je inspirována metodikou měření definovanou v doporučení *ITU-T Y.1564* [4]. Pro hodinový interval s největším objemem provozu bude užito označení **ADPH60** a analogicky pro dvouhodinový interval s největším objemem přenesených dat v provozu – označení **ADPH120**.

U datových sítí je významným parametrem objem dat přenesených v době provozní špičky neboli v hlavní provozní hodině, respektive jeho podíl na celkovém objemu dat přenesených za měřený den. Pro jednotlivé technologie jsou všechny tyto údaje shrnuty v tabulkách pro pracovní dny 4.1, 4.3 a pro víkendové dny 4.2, 4.4.

Tab. 4.1: Časový interval s největším datovým provozem v sítích CATV v pracovních dnech.

		Pracovní dny			
		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Port 8	MAX	21 : 15 – 21 : 30	1.78459	21 : 30 – 21 : 45	2.19245
	ADPH-60	19 : 45 – 21 : 30	7.11387	22 : 00 – 23 : 00	8.72481
	ADPH-120	20 : 30 – 22 : 30	14.08114	20 : 45 – 22 : 45	17.22492
Port 9	MAX	20 : 45 – 21 : 00	1.97156	21 : 30 – 21 : 45	2.21109
	ADPH-60	20 : 45 – 21 : 45	7.81337	21 : 15 – 22 : 15	8.78251
	ADPH-120	20 : 15 – 22 : 15	15.32517	20 : 45 – 22 : 45	17.32924
Port 12	MAX	21 : 15 – 21 : 30	2.09467	21 : 30 – 21 : 45	2.17381
	ADPH-60	21 : 00 – 22 : 00	8.0147	21 : 15 – 22 : 15	8.63814

	ADPH-120	20 : 30 – 22 : 30	15.71085	20 : 45 – 22 : 45	16.99938
Port 13	MAX	20 : 00 – 21 : 15	1.99028	21 : 30 – 21 : 45	1.84161
	ADPH-60	20 : 45 – 21 : 45	7.90335	21 : 30 – 23 : 30	7.33893
	ADPH-120	20 : 30 – 22 : 30	15.56501	20 : 45 – 22 : 45	14.44498

Tab. 4.2: Časový interval s největším datovým provozem v sítích CATV ve víkendových dnech.

		Víkendové dny			
		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Port 8	MAX	20 : 45 – 21 : 00	1.64446	21 : 45 – 22 : 00	1.84125
	ADPH-60	21 : 15 – 22 : 15	6.53802	21 : 30 – 22 : 30	7.3234
	ADPH-120	20 : 15 – 22 : 15	12.95035	21 : 00 – 23 : 00	14.43913
Port 9	MAX	21 : 00 – 21 : 15	1.74554	21 : 30 – 21 : 45	1.84875
	ADPH-60	20 : 45 – 21 : 45	6.88036	21 : 15 – 22 : 15	7.35268
	ADPH-120	21 : 15 – 23 : 15	13.51805	20 : 45 – 22 : 45	14.53
Port 12	MAX	20 : 30 – 20 : 45	1.77161	21 : 45 – 22 : 00	1.83375
	ADPH-60	20 : 30 – 21 : 30	7.05822	21 : 30 – 22 : 30	7.29749
	ADPH-120	20 : 30 – 22 : 30	13.96214	21 : 00 – 23 : 00	14.42911
Port 13	MAX	21 : 00 – 21 : 15	1.73733	21 : 45 – 22 : 00	2.19812
	ADPH-60	20 : 45 – 21 : 45	6.92573	21 : 15 – 22 : 15	8.74776
	ADPH-120	20 : 15 – 22 : 15	13.68019	20 : 45 – 22 : 45	17.22781

Tab. 4.3: Časový interval s největším datovým provozem v sítích PON v pracovních dnech.

		Pracovní dny			
		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Port 10	MAX	21 : 15 – 21 : 30	1.79053	21 : 15 – 21 : 30	2.00631
	ADPH-60	21 : 15 – 22 : 15	7.0425	21 : 15 – 22 : 15	8.01366
	ADPH-120	21 : 00 – 22 : 00	13.76697	20 : 45 – 22 : 45	15.8226
Port 14	MAX	21 : 15 – 21 : 30	2.12361	21 : 30 – 21 : 45	1.84875
	ADPH-60	21 : 15 – 22 : 15	8.40489	21 : 15 – 22 : 15	7.35268
	ADPH-120	20 : 30 – 22 : 30	16.49592	20 : 45 – 22 : 45	14.53
Port 16	MAX	21 : 00 – 21 : 15	1.96759	21 : 15 – 21 : 30	2.04812
	ADPH-60	21 : 00 – 22 : 00	7.73428	21 : 00 – 22 : 00	8.15838
	ADPH-120	20 : 45 – 22 : 45	14.9427	20 : 45 – 22 : 45	16.09967
Port 21	MAX	21 : 15 – 21 : 30	1.86817	21 : 30 – 21 : 45	2.04985
	ADPH-60	21 : 00 – 22 : 00	7.3982	21 : 30 – 23 : 30	8.12588
	ADPH-120	20 : 30 – 22 : 30	14.61808	20 : 45 – 22 : 45	16.00098

Tab. 4.4: Časový interval s největším datovým provozem v sítích PON ve víkendových dnech.

		Víkendové dny			
		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Port 10	MAX	21 : 45 – 22 : 00	1.79118	21 : 45 – 22 : 00	1.73697
	ADPH-60	21 : 30 – 22 : 30	7.14828	21 : 15 – 22 : 15	6.89484
	ADPH-120	20 : 45 – 22 : 45	14.10584	20 : 45 – 22 : 45	13.61777
Port 14	MAX	21 : 00 – 21 : 15	1.84375	21 : 30 – 21 : 45	1.82232
	ADPH-60	21 : 00 – 22 : 00	7.235	21 : 30 – 22 : 30	7.2741
	ADPH-120	20 : 15 – 22 : 15	14.10142	21 : 00 – 22 : 00	14.37535
Port 16	MAX	21 : 00 – 21 : 15	1.79893	21 : 30 – 21 : 45	1.7625
	ADPH-60	21 : 00 – 22 : 00	7.0484	21 : 15 – 22 : 15	7.01751
	ADPH-120	20 : 30 – 22 : 30	13.65964	20 : 45 – 22 : 45	13.84752
Port 21	MAX	20 : 45 – 21 : 00	1.66196	21 : 30 – 21 : 45	1.72518
	ADPH-60	20 : 15 – 21 : 15	6.55822	21 : 15 – 22 : 15	6.81768
	ADPH-120	20 : 00 – 22 : 00	13.68019	20 : 45 – 22 : 45	13.47803

Relativní objem provozu přenesených dat v časovém intervalu ADPH60 a ADPH120 je promítán do jiné definice metrik odpovídajících hlavní provozní hodině. Zároveň lze konstatovat, že tyto metriky jsou založeny na relativním objemu intenzity provozu přenesených dat.

V tabulce 4.1 je doloženo, že za dobu 60 minut s největším provozem je přeneseno téměř 10 % denního objemu dat. Je to patrné zejména v případě tzv. downlinku. To vede k definici doby provozní špičky neboli hlavní provozní hodiny jako nejkratšího časového intervalu, v němž je přeneseno 10 % denního objemu dat. Tento interval je označen jako **HT10**. Podobně lze definovat dobu konstantně vysoké intenzity provozu jako nejkratší interval, v němž je přeneseno 25 % denního objemu dat. Tyto intervaly je možno označit jako **HT25**.

Obdobně lze provést definici doby **provozního sedla** jako nejdelšího časového intervalu, v němž není přeneseno více než 5 %, případně 10 % denního objemu dat. Pro účely této práce jsou tyto intervaly intenzity datového provozu označeny jako **LT5** a **LT10**.

4.1 Využití matematického modelu intenzity datového provozu

Navržené metriky HT10, HT25, LT5 a LT10 vycházejí z pozorování vlastností rozložení intenzity datového provozu v průběhu dne a bude zapotřebí je podrobit širší diskusi v rámci odborné veřejnosti – ISP operátorů a regulátorů.

Prostřednictvím stanovených metrik ADPH60 a ADPH120 je v rámci intenzity provozu zjišťován časový interval předem dané délky, v němž je intenzita datového provozu maximální. Pro časový interval, v němž je přenesen daný objem dat (např. 10 % denního objemu dat), není předem známa jeho délka, tudíž konstruování metrik H10, H25 apod. stejným způsobem

jako metrik ADPH60 a ADPH120, by proto bylo neefektivní. Naopak je zde možno využít aproximační polynomy, jimiž je rozložení intenzity datového provozu modelováno.

Jako nejhodnější model rozdělení datového provozu se ukázaly polynomy sedmého stupně nalezené metodou nejmenších čtverců, jež jsou výše označeny jako PS7. Tyto polynomy je možno pro zjednodušení zápisu vyjádřit pomocí vztahu $P(x) = \sum_{i=0}^7 a_i x^i$.

Poněvadž je pracováno s relativním objemem provozu, je celkový objem provozu za jeden den roven 1. V případě aproximačního polynomu PS7 tedy platí přibližná rovnost 4.1.

$$\int_0^1 P(x) dx \approx 1 \quad (4.1)$$

Pro zjednodušení zápisu bude dále místo symbolu \approx používán symbol $=$. Časový interval $\langle t_1, t_2 \rangle$, v němž se přeneso $V_{10} = 10$ % objemu provozu, je hledán pomocí vztahu 4.2. Obdobně lze postupovat při výpočtu jiných hodnot relativního objemu dat $V_{25} = 25$ %, $V_{50} = 50$ %.

$$\int_{t_1}^{t_2} P(x) dx = 0,1 \quad (4.2)$$

Tento interval je minimální, pokud $T_{max} \in \langle t_1, t_2 \rangle$, kde T_{max} je časový interval, v němž se přeneso největší relativní objem dat. Pro relativní objem intenzity provozu $V_r = r$ je možno interval $\langle t_1, t_2 \rangle$ najít pomocí vztahů 4.3.

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} P(x) dx &= r \\ P(t_1) &= P(t_2) \\ T_{max} &\in \langle t_1, t_2 \rangle \end{aligned} \quad (4.3)$$

Pro menší hodnoty relativního objemu intenzity přenesených dat V_r lze vztahy 4.3 pro výpočet nejkratšího časového intervalu, v němž se přeneso r % objemu dat s dostatečnou přesností, nahradit vztahem 4.4, který je vhodnější pro praktický výpočet.

$$\int_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} P(x) dx = r \quad (4.4)$$

Podobným způsobem lze nalézt maximální časový interval $\langle T_1, T_2 \rangle$, v němž se přeneso

r % objemu dat pomocí vztahu 4.5, kde T_{min} je časový interval, ve kterém je přenesen největší relativní objem dat.

$$\int_{T_{min}-t}^{T_{min}+t} P(x)dx = r \quad (4.5)$$

Pro výpočet hodnoty t , z níž jsou následně určeny hodnoty t_1 a t_2 , jsou použity známé vztahy 4.6.

$$\begin{aligned} \int_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} P(x)dx &= \int_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} \sum_{i=0}^7 a_i x^i dx \\ &= \left[\sum_{i=0}^7 \frac{a_i}{i+1} x^{i+1} \right]_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} \\ &= \sum_{i=0}^7 \frac{a_i}{i+1} \left[(T_{max}+t)^{i+1} - (T_{max}-t)^{i+1} \right] \end{aligned} \quad (4.6)$$

Hodnota t je pak získána řešením rovnice 4.7. Rovnice 4.7 obecně nemá analytické řešení a je třeba ji řešit numerickými metodami.

$$\sum_{i=0}^7 \frac{a_i}{i+1} \left[(T_{max}+t)^{i+1} - (T_{max}-t)^{i+1} \right] = r \quad (4.7)$$

Pro řešení rovnice 4.7 byla použita procedura `polyroot()` nástroje Projekt R. Hledanou hodnotou t je nejmenší kladný reálný kořen získaný touto procedurou.

Získaná hodnota se samozřejmě většinou nenalézá na hranici čtvrt hodinových intervalů, jež byly použity pro agregaci naměřených dat. Z tohoto důvodu je zapotřebí provést zaokrouhlení hodnot získaných výpočtem. Zaokrouhlování je prováděno tak, že dolní konec intervalů HTxx je zaokrouhlován směrem dolů, horní konec naopak směrem nahoru. Tímto způsobem je zajištěno, že nalezený interval obsahuje vždy nejméně xx % objemu dat přenesených v daný den.

Obdobně u intervalů LTxx je zaokrouhlován dolní konec intervalu směrem nahoru a horní konec tohoto intervalu směrem dolů. Tím je zajištěno, že interval LTxx je nejdelší časový interval, během něhož se nepřenese více než xx % denního objemu provozu.

Stanovení intervalů HTxx i LTxx je smysluplné pouze pro adekvátně malé hodnoty xx . V případě HTxx si zaslouží pozornost hodnota tzv. širší provozní špičky, tj. nejkratší časový interval, do něhož je koncentrováno minimálně 10 %, resp. 25 %, denního objemu provozu.

Tento interval může sloužit pro výpočet parametrů agregační křivky a vyhodnocení dodržování podmínek stanovených regulačním orgánem dle *směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1972* [14].

Intervaly HTxx odpovídají tradičním metrikám typu ADPH a TCBH používaným v hlasových sítích a je jimi vyjádřena doba provozní špičky neboli hlavní provozní hodina. Zde je zajímavý interval tzv. širšího maxima neboli nejkratší interval, v němž je přeneseno 0 % – 25 % denního objemu provozu.

Intervaly LTxx je popisována doba **provozního sedla**, tj. doba vhodná pro servisní práce na přístupové síti a pro údržbu agregační vrstvy. Délkou tohoto intervalu je vyjadřována doba, jež je k dispozici za situace, kdy je možno ztratit ne více než xx % denního objemu provozu, přičemž v tomto případě jako hodnoty xx dávají smysl nejvýše do hodnoty přibližně 10 %.

Intervaly HT10, HT25, LT10 a LT05 pro stanovení intenzity různých typů přístupových sítí jsou shrnuty v tabulkách 4.5 – 4.9.

Tab. 4.5: Časový interval dle HT a LT v sítích PON v pracovních a ve víkendových dnech.

Pracovní dny						
PON	Uplink (IN)			Downlink (OUT)		
Ozn.	Interval	Model	Měřená hodnota	Interval	Model	Měřená hodnota
HT10	19 : 15 – 21 : 00	13.43	15.03	19 : 45 – 21 : 15	12.33	14.19
HT25	18 : 15 – 22 : 00	27.96	28.70	19 : 00 – 22 : 15	26.01	27.11
LT10	1 : 30 – 6 : 30	9.03	9.28	00 : 45 – 6 : 45	9.31	9.40
LT05	2 : 30 – 5 : 30	4.77	5.21	1 : 45 – 5 : 45	4.94	5.22

Víkendové dny						
PON	Uplink (IN)			Downlink (OUT)		
Ozn.	Interval	Model	Měřená hodnota	Interval	Model	Měřená hodnota
HT10	19 : 30 – 21 : 15	11.94	13.41	20 : 00 – 21 : 45	12.26	13.70
HT25	18 : 15 – 22 : 15	26.62	27.27	19 : 00 – 22 : 45	25.40	25.95
LT10	1 : 45 – 7 : 15	9.30	9.55	1 : 00 – 7 : 30	9.67	9.72
LT05	3 : 00 – 6 : 15	4.60	5.22	2 : 15 – 6 : 15	4.81	4.24

Tab. 4.7: Časový interval dle HT a LT v sítích CATV v pracovních a ve víkendových dnech.

Pracovní dny						
CATV	Uplink (IN)			Downlink (OUT)		
Ozn.	Interval	Model	Měřená hodnota	Interval	Model	Měřená hodnota

HT10	19 : 30 – 21 : 00	11.57	13.27	20 : 00 – 21 : 15	10.91	12.94
HT25	18 : 30 – 22 : 00	26.32	27.21	19 : 00 – 22 : 15	27.53	28.70
LT10	1 : 30 – 6 : 45	9.53	9.83	0 : 45 – 7 : 00	9.13	9.28
LT05	2 : 30 – 5 : 30	4.73	5.27	1 : 45 – 5 : 45	4.46	4.75

Víkendové dny						
CATV	Uplink (IN)			Downlink (OUT)		
Ozn.	Interval	Model	Měřená hodnota	Interval	Model	Měřená hodnota
HT10	19 : 30 – 21 : 15	12.01	13.46	20 : 15 – 21 : 45	11.05	12.61
HT25	18 : 30 – 22 : 30	26.64	27.23	19 : 00 – 22 : 45	26.56	27.15
LT10	1 : 45 – 7 : 15	8.94	9.23	1 : 00 – 7 : 30	9.03	8.96
LT05	2 : 45 – 6 : 15	4.77	5.45	2 : 00 – 6 : 30	4.56	5.05

Tab. 4.9: Časový interval dle HT a LT v rádiových přístupových sítích v pracovních a ve víkendových dnech.

Pracovní dny						
RAD.	Uplink (IN)			Downlink (OUT)		
Ozn.	Interval	Model	Měřená hodnota	Interval	Model	Měřená hodnota
HT10	19 : 30 – 21 : 15	12.05	13.78	19 : 30 – 21 : 00	12.65	14.97
HT25	18 : 15 – 22 : 15	26.51	27.18	18 : 45 – 22 : 00	26.54	28.12
LT10	1 : 00 – 6 : 00	9.22	9.41	0 : 00 – 6 : 30	9.49	9.74
LT05	2 : 15 – 5 : 00	4.29	4.82	1 : 15 – 5 : 30	4.45	4.87

Víkendové dny						
RAD.	Uplink (IN)			Downlink (OUT)		
Ozn.	Interval	Model	Měřená hodnota	Interval	Model	Měřená hodnota
HT10	19 : 45 – 21 : 15	10.55	11.99	19 : 15 – 21 : 00	12.58	14.30
HT25	18 : 15 – 22 : 30	26.77	27.83	18 : 15 – 22 : 00	26.01	26.84
LT10	1 : 15 – 6 : 45	9.05	9.43	0 : 30 – 7 : 15	9.04	8.85
LT05	2 : 15 – 5 : 45	4.75	5.64	1 : 00 – 6 : 15	4.67	4.85

Z tabulek 4.5 – 4.9 je patrné, že intervaly HTxx a LTxx pro uplink a downlink se mírně liší. Tato drobná nekonzistence získaných hodnot je dána charakterem zkoumaného datového provozu, kdy uživatelé, využívající datové připojení převážně pro osobní potřebu, jsou spíše

konzumenti než producenti dat. V grafech je patrn strmější charakter rozložení intenzity provozu kolem denního maxima u tohoto směru přenosu. V případě ploššího profilu provozu ve směru uplink proto může docházet k posunu maxima provozu vůči směru downlink, jenž je způsoben drobnými fluktuacemi provozu a ve skutečnosti se hodnota maxima (resp. minima) od sousedních intervalů liší jen nepatrně.

U sítí s převládajícími zdroji dat by naopak bylo zapotřebí použít statistiky pro směr uplink. Alternativně by bylo možné uvažovat o kombinaci obou směrů, např. o sjednocení intervalů HTxx pro uplink a downlink. V případě analyzované sítě by to však nepřineslo očekávaný úžitek – došlo by totiž k rozšíření intervalu HT10, resp. HT25, přičemž pro směr uplink by objem provozu v tomto intervalu překračoval 10 %, resp. 25 % jen mírně, zatímco ve směru downlink by objem intenzity provozu byl překročen poměrně výrazně.

5 Shrnutí výsledků disertační práce

Po teoretickém vhledu v teoretické části disertační práce do stavu poznání v oblasti přístupové síti, služeb streamování video obsahu v přístupové síti a po provedení základní charakteristiky matematických metod použitých pro zpracování dat z přístupové sítě byly v praktické části formulovány hlavní cíl práce a cíle parciální. Nyní bude přistoupeno k diskusi o jejich splnění formou shrnutí výsledků disertační práce. To je možno považovat za nosnou část celé práce, poněvadž jsou zde spolu s vyhodnocením splnění hlavního cíle a z něj vyplývajících cílů parciálních taktéž diskutovány možná úskalí i zjevné výhody pro praxi, jež toto řešení hlavního cíle v podobě návrhu funkčního matematického modelu pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě přináší. Na úskalí i výhody bylo nutno při řešení stanovených cílů brát zřetel a bude je nezbytné zohlednit v případě navazujících plánovaných výzkumných aktivit v blízké budoucnosti.

Hlavním cílem předkládané disertační práce bylo navrhnout funkční matematický model pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě. Na základě kapitol, věnovaných vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě a analýze distribuce datového provozu v přístupové síti, byl navržen funkční model pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu. Úspěšnost tohoto navrženého funkčního matematického modelu je diskutována níže v podkapitole 5.1, návrh doporučených metrik pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti pak v podkapitole 5.2. Východiskem pro řešení hlavního cíle předkládané disertační práce byla analýza provozu přístupových sítí elektronických komunikací, jejíž zdrojové východisko se sestávalo z provozních statistik přístupových sítí konkrétního operátora, tj. poskytovatele internetových služeb – ISP. Přístupovými sítěmi jsou v současnosti připojovány k internetu zejména rezidenční oblasti. Toto specifikum má přímý vliv na rozložení intenzity provozu v přístupových sítích elektronických komunikací během jednotlivých časových intervalů. Základní časový interval u tohoto operátora je vymezen intervalem 24 hodin, tj. 1 provozní kalendářní den. U jiných operátorů mohou tyto provozní statistiky dosahovat odlišných hodnot, poněvadž proces sběru dat může být determinován řadou proměnných, jako je např. jiné demografické složení uživatelů v příslušné oblasti apod. Z tohoto důvodu nelze zjištěné intervaly špičkového provozu neboli hlavní provozní hodiny považovat za jediné možné.

Důležitým konkrétním výstupem řešení hlavního cíle disertační práce je navržené řešení, jež je formulováno jako návrh metodiky pro provádění vyhodnocování statisticky sledovaných metrik přístupových sítí. Metodika pro realizaci daných měření byla rozpracována v předchozích kapitolách, konkrétní návrh metodického postupu je sumarizován níže. Hlavní cíl disertační práce byl splněn – viz výše sedmá a tato osmá kapitola v předkládané práci.

V přímé návaznosti na hlavní cíl disertační práce byly formulovány cíle parciální. Tyto

další cíle si kladly za úkol:

- Ověřit mapování, monitorování a zaznamenávání reálných provozních dat provozu přenosových přístupových sítí, aby bylo možno následně kvalifikovaně navrhnout efektivní řešení provozních změn v sítích a jejich optimální korekci pro vyhodnocování datových sad – parciální cíl byl splněn, což je doloženo v jednotlivých kapitolách teoretické části disertační práce.
- Realizovat rozbor stávajících řešení pro provoz hlasového provozu v telekomunikačních sítích dle jednotlivých metod – parciálního cíle bylo dosaženo, o čemž svědčí druhá kapitola v tomto dokumentu.
- Provést charakteristiku datového typu provozu pro přístupové sítě, a to konkrétně pro pasivní optické, kabelové a radiové sítě – parciální cíl byl naplněn, a to konkrétně viz třetí kapitola výše.
- Vytvořit funkční matematický analytický model pro vyhodnocování výkonových parametrů přenosových sítí nové generace na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě při zohlednění poznatků z jeho ověřování v reálné přístupové síti a při respektování současných požadavků na kvalitu poskytovaných služeb v rámci těchto sítí – hlavní a s ním související parciální cíl byl splněn, viz strukturovaný popis řešení tohoto úkolu na základě dat získaných v dlouhodobě prováděném měření intenzity provozu v přístupové síti – konkrétně se jednalo o časový interval půl roku, tj. 6 měsíců, a s přihlédnutím k současnému stavu přístupové sítě. Dále bylo řešení tohoto parciálního úkolu zaměřeno na konkrétní pracovní postup při sestavování analytického modelu pro vyhodnocování výkonových parametrů přenosových sítí nové generace na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě, podrobněji viz čtvrtá a tato pátá kapitola dokumentu.
- Sestavit metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě – tento parciální cíl byl úspěšně splněn, jak je doloženo ve čtvrté kapitole výše.
- Ověřit sestavené metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě pomocí výpočtů a jednotlivých dílčích zpracování – ověření sestavené metriky bylo provedeno v podkapitole 5.2 – viz níže, tudíž cíle bylo úspěšně dosaženo.
- Provést porovnání hodnot na základě aproximace dat provozního profilu s naměřenými hodnotovými charakteristikami v reálných přístupových sítích – taktéž tento poslední parciální cíl byl splněn, což je možno doložit šetřeními, jež jsou provedeny ve třetí kapitole tohoto dokumentu a v příloze A a B v předkládané disertační práci.

5.1 Doporučený postup konstrukce modelu provozu v přístupové síti

Pro vytvoření modelu provozu přístupových sítí bylo obdobně jako u telekomunikačního provozu hlasových služeb zvolen interval 15 minut. Tento časový interval se jeví jako vhodný i pro

datovou komunikaci a v jejím rámci pro vyhodnocování průběhu provozu přístupových sítí.

Z logiky věci vyplývá, že tímto způsobem je 1 provozní kalendářní den rozdělen na 96 časových intervalů, přičemž 1 takový časový úsek tak přibližně odpovídá 1 procentu denní doby ve smyslu nejbližšího vhodného intervalu, jenž zároveň respektuje běžný časový model.

Za účelem průběžného vyrovnávání kolísání objemu intenzity provozu přístupových sítí v jednotlivých kalendářních dnech je realizováno vyhodnocování jen relativního objemu provozu přístupových sítí, tj. daný podíl objemu dat přenesených v daném 15minutovém intervalu na celkovém objemu dat přenesených v daném kalendářním dni.

Provozní statistiky byly analyzovány v přímé závislosti na daném přístupovém komunikačním rozhraní a na konkrétní použité technologii, dále dle směru přenosu a podle kalendářního dne v daném týdnu. Průměrováním těchto statistik za dostatečně dlouhou dobu, jež zahrnovala alespoň několik měsíců, jsou vyrovnávány nepravidelnosti příslušného časového úseku daného kalendáře, jež byly způsobeny zejména státními svátky, významnými dny a konkrétním charakteristickým denním režimem pro danou výseč časové etapy v příslušném ročním období. V těchto časových intervalech se totiž logicky mění i konkrétní chování uživatelů přístupových sítí.

V analyzovaných přístupových sítích získaná data dokládala velmi podobné rozložení intenzity provozu přístupových sítí, a to v pracovních kalendářních dnech i ve víkendových kalendářních dnech. Na základě tohoto zjištění bylo dále operováno se statistikami, jež byly průměrovány pro kalendářní dny pracovní a víkendové. Z obecného hlediska je však žádoucí mít zároveň na zřeteli, že např. intenzita provozu přístupových sítí v kalendářní pracovní den, jenž předchází víkendu, nemusí být srovnatelná s provozem kalendářního pracovního dne uprostřed pracovního týdne. Proto je vždy nutno ověřit, zda je možno tento postup aplikovat pro analýzu konkrétní přístupové sítě.

Empiricky zjištěné relativní rozložení intenzity provozu je následně aproximováno pomocí vhodné polynomiální funkce. Jako vhodný model se jeví polynom sedmého stupně. Tento polynom byl následně využit pro výpočet metrik popisujících hlavní provozní hodinu a hodiny provozního sedla.

5.2 Doporučené metriky pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti

Z hlediska technické praxe poskytovatelů internetových služeb je žádoucí věnovat pozornost dvěma provozním extrémům, a to konkrétně době provozní špičky neboli hlavní provozní hodině, v jejímž rámci je přenesen relativně maximální objem dat při nejvyšší intenzitě provozu přístupové sítě za minimální časový interval, a době provozního sedla.

V době provozní špičky neboli v hlavní provozní hodině je jakýkoli výpadek služeb nežádoucí, poněvadž jeho přímým důsledkem je snížená kvalita či nedostupnost služeb v přístupové síti v daném časovém intervalu, což zasahuje velké množství konkrétních jednotlivých uživatelů, a to včetně uživatelů s největšími objemy datových přenosů.

Naopak doba provozního sedla, v jehož rámci je z hlediska intenzity zabezpečován nejnižší objem datových přenosů během maximálního časového intervalu se z hlediska využití jeví jako vhodná pro provádění plánované údržby přístupové sítě, a to včetně aktualizace nebo inovace aktivních prvků či kompletní změny technologie apod.

Jako vhodné hodnoty je možno definovat následující sestavu intervalů:

- HT10 – minimální interval, během něhož je přeneseno nejméně 10 % denního objemu provozu;
- HT25 – minimální interval, během něhož je přeneseno nejméně 25 % denního objemu provozu;
- LT10 – maximální časový interval, během něhož je přeneseno nejvýše 10 % denního objemu provozu;
- LT05 – maximální časový interval, během něhož je přeneseno nejvýše 5 % denního objemu provozu.

S ohledem na dlouhodobé zkušenosti s provozem přístupových sítí je možno považovat tyto metriky za vhodné pro popis provozní špičky neboli hlavní provozní hodiny a pro popis provozního sedla. Je žádoucí, aby analýzou získané hodnoty procentuálního objemu intenzity provozu přístupových sítí těchto metrik, byly dále předmětem všeobecné odborné diskuse.

Závěr

V rámci předkládané disertační práce byl nejprve proveden rozbor stávajícího způsobu měření a vyhodnocování hlasového telefonního provozu v přístupových sítích. Poté bylo přistoupeno k provedení komparace jednotlivých v provozu dlouhodobě ověřených typů měření a používaných modelů pro vyhodnocování intenzity hlasového provozu.

Hlavním cílem předkládané disertační práce bylo navrhnout funkční matematický model pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě. Tento hlavní cíl byl splněn, jak je doloženo v páté kapitole tohoto dokumentu. V této kapitole je dále diskutováno splnění parciálních cílů, jež byly naplněny takto:

- bylo ověřeno mapování, monitorování a zaznamenávání reálných provozních dat provozu přenosových přístupových sítí;
- byl realizován rozbor stávajících řešení pro provoz hlasového provozu v telekomunikačních sítích dle jednotlivých metod;
- byla provedena charakteristika datového typu provozu pro přístupové sítě, a to konkrétně pro pasivní optické, kabelové a radiové sítě;
- byl vytvořen funkční matematický analytický model pro vyhodnocování výkonových parametrů přenosových sítí nové generace na základě kritéria intenzita provozu – viz hlavní cíl výše – při zohlednění poznatků z jeho ověřování v reálné přístupové síti a při respektování současných požadavků na kvalitu poskytovaných služeb v rámci těchto sítí;
- byly doporučeny metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě;
- sestavené metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě byly ověřeny pomocí výpočtů a jednotlivých dílčích zpracování;
- bylo provedeno porovnání hodnot na základě aproximace dat provozního profilu s naměřenými hodnotovými charakteristikami v reálných přístupových sítích.

Teoretická část disertační práce se sestává z kapitol, jež se soustřeďují na stav současného poznání dané oblasti. V jejich rámci byla představena teoretická východiska, legislativní rámec a tematika regulace trhu, sítí nové generace – NGN i sítí s velmi vysokou kapacitou – VHCN. Zároveň byla popsána problematika přístupové sítě, služby vysokorychlostního přístupu k internetu v pevném místě, měřicí a testovací metody přenosových ukazatelů dle příslušných referenčních modelů a parametrů. Poté byla podána charakteristika služby streamování video obsahu v přístupové síti, přičemž byla zkoumána prostupnost a kapacita přístupové sítě, možné důsledky změn, typy video přenosů v přístupové síti, jejich datová náročnost a vliv degradace parametrů přenosového média v přístupové síti. V kontextu statistických metod a postupů byly stručně představeny matematické metody, jež byly použity pro zpracování dat z přístupové sítě. Postupně bylo přistoupeno k realizaci aproximace měřených dat prostřednictvím vybraných konkrétních polynomů, aproximace polynomem daného stupně a taktéž bylo provedeno měření kvality aproximace.

V praktické části, jež představuje stěžejní jádro disertační práce, bylo nejdříve v první kapitole tohoto dokumentu vymezeno zaměření, hlavní cíl a parciální cíle disertační práce.

Následně ve druhé kapitole bylo provedeno vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě. Poté byla provedena analýza systémového řešení provozu hlasových služeb, a to včetně teorie pravděpodobnosti v provozu hlasových služeb, měření provozní zátěže hlasových služeb prostřednictvím Centa Call-seconds. Následně byla v praktické části pozornost zacílena na kritérium intenzita provozu z hlediska různých vybraných konkrétních metod dle *ITU-T* a na řízení provozu, jeho fází a provozních cílů. Ve třetí kapitole tohoto dokumentu byla analyzována distribuce datového provozu v přístupové síti, pozornost byla soustředěna na geografické a demografické parametry analyzované přístupové sítě. Pro tento účel byla realizována agregace uživatelů přístupové sítě, dále pak rozbor denního profilu provozu přístupové sítě a zdůvodnění užitých metody vyrovnání časových změn v přístupové síti. Poté byl v závěru třetí kapitoly předložen návrh matematického modelu pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita provozu jako jednoho z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě. V rámci návrhu byla provedena aproximace pomocí Lagrangeových polynomů a taktéž byla analyzována kvalita s využitím aproximace. Proces konstrukce metrik v přístupové síti a následné využití matematického modelu intenzity datového provozu byl předmětem odborného zájmu ve čtvrté kapitole. Na ni navazuje poslední, tj. pátá, kapitola tohoto dokumentu, v níž byla vyhodnocena řešení hlavního cíle i cílů parciálních. Taktéž zde byl podán popis procesu konstrukce doporučené metriky pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti a využití matematického modelu intenzity datového provozu. V závěru disertační práce jsou formulována zjištění a doporučení pro další praxi a případné vědecké bádání.

Na závěr je třeba provést shrnutí diskuse o stavu současného komunikačního prostředí, v jehož rámci jsou v hlasovém telefonním provozu v běžné praxi využívány metody uvedené v podkapitole 2.2. Pro tyto hlasové služby byly stručně popsány jednotlivé metody vyhodnocování, a to včetně specifikace pro výpočet telefonního provozu – viz podkapitola 2.3. Dále je zapotřebí zdůraznit, že základní charakteristika pro výše uvedený hlasový telefonní provoz je určena čtyřmi nejsilnějšími po sobě následujícími čtvrt hodinami, jež jsou označovány jako hlavní provozní hodina. Jejich velikost bývá používána pro dimenzování kapacit telefonních spojů mezi ústřednami i mezi telefonními sítěmi. Objem provozu v hlavní provozní hodině zpravidla odpovídá 10 až 15 % objemu celodenního provozu.

Za přiměřeně kvalitní je považováno, je-li pravděpodobnost obsazení všech spojovacích cest menší než 0,05 %.

Celková komplexnost pro monitorování a následné dimenzování hlasových sítí a systémů je v praxi dostatečně ověřena a popsána. Telekomunikační provozní modely i přes jejich komplexnost nelze jednoduše převést do datových sítí. Datovými sítěmi jsou využívány rozdílné přístupy ke sdíleným kapacitám, takže jejich celkový princip by nebyl dostatečný pro daný typ provozu.

Telefonním hovorem jsou kompletně obsazovány přidělené zdroje, tj. komunikační kanál. V případě datových sítí je situace odlišná. Datovou službou je na rozdíl od služby hlasové používáno tzv. statistické multiplexování. Počet sestavených hovorů za jednotku času nebo

počet současně probíhajících hovorů tak zde nedává smysl. Cílem této disertační práce proto bylo vytvořit metriky vycházející z doporučení *ITU-T E.500* a vhodné pro datový provoz. Vytvořený model vychází z doporučení *ITU-T E.500* a v maximální možné míře kopíruje zavedené postupy jako je např. použití čtvrt hodinových časových intervalů. Navržený postup vychází z analýzy provozu reálných přístupových sítí, jež využívají různé technologie.

Konstruovaný matematický model provozu a doporučené metriky odpovídající doporučení *ITU-T E.500* vycházejí z analýzy datového provozu konkrétního poskytovatele internetových služeb po dobu šesti měsíců. Prostřednictvím analyzovaných přístupových sítí jsou připojovány rezidenční oblasti, jež jsou poplatné chování uživatelů daného demografického složení. Pro jinou demografickou strukturu uživatelů, např. pro oblast s větším výskytem firemních zákazníků, proto není možné použít zjištěné časové intervaly, nýbrž je nutno zkonstruovat matematický model provozu v dané síti, a na jeho základě tak stanovit hodnoty navržených metrik.

Jako vhodné metriky pro popis časových intervalů s velmi vysokým provozem jsou autorem práce doporučeny metriky HT10 a HT25, tj. nejkratší časové intervaly, v nichž je přeneseno nejméně 10 %, resp. 25 % denního objemu datového provozu. Východiskem pro stanovení těchto hodnot byla zkušenost s aplikací doporučení *ITU-T E.500*. Hodnoty relativního objemu provozu (10 %, 25 %), případně jiné procentuálně zvolené hodnoty, jsou k diskusi a nanejvýš je žádoucí nalézt konsenzus většiny poskytovatelů internetových služeb a regulačních orgánů.

Na úplný závěr je zapotřebí zdůraznit skutečnost, že navržený funkční matematický model pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzity provozu jako jeden z hlavních charakteristických parametrů přístupové sítě, doporučený postup konstrukce modelu provozu v přístupové síti a doporučené sestavené metriky pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové síti jsou konkrétními produkty, jež dokládají, že v předkládané disertační práci bylo dosaženo úspěšného řešení hlavního cíle i cílů parciálních.

Navazující odborná práce autora bude implementovat nabyté poznatky, dosažené výsledky a získané zkušenosti do odborných aktivit zaměřených na sestavování funkčních modelů intenzity datového provozu pro další typy komunikačních sítí.

Literatura

- [1] Broadband Competence Offices (BCOs) Network *Broadband Competence Offices (BCOs) Network*[online]. BCO, 2020 [cit. 25. 10. 2022], Dostupné z URL:<<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/bco-network>>.
- [2] Český telekomunikační úřad *Narízením vydáno všeobecné oprávnění č. VO-S/1/08.2020-9*[online]. ČTÚ, 2020 [cit. 21. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/36864/soubory/vos1final.pdf>>.
- [3] Internet Engineering Task Force *Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices. RFC 2544*. Network Working Group[online]. 1999 [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>>.
- [4] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *Recommendation Y.1564. Ethernet service activation test methodology*[online]. ITU-T, 2016 [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1564-201602-I/en>>.
- [5] Internet Engineering Task Force *Framework for TCP Throughput Testing. RFC 6349*. Network Working Group[online]. 2011 ISSN: 2070-1721, [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.ietf.org/rfc/rfc6349.txt>>.
- [6] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *Recommendation Y.1731. OAM functions and mechanisms for Ethernet based networks*[online]. ITU-T, 2015 [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.1731/en>>.
- [7] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *Recommendation Y.2004. General overview of NGN*[online]. ITU-T, 2004 [cit. 21. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001-200412-I/en>>.
- [8] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *Recommendation Y.2012 Functional requirements and architecture of next generation networks*[online]. ITU-T, 2004 [cit. 21. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2012/en>>.
- [9] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *Recommendation E.800 Definitions of terms related to quality of service*[online]. ITU-T, 2008 [cit. 21. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/rec/T-REC-E.800-200809-I/en>>.
- [10] *Dopad COVIDu-19 na služby streamování videa a cloudová DVR úložiště - IT-Biz.cz. Zprávy ze světa IT a byznysu - ITBiz.cz*[online]. 2019 [cit. 21. 12. 2022],

Dostupné z URL: <<https://www.itbiz.cz/tiskove-zpravy/dopad-covidu-19-na-sluzby-streamovani-vidoa-a-cloudova-dvr-uloziste>>.

- [11] Federal Communications Commission - FCC *Broadband Speed Guide - Consumer and Governmental Affairs Bureau 2022*[online].2022 [cit. 21. 12. 2022], Dostupné z URL: <https://www.fcc.gov/sites/default/files/broadband_speed_guide.pdf>.
- [12] Evropská komise *Shrnutí rozvoje širokopásmových sítí v České republice*[online]. [cit. 5. 9. 2022], Dostupné z URL:<<https://digital-strategy.ec.europa.eu/cs/policies/broadband-czech-republic>>.
- [13] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky *Zpráva o naplňování Akčního plánu 2.0 a Národního plánu rozvoje sítí s velmi vysokou kapacitou*[online], [cit. 8. 9. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2022/6/58180-22---II--Material.pdf>>.
- [14] Úřední věstník Evropské unie *Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/1972 ze dne 11. prosince 2018, kterou se stanoví evropský kodex pro elektronické komunikace*. [online]. EU, 2018 [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?>>.
- [15] CHAN, Wah. *Performance Analysis of Telecommunications and Local Area Networks*. (Springer US,2005) [cit. 24. 2. 2023], Dostupné z URL: <<https://books.google.cz/books?id=SdgLBwAAQBAJ>>
- [16] CHROMY, Erik, Tibor MISUTH a Adam WEBER. *Application of Erlang Formulae in Next Generation Networks*. In International Journal of Computer Network and Information Security (Vol. 4, pp. 59-66) 2012 [cit. 24. 2. 2023], Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.5815/ijcnis.2012.01.08>>
- [17] CHROMY, Erik, Jan SURAN, Matus KOVACIK a Matej KAVACKY. *Usage of Erlang Formula in IP Networks*. In Communications and Network (Vol. 03, pp. 161-167) 2011 [cit. 24. 2. 2023], Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.4236/cn.2011.33020>>
- [18] SYSKI, R. *Introduction to congestion theory in telephone systems (Vol. 4)* Elsevier Science Limited 1986
- [19] FREEMAN, Roger L. *Telecommunication System Engineering*. Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing 2004 [cit. 24. 2. 2023], Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.1002/0471728489.ch1>>
- [20] Avaya Documentation *Erlang and ccs definitions*[online]. 2013 [cit. 7. 3. 2023], Dostupné z URL: <https://documentation.avaya.com/en-US/bundle/AvayaAuraCoreSolutionDescription_r8.0/page/ErlangAndCcsDefinitions.html>

- [21] FELDMANN, A., A. GREENBERG, C. LUND, N. REINGOLD, J. REXFORD a F. TRUE. *Deriving traffic demands for operational IP networks: methodology and experience*. In *IEEE/ACM Transactions on Networking (Vol. 9, Issue 3, pp. 265–279)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [cit. 7. 3. 2023]. Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.1109/90.929850>>.
- [22] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *E.500 : Traffic intensity measurement principles*[online]. [cit. 7. 3. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-E.500-198811-S/en>>.
- [23] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) *E.600 : Terms and definitions of traffic engineering*[online]. [cit. 7. 3. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-E.600-199303-I/en>>.
- [24] Internet Society *RFC 3272 : Overview and Principles of Internet Traffic Engineering*[online]. [cit. 17. 3. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3272>>.
- [25] Internet Society *RFC 3271 : The Internet is for Everyone*[online]. [cit. 17. 3. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3271>>.
- [26] OZOVEHE, A, O.U. OKEREKE, E.C. ANENE a A.U. USMAN. *Busy hour traffic congestion analysis in mobile macrocells*. Nigerian Journal of Technology(Vol. 36, pp. 1265-1270) 2018 [cit. 17. 3. 2023] ISSN 2467-8821, Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.4314/njt.v36i4.37>>
- [27] *Overwhelming OTT: Telcos growth strategy in a digital world*. [online]. 2020 [cit. 10. 4. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/overwhelming-ott-telcos-growth-strategy-in-a-digital-world>>
- [28] *The R Project for Statistical Computing*[online]. [cit. 10. 4. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.r-project.org/>>
- [29] *The R Project for Statistical Computing - Package ‘PolynomF’*[online]. 2022 [cit. 26. 4. 2023], Dostupné z URL: <<https://cran.r-project.org/web/packages/PolynomF/PolynomF.pdf>>

David Grenar

Affiliation

E-mail: xgrena04@vut.cz
Tel: +420 534 534 481
WWW: <https://www.vut.cz/lide/david-grenar-145999>

KVALIFIKACE A PROFESNÍ KARIÉRA

Kvalifikace

2016 – dosud student doktorského studia oboru Teleinformatika, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Disertační práce: *Měření a monitorování výkonnostních parametrů sítí nové generace*

2014 – 2016 Ing. obor Telekomunikační a informační technika, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Diplomová práce: *Řešení nasazení DWDM systémů na 100G a 400G*

2011 – 2014 Bc. obor Teleinformatika, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Bakalářská práce: *Pokrytí signálem – odlehlé oblasti*

Profesní kariéra

2010 – dosud Specialista IT a ICT

VÝZKUMNÉ PROJEKTY

2023 – 2026 VK01030060 MVČR – Okamžité zpracování signálů pomocí hybridních systémů v obranné infrastruktuře

2020 – 2021 FEKT-S-20-6312 Výzkum elektronických komunikačních a informačních a systémů a jejich využití pro zabezpečení kritických infrastruktur

2019 – 2022 VI20192022140 MVČR – Detekce narušení obranného perimetru pomocí okamžité změny polarizace optického signálu

2017 – 2020 FEKT-S-17-4184 Výzkum informačních a komunikačních systémů a jejich bezpečnost

ODBORNÉ ČINNOSTI

Lektorská činnost

2016 – 2023	Optické sítě
2017 – 2022	Přenosová média
2016 – 2017	Praktikum z informačních sítí

DALŠÍ KVALIFIKACE A ZNALOSTI

Jazykové znalosti	Český jazyk (rodilý mluvčí)
	Anglický jazyk (úroveň C1)
	Německý jazyk (úroveň A1)

Certifikace

2015	MikroTik - MTCNA
2015	DWDM - Fiber technology 100G and 400G
2009	LINUX - Administrator - Implementation Engineering

Ocenění

červen 2016	Cena děkana za diplomovou práci
-------------	---------------------------------

SHRNUTÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI

- Vědecké časopisy s impakt faktorem podle Web of Science: 1
- Mezinárodní konference indexované ve Web of Science nebo Scopus: 11
- Celkový počet citací podle Web of Science: 9
- Celkový počet citací podle Scopusu: 18
- H-index podle Web of Science: 2
- H-index podle Scopusu: 2
- Počet vydaných produktů: 2

Abstrakt

Práce se věnuje tématu přístupových sítí nové generace. V práci je nejprve proveden rozbor současného stavu poznání zaměřený na aktuální technický ale i legislativní vývoj a trend v přístupových sítích. Práce popisuje aktuální strukturu přístupových sítí a analyzuje stávající stav problematiky přístupových technologií. Dále jsou uvedeny měřicí a testovací metody pro jejich ověřování v závislosti na typu sítě či provozu IP služeb. Poté disertační práce představuje matematické metody, které lze využít pro vyhodnocovací model přístupové sítě. Následně jsou vyhodnocena doporučení a metody pro monitorování a modelování dat z přístupové sítě. Předmětem zájmu je zde zejména problematika intenzity provozu. Práce předkládá návrh pro konstrukci matematického modelování provozního profilu a jeho využití.