



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## MĚŘENÍ A MONITOROVÁNÍ VÝKONNOSTNÍCH PARAMETRŮ SÍTÍ NOVÉ GENERACE

MEASUREMENT AND MONITORING PERFORMANCE PARAMETERS OF NEXT GENERATION NETWORKS

### DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. David Grenar

### ŠKOLITEL

SUPERVISOR

prof. Ing. Zdeněk Smékal, CSc.

BRNO 2023





## **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.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

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

## **ABSTRACT**

The thesis is concentrated on the topic of next generation access networks. In the thesis, first of all, is conducted the analysis of the current state of knowledge with special focus on current technical and legislative developments and trends in access networks. The thesis describes the current structure of access networks and analyzes the current state of the issue of access technology. Measurement and testing methods for its verification depending on the type of network or operation of IP services are also described. Subsequently, the dissertation presents mathematical methods, that can be used in order to assess the access network model. In addition, recommendations and methods for monitoring and modelling access network data are evaluated. In particular, the subject of interest in this thesis is the issue of traffic intensity. The thesis presents a proposal for the construction of a mathematical modelling for the traffic profile and its application.

## **KEYWORDS**

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



## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Ing. David Grenar
<b>VUT ID autora:</b>	145999
<b>Typ práce:</b>	Disertační práce
<b>Akademický rok:</b>	2022/23
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Měření a monitorování výkonnostních parametrů sítí nové generace

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.



## PODĚKOVÁNÍ

Upřímně děkuji vedoucímu disertační práce a svému školiteli prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc. za odborné vedení, projevenou trpělivost a empatii během mého doktorského studia, dále za účinnou odbornou a metodickou pomoc, podnětné návrhy a připomínky k oblasti zkoumaného tématu i za cenné rady při zpracování mé disertační práce.

Velké díky náleží prof. Ing. Zdeňku Smékalovi, CSc. za všeobecnou podporu, cenné metodické rady, konstruktivní zpětnou vazbu, vstřícnost a za organizační pomoc při realizaci závěrečné fáze této disertační práce.



# Obsah

Úvod	17
<b>1 Současný stav poznání</b>	<b>23</b>
1.1 Definice sítí nové generace – NGN	23
1.1.1 Síť s velmi vysokou kapacitou – VHCN	24
1.2 Přístupové sítě	25
1.3 Legislativa a regulace trhu	26
1.3.1 Národní kanceláře Broadband Competence Office – BCO	28
1.3.2 Regulace a sledování parametrů vysokorychlostních sítí	30
1.3.3 Specifikace kvalitativních parametrů služby přístupu k internetu v pevných sítích dle <i>Narřízení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120</i> a podle ČTÚ	31
1.4 Struktura přístupové sítě	32
1.4.1 Uživatelský segment	33
1.4.2 Distribuční segment	33
1.4.3 Přípojný segment	34
1.4.4 Strategie rozvoje uživatelského segmentu sítí	34
1.4.5 Stávající stav přístupových sítí a technologií	34
1.5 Služby vysokorychlostního přístupu k internetu v pevném místě	35
1.6 Měřicí a testovací metody přenosových parametrů dle referenčního modelu <i>ISO/OSI</i>	38
1.7 Testování přenosových parametrů dle <i>RFC 2544</i>	38
1.7.1 Test propustnosti sítě – Troughput	39
1.7.2 Test latence sítě – Latency	39
1.7.3 Test obnovy systému po přetížení – System recovery	39
1.7.4 Test obnovy systému po restartu – Reset	40
1.7.5 Test ztrátovosti rámců – Frame loss rate	40
1.7.6 Test zatížitelnosti – Back-to-back	40
1.8 Testování dle <i>ITU-T Y.1564 – Ethernet SAM</i>	40
1.9 Testování dle doporučení <i>RFC 6349</i>	42
1.10 Vyhodnocování parametrů přístupu k internetu dle <i>Narřízení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120</i>	43
<b>2 Služby streamování video obsahu v přístupové síti</b>	<b>45</b>
2.1 Prostupnost a kapacita přístupové sítě	46
2.1.1 Změny v chování uživatelů přístupové sítě	46
2.1.2 Typy video přenosů v přístupové síti	46

2.1.3	Datová náročnost streamovacích video služeb v přístupové síti	47
2.1.4	Vliv degradace parametrů přenosového média v přístupové síti	48
<b>3</b>	<b>Matematické metody použité pro zpracování dat z přístupové sítě</b>	<b>51</b>
3.1	Aproximace měřených dat	51
3.1.1	Lagrangeovy polynomy	53
3.1.2	Čebyševovy polynomy	53
3.1.3	Legendrovy polynomy	53
3.1.4	Laguerrovy polynomy	54
3.1.5	Hermiteovy polynomy	54
3.2	Aproximace polynomem daného stupně	55
3.2.1	Měření kvality aproximace	56
3.3	Statistické metody a postupy	58
3.3.1	Teorie pravděpodobnosti	58
3.3.2	Číselné charakteristiky náhodných veličin	60
3.3.3	Popisná neboli deskriptivní statistika	61
3.3.4	Inferenční neboli induktivní statistika	61
<b>4</b>	<b>Zaměření a cíle disertační práce</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>Vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě</b>	<b>67</b>
5.1	Teoretické východisko k provozu v komunikačních sítích	68
5.2	Systémové řešení provozu hlasových služeb	69
5.2.1	Teorie pravděpodobnosti v provozu hlasových služeb	70
5.2.2	Měření provozní zátěže hlasových služeb prostřednictvím Centa Call-seconds	71
5.3	Intezita provozu dle <i>ITU-T E.500</i>	71
5.3.1	Metoda Time-Consistent Busy Hour – TCBH	72
5.3.2	Metoda Average Daily Peak Hour – ADPH	72
5.3.3	Metoda Fixed Daily Measurement Period – FDMP	73
5.4	Proces Traffic engineering dle <i>ITU-T E.600</i>	74
5.4.1	Fáze procesu Traffic engineering dle <i>ITU-T E.600</i>	74
5.4.2	Cíle procesu Traffic engineering dle <i>ITU-T E.600</i>	75
<b>6</b>	<b>Analýza distribuce datového provozu v přístupové síti</b>	<b>77</b>
6.1	Geografické a demografické parametry analyzované přístupové sítě	77
6.1.1	Agregace uživatelů přístupové sítě	78
6.2	Denní profil provozu přístupové sítě	80
6.2.1	Metoda vyrovnání časových změn v přístupové síti	83
6.3	Matematický model profilu datového provozu přístupové sítě	85



6.3.1	Aproximace pomocí Lagrangeových polynomů . . . . .	87
6.3.2	Analýza kvality aproximace . . . . .	93
<b>7</b>	<b>Konstrukce metrik v přístupové síti</b>	<b>99</b>
7.1	Využití matematického modelu intenzity datového provozu . . . . .	102
<b>8</b>	<b>Shrnutí výsledků disertační práce</b>	<b>109</b>
8.1	Doporučený postup konstrukce modelu provozu v přístupové síti . . .	111
8.2	Doporučené metriky pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístu- pové síti . . . . .	112
	<b>Závěr</b>	<b>115</b>
	<b>Literatura</b>	<b>119</b>
	<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>129</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>133</b>
<b>A</b>	<b>Procedury pro zpracování vstupních dat</b>	<b>135</b>
A.1	Příprava dat . . . . .	135
A.2	Matematické zpracování dat . . . . .	144
A.3	Výpočet hlavní provozní hodiny a provozního sedla . . . . .	152
<b>B</b>	<b>Výsledky a výstupy zpracovaných dat</b>	<b>167</b>



# Seznam obrázků

1.1	Struktura sítě nové generace. . . . .	33
1.2	Způsob připojení účastníka. . . . .	35
1.3	Podíl vysokorychlostních přístupů dle jednotlivých technologických řešení. . . . .	36
1.4	Vývoj podílu vysokorychlostních přístupů dle jednotlivých technologických řešení na maloobchodním trhu . . . . .	37
1.5	Jednotlivé testy dle <i>ISO/OSI</i> vrstev. . . . .	38
2.1	Datový tok pro služby IPTV v obrazovém rozlišení HD (vlastní měření). . . . .	47
3.1	Grafické znázornění principu výpočtu metody nejmenších čtverců. . . . .	55
6.1	Blokové schéma analyzované topologie sítě s velmi vysokou kapacitou – VHCN. . . . .	78
6.2	Složení dle typů služeb v přístupové síti. . . . .	79
6.3	Vyhledávání bodů polynomů denního datového provozu v pracovních a ve víkendových dnech na portu 10 v PON síti pomocí numerických metod. . . . .	85
6.4	Vyhledávání bodů polynomů denního datového provozu v pracovních a ve víkendových dnech na portu 10 v PON síti pomocí numerických metod. . . . .	85
6.5	Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy P0, P1 a P2. . . . .	86
6.6	Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy PS3, PS5 a PS7. . . . .	88
B.1	Polynom P0 pro port 10 v přístupové síti PON v jednotlivých dnech týdnu směr IN. . . . .	167
B.2	Polynom P0 pro port 10 v přístupové síti PON v jednotlivých dnech týdnu směr OUT. . . . .	168
B.3	Polynom P0 pro port 10 v přístupové síti PON ve víkendových dnech. . . . .	169
B.4	Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy P0, P1 a P2. . . . .	170
B.5	Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy PS3, PS5 a PS7. . . . .	171
B.6	Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON ve víkendových dnech pro polynomy P0, P1 a P2. . . . .	172
B.7	Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON ve víkendových dnech pro polynomy PS3, PS5 a PS7. . . . .	173



# Seznam tabulek

1.1	Počet vysokorychlostních přípojek v Česku . . . . .	37
1.2	Stupně výkonosti dle specifikace <i>Metro Ethernet fórum – dokument MEF 23.1</i> . . . . .	42
6.1	Rozpis použitých rozhraní v analyzované přístupové síti. . . . .	80
6.2	Vytvoření intervalů pro určení začátku a konce dne. . . . .	82
6.3	Kompenzace hodnot pro návrat z letního času do příslušného časového pásma. . . . .	84
6.4	Kompenzace hodnot pro přechod z příslušného časového pásma do letního času. . . . .	84
6.5	Aproximační polynomy portu 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech – úplný výpis pro jednotlivé polynomy. . . . .	89
6.6	Aproximační polynomy pro přístupové síť CATV v pracovních dnech. . . . .	90
6.7	Aproximační polynomy pro přístupové síť CATV ve víkendových dnech. . . . .	91
6.8	Aproximační polynomy pro přístupové síť PON v pracovních dnech. . . . .	91
6.9	Aproximační polynomy pro přístupové síť PON ve víkendových dnech. . . . .	92
6.10	Aproximační polynomy pro rádiové přístupové síť v pracovních dnech. . . . .	92
6.11	Aproximační polynomy pro rádiové přístupové síť ve víkendových dnech. . . . .	93
6.12	Analýza aproximačních polynomů portu 10 v přístupové síti PON – výpis polynomů. . . . .	93
6.13	Analýza aproximačních polynomů pro přístupové síť CATV. . . . .	94
6.17	Analýza aproximačních polynomů pro přístupové síť PON. . . . .	94
6.21	Analýza aproximačních polynomů pro rádiové přístupové síť. . . . .	95
6.23	Aproximační polynomy společné pro danou přenosovou technologii. . . . .	96
6.24	Analýza aproximačních polynomů společných pro síť CATV. . . . .	96
6.25	Analýza aproximačních polynomů společných pro síť PON. . . . .	97
6.26	Analýza aproximačních polynomů společných pro rádiové přístupové síť. . . . .	97
7.1	Časový interval s největším datovým provozem v sítích CATV v pracovních dnech. . . . .	99
7.2	Časový interval s největším datovým provozem v sítích CATV ve víkendových dnech. . . . .	100
7.3	Časový interval s největším datovým provozem v sítích PON v pracovních dnech. . . . .	100
7.4	Časový interval s největším datovým provozem v sítích PON ve víkendových dnech. . . . .	101

7.5	Časový interval dle HT a LT v sítích PON v pracovních a ve víkendových dnech. . . . .	105
7.7	Časový interval dle HT a LT v sítích CATV v pracovních a ve víkendových dnech. . . . .	105
7.9	Časový interval dle HT a LT v rádiových přístupových sítích v pracovních a ve víkendových dnech. . . . .	106
A.1	Aproximační polynomy pro přístupové sítě CATV v pracovních dnech.	152
A.2	Aproximační polynomy pro přístupové sítě CATV ve víkendových dnech. . . . .	154
A.3	Aproximační polynomy pro přístupové sítě PON v pracovních dnech.	156
A.4	Aproximační polynomy pro přístupové sítě PON ve víkendových dnech.	159
A.5	Aproximační polynomy pro rádiové přístupové sítě v pracovních dnech.	161
A.6	Aproximační polynomy pro rádiové přístupové sítě ve víkendových dnech. . . . .	162
A.7	Analýza aproximačních polynomů pro přístupové sítě CATV. . . . .	164
A.11	Analýza aproximačních polynomů pro přístupové sítě PON. . . . .	165
A.15	Analýza aproximačních polynomů pro rádiové přístupové sítě. . . . .	166

# 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.

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 páteří a přístupové sítě.[1]

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; [1],[2]

- přístup k minimálně gigabitové rychlosti, a to symetricky pro podnikatelské subjekty, státní správu, místní samosprávu a socioekonomické subjekty [1],[2].

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. 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.

Disertační práce se skládá z teoretické a praktické části. Je členěna do osmi kapitol, přičemž kapitoly jsou dále uspořádány do jednotlivých podkapitol. První kapitola disertační práce je věnována současnému stavu poznání, a představuje tak teoretická východiska pro naplnění hlavního cíle i s ním bezprostředně souvisejících cílů parciálních. Tato kapitola je zaměřena na stručný výklad k problematice sítí nové generace – NGN, a to včetně sítě s velmi vysokou kapacitou – VHCN, 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 kapitola 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 *Narřízení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120*.

Ve druhé kapitole je proveden vhléd do tématu služby streamování video obsahu v přístupové síti. Jednotlivé podkapitoly se postupně zabývají tematikou 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.

Třetí kapitola představuje 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. V této kapitole 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. Kapitola se taktéž zabývá stručným výkladem statistických metod a postupů. V podkapitolách jsou 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 měřením 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.

Ve čtvrté kapitole, jež tvoří stěžejní jádro praktické části disertační práce, je na základě výše popsanych 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.

Pátá kapitola 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 šesté kapitoly praktické části disertační práce 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

šesté 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.

V sedmé kapitole disertační práce 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 osmou 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 disertační práce jsou formulována zjištění a doporučení pro další vědecké bádání i pro praxi.

Nedílnou součástí disertační práce je seznam odborné literatury a použitých elektronických zdrojů a pramenů. Práce 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 závěru práce 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.



# 1 Současný stav poznání

Na základě překotného technologického rozvoje komunikačních technologií i díky zvyšujícím se požadavkům na straně koncových uživatelů přístupové sítě dochází v současnosti k realizaci přesunů informačních a telekomunikačních služeb do prostředí sítí nové generace – NGN (Next Generation Network, dále NGN), jež zároveň garantují rychlost a stanovenou kvalitu poskytovaných služeb a stejně tak časovou a místní nezávislost.

Sít NGN staví na výhodách spojení datových sítí založených na IP (Internet Protocol) protokolu a PSTN (Public Switched Telephone Network) sítí, jež spočívá ve využívání přepojování fyzických okruhů. Tato výhoda koncipuje širokopásmovou síť, jež je nezávislá na přenosové technologii a přitom umožňuje spolu s paketovým přenosem konvergenci nejrůznějších aplikačních služeb prostřednictvím datové sítě s využitím IP protokolu s jednoduchou správou sítě a datových toků.

Aktuálně je při poskytování internetových služeb v hojné míře využíván základní model tzv. best-effort, jenž nezaručuje doručení paketů, a neusiluje tak v případě potíží s doručením o jeho opakování až do finálního úspěšného doručení. V brzké budoucnosti lze však ze strany uživatelů očekávat vyšší tlak na vysokou kvalitu a garanci poskytovaných služeb, což s sebou zákonitě přinese i požadavek na záruku doručení a na garanci požadované vysoké kvality poskytovaných služeb [3].

## 1.1 Definice sítí nové generace – NGN

Sítě nové generace – NGN vznikly konvergencí klasických telekomunikačních sítí do datových sítí, principiálně jsou založeny na protokolu IP. Tímto spojením vzniká širokopásmová síť NGN, jež disponuje vysokorychlostním paketovým přenosem, a rozšiřuje tak poskytované spektrum služeb. *Doporučení ITU-T Y.2001* (ITU – Mezinárodní telekomunikační unie, dále ITU). ITU definuje NGN jako síť založené na přepojování paketů a s možností garance kvality služeb, kde funkce týkající se služeb jsou nezávislé na konkrétní přenosové technologii [3]. Sítě NGN tak poskytují obecnou mobilitu, jež umožňuje kontinuální a všudypřítomné poskytování služeb jejich uživatelům. Nezbytným požadavkem na síť nové generace je plná integrace kvality služeb QoS v přístupových sítích včetně účastnických terminálů. Kvalita síťových služeb pracuje s klasifikací datových toků, využívá tzv. prioritizaci a je plně v souladu s velkým množstvím aplikačních služeb. Tímto krokem je usilováno o zajištění IP služby koncovému uživateli v definované kvalitě s ohledem na kapacitu sítě. Dle organizace ITU [4], [7] síť NGN charakterizují následující vlastnosti:

- paketový přenos dat;
- podpora více druhů technologií přístupových sítí;

- oddělení řídicích funkcí;
- podpora široké škály služeb, aplikací a mechanismů včetně služeb v reálném čase, streamingu a multimediálních a ostatních služeb neprobíhajících v reálném čase;
- širokopásmové připojení s podporou end-to-end QoS;
- podpora spolupráce se staršími sítěmi prostřednictvím otevřených rozhraní;
- mobilita a neomezený přístup uživatelů ke službám různých poskytovatelů;
- konvergované služby mezi pevnými a mobilními sítěmi;
- nezávislost poskytovaných služeb na přenosové technologii.

Sítě nové generace se dělí na páteřní (NGN) a přístupové sítě (NGA), přičemž NGN jsou páteřní sítě (backhaul) a využívají k přenosu dat optické kabely [6]. Přístupové sítě NGA mohou tvořit pokročilé bezdrátové a kabelové sítě či optické sítě při splnění předpokladu, že budou splněny požadavky na rychlost [6],[7].

### 1.1.1 Síť s velmi vysokou kapacitou – VHCN

Optická přístupová síť představuje síťovou distribuční infrastrukturu, jež zprostředkovává konektivitu uživatele se sítí, která poskytuje telekomunikační služby prostřednictvím optického vlákna. Ačkoli optická technologie byla donedávna výsadou páteřních a metropolitních síťových infrastruktur, dnes je již zřejmé, že z dlouhodobého hlediska se optické sítě stanou standardem i pro sítě přístupové.

Klíčovými vlastnostmi optických systémů je bezesporu vynikající poměr ceny a výkonu a velmi pozitivní predikce na možnosti zvyšování přenosové kapacity. To je jeden ze zásadních důvodů, proč optické sítě tvoří základ elektronické komunikace a jejich prostřednictvím dnes probíhá naprostá většina internetových přenosů dat. [8]

Dle definice VHCN – Very High Capacity Network – je síť s velmi vysokou kapacitou definována a chápána jako síť, která se zcela skládá z optických prvků (s vlákny dle ITU-T specifikace G.652 až G.657). Přístupová část je vedena alespoň do distribučního bodu v obslužném místě, nebo do sítě elektronických komunikací, která je schopna za obvyklých podmínek v době špičky neboli hlavní provozní hodiny dosahovat obdobné výkonnosti, a to s běžně dostupnou rychlostí pro downlink a uplink, s dostatečnou odolností a s ostatními parametry souvisejícími s chybovostí a latencí, včetně kolísání těchto parametrů. Této definici odpovídá síť elektronických komunikací typu NGN, nebo její část označovaná jako síť NGA, či síť odpovídajících uvedených vlastností [6].

## 1.2 Přístupové sítě

Přístupové sítě primárně zajišťují přenos do vzdálenosti několika kilometrů. Slouží k překlenutí tzv. první míle, která je označována v odborné literatuře jako „first mile“ či „last mile“. Úkolem přístupové sítě je připojení koncových uživatelů k nejbližšímu bodu rozhraní telekomunikační sítě. Ten tvoří přepínač, směrovač, koncentrátor. Hlavním znakem přístupové sítě je sdílení síťové infrastruktury s koncovými uživateli. Mezi často používané technologie pro přístupové sítě v současnosti patří xDSL, xPON, CATV, WiFi sítě. [23]

VHCN – Very High Capacity Networks – je zkratka pojmenování, jež je v současné době užíváno pro označení sítí s velmi vysokou kapacitou. Tato síť VHCN nahradila síť NGN. Vysokorychlostní sítě jsou často ztotožňovány se sítěmi NGA (Next Generation Access), tj. s přístupovými sítěmi příští generace, pro které se vžil název „sítě nové generace“. Označení „sítě nové generace“ se používá také pro NGN (Next Generation Networks) [9]. VHCN, tj. sítě s velmi vysokou přenosovou kapacitou, vystihuje přenosová rychlost, kterou je síť schopna dosahovat, respektive kterou je možné zaručit koncovému uživateli v síti. Zásadní rozdíl mezi sítěmi VHCN a NGA/N spočívá ve zvýšení rychlosti stahování dat. Jestliže pro vysokorychlostní síť je rozhodujícím atributem rychlost stahování dat (download) 30 Mbit/s a více, tak pro síť VHCN maximálně dosažitelná rychlost realizovaná prostřednictvím současných technologií činí u downloadu více jak 333 násobků rychlosti sítě NGA/N, takže je možno dosáhnout násobky gigabitových rychlostí.

Sítě NGA/N jsou založeny na internet protokolu (IP protokolu), síť NGA využívají ve velké míře širokopásmová přenosová media. Díky tomu jsou schopny dosahovat podstatně vyšších přenosových rychlostí, než tomu bylo před rokem 2010, tj. v době před nástupem sítí NGA/N. Odtud pochází i termín označující síť jako „vysokorychlostní“, což zároveň znamenalo prolomení hranice 30 Mbit/s download. V té době si odborná veřejnost kladla otázku, jaká bude další generace sítě, co přijde. Jak bude nová generace NGA/N pojmenována a v čem bude příští nová generace lepší než běžný standard NGA/N.

Tyto otázky byly zodpovězeny právě sítěmi VHCN, jež jsou zároveň definovány novým kodexem elektronických komunikací [16]. Přesné atributy VHCN byly doplněny sdružením evropských regulátorů Body of European Regulators for Electronic Communications (dále jen BEREC) společně s Evropskou komisí v roce 2020.

Výchozí charakteristika, definice a základní parametry VHCN jsou vyloženy v odstavci (13) na str. 38 dokumentu *Kodex evropských elektronických komunikací*. V této textové pasáži je uvedeno, že VHCN jsou sítě s optickým vláknem do distribučního bodu DP (Distribution Point) v obslužném místě. V případě pevné sítě je to FTTB (Fiber to the Building), v případě mobilní sítě je to FTTA (Fiber to the

Antena). Toto je však pouze obecný, referenční model. Podmínky VHCN splňují i jiné technologie a řešení sítě NGA, jež dosahují stejných výkonnostních parametrů jako FTTB. Tato podmínka technologické neutrality, která připouští různé technologie pro dosažení cílových výkonnostních parametrů sítě, se však nedá aplikovat, nejsou-li známy přesné limitní hodnoty těchto parametrů. Znamená to, že pokud nejsou známy předepsané limity pro přenosové parametry, nelze rozhodnout, která technologie je s VHCN kompatibilní, nebo která síť je VHCN a která už VHCN není [20].

Evropská komise na základě výše uvedeného *Kodexu evropských elektronických komunikací* [17] předpokládá vyhodnocování dostupnosti sítí s velmi vysokou kapacitou v případě všech významných sociálně ekonomických objektů, jako jsou školy, dopravní uzly, významní poskytovatelé veřejných služeb, vysoce digitalizované podniky a společnosti. Spolu s vyhodnocováním dostupnosti plošného pokrytí sítěmi 5G v městských oblastech a podél hlavních pozemních komunikací a s vyhodnocováním celkové dostupnosti sítí elektronických komunikací, jež jsou schopny zajistit připojení alespoň o rychlosti 100 Mbit/s a zároveň umožňují snadné navýšení na gigabitové rychlosti, mají být sítě a jejich prostřednictvím realizované služby dostupné všem stávajícím i potenciálním zájemcům v každém členském státě, a to včetně jednotlivých domácností.

Strategický cíl formulovaný Evropskou komisí pro rok 2025 vymezuje požadavek na gigabitové připojení (sítě s velmi vysokou kapacitou), respektive vytyčuje požadavek na výkonnost, tj. na rychlost stahování alespoň 100 Mbit/s, což je zabezpečeno prostřednictvím významně modernizované či rozšířené sítě. V souladu s výhledem na požadavky Evropské komise pro futurum a v přímé návaznosti na výše citovaný dokument Evropské komise se proto v naší práci budeme dále zabývat zvláště vysokorychlostním připojením s rychlostí nad 100 Mbit/s a zvláště optickým připojením FTTB/H, jež v současnosti nabízí rychlosti 1 Gbit/s [20].

### 1.3 Legislativa a regulace trhu

Rozhodující roli v oblasti legislativy a regulace trhu pro Českou republiku v sektoru telekomunikačních technologiích zastává MPO a regulační úřad ČTÚ. Národní regulátor ČTÚ v rámci provádění periodického elektronického sběru dat o pokrytí a rychlosti internetových služeb od podnikatelů v elektronických komunikacích provádí autorizaci zaslaných údajů. Na jejich základě ČTÚ následně realizuje verifikaci shromážděných dat a tato zjištění na národní úrovni předává MPO. Ministerstvo data implementuje do mapového podkladu, a to konkrétně do dokumentu *Mapa internetu. Pokrytí ČR sítěmi elektronických komunikací umožňující přístup v pevném*



*místě* [22]. Tento nástroj je veřejně a zdarma přístupný a jeho pomocí lze pro konkrétní lokalitu ověřit dostupnou rychlost internetové služby v daném adresním místě v České republice a zároveň lze získat informaci o typu technologie připojení daného adresního místa. Jedním ze zájmů MPO je registrovat území, na nichž vysokorychlostní sítě zcela chybějí a taktéž identifikovat území, jež jsou nedostatečně pokryta těmito vysokorychlostními sítěmi, popř. území, jež jsou sice těmito sítěmi pokryta, avšak tamější vysokorychlostní sítě nedisponují dostatečnou kapacitou optických páteřních, distribučních a přístupových sítí. MPO v rámci sběru dat identifikuje taktéž území, která je nutno zasítovat, tj. provést výstavbu či potřebnou modernizaci sítí NGA/VHCN. Pro tyto oblasti se posléze MPO snaží vybrat vhodné formy podpory pro posílení atraktivity výstavby či modernizace přenosových sítí, jež jsou určeny pro zajištění služby přístupu k internetu v pevném místě. Při budování či inovacích přenosových sítí je zároveň zapotřebí provést pokládku především optických kabelů k základnovým stanicím mobilních sítí 5G [19]. Jako nejvhodnější formu podpory pro pokrytí a posílení vysokorychlostních sítí byl MPO zvolen v rámci *Národního plánu obnovy* [11] výše zmíněný národní dotační program *Vysokorychlostní internet*.

V souladu s aktuálními směry vývoje a s neustále rostoucími nároky na přenosovou kapacitu sítí ministerstvo klade na vysokorychlostní sítě stále vyšší požadavky, kdy se možnosti jednotek přenosové kapacity posouvají z řádů stovek Mbit/s do jednotek Gbit/s. Aby bylo možné přenosovou kapacitu reálně a v krátkém čase na požadovanou výši a bez zásadních realizačních překážek uskutečnit, je nutno použít jako přenosové médium optický kabel a modulární aktivní prvky. Žádoucí parciální výsledek těchto kroků je očekávaný stav, kdy koncoví uživatelé budou mít v brzké době v pevném místě připojení k dispozici maximální rychlost služeb vysokorychlostního internetu v násobcích Gbit/s [6].

MPO v průběhu vyhodnocování dat o trasách páteřních sítí zjistilo i nejrůznější anomálie. Např. v daném území se sice vyskytuje páteřní optická síť, v této dané lokalitě však neexistuje potřebný propojovací bod na procházející páteřní optickou síť. V přímém důsledku je pak použito suboptimální řešení napojení na páteřní optickou síť, spočívající v napojení v méně vhodném místě, jež nelze jednoduše a z hlediska finanční náročnosti levně aktualizovat. Konkrétně tak lze tuto situaci dokumentovat na příkladu, kdy není technicky možné jednoduše a s minimální finanční náročností navýšit přenosovou kapacitu propojovacího bodu na nově požadované hodnoty.

Dále je zapotřebí při hledání optimálních řešení problémů s přenosovou kapacitou vzít v potaz nebezpečí vzniku tzv. úzkého hrdla mezi páteřní a přípojnou sítí a obdobně i rizika, jež mohou nastat při propojování nižších úrovní sítí se sítěmi páteřními.

Dalším účelem prováděného sběru dat na národní úrovni je nabytí aktuálních informací o možných variantách propojení přístupové sítě NGA/VHCN, stejně tak o

eventualitách, jak řešit propojení daných vysokorychlostních sítí se sítěmi páteřními, a to zejména pro připojení s využitím optických vláken pro napojení základnových stanic 5G. Architektura propojení mezi páteřní optickou sítí a optickou přípojnou, tj. přístupovou, sítí a mezi optickou přípojnou a distribuční sítí, nebo mezi distribuční a účastnickou sítí, jež obstarává připojení jednotlivých koncových uživatelů je graficky znázorněna na obrázku 1.1.

Sběrem získaná data jsou podrobena analýze, jejíž výsledky prezentují aktuální stav přístupových sítí a v neposlední řadě i skutečnost, je-li v jednotlivých lokalitách k dispozici potřebná struktura optických propojovacích bodů, popř. jsou-li komerční subjekty schopny zajistit potřebnou architekturu vysokorychlostních sítí z vlastních prostředků, popř. z prostředků v rámci jednotlivých dotačních titulů [13].

### **1.3.1 Národní kanceláře Broadband Competence Office – BCO**

V únoru 2020 začala na českém území pracovat národní kancelář Broadband Competence Office (dále BCO), jejímž hlavním úkolem je podpora rozvoje vysokorychlostních sítí elektronických komunikací v Česku, a to v souladu s činností Evropské unie v této oblasti. Analogickým způsobem jsou BCO zakládány i v dalších členských zemích Evropské unie. Evropská komise v rámci Evropské unie iniciovala potřebu budování sítí BCO především proto, že tyto sítě jsou vnímány z její strany jako nutná podmínka pro zajištění udržitelnosti dalšího vývoje [9], [20].

České Národní kanceláře BCO napříč naší republikou jsou svým způsobem jedinečné. V každém kraji prostřednictvím krajských pracovišť BCO zajišťují krajské koordinátoři, respektive tzv. územní koordinátoři, danému území odbornou podporu, poradenství a konzultace samosprávě a právním subjektům, jako jsou např. stávající operátoři vysokorychlostních sítí, současní i pro futurum potenciální možní investoři. Koordinátoři jsou nápomocni radou a doporučením zástupcům laické i odborné veřejnosti. Na krajské úrovni mohou koordinátoři zastávat pozici konzultanta, poradce a experta, taktéž facilitátora a mediátora, ale i propagátora a popularizátora tématické oblasti vysokorychlostních sítí včetně zjišťování stavu pokrytí území těmito sítěmi i možnostmi jejich dostupnosti. Kanceláře BCO mají za úkol posilovat efektivitu přijímaných řešení, snižovat investiční náročnost budování těchto sítí a v neposlední řadě i sdílet a zajišťovat oboustranný přenos informací mezi krajskými kanceláři BCO a národní kanceláří i mezi kanceláři BCO v rámci Evropské komise. Ke konkrétním úkolům BCO náleží i engineering v širším slova smyslu, dále synergie všech činností, zajišťování aktivit při budování či rekonstrukci vysokorychlostních sítí, územním plánování, při promýšlení efektivních postupů, odhalování specifik, možných rizik a konkrétních úskalí v příslušných územních celcích. Ve srovnání s jinými zeměmi Evropské unie má zásadní roli již zmíněná podpora sa-

mosprávy, poněvadž v Česku to představuje konkrétní realizaci podpory zhruba 6 000 obcí. Za tímto číselným údajem je zapotřebí si představit i lidský faktor a jeho potenciál, tj. starosty, primátory, jejich samosprávný aparát a členy příslušné místní samosprávy a státní správy, ředitele škol a dalších školských zařízení, zástupce kulturních institucí jako jsou knihovny, muzea, představitele osvětových a sportovních organizací apod. Vysokorychlostní sítě jsou z pohledu občanů i v těch nejmenších obcích logickým předpokladem a zároveň i zákonitou nezbytnou podmínkou pro jejich životaschopnost a další rozvoj v Česku [10].

Projekt *Broadband Competence Office Česká republika* byl zpracován v souladu s *Národním plánem rozvoje sítí nové generace* a je realizován v rámci prioritní osy 5 *Technická pomoc Operačního programu Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost – OP PIK*. Zároveň bylo naplánováno, že projekt bude pokračovat v návazném programu pro léta 2021–2027 [11].

Rozvoj NGN a VHCN sítí je logicky v praxi provázen některými místními komplikacemi, poněvadž budování těchto sítí je realizováno na pozemcích různých vlastníků, a to na pozemcích, jejichž vlastníkem je stát, územní samospráva, nebo je pozemek v soukromém vlastnictví, konkrétně daného podnikatelského subjektu či soukromé, tj. fyzické, osoby. Z hlediska vlastní realizace výstavby vysokorychlostních sítí je nanejvýš žádoucí výborná informovanost a orientace v současné situaci i dobré povědomí o budoucích plánech rekonstrukcí, inovací i zcela nové výstavby všech liniových staveb v dané lokalitě. Tato znalost konkrétních lokálních parametrů a specifik významně nápomocna úsporám investičních prostředků, snížení energetické náročnosti výstavby a sdružování realizačních požadavků na administrativu a logistiku, což ve výsledku může významně snížit diskomfort obyvatelstva v daném místě výstavby, jenž je způsoben opakovanými stavebními činnostmi. Tyto argumenty zároveň dokládají fakt, proč by organizací BCO měla být aktivně a systematicky vyhledávána nejvhodnější řešení budování i inovování těchto sítí v dané lokalitě.

Pro účely rozvíjení potřebné infrastruktury elektronických komunikací je nutno synergicky se všemi aktéry sdílet nejvhodnější postup a praxi. Zejména je nutno usilovat o odstranění nelogických administrativních, organizačních i technických překážek, jež jsou přímo navázány na místně příslušné stavební řízení, tj. na konkrétní stanovené podmínky vlastní výstavby, na výkupy pozemků, případně na vytváření zcela nových nebo pro inovaci vhodných stávajících podmínek pro služebnost apod. Pro tyto účely je role krajských pracovišť BCO v daném území nezastupitelná.

### 1.3.2 Regulace a sledování parametrů vysokorychlostních sítí

S rostoucím trendem Over-the-top (OTT) služeb, především pak v oblasti streamovacích a reálných služeb, jsou uživatelé přístupových sítí kladeny stále se zvyšující požadavky na přenosovou rychlost a na posílení přístupu ke službám prostřednictvím přístupové sítě.

Výše zmíněné dva základní požadavky na rozvoj přístupových sítí jsou rozhodujícími faktory, podle kterých je uživatelem zvolen poskytovatel OTT služeb. I přesto, že v daný moment nebylo možné zajistit tuto potřebnou rychlost nabízených služeb anebo nebyla v požadované době užívání služeb dostupná potřebná páteřní kapacita sítě, poskytovatelé tyto služby uživatelům nabízeli. Přírodním důsledkem těchto obchodních aktivit, jež nesplňovaly základní technologické nároky na tyto služby, byl pokles kvality poskytovaných služeb. Na to reagovali nespokojení uživatelé řadou stížností k národnímu telekomunikačnímu regulátorovi – ČTÚ. Ten musel s rostoucím počtem obdržovaných stížností na nastalou situaci adekvátně reagovat. Byla proto sestavena metodika, jež stanovuje technické parametry pro provozování přístupu k internetu v pevném místě [13].

Sledováním parametrů vysokorychlostních sítí se dnes zabývají mnohé dokumenty, přičemž některé jsou součástí závazné legislativy ČR a EU, jiné tvoří pouze obecné rámce doporučení EU. [20]

Neexistence jednoznačné a jasně formulované definice a přesného výkladu parametrů služeb vedou v tržním mechanismu k diskrepancím ve vyhodnocování kvalitativních parametrů u jednotlivých poskytovatelů služeb. Následkem toho nebylo možno realizovat např. relevantní porovnání jednotlivých nabídek na poskytování internetových služeb, stejně tak nebylo možno provádět porovnávání a vyhodnocování kvalitativních parametrů služeb od jednotlivých poskytovatelů.

Z důvodu neustálého navyšování poskytovaných služeb v elektronických komunikacích procházejí vysokorychlostní přístupové sítě, a to včetně kompletní technologické infrastruktury internetu, intenzivním vývojem.

Diskuse o kvalitativních přenosových parametrech připojení domácností k internetu byla zahájena poměrně nedávno. V roce 2015 bylo Evropským parlamentem připraveno a následně přijato nařízení, jímž byly upraveny obchodní a provozní podmínky pro poskytování služby přístupu k internetu. Hlavním cílem nařízení je uvést v platnost požadavek na transparentnost, technologickou neutralitu a na nediskriminační jednání poskytovatelů přístupu k internetu tzv. ISP (Internet Service Provider) pro všechny uživatele elektronických komunikací. Dílčí cíle nařízení se soustředí na definování a způsoby garantování kvalitativních kritérií pro přístup a připojení k internetu v kontextu jednotného evropského digitálního tržiště, v jehož rámci je za hlavní kvalitativní měřítko považována rychlost.

Nařízení EU ukládá poskytovateli povinnost uvádět v rámci svých obchodních podmínek a v uzavřených smlouvách o poskytování elektronických komunikačních služeb tyto konkrétní hodnoty rychlosti, jež jsou uživateli garantovány pro download – stahování a upload – vkládání:

- Maximální rychlost;
- Běžně dostupná rychlost (BDR);
- Minimální rychlost;
- Inzerovaná rychlost.

U prvních tří rychlostí musí být stanoveny jasné technické definice. Jejich interpretace a význam budou okomentovány níže. Poslední, tj. inzerovaná rychlost, je užívána jako marketingový termín. Je stanoveno, že tato rychlost nesmí být vyšší hodnoty, než činí uvedená maximální rychlost.

Neméně dalším důležitým parametrem pro hodnocení služeb v elektronických komunikacích je jejich dostupnost v čase. V praxi je vyjádřena poměrem času, v jehož rámci jsou parametry poskytované služby realizovány v dané časové jednotce.

V doporučení BEREC je vysloven požadavek, aby jako vysokorychlostní připojení byly označovány jen služby připojení k internetu, jež vyhovují stanoveným parametrům, a to konkrétně veličinám: běžně dostupná rychlost (dále BDR), zpoždění, kolísání rychlosti, ztrátovost rámců. Parametry časových poměrů lze v potřebných intervalech korigovat tak, aby byly v souladu se zaváděním *Směrnice Evropského parlamentu a Rady EU 2018/1972*.

### **1.3.3 Specifikace kvalitativních parametrů služby přístupu k internetu v pevných sítích dle *Nařízení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120* a podle ČTÚ**

Z hlediska základních kvalitativních ukazatelů a vývoje vysokorychlostních sítí elektronických komunikací je nezbytné trvat na zásadách definovaných *Směrnicí Evropského parlamentu a Rady EU 2018/1972* ze dne 11. prosince 2018. *Směrnice* taktéž formuluje evropský kodex pro elektronické komunikace. jednotlivé přenosové parametry budou dále rozvinuty v nařízení BEREC.

K základním ukazatelům pro práci s parametry vysokorychlostních sítí náleží:

- **Běžně dostupná rychlost** – je řazena k nejvýznamnějším hlediskům kvality. Označení běžně dostupná rychlost (dále BDR) je užíváno pro rychlost, jejíž dosažení je typické po většinu časového intervalu, v němž je uživateli služba používána. V obecné rovině BDR charakterizují dva parametry, a to číselné vyjádření rychlosti a dostupnost rychlosti v časovém intervalu.

- **Minimální rychlost** – je označována tzv. nejnižší rychlost, kterou poskytovatel internetových služeb uživateli smluvně garantuje.
- **Maximální rychlost** – je vymezena jako rychlost, jejíž dosažení lze z pohledu koncového uživatele předpokládat minimálně jedenkrát v dané časové jednotce. Dosažení maximální rychlosti musí být garantováno i použitím příslušného technologického řešení připojení k přístupové síti.
- **Inzerovaná rychlost** – je označována rychlost, kterou poskytovatel internetových služeb deklaruje ve svých marketingových a reklamních aktivitách, přičemž je nezbytné tuto inzerovanou rychlost dát do přímé souvislosti a vzájemné souvztažnosti s dalšími rychlostmi, tj. s běžně dostupnou, minimální i maximální rychlostí. Tyto parametry by měly být nedílnou a zároveň jasně a srozumitelně formulovanou součástí reklamních nástrojů i smluvních dohod.

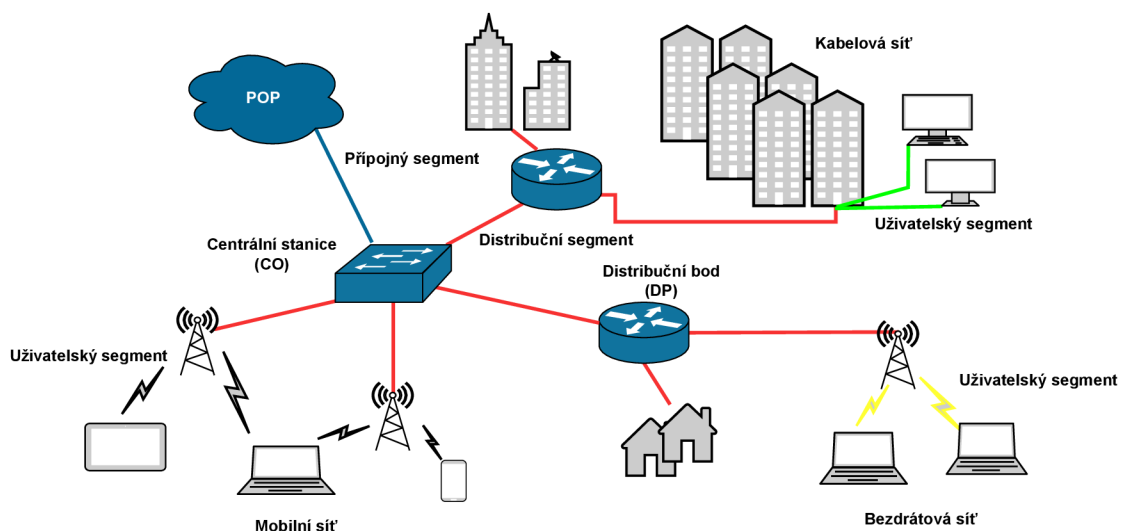
Tyto výše uvedené rychlostní charakteristiky musí povinně obsahovat inzerce i smluvní dokumenty.

Dalšími ukazateli je specifikována kvalita vysokorychlostních přístupových sítí. Konkrétně se jedná o tyto vybrané dílčí ukazatele:

- **Latence** – neboli prodleva – vyjadřuje zpoždění mezi nárokovanou potřebou uživatele na její realizaci a skutečnou odezvou v čase. Měrnou jednotkou pro tento ukazatel je milisekunda (ms). Pro nové služby, jež jsou vystaveny zejména na reálných protokolech, je tento ukazatel klíčový. Důraz na zkrácení časového intervalu mezi požadavkem a jeho realizací hraje důležitou roli.
- **Jitter** – neboli kolísání hodnoty zpoždění – je veličina, jež je udávána v milisekundách (ms). Tento ukazatel s rozvojem technologií zákonitě nabývá na své důležitosti.
- **Ztrátovost paketů** – je vyjádřena procentem tzv. ztracených či poškozených paketů, jež je nezbytné při spojení nahradit, opakovat nebo opravit.

## 1.4 Struktura přístupové sítě

Struktura přístupové sítě s vysokou kapacitou je graficky znázorněna na obrázku 1.1. Přístupová síť se sestává z centrální stanice poskytovatele služeb v elektronických komunikacích, z distribuční, přípojné a uživatelské části. Přístupová síť je členěna na tři segmenty, a to na část přípojnu, distribuční a účastnickou, přičemž u každého segmentu je jasně definována funkce, technické požadavky a demarkační body, tj. předávací rozhraní. Snadnější lokalizace případných poruch na přístupové síti je umožněna demarkačními body, jimiž je kromě toho definován vlastník dané trasy, a to včetně odpovědnosti za případnou údržbu, opravu či odstranění závad.



Obr. 1.1: Struktura sítě nové generace.

Standardně nově budované a provozované vysokorychlostní sítě zahrnují sítě NGA/N, jež jsou vymezeny mezi operátory dvěma předávacími body:

- **Centrální bod** – CO;
- **Distribuční bod** – DP.

Centrální bod je popsán v podkapitole 1.4.3 V distribučním bodě NGA sítí jsou primárně využívány vysokokapacitní optické rozvaděče ODF a optické rozbočovače. Síť je u koncového zákazníka zakončena rozhraním účastnické zásuvky. Centrální stanice (CO) slouží jako předávací bod mezi jednotlivými telekomunikačními operátory, je využívána sdílená přístupová síť. Centrální stanice (CO) je napojena na síť NGN a tvoří rozhraní mezi transportní a přístupovou sítí [3], [4].

### 1.4.1 Uživatelský segment

Uživatelský segment sítě je často definován jako její vnitřní část. Jedná se o vnitřní rozvody v objektech, jež jsou používány pro poskytování telekomunikačních služeb. Uživatelská část je oddělena od distribuční sítě demarkačním bodem. Majitelem uživatelské sítě může být vlastník objektu, nebo uživatelská síť může být vlastněna poskytovatelem služeb.

### 1.4.2 Distribuční segment

Distribučním segmentem sítě jsou propojeny distribuční body s centrální stanicí. Podle aplikované strategie *Digitální agenda pro Evropu* je distribuční segment sítě definován jako optická distribuční síť – ODN (Optical Distribution Network). Dle

ODN by ke každému distribučnímu bodu v nově připojovaném objektu mělo vést alespoň jedno optické vlákno.

### 1.4.3 Přípojný segment

Přípojným segmentem sítě je zajištěno připojení centrálního bodu – CO k poskytovatelům konektivity do internetu. Tato část sítě je tvořena pouze optickými kabely, jimiž je vytvářena nejdelší část přístupové sítě. V této části jsou výhradně používány optické prvky, kde jsou využívány xPON (GPON, EPON) v síti. Pro ochranu optických kabelů slouží chráničky s HDPE trubkami či mikrotrubičkovací systémy, čímž je flexibilně umožněno dle případných požadavků navyšovat počet optických vláken, takto je dosaženo zvýšení přenosové kapacity. Přípojným segmentem je připojeno více distribučních bodů (DP).

### 1.4.4 Strategie rozvoje uživatelského segmentu sítí

Současnými strategickými cíli Evropské Unie (s platností i pro ČR) jsou definovány požadavky na zajištění dostupnosti připojení koncových bodů vysokokapacitních sítí. Původním záměrem pro sítě NGA bylo poskytovat přenosové rychlosti 30 Mbit/s. S novým trendem, jímž byly prosazeny sítě s velmi vysokou kapacitou VHCN s minimální rychlostí 100 Mbit/s pro každého koncového uživatele, je nutno, aby nově na NGA sítích byla povinně poskytována přenosová rychlost 100 Mbit/s až násobky Gbit/s.

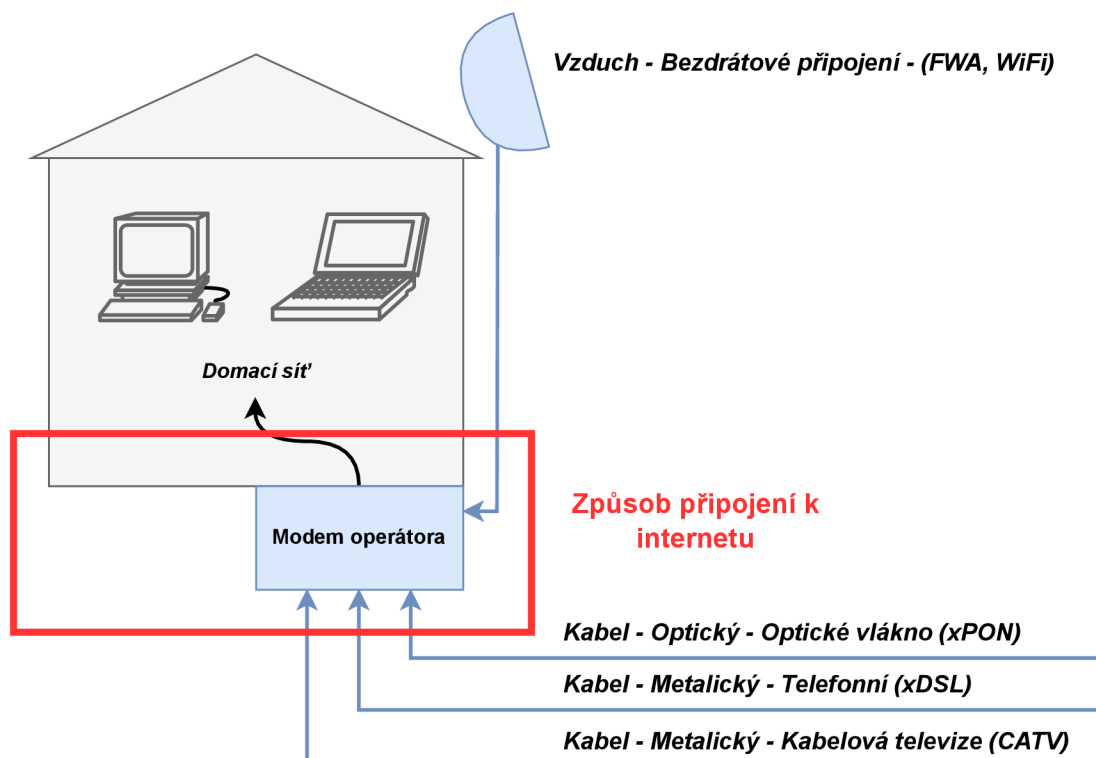
Výsledky doposud realizovaných geografických sběrů dat zajišťovaných národním regulátorem ČTÚ poukazují na fakt, že ve většině případů prostřednictvím stávajících a plánovaných sítí NGA je umožněno poskytování běžně dostupné rychlosti připojení – BDR minimálně 30 Mbit/s. U řady z nich je dosahována přenosová rychlost 100 Mbit/s a více ve směru z internetové sítě ke koncovému uživateli.

### 1.4.5 Stávající stav přístupových sítí a technologií

Z důvodu využívání různých komunikačních přístupových technologií, jimiž je zajišťován přístup k internetu, je nutno cyklicky provádět analýzy rizik a následně zjištěná rizika pro přenos internetu od poskytovatele k uživateli vyhodnocovat. V rámci analýzou odhalených rizik je poté přistoupeno k vyhledání největšího rizika, jež je označováno termínem **úzké hrdlo**. Pro zajištění potřebné kvality poskytovaných služeb, zejména pak pro dosažení BDR, je nutno toto **úzké hrdlo** vhodným technologickým řešením eliminovat.

Velmi důležitým článkem celého připojovacího řetězce k internetu od poskytovatele k uživateli je způsob připojení koncového bodu sítě – KBS neboli tzv. adresního





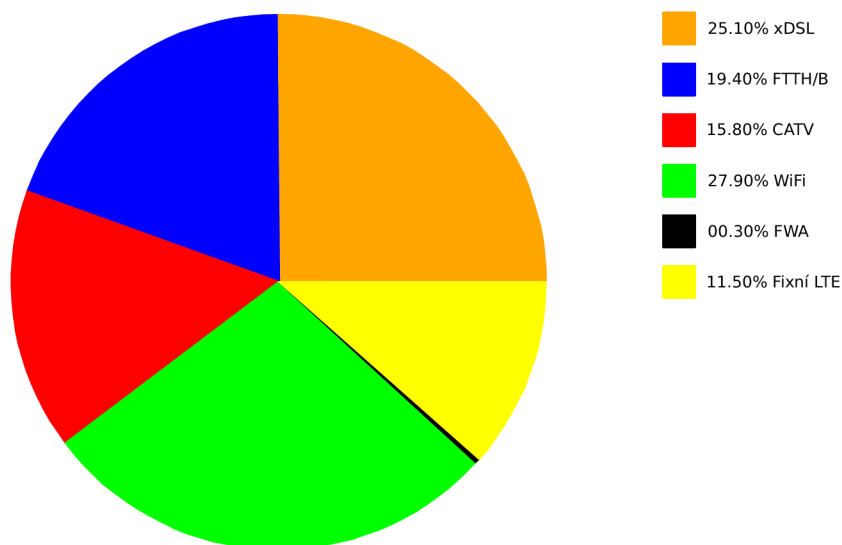
Obr. 1.2: Způsob připojení účastníka.

bodů – viz obrázek 1.2. Na tomto obrázku 1.2 je zobrazeno schématické rozdělení způsobů připojení k internetu a oddělení těchto způsobů připojení od připojení, jimiž jsou uživatelem připojována jeho koncová zařízení v uživatelské síti (LAN). Typem využitých technologií pro realizaci uživatelské přípojky jsou určovány maximální přenosové limity.

## 1.5 Služby vysokorychlostního přístupu k internetu v pevném místě

V roce 2021 bylo národním regulátorem ČTÚ ze sběru dat zjištěno – viz obrázek 1.4, že z hlediska jednotlivých způsobů technické realizace služeb vysokorychlostního přístupu k internetu byly v rámci podílu na maloobchodním trhu nejvíce zastoupeny přístupy prostřednictvím bezdrátových sítí v nelicencovaných pásmech, pro něž je užíváno označení WiFi.

ČTÚ byl předpokládán meziroční nárůst, jenž v roce 2021 dosáhl počtu cca 1,13 milionu. Český národní regulátor zveřejnil očekávání dalšího meziročního nárůstu pro technologii xDSL. V roce 2021 bylo vykázáno prostřednictvím technologie xDSL cca 989 tisíc přístupů, což značí navýšení oproti roku 2020, přičemž v roce 2020 byl



Obr. 1.3: Podíl vysokorychlostních přístupů dle jednotlivých technologických řešení (včetně služeb fixního LTE) k 31. 12. 2021 [13]

zaregistrován snižující se trend počtu přípojek prostřednictvím technologie xDSL. Poté však došlo k obratu v podobě nárůstu počtu přípojek. Taktéž u technologie FTTH/B byl v roce 2021 zaznamenán trend dlouhodobého růstu počtu přístupů s využitím optických sítí. Konkrétně byla dosažena úroveň počtu připojení ve výši přibližně 765 tisíc.

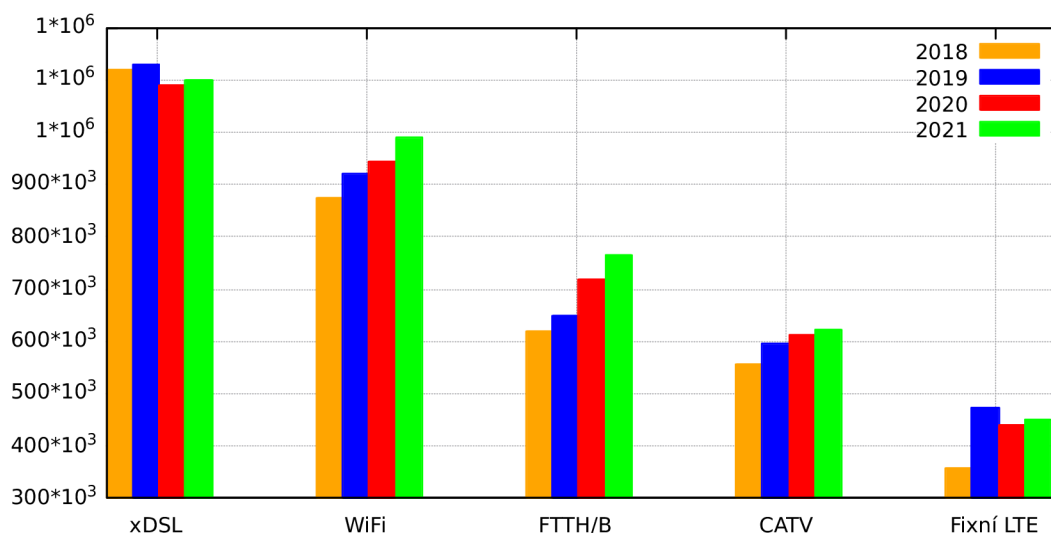
Jisté specifikum současné situace v České republice, zaregistrované v šetření ČTU v roce 2021 [13], představují zvyšující se počty využívání technologie připojení k internetu tzv. fixním mobilním přístupem k internetu prostřednictvím LTE. Dle zveřejněných údajů ČTÚ počet připojení typu LTE oproti roku 2018, kdy počet těchto připojení k internetu činil 358 tisíc, v roce 2021 stoupl na přibližně 452 tisíc přípojek.

Porovnání počtu připojení prostřednictvím jednotlivých technologických řešení na maloobchodním trhu v letech 2018 až 2022 je graficky zpracováno na obr. 1.3. Z grafického znázornění je zřejmé, že u progresivních platforem, konkrétně u sítí FTTH/B a tzv. fixní LTE, se prosadil trend dlouhodobého růstu.

V relativním vyjádření u všech jednotlivých způsobů přístupu k vysokorychlostnímu internetu je vykázan v roce 2021 nárůst tržního počtu připojení.

Tzv. fixní LTE znázorňuje jediný způsob realizace vysokorychlostního přístupu, u něhož bylo zaznamenáno zvýšení tržního podílu i v roce 2021.

Souhrnné pokrytí optickými sítěmi (FTTH/B) a sítěmi CATV s využitím stan-



Obr. 1.4: Vývoj podílu vysokorychlostních přístupů dle jednotlivých technologických řešení na maloobchodním trhu [13]

dardu DOCSIS 3.1, tj. sítěmi schopnými poskytovat gigabitové služby (download) dle metodiky studie Evropské komise *Broadband Coverage in Europe in 2020* [15] dosahovalo v průměru EU27 59,3 %. V dotčeném ukazateli o souhrnném pokrytí FTTH/B a DOCSIS 3.1 sítěmi tak Česko s pokrytím na úrovni 33,3 % zaostávalo za evropským průměrem. Pokrytí FTTH/B sítěmi bylo dle předmětné studie v České republice v roce 2020 oproti roku 2019 o 4 p.b. vyšší než v roce 2019 (29,3 %). Pokrytí FTTH/B sítěmi v roce 2020 v průměru za EU27 činilo 42,5 %, což je o 9,2 p.b. více než v Česku. Při pohledu na mezinárodní srovnání dostupnosti NGA

Tab. 1.1: Počet vysokorychlostních přípojek v Česku [13].

Typ připojení	2018	2019	2020	2021
WiFi	1 120 000	1 130 000	1 090 000	1 100 000
xDSL	875 000	920 000	945 000	989 000
FTTH/B	620 000	650 000	720 000	765 000
CATV	558 000	595 000	611 000	623 000
Fixní LTE	358 000	475 000	440 000	452 000

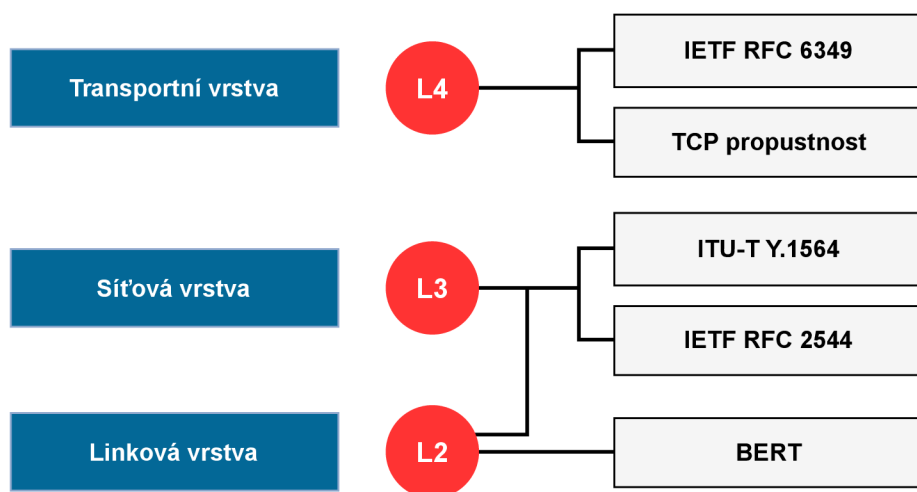
sítí byla Česká republika dle výše uvedené studie nad průměrem EU27, konkrétně pokrytí těmito sítěmi v ČR činilo v roce 2020 96,9 % a v EU 87,2 %.

Z hlediska pokrytí v rurálních oblastech bylo v Česku pokrytí domácností dle předmětné studie za rok 2020 u optických sítí FTTH/B o 18,5 p. b. nižší, než byl

průměr v EU – konkrétně 6,4 % v České republice oproti 24,9 % EU27. U celkového pokrytí domácností NGA sítěmi v rurálních oblastech však bylo Česko stále nad průměrem EU27, hodnota pokrytí (89,9 %) byla konkrétně o 30,1 p. b. vyšší.

## 1.6 Měřicí a testovací metody přenosových parametrů dle referenčního modelu *ISO/OSI*

Testování přenosových parametrů je popsáno v řadě doporučení, jež se navzájem liší metodikou a složením jednotlivých dílčích testů. V současnosti je často využíváno doporučení *IETF RFC 2544* [25] (IETF – Komise pro technickou stránku internetu, dále IETF) nebo novější *IETF RFC 6349* [29]. Doporučení totiž zároveň představuje východisko pro vývoj dalších testů, jež si kladou za cíl částečnou či v ideálním případě úplnou eliminaci chybovosti předchozích testů. Takto koncipované testy jsou určeny pro provádění testování na různých vrstvách referenčního modelu *ISO/OSI*. Jednotlivé typy testů, jež je vhodné použít dle konkrétních doporučení na jednotlivých vrstvách *ISO/OSI* referenčního modelu, jsou graficky znázorněny na obrázku 1.5. V přímé závislosti na situačních parametrech a na typu poskytované služby je zapotřebí zvolit vhodný test.



Obr. 1.5: Jednotlivé testy dle *ISO/OSI* vrstev [32].

## 1.7 Testování přenosových parametrů dle *RFC 2544*

Výkonnostní testy dle *RFC 2544* [25] umožňují prověřit parametry, tj. především propustnost, latenci, obnovitelnost systému, ztrátovost a zatížení přístupových sítí.

Jedná se o:

- Test propustnosti sítě (Throughput);
- Test latence sítě (Latency);
- Test obnovy systému po přetížení (System recovery);
- Test obnovy systému po restartu (Reset);
- Test ztrátovosti rámců (Frame loss rate);
- Test zatížitelnosti (Back-to-back).

### **1.7.1 Test propustnosti sítě – Throughput**

Úkolem testu je určení maximální rychlosti přenosu rámců v okamžiku, kdy ještě nedochází k jejich ztrátě. Je prováděno testování a velikosti rámce jsou nastaveny na tyto hodnoty: 64B, 128B, 256B, 512B, 1024B, 1280B, 1518B. Testem je vysílán přes testovanou síť daný počet rámců s určitou přenosovou rychlostí. Po přenosu je porovnáván počet odeslaných a přijatých rámců. Měřicí test je ve výchozím nastavení běžně zahájen odesíláním rámců s potenciálně větší rychlostí přenosu. V okamžiku, kdy je detekována ztráta rámců, dochází ke snížení přenosové rychlosti, a to zpravidla na polovinu původní přenosové rychlosti. Jestliže po snížení rychlosti nedojde k rozpoznání ztráty rámců, je provedeno opětovné snížení přenosové rychlosti o polovinu. [25]

### **1.7.2 Test latence sítě – Latency**

Testování je prováděno s obousměrným zpožděním RTT – Round Trip Time (neboli obousměrné zpoždění) a zahrnuje taktéž potřebnou časovou osu s ohledem na opětovné odesílání dat v smyčkovém režimu. V rámci testování je využita výchozí velikost ethernetového rámce. Pro každou velikost rámce je proveden cyklus dvaceti opakování, kdy minimální časová délka testu činí 120 s. Po 60 s je vloženo časové razítko do rámce pro vysílání. Hodnota latence je dána časovým rozdílem mezi odesláním a přijetím rámce. Latence je definována jako aritmetický průměr jednotlivých měření, přičemž musí být proveden minimální počet 20 měření. [25]

### **1.7.3 Test obnovy systému po přetížení – System recovery**

Test spočívá v zahlcení zařízení vysíláním rámců s rychlostí minimálně 100 % ze změřené propustnosti po dobu alespoň 60 s. Následně je přenosová rychlost skokově snížena na polovinu, poté začíná odpočítávání času, jež je zastaveno až v době, kdy testované zařízení nevykazuje žádnou ztrátovost rámců. [25]

### 1.7.4 Test obnovy systému po restartu – Reset

Test slouží k měření času potřebného u daného spojení, tj. kdy zařízení po svém restartu dosáhne 100% funkčnosti. Testování probíhá na principu kontinuálního vysílání toku rámců v testovaném zařízení. V určitém okamžiku je testované zařízení restartováno a následně je prováděno měření časového intervalu mezi přijetím posledního rámce před restartem a přijetím prvního rámce po obnovení funkčnosti zařízení. [25]

### 1.7.5 Test ztrátovosti rámců – Frame loss rate

Výstupní hodnota testu vyjadřuje závislost ztracených rámců na přenosové rychlosti vztažené k velikosti rámců. Tento test je klíčový zejména pro služby využívající transportního protokolu UDP. Jedná se o služby v reálném čase, kdy nejsou protokolem UDP opětovně zasílána přenesená data. Testování pracuje na principu odeslání předem určeného počtu rámců o specifikované velikosti do zařízení. Následně je prováděno porovnání, jež má za cíl zjistit počet zpět navracených rámců. Opětovně zahájení testu je realizováno na maximální možné přenosové rychlosti, jež je při detekci ztrátovosti iteračně degradována o desetinu či menší hodnotu, dokud není dosaženo hodnoty nulové ztrátovosti. [25]

### 1.7.6 Test zatížitelnosti – Back-to-back

Úkolem testu je určit maximální možný počet rámců ve shluku, kdy je aktivním prvkem zvládnuto jejich procesování tak, že je dosažena nulová ztrátovost rámců. Během testování je porovnáván počet odeslaných a přijatých rámců ve shluku. V případě, že počet odeslaných a přijatých rámců ve shluku vzájemně neodpovídá, je zapotřebí provést snížení počtu rámců v tomto shluku. Souhlasí-li počet rámců, je možno přistoupit k provedení navýšení počtu rámců ve shluku. V souladu se standardem by měla délka shluku činit 2 s a tento test je zapotřebí opakovat minimálně 50krát. [25]

## 1.8 Testování dle *ITU-T Y.1564 – Ethernet SAM*

V roce 2011 bylo uveřejněno doporučení *ITU-T Y.1564* pod názvem *Ethernet SAM – Service Activation Test Methodology*. Klíčový přínos tohoto doporučení spočívá v rozsáhlém portfoliu měřených kritérií, měřítek a veličin, a to zejména propustnosti (Throughput), zatížitelnosti spojení (Back-to-back), ztráty a poškození rámců při přenosu (Frame Loss), zpoždění při přenosu (Latency), kolísání zpoždění (Jitter), dostupnosti služby (Availability) a čas přepnutí na záložní spoj (Protection

Switching). Toto měřicí portfolio zajišťuje plnohodnotné a souhrnné posouzení výkonnostních ukazatelů příslušného testovaného zařízení nebo přenosových systémů pro zaručené úrovně služeb v souladu se smluvním ujednáním SLA (Service Level Agreement) poskytovatele a koncového spotřebitele.[28]

Hodnocené kvalitativní ukazatele jsou nazývány klíčovými výkonnostními indikátory KPI – Key Performance Indicator. V *ITU-T Y.1564* jsou v rámci doporučených metodických postupů vymezeny indikátory KPI – propustnost, zpoždění, ztrátovost, kolísání, jejichž charakteristika je podána výše v této práci – viz podkapitola 1.7.

V rámci metodického postupu podle doporučení *ITU-T Y.1564* je v počáteční etapě uskutečňován tzv. ramp test. Tímto názvem je pojmenován test se stupňovitě zvyšovanou přenosovou rychlostí, kdy jsou ověřovány prahové hodnoty CIR a EIR pro určité spojení nebo přenosové systémy:

- **CIR – Committed Information Rate** označuje horní limit zaručené přenosové kapacity vybrané služby;
- **EIR – Excess Information Rate** stanovuje přenosovou šířku, v níž však již nejsou zaručeny kvalitativní přenosové ukazatele vybrané služby.

V následující etapě je prováděn tzv. test výkonnosti služeb. V této periodě jsou proměřovány parametry KPI pro všechny typy spojení v jednom okamžiku. Měřicí nástroje vytvářejí souběžně datové toky, jež korespondují konfiguraci zvolených služeb a které odpovídají nastaveným službám a jejich ukazatelům (např. odpovídající přenosová rychlost, délky rámců apod.).[28]

V další etapě, jež je věnována komparaci měřicími testy získaných ukazatelů v souladu s vymezeným metodickým postupem, je na druhé linkové vrstvě komunikačního modelu (L2) provedeno vyhodnocení podle specifikace *Metro Ethernet fórum – dokument MEF 23.1* [26]. V dokumentu *MEF 23.1* jsou specifikovány různé rozsahy ukazatelů, a to z hlediska velikosti sítě s tím, že tento ukazatel není uplatňován pouze na metropolitní síti. Dále pak je podána charakteristika z hlediska dalšího ukazatele – stupně výkonnosti nastavených kritérií (úroveň služeb: H – High; M – Medium; L – Low). Podle vzdálenosti je provedena definice tzv. stupně výkonnosti PT (Performance Tier) – viz tab 1.2.

Hlavní přínos této metodiky spočívá v rychlosti vyhodnocení realizovaných měření. Doporučení *ITU-T Y.1564 Ethernet SAM* stanovuje technické ukazatele pro testování paralelních datových toků a pro testování upřednostňování jednotlivých datových spojení. Prováděná měření mezi těmito spojeními jsou akcelerována, a to díky skutečnosti, že jednotlivá měření jsou realizována souběžně a ne jenom postupně. Měření může být uskutečňováno v intervalu 2 minut, standardně je však využíván interval 2 hodiny. Časový úsek mezi jednotlivými měřeními je možno navýšit na interval 24 hodin.

Tab. 1.2: Stupně výkonosti dle specifikace *Metro Ethernet fórum – dokument MEF 23.1*

Stupeň PT (Performance Tier)	Vzdálenost
PT1 (Metro PT)	do 250 km
PT2 (Regional PT)	do 1200 km
PT3 (Continental PT)	do 7000 km
PT4 (Global PT)	nad 7000 km

## 1.9 Testování dle doporučení *RFC 6349*

V doporučení *RFC 6349 – Framework for TCP Throughput Testing* [29], pro něž bývá užíván i název *TCP True Speed*, je specifikovaná metoda, jež upřesňuje výčet ukazatelů a postup pro vyhodnocování měření ve čtvrté komunikační vrstvě – L4. Při realizaci měření dle tohoto výše uvedeného doporučení jsou uplatňovány vhodné charakteristiky protokolu s potvrzováním doručení datových segmentů, přičemž jsou protokolem současně řízeny datové toky dle aktuálního stavu sítě. Významný přínos postupu s uplatněním TCP protokolu spočívá i v jeho širokém využití pro nejrůznější aplikace, takže výsledky měření téměř odpovídají reálnému provozu uživatelů přístupových sítí [29].

V doporučení *RFC 6349* jsou obdobně jako v doporučení *RFC 2544 1.7* a *ITU-T Y.1564 1.8* specifikovány ukazatelé TCP throughput a RTT – Round-Trip Time, jež pracují s metrikami a parametry. Navíc jsou v doporučení uvedeny tyto metriky a parametry:

- **BB – Bottleneck Bandwidth** – nejnižší hodnota přenosové kapacity celé měřené trasy;
- **BDP – Bandwidth Delay Product** – násobek kapacity datového spoje (v bitech za sekundu) a zpoždění mezi oběma konci spoje (v sekundách);
- **Send and Receive Socket Buffers** – velikost vysílací a přijímací vyrovnávací paměti;
- **Minimum TCP RWND – Receive Window** – velikost okna pro potvrzování přijetí paketů;
- **MTU – Maximum Transmission Unit** – maximální velikost paketu použitelná pro datový spoj (bez nutnosti segmentace). [27]

Na čtvrté vrstvě – L4 je ve srovnání se třetí vrstvou dosahováno nižší přenosové rychlosti. Obdobně je přenosová rychlost snižována i vůči L2 a L1, což je logicky způsobeno dalším přidáním záhlavím (tj. hlavičkou IP paketu). Přenosová rychlost



je taktéž snížena o nedoručené pakety, jež jsou protokolem TCP opětovně požadovány k přeposlání. Zároveň jsou prosazována další regulační pravidla TCP protokolu, v jejichž intencích je prováděn pomalý náběh při sestavování spojení a při zpomalování komunikačního toku za situace, kdy je zvyšována ztrátovost paketu. Tímto mechanismem je zajištěna ochrana sítě před přetížením [30].

## 1.10 Vyhodnocování parametrů přístupu k internetu dle *Nařízení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120*

Při vyhodnocování parametrů přístupu k internetu je v České republice vycházeno z dokumentu *Nařízení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120*. Na národní úrovni v Česku je zároveň nutno dodržovat *Vyjádření Českého telekomunikačního úřadu k vybraným otázkám přístupu k otevřenému internetu a evropským pravidlům síťové neutrality*, jež musí být v souladu s evropským *Nařízením*, poněvadž to je dokumentem nadřazeným a závazným.

Na evropské i národní úrovni byla pozornost evropského a národního regulátora primárně zaměřena na přenosovou rychlost a na vliv odchylek na výkonovou složku přenosu.

Českým telekomunikačním úřadem bylo ve shodě s *Nařízením* vydáno *všeobecné oprávnění č. VO-S/1/08.2020-9* [31], jímž je definováno hodnocení parametrů týkajících se přenosové rychlosti a odchylek.

Národním regulátorem ČTÚ byly stanoveny čtyři parametry pro přenosové rychlosti, a to pro oba směry síťového přenosu – download a upload. Jak bylo uvedeno výše – viz podkapitola 1.3.3, je definována tzv. **minimální rychlost, maximální rychlost, běžně dostupná rychlost, inzerovaná rychlost**.

Kromě přenosové rychlosti byly ČTÚ zavedeny parametry pro posouzení výkonnostních přenosových parametrů v přístupových sítích. Výkonnostní parametry jsou nežádoucím způsobem ovlivňovány odchylkami, jejichž ukazatelé jsou přesně definovány ve výše uvedeném *oprávnění*. Konkrétně je rozlišována tzv. **velká trvajicí odchylka** a **velká opakující se odchylka**:

- **Velká trvajicí odchylka** – na rozdíl od běžné odchylky je za velkou trvajicí odchylku považován souvislý pokles výkonu služby přístupu k internetu, kdy je snížena běžná dostupná rychlost v časovém intervalu větším než 70 minut.
- **Velká opakující se odchylka** – jako velká opakující se odchylka je brána odchylka, při níž nastanou alespoň tři prokazatelné rychlostní poklesy oproti běžně dostupné rychlosti v časovém intervalu, jenž je větší nebo roven 3,5 minutám v časovém intervalu 90 minut.

Matematické definice jsou včetně stanovených parametrů pro službu přístupu k internetu v pevných sítích uvedeny v rámci dokumentu *všeobecné oprávnění č. VO-S/1/08.2020-9* jsou definovány v tomto *oprávnění* [31].

## 2 Služby streamování video obsahu v přístupové síti

Přístup uživatelské veřejnosti k médiím se obecně v současné době značně mění. Zájem mladé generace uživatelů se jednoznačně posouvá od tradičního pozemního televizního vysílání k internetovému streamovacímu vysílání prostřednictvím přístupových sítí. Stejně tak uživatelé středního věku čím dál tím více postupně přecházejí na tuto formu vysílání. Uplatňování tohoto nového přístupu je realizováno v režimu OTT (Over-the-top), jehož prostřednictvím je zajišťována dostupnost streamovacích služeb pro video obsah v přístupové síti. Tento současný trend má za následek významný nárůst nejrůznějších streamovacích služeb a logicky s sebou přináší zvýšené nároky na kvalitativní parametry přístupových sítí.

Velkou výhodou streamovacích platforem je vedle neomezené nabídky digitálních obsahů i ve své podstatě možnost jejich výběru dle individuálních osobních preferencí uživatele internetového připojení. Na straně uživatele je logicky očekáváno komfortní a spolehlivé uživatelské rozhraní, u něhož se nepředpokládají technické problémy a jež uživateli jednoduše umožňuje provést přerušování či odložení sledování vybraného video obsahu a zároveň mu nabízí možnost přepínat jednotlivé programy s video obsahy navzájem [38].

Streamovací platformy a služby v přístupové síti jsou ve většině případů z provozně technického hlediska provozovány v cloudovém prostředí. Cloudem tak byly poskytovatelům i uživatelům tohoto prostředí zpřístupněny nové formy využití streamovacích služeb prostřednictvím přístupové sítě, jejichž rozsah byl za poměrně krátké časové období významně navýšen.

Přemístěním lokálního záznamového úložiště do cloudového prostředí byly otevřeny nové možnosti vzdáleného přístupu prostřednictvím přístupových sítí, spočívající v neustále se zvyšující nabídce video a streamovacích služeb spolu s rostoucí četností samotných uživatelů. Toto současné vývojové specifikum lze demonstrovat na konkrétních příkladech, kdy společnosti Cisco bylo odhadováno očekávané navýšení transferu dat prostřednictvím IP protokolu na dvojnásobek objemu z roku 2021. Tento odhad byl naplněn. Ve studii Cisco [43] bylo dále na základě kvalifikovaného odhadu očekáván nárůst objemu gamingových neboli herních dat za posledních pět let devítinásobně, přičemž tímto objemem jsou zastoupena čtyři procenta celkového datového objemu [44].

Tyto výše uvedené konkrétní příklady svědčí o nutnosti vybudování zcela nových přístupových sítí či o nezbytném inovování stávajících přístupových a transportních vysokorychlostních sítí.

## 2.1 Prostupnost a kapacita přístupové sítě

V přístupové síti jsou v současnosti na straně uživatelů video služeb stále častěji uplatňovány služby VOD (Video on Demand) a taktéž je stále více uživateli požadováno přehrávání televizních pořadů z cloudového video archivu a videotéky. V období covidové pandemie a lockdownů bylo uživateli významným způsobem posíleno vlastní vyhledávání video streamovacích služeb. Aby v tomto nenadálém nárůstu během covidové pandemie některé streamovací společnosti byly vůbec schopny zajistit plynulé sledování vysílání video obsahu, bylo těmito společnostmi přistoupeno k opatření, jež spočívalo ve snížení kvality obrazu. Tím bylo zároveň dosaženo i potřebného snížení datové náročnosti video přenosu v přístupové síti [36].

Řadou poskytovatelů placených video služeb je uživatelům v současnosti předkládána nabídka, jejíž nedílnou součástí je možnost volby přerušování vysílaného video pořadu nebo umožnění prodloužení původního záznamu video pořadu či umožnění jeho opětovného přehrání, a to v individuálně zvoleném čase. Přechod nahrávání pořadů do cloudového prostředí a narůstající počet uživatelů streamovacích služeb v online režimu vede ve svém důsledku k vysokým nárokům na síťovou přístupovou infrastrukturu, a kvalita připojení se tak může stát omezujícím faktorem [44].

### 2.1.1 Změny v chování uživatelů přístupové sítě

Jak již bylo uvedeno výše, chování a nároky uživatelů přístupové sítě se neustále vyvíjejí. Na základě prováděných analýz a komparací uživatelských potřeb a požadavků lze stanovit hlavní vývojový trend. Na příkladu nárůstu přerušování sledování video obsahů lze dokumentovat skutečnou změnu ve způsobu sledování televize (pause-storm). K této situaci dochází ku příkladu při sledování sportovních pořadů – konkrétně různých sportovních utkání, v jejichž průběhu poměrně velký počet uživatelů coby diváků přepíná mezi aktuálně vysílaným sportovním utkáním (multicast stream) a uloženým záznamem pořadu (unicast stream) s využitím funkce time-shift a mezi živými neboli reálnými přenosy (např. periodicky se opakující standardní informační relace v pevně stanovených vysílacích časech versus zveřejnění aktuálních a mimořádných informací a zpráv při neočekávaných událostech apod.) [36].

### 2.1.2 Typy video přenosů v přístupové síti

K vysílání IPTV lze použít dvou různých typů přenosu, a to lineární přenos – Multicast a nelineární přenos – Unicast. Multicast představuje živý přenos všech obsahů (video streamu) až do posledního aktivního prvku sítě, jenž je schopen uživateli zpřístupnit tento obsah. Uživatel se připojuje k živě vysílanému video obsahu v přístupové síti. Streamovaný video obsah je u tohoto typu spojení přenášen pro všechny

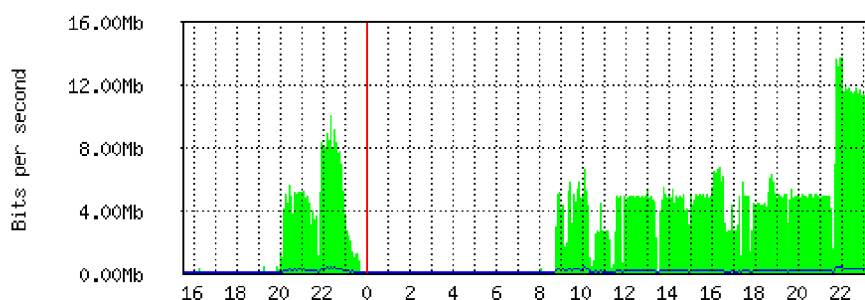
uživatele sítě pouze jedenkrát. V momentě, kdy je program šířen prostřednictvím IPTV na principu Multicastu, a v situaci, kdy je uživatelem byt jen na jednu sekundu přenos pozastaven, je realizován přenos obsahu pomocí typu Unicast. Tím se stane přenos unikátním, a musí tak být individuálně poslán přes celou síť [36].

Na jedné straně jsou uživatelé video služeb v přístupové síti neustále zvyšovány požadavky na obrazovou kvalitu, což na straně druhé u poskytovatele vede k rostoucím požadavkům na kapacitu přístupové sítě.

### 2.1.3 Datová náročnost streamovacích video služeb v přístupové síti

V rámci poskytování video služeb v přístupové síti, jež jsou nejčastěji využívány pro IPTV, je možno používat několik druhů datového profilu video přenosu.

Důležitou roli při poskytování video služeb v přístupové síti hraje kvalita přístupové sítě. Nejčastěji využívaným druhem datového profilu je v IPTV video streamování přenos v obrazovém rozlišení HD ready, přičemž jeden stream v rozlišení HD zabere minimálně 3 až 4 Mbit/s, pro rozlišení full HD rozlišení je to cca 5-6 Mbit/s a pro 4K UHD jde o minimálně 15 až 20 Mbit/s [41]. Jedná se o unicastovou službu pro kodeky video streamu H.264 a H.265. Pro vlastní realizaci možného sledování IPTV služby je nutno připojení s dlouhodobě stabilní rychlostí stahování dat, a to alespoň 10 Mbit/s [42]. Přenos datového toku v přístupové síti byl ověřen měřeními IPTV služby – viz obr. 2.1. Pro dobrý uživatelský zážitek je u koncového uživatele doporučeno připojení v přístupové síti o rychlosti stahování dat 30 Mbit/s. Takovou kapacitou je umožněno sledování video služeb v přístupové síti bez omezení i v HD rozlišení a taktéž využívání souběžně i více zařízení IPTV. Z důvodu dostatečné kapacity přístupové sítě je zároveň možno prohlížet webové stránky či stahovat velké datové soubory [38].



Obr. 2.1: Datový tok pro služby IPTV v obrazovém rozlišení HD (vlastní měření).

Při srovnání datových toků je nutno zohlednit nejen kvalitu streamovaného videa,

ale je zapotřebí vzít v úvahu i ostatní podpůrné streamy, jako jsou zvukové stopy, titulky a další obsah. Taktéž je nutno pracovat i s dalšími ukazateli, a to:

- U samotného video streamu je nutno dodržet chybovost pod  $5 \times 10^{-9}$ , nelze tedy přenášet čistý video stream, ale musí být nasazen nějaký samoopravitelný kód (Reed Solomon, FEC, LDPC apod. [45], čím je zvednuta datová náročnost na video [44];
- Rychlost video streamu se v čase výrazně mění. Například u sportovního video přenosu některé ukazatele, jako jsou např. rychlé pohyby, značné kontrasty, odlesky včetně přepojování mezi záběry jednotlivých kamer a záběry zblízka na pohybující se detaily, stupňují požadavky na bitový tok [44];
- Se streamovaným videem jsou přenášeny další informace – zvuky (stereo, vícejazyčný zvuk, ruchový zvukový kanál, Dolby zvukový kanál) a tyto zvuky rovněž potřebují příslušný datový tok – několik stovek kbit/s [44];
- Se streamovaným videem jsou přenášeny taktéž informace jako teletext, EPG (Elektronický programový průvodce) a různé další informace typu ochrana autorských práv, původ videa atd. [44];
- Oproti vysílání v programových multiplexech DVB (Digital Video Broadcasting) u kteréhokoli typu DVB nelze v případě přenosu v IPTV snížit bitové toky pomocí statistického multiplexu, kdy je streamovaný video datový tok jednotlivých programů dynamicky poskytován dalším programům, jež v tom daném okamžiku mají „převis“ poptávky nad nabídkou (sportovní kanál dostane vyšší datový tok na úkor filmového programu). To nelze uplatnit u streamovaného video přenosu typu Unicast [44];

Pro plnohodnotné streamované video H.264, MPEG-4 AVC (1920×1080×25) s prokládaným řádkováním je vhodné alokovat cca 6–10 Mbit/s [45], [44].

### **2.1.4 Vliv degradace parametrů přenosového média v přístupové síti**

V návaznosti na výše indikovaný významný nárůst rychlosti připojení (download i upload) a neustálé navyšování objemu stažených dat na uživatele je zřejmé, že do budoucna je zapotřebí investovat zejména do technologií, jež mohou nabízet vysokou kapacitu připojení. Z tohoto pohledu se tak jako nejvhodnější řešení jeví technologie FTTB/FTTH, jež se vyznačují navíc symetričností (tj. umožňují stejné rychlosti jak ve směru download – k uživateli, tak ve směru upload – od uživatele). Z hlediska dlouhodobého vývoje jsou rychlosti FTTB/FTTH sítí prakticky neomezeny [48].

U dalších sledovaných řešení pro přístupové sítě existují z pohledu dosahovaných rychlostí různá omezení. Např. sítěmi xDSL jsou využívány existující telefonní metalické rozvody, u nichž je zásadním problémem omezená šířka pásma. Maximální

dosažitelné rychlosti jsou nižší, navíc značně klesají se vzdáleností od centrálního uzlu [46]. V České republice je realizována modernizace přístupových sítí s využitím principu telefonních rozvodů pomocí vectoringu. Tento princip je využíván pro potlačení přeslechů na přenosovém vedení [47],[48]. Maximálnímu zrychlení přenosových rychlostí po metalickém přenosovém vedení se věnují další výzkumné týmy [49].

Bezdrátovými sítěmi – FWA (Fixed Wireless Access), jež jsou provozovány v nelicencovaných pásmech, jsou vykazována omezení zejména z hlediska nedostatku šířky volného pásma. U bezdrátových sítí dochází k degradaci přenosových parametrů z důvodu vzniku interferencí s jinými uživateli radiového pásma. Využití této technologie tedy dává smysl především v nejmenších sídelních jednotkách s malým počtem přípojných bodů [48], [50]. U bezdrátových sítí provozovaných v licencovaných pásmech není výrazně ohrožena kvalita spojení, tyto sítě jsou legislativně chráněny proti škodlivému rušení [48].





## 3 Matematické metody použité pro zpracování dat z přístupové sítě

V této kapitole je uveden přehled matematických metod používaných v disertační práci pro účely vytvoření matematického modelu intenzity provozu přístupových sítí. Jedná se o obecně známé a používané metody. Cílem této kapitoly je uvedení používaných metod do obecného rámce a tematického kontextu překládané práce a taktéž sjednocení použité terminologie včetně značení.

### 3.1 Aproximace měřených dat

Aproximace měřených dat pomocí matematické funkce slouží pro snadnější analýzu chování sledovaných veličin. Obecně je využívána pro modelování a predikci chování těchto veličin. V práci je využíváno aproximací měřených dat pomocí polynomiálních funkcí pro konstrukci modelu síťového provozu. Polynom neboli mnohočlen stupně  $n$  je funkce tvaru 3.1.

$$P(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_0 \quad (3.1)$$

Je-li zapotřebí zdůraznit, že polynom představuje stupeň  $n$ , je nutno provést zápis  $P_n(x)$ . Vedle polynomiálních funkcí je možno pro aproximaci použít i další typy funkcí. Polynomiální funkce je zvolena pro snadnost její aplikovatelnosti pro výpočty funkce [51].

Pro nalezení polynomiální funkce, jíž je co nejlépe vystiženo chování měřené veličiny, je možno uplatnit několik možných postupů. Jedná se o metody aproximační nebo interpolační. Aproximační metoda spočívá v tom, že je zvolen stupeň polynomu a jsou hledány koeficienty polynomu, kterými je minimalizován součet odchylek hodnot polynomu od měřených hodnot. Interpolační metody jsou založeny na hledání polynomu nejmenšího možného stupně, a to takového, jehož hodnoty polynomu v zadaných bodech se rovnají měřeným hodnotám. Jednotlivé metody, jež jsou použity, nebo o jejichž použití bylo uvažováno v disertační práci, jsou připomenuty v následujících podkapitolách [52].

Interpolační polynomy se sestávají z podobného základu jako Fourierova transformace. V práci jsou však interpolační polynomy využívány jiným způsobem.

Množinou funkcí  $f(x)$ , které splňují rovnici 3.2, je tvořen lineární prostor;  $w(x) > 0$  je tzv. váhová funkce, často je používána i konstantní váhová funkce  $w(x) = 1$ . Tento prostor je značen  $L_{(w)}^2(a, b)$ .

$$\int_a^b w(x)f^2(x) dx < \infty \quad (3.2)$$

Předpisem 3.3 je definován skalární součin v lineárním prostoru  $L^2_{(w)}(a, b)$ . Pokud  $\langle f, g \rangle = 0$ , lze říci, že vektory  $f$  a  $g$  jsou ortogonální.

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b w(x)f(x)g(x) dx \quad (3.3)$$

Spočteným systémem funkcí navzájem ortogonálních funkcí  $g_i$ , tj. funkcí vyhovujících rovnici 3.1, je tvořena báze prostoru  $L^2_{(w)}(a, b)$ . Prvky prostoru  $f \in L^2_{(w)}(a, b)$  je pak možno vyjádřit jako lineární kombinaci bázevých vektorů pomocí vztahu 3.5

$$\int_a^b w(x)g_i(x)g_j(x) dx = \begin{cases} 0, & \text{pokud } i \neq j \\ 1, & \text{pokud } i = j \end{cases} \quad (3.4)$$

$$f = \int_a^b w(x)c_i g_i(x) dx, \text{ kde } c_i = \langle f, g_i \rangle \quad (3.5)$$

Např. pro  $\langle a, b \rangle = \langle 0, 2\pi \rangle$ ,  $w(x) = 1$  a  $g_i = 0, \sin(ix), \cos(ix)$  je získán známý Fourierův rozvoj funkce  $f$ .

Jinou vhodnou variantou báze prostoru  $L^2_{(w)}(a, b)$  jsou systémy polynomů. Pro různé váhové funkce  $w(x)$  a definiční intervaly funkcí  $\langle a, b \rangle$  existují známé systémy ortogonálních interpolačních polynomů popsané v následujících podkapitolách. Empiricky zjištěná závislost objemu přenášených dat na denní době bude aproximována pomocí lineární kombinace konečného počtu interpolačních polynomů [53]. Zde je využito skutečnosti, že lineární kombinace konečného počtu polynomů je opět polynom. Tj. empiricky zjištěnou distribuci  $D(t)$  objemu přenášených dat bude možno aproximovat polynomem 3.6.

$$D(t) = \sum_{i=0}^n P_i(t) = P_D(t) \quad (3.6)$$

Stupeň polynomu  $P_D(t)$  je dán počtem uzlových bodů použitých pro konstrukci příslušné interpolace a je předmětem zkoumání disertační práce. Interpolační polynomy v tomto případě nejsou používány pro jejich dobré vlastnosti v oblasti výpočtu derivací a integrálů [53], nýbrž z toho důvodu, že existují známé algoritmy konstrukce těchto interpolačních polynomů a tyto algoritmy jsou implementovány v prostředí R [70].

### 3.1.1 Lagrangeovy polynomy

Lagrangeův interpolační polynom je jedním ze základních způsobů interpolace funkce zadané pouze v diskrétních bodech [54]. Je-li dáno  $n + 1$  bodů  $x_i$ , ve kterých hledaná funkce nabývá hodnot  $f_i$ , je možno tuto funkci aproximovat polynomem  $L(x)$  definovaným rovnicí 3.7.

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i)l_i(x) \quad , \quad (3.7)$$

kde  $l_i(x)$  jsou Lagrangeovy polynomy definované vztahem 3.8.

$$l_i(x) = \prod_{0 \leq k \leq n, k \neq i} \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \quad (3.8)$$

### 3.1.2 Čebyševovy polynomy

Jedny z nejpřesnějších interpolačních polynomů, jež jsou často využívány pro aproximaci funkcí, jsou Čebyševovy polynomy [53]. Čebyševovy polynomy stupně  $n$  jsou definovány vztahem 3.9. Je možné je konstruovat pomocí rekurentního vztahu 3.10. Čebyševovy polynomy jsou ortogonální na intervalu  $\langle -1, 1 \rangle$  s váhovou funkcí  $w(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ .

$$C e_n(x) = \cos(n \cdot \arccos(x)) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} C e_0(x) &= 1 \\ C e_1(x) &= x \\ C e_n(x) &= \frac{2n-1}{n} L e_{n-1}(x) - \frac{n-1}{n} L e_{n-2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

### 3.1.3 Legendrovy polynomy

Jedním z významných systémů ortogonálních polynomů používaných v numerické matematice, a to zejména pro numerické integrování, jsou Legendrovy polynomy. Tyto polynomy byly definovány francouzským matematikem Adrienem-Marie Legendrem při studiu potenciálu bodového elektrického náboje. Již dlouhou dobu jsou předmětem zájmu matematiků a je známa celá řada jejich vlastností užitečných především pro numerický výpočet integrálů [54]. Legendrovy polynomy jsou ortogonální na intervalu  $\langle -1, 1 \rangle$  s váhovou funkcí  $w(x) = 1$ . Je možno je konstruovat pomocí rekurentních vztahů 3.11.

$$\begin{aligned}
Le_0(x) &= 1 \\
Le_1(x) &= x \\
Le_n(x) &= \frac{2n-1}{n}Le_{n-1}(x) - \frac{n-1}{n}Le_{n-2}
\end{aligned} \tag{3.11}$$

### 3.1.4 Laguerrovy polynomy

Dalším příkladem ortogonálních polynomů jsou Laguerrovy polynomy. Jedná se o polynomy ortogonální na intervalu  $\langle 0, \infty \rangle$  s váhovou funkcí  $w(x) = e^{-x}$ . Laguerrovy polynomy jsou definovány vztahem 3.12 a je možné je konstruovat rekurentním vztahem 3.13. Jsou pojmenovány po Edmondovi Laguerrovi a jsou používány zejména v kvantové mechanice [54].

$$\begin{aligned}
La_0(x) &= 1 \\
La_n(x) &= e^x \frac{d^n}{dx^n} \left( \frac{x^n}{e^x} \right)
\end{aligned} \tag{3.12}$$

$$La_n(x) = (2n-1)xLa_{n-1}(x) - (n+1)^2La_{n-2}(x) \tag{3.13}$$

### 3.1.5 Hermiteovy polynomy

Posledním běžně používaným systémem ortogonálních polynomů, jsou Hermiteovy polynomy pojmenované po francouzském matematikovi Charlesi Hermiteovi. Jde o polynomy, které jsou ortogonální na intervalu  $\langle -\infty, \infty \rangle$  s váhovou funkcí  $w(x) = e^{-x^2}$ . Jsou definovány vztahem 3.14 a pro jejich konstrukci je možno použít rekurentní vztah 3.15. Hermiteovy polynomy jsou používány zejména v oblastech stochastických dějů a zpracování signálů [54].

$$He_0(x) = e^{x^2} \frac{d^n}{dx^n} \left( \frac{(-1)^n}{e^{x^2}} \right) \tag{3.14}$$

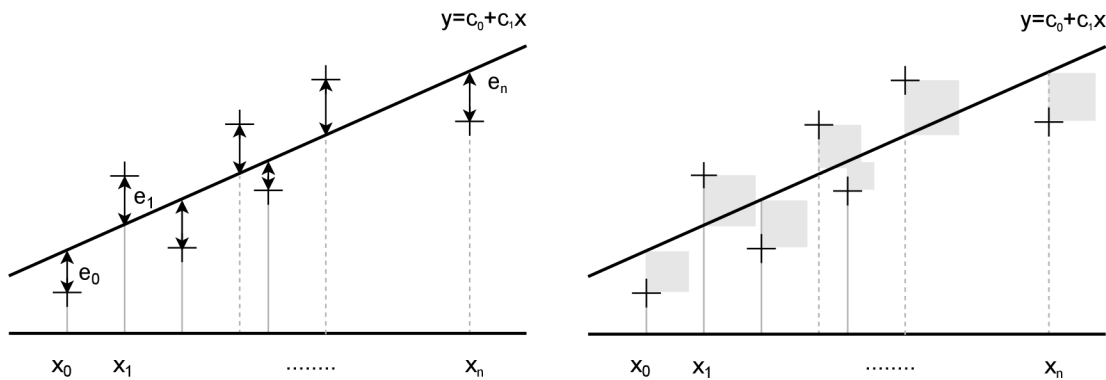
$$\begin{aligned}
He_{-1}(x) &= 0 \\
He_0(x) &= 1 \\
He_{n+1}(x) &= 2xHe_n(x) - 2nHe_{n-1}(x)
\end{aligned} \tag{3.15}$$

## 3.2 Aproximace polynomem daného stupně

Pro aproximaci polynomem předem zadaného stupně je nejčastěji používána metoda nejmenších čtverců. S nejjednodušší aplikací metody nejmenších čtverců je možno se setkat například při prokládání neboli aproximaci naměřených jednorozměrných dat parametrickou funkcí daného typu, např. přímkou, parabolou, polynomem předem daného stupně, nebo obecnou lineární kombinací předem daných básových funkcí. Proložení dat polynomem libovolného, ale předem daného, stupně je stále lineární regresí, neboť pro nalezení koeficientů tohoto polynomu vede řešení soustavy lineárních rovnic [53]. Metoda nejmenších čtverců má velmi mnoho dalších aplikací v nejširším okruhu vědních oborů, v nichž je možno se setkávat s nepřesnými daty, tj. od statistiky a ekonomie přes geodézii až po zpracování signálů a teorii řízení [53].

Pro množinu dvojic  $[x_0, y_0], [x_1, y_1], \dots, [x_k, y_k]$  výsledků měření závislosti proměnné  $y$  na proměnné  $x$  je hledána funkce  $f(x)$  předem daného typu, jež tuto závislost co nejlépe popisuje. Funkce  $f(x)$  je závislá na množině koeficientů  $a_0, a_1, \dots, a_k$ , které jsou hledány tak, aby byly minimalizovány odchylky  $|y_i - f(x_i)|$ . To znamená, že je hledáno minimum chybové funkce  $E$  definované vztahem 3.16. Princip této metody je doložen na obrázku 3.1.

$$E = \sum_{i=0}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (3.16)$$



Obr. 3.1: Grafické znázornění principu výpočtu metody nejmenších čtverců.

Pro popis závislosti relativního objemu provozu na denní době je hledána funkce tvaru polynomu předem daného stupně, tj. funkce tvaru 3.1. Je tedy hledána sestava koeficientů  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , jež minimalizuje chybovou funkci  $E$  tvaru 3.17.

$$E = \sum_{i=0}^n (y_i - P(x_i))^2 \quad (3.17)$$

Hledané koeficienty jsou řešením soustavy rovnic 3.18, což je v případě polynomu možno vyjádřit soustavou lineárních rovnic 3.19. Pro řešení této soustavy rovnic byl využit volně dostupný nástroj R [70].

$$\frac{\partial f}{\partial a_i} = 0 \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n 2(y_i - a_0 - a_1x - \dots - a_kx^k)(-1) &= 0 \\ \sum_{i=0}^n 2(y_i - a_0 - a_1x - \dots - a_kx^k)(-x_i) &= 0 \\ &\dots \\ \sum_{i=0}^n 2(y_i - a_0 - a_1x - \dots - a_kx^k)(-x_i^k) &= 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

### 3.2.1 Měření kvality aproximace

Pro měření kvality aproximace jsou využívány postupy podobné metodě nejmenších čtverců. V tomto případě je měřena průměrná vzdálenost hodnot aproximační funkce od exaktních měřených hodnot, nebo hodnot aproximované funkce. Běžně je používána jedna z následujících metod [54]:

- MSE – střední kvadratická chyba – odpovídá rozptylu;
- RMSE – odpovídá směrodatné odchylce;
- MAE – střední absolutní chyba.

Střední kvadratická chyba je v matematické statistice veličina vyjadřující přesnost odhadů pomocí střední hodnoty druhých mocnin rozdílů mezi odhadem či měřením a skutečností. MSE odpovídá rozptylu náhodné veličiny. Druhá mocnina je použita zejména z toho důvodu, že nezávisí na tom, zda je odchylka odhadu od skutečnosti kladná či záporná. Matematicky je MSE vyjádřena vztahem 3.20.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i - f(x_i))^2 \quad (3.20)$$

kde:

$y_i$  – je hodnota sledované veličiny v bodě  $x_i$ ,

$f(x_i)$  – je hodnota aproximační funkce v bodě  $x_i$  a

$n$  – je celkový počet pozorování klasifikovaný systémem.

Střední kvadratickou chybu není možno přímo srovnávat se sledovanou veličinou, a počítat tak například relativní chybu aproximace [54]. Z tohoto důvodu pro tento

účel je pro měření kvality aproximace používána odmocněná střední kvadratická chyba – Root Mean Square Error – RMSE. RMSE je obdoba směrodatné odchylky ve statistice. Matematicky je RMSE vyjádřena vztahem 3.21.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (y_i - f(x_i))^2} \quad (3.21)$$

kde:

$y_i$  – je hodnota sledované veličiny v bodě  $x_i$ ,

$f(x_i)$  – je hodnota aproximační funkce v bodě  $x_i$  a

$n$  – je celkový počet pozorování klasifikovaný systémem.

Další možností jak zajistit, že se odchylky v kladném a záporném směru nebudou vzájemně kompenzovat, je použít absolutní hodnotu rozdílu  $y_i - f(x_i)$ . Tento model výpočtu chyby je označován jako střední absolutní odchylka – Mean Absolute Error = MAE [54]. Matematicky je MAE vyjádřena vztahem 3.22.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y_i - f(x_i)| \quad (3.22)$$

kde:

$y_i$  – je hodnota sledované veličiny v bodě  $x_i$ ,

$f(x_i)$  – je hodnota aproximační funkce v bodě  $x_i$  a

$n$  – je celkový počet pozorování klasifikovaný systémem.

V disertační práci je používána pro porovnání kvality aproximace RMSE, neboť v tomto případě má smysl počítat i relativní chybu aproximace [54], která je definována vztahem 3.23.

$$\text{RelativeRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n f(x_i)} \quad (3.23)$$

kde:

$f(x_i)$  – je hodnota aproximační funkce v bodě  $x_i$  a

$n$  – je celkový počet pozorování klasifikovaný systémem.

## 3.3 Statistické metody a postupy

Statistika jako matematická disciplína se zabývá sběrem, prezentací, analýzou a interpretací dat o jevech hromadné povahy. Pod termínem data jsou rozuměny údaje, jež jsou využívány k popisu jevů, stavů nebo vlastností pozorovaných objektů a je možno je získat měřením nebo pozorováním [51], [56].

Obecně lze statistické metody rozdělit na tři základní složky:

- **Popisná statistika** – slouží k popisu zejména kvantitativních parametrů zkoumaného souboru dat, jako jsou zejména charakteristiky polohy a variability dat.
- **Inferenční statistika** – vyhledává závislosti a zákonitosti ve zkoumaných datech. Pomocí inferenční statistiky lze provést odhady nebo předpovědi pro celek jako takový.
- **Teorie pravděpodobnosti** – poskytuje teoretický základ pro matematickou statistiku. Definuje klíčové charakteristiky tzv. náhodných veličin, jimž odpovídají příslušné empirické charakteristiky měřených nebo pozorovaných souborů dat.

V následujících podkapitolách bude podán stručný vhled do některých statistických pracovních metod a postupů, jež jsou v odborné praxi často uplatňovány.

### 3.3.1 Teorie pravděpodobnosti

Základním pojmem teorie pravděpodobnosti je tzv. náhodný jev. Náhodný jev si je možné představit jako výsledek realizace určitého souboru podmínek, tzv. náhodného pokusu. Jeho důležitým rysem je fakt, že může, ale nemusí nastat. Důležitými vlastnostmi náhodného pokusu jsou neměnnost, opakovatelnost a rozpoznatelnost. Míra možnosti nastoupení náhodného jevu je číselně vyjadřována v podobě reálného čísla z intervalu  $< 0, 1 >$  a je označována jako pravděpodobnost. Náhodný jev, jehož pravděpodobnost je rovna 1 je nazýván jevem jistým, náhodný jev, jehož pravděpodobnost výskytu je rovna 0, je označován jako jev nemožný. Důležitým pojmem je pojem nezávislosti dvou náhodných jevů. Dva náhodné jevy jsou nezávislé, pokud nástupem jednoho z nich není ovlivňována pravděpodobnost druhého jevu. Pravděpodobnost společného nastoupení dvou nezávislých náhodných jevů je představena součinem jejich pravděpodobností. [55]

V mnoha případech je možné výsledek náhodného pokusu ohodnotit číslem. Např. počet cestujících v autobuse, nebo počet IP paketů přenesených ve sledované síti mezi 8:05 a 8:07 ráno. Proměnná, jež takovému náhodnému pokusu přiřazuje příslušnou číselnou hodnotu, je potom nazývána **náhodnou veličinou**. Náhodná veličina může nabývat buďto jen konečný počet hodnot (počet cestujících v auto-



buse), v tom případě je uvažováno o diskrétní náhodné veličině, nebo nekonečně mnoho hodnot z předem známého souvislého intervalu – potom se hovoří o spojitě náhodné veličině.

Diskrétní náhodná veličina je popisována pomocí pravděpodobnostní funkce, jež definuje pravděpodobnost  $P(x) = p$ , že sledovaná náhodná veličina  $X$  nabývá hodnoty  $x$ .

U spojitých náhodných veličin by tato charakteristika neměla smysl, neboť pravděpodobnost, že náhodná veličina  $X$  nabývá právě hodnoty  $x$  je rovna nule. Spojitou náhodnou veličinu tak lze charakterizovat pomocí distribuční funkce  $F(x) = P(X < x)$ , jež vyjadřuje pravděpodobnost, že sledovaná náhodná veličina  $X$  nabývá hodnoty menší než  $x$ . Z praktických důvodů spojitá náhodná veličina je charakterizována nikoli pomocí její distribuční funkce, nýbrž pomocí tzv. hustoty pravděpodobnosti  $f(x)$ , pro kterou platí  $F(x) = \int_{-\infty}^x f(t)dt$ .

## Rozdělení pravděpodobnosti

Předpis, kterým je každé přípustné hodnotě diskrétní náhodné veličiny nebo intervalu hodnot spojitě náhodné veličiny přiřazena pravděpodobnost, se nazývá rozdělení pravděpodobnosti. [51].

Existuje mnoho různých typů rozdělení pravděpodobnosti, nejběžnější rozdělení pravděpodobnosti diskrétních náhodných veličin jsou [56]:

- **Binomické rozdělení** – je používáno pro popis počtu úspěchů v určitém počtu nezávislých pokusů s dvěma výsledky (úspěch nebo neúspěch). Každý pokus má konstantní pravděpodobnost úspěchu. Např. hod mincí.
- **Multinomické rozdělení** – je používáno pro popis četnosti výskytu dvou či více jevů při realizaci  $N$  nezávislých pokusů. Každý jev má konstantní pravděpodobnost výskytu  $p_i$ , přičemž součet všech  $p_i$  musí být 1. Příkladem je hrací kostka.
- **Poissonovo rozdělení** – je užíváno pro modelování počtu řídkých událostí, jež nastávají v určitém intervalu času. Je charakterizováno jediným parametrem, a to průměrnou intenzitou událostí. Příkladem je třeba počet zákazníků ve frontě u pokladny v obchodě.

U spojitých náhodných veličin jsou nejdůležitější tato rozdělení pravděpodobnosti:

- **Rovnoměrné rozdělení** – všechny hodnoty vykazují stejnou pravděpodobnost výskytu. Jako příklad lze uvést chybu při zaokrouhlování.
- **Normální rozdělení, taktéž Gaussovo rozdělení** – je jedním z nejdůležitějších pravděpodobnostních rozdělení. Má symetrický tvar a je charakterizováno střední hodnotou (průměrem) a směrodatnou odchylkou. Mnoho

přirozených jevů, jako jsou např. chyby měření, je aproximováno normálním rozdělením. Za určitých podmínek dobře aproximuje řada jiných rozdělení, i když v praxi je málokteré rozdělení přesně normální.

- **Exponenciální rozdělení** – je uplatňováno pro popis doby mezi dvěma řídkými událostmi či jevy v časovém období. Často se používá v analýze životnosti technologických zařízení. V praxi bývá svázáno s odpovídajícím jevem s Poissonovým rozdělením pravděpodobností se stejným parametrem. Typicky např. počet výpadků napájení aktivního síťového prvku za jednotku času má Poissonovo rozdělení pravděpodobnosti a doba mezi těmito výpadky vykazuje exponenciální rozdělení pravděpodobnosti se stejným parametrem.

Existuje řada dalších typů diskrétních i spojitých rozdělení pravděpodobnosti (hypergeometrické, Weibullovo, gamma, Pearsonovo  $\chi^2$ , Studentovo, Fisher-Snedecorovo a další). Některá z těchto rozdělení popisují konkrétní typy náhodných jevů vyskytujících se v praxi, některá, jako např. Pearsonovo  $\chi^2$ , jsou používána ve statistice pro rozhodnutí, zda zkoumaná množina dat odpovídá dané distribuční funkci. [56].

### 3.3.2 Číselné charakteristiky náhodných veličin

Rozdělení pravděpodobnosti poskytuje jednoznačný popis chování náhodné veličiny, v praxi však není dostatečně přehledné. Proto jsou zaváděny jednodušší číselné charakteristiky, jež poskytují základní hrubou představu o náhodné veličině. Jsou to zejména charakteristiky polohy a charakteristiky variability náhodné veličiny.

Klíčovou charakteristikou polohy je střední hodnota náhodné veličiny. Je to nejvíce "očekávaná" hodnota této veličiny. V případě diskrétní náhodné veličiny je střední hodnota definována jako  $E(X) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i x_i$ . V případě spojitě náhodné veličiny je střední hodnota vymezena jako  $E(X) = \int_{\mathbb{R}} x f(x) dx$ .

Další charakteristikou polohy, jež je hojně využívána zejména u diskrétních náhodných veličin v různých demografických analýzách, je medián. Jedná se o takovou hodnotu náhodné veličiny, která dělí řadu vzestupně seřazených hodnot náhodné veličiny na dvě stejně početné poloviny. V případě spojitě náhodné veličiny je medián definován jako hodnota  $M$ , pro kterou platí  $\int_{-\infty}^M f(x) dx = 1/2$ .

Jako charakteristiky míry variability se používají variační rozpětí, rozptyl a směrodatná odchylka.

Variační rozpětí je statistická charakteristika, kterou je vyjádřena míra variability statistického souboru. Obyčejně se značí písmenem  $R$ . Je to rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou kvantitativního znaku, neboli  $R = X_{max} - X_{min}$ . Variační rozpětí je velmi přibližnou charakteristikou variability hodnot sledované numerické proměnné, neboť je příliš ovlivněno velikostí extrémních hodnot, jež mohou být mnohdy odlehlými pozorováními.

Rozptyl, nebo též střední kvadratická odchylka, vyjadřuje variabilitu rozložení hodnot náhodné veličiny kolem její střední hodnoty.  $D(X) = E(X - E(X))^2$ . Pro praktické použití se používá spíše směrodatná odchylka, což je druhá odmocnina rozptylu. Směrodatná odchylka má stejnou jednotku, jako vykazuje sledovaná veličina.

### 3.3.3 Popisná neboli deskriptivní statistika

Popisná statistika se zabývá popisem stavu nebo vývoje hromadných jevů, jež vykazují vliv náhody. Zahrnuje získávání a analýzu kvantitativních vlastností souboru informací, jehož výsledkem je číselný popis studovaného jevu.

K charakteristikám, jež jsou běžně používány k popisu souboru údajů, patří charakteristiky polohy a charakteristiky variability. Tyto (empirické) charakteristiky odpovídají teoretickým K charakteristikám polohy a variability uvedeným v předchozí podkapitole.

Jako charakteristika odpovídající střední hodnotě se využívá výběrový (aritmetický) průměr, charakteristika variability odpovídající směrodatné odchylce je výběrová směrodatná odchylka konstruovaná stejným způsobem, jako je směrodatná odchylka v případě teorie pravděpodobnosti. Variační rozpětí odpovídá intervalu od nejmenší do největší hodnoty zkoumaných dat [51], [56].

### 3.3.4 Inferenční neboli induktivní statistika

Inferenční statistika slouží k vyhledávání zákonitostí v analyzovaných datech. Cílem statistické inference je určit věrohodný statistický model pro popis mechanismu vzniku analyzovaných dat. Inferenční statistika zahrnuje zejména odhad parametrů modelu, testování, zda analyzovaný datový soubor je realizací náhodné veličiny očekávaného rozdělení pravděpodobností, a testování statistických hypotéz. Tyto komponenty jsou ožřejmeny v následujícím textu podkapitoly.

#### Korelace

Korelace je na rozhraní popisné a inferenční statistiky. Jde o míru lineárního vztahu mezi dvěma proměnnými, tj. náhodnými veličinami. Míra lineárního vztahu náhodných veličin  $X$  a  $Y$  je vyjádřena korelačním koeficientem, jenž je definován vztahem:

$$X, Y = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{(X - E(X))^2} \sqrt{(Y - E(Y))}} \quad (3.24)$$

Hodnota korelačního koeficientu se pohybuje od -1 do +1. Korelační koeficient blízký -1 znamená silný negativní lineární vztah, korelační koeficient blízký +1 znamená silný pozitivní lineární vztah. Korelační koeficient blízký nule vyjadřuje, že mezi proměnnými není silný lineární vztah [56]. Korelace nevyjadřuje kauzalitu, ale pouze indikuje, že jsou zkoumané proměnné statisticky spojeny [51].

## Regresní analýza

Regresní analýza slouží pro zkoumání závislosti proměnných, které jsou zpravidla výsledkem nějakého experimentu. Závislou proměnnou  $Y$  je možno vysvětlit pomocí nezávislé proměnné  $X$ , případně vektoru nezávisle proměnných  $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_k)$ . Tato závislost je hledána ve tvaru

$$y = \phi(\mathbf{x}), \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k \quad (3.25)$$

kde:

$y$  je konkrétní hodnota proměnné  $Y$  pro  $\mathbf{X} = \mathbf{x}$  a  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  jsou hledané koeficienty.

Koeficienty  $\mathbf{X} = \mathbf{x}$  a  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  jsou hledány minimalizací tzv. reziduálního součtu čtverců

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - \phi(\mathbf{x}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)]^2 \quad (3.26)$$

kde:

$n$  je počet naměřených hodnot proměnné  $Y$ .

V praxi se nejvíce používá tzv. lineární regresní model, kdy funkce  $\phi(\mathbf{x}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$  je hledána ve tvaru

$$\phi(\mathbf{x}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) = \sum_{i=1}^k \beta_i f_i(x) \quad (3.27)$$

kde:

$f_i(x)$  jsou známé regresní funkce nezávislé na regresních koeficientech  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ . Hledaná regresní funkce je tak lineární vzhledem k regresním koeficientům.

## Testování hypotéz

V technické praxi je často zapotřebí rozhodnout, zda daný soubor dat je výběrem z daného typu rozdělení, případně nalézt parametry tohoto rozdělení, popř. ověřit jinou hypotézu o vlastnostech analyzovaných dat. Touto problematikou se zabývá část matematické statistiky, jež se nazývá testování hypotéz.

Statistická hypotéza  $H$  je tvrzení o vlastnostech rozdělení pravděpodobnosti sledované náhodné veličiny  $X$  s distribuční funkcí  $F(x, \theta)$ . Platnost této hypotézy je ověřována postupem obecně nazývaným test statistické hypotézy. Neexistuje matematický postup, jenž jednoznačně prokáže platnost či neplatnost hypotézy  $H$ . Test statistické hypotézy tuto hypotézu zamítne či nezamítne na předem stanovené hladině významnosti  $\alpha$ .

Proti testované hypotéze  $H$ , jež je nazývána též nulová hypotéza, je stavěna alternativní hypotéza  $\bar{H}$ . Pro testování hypotézy  $H$  o náhodné veličině  $X$  je konstruována vhodná statistika  $T(X)$ , jež je nazývána testovým kritériem. Obor hodnot testového kritéria se za předpokladu, že platí hypotéza  $H$ , rozdělí na dva intervaly: kritický obor  $W$  a jeho doplněk  $\bar{W}_\alpha$ . Kritický obor se stanoví tak, aby pravděpodobnost toho, že testové kritérium nabude hodnoty z intervalu  $W$  byla rovna  $\alpha$ . Hladina významnosti  $\alpha$  je volena zpravidla 0,05 nebo 0,01.

Rozhodnutí o hypotéze  $H$  na základě pozorování náhodné veličiny  $X$  je potom provedeno tímto způsobem: pokud hodnota testového kritéria  $t = T(x)$  pozorovaného statistického souboru  $x$  padne do kritického oboru, t.j.  $t \in W_\alpha$ , je zamítána hypotéza  $H$  a zároveň není zamítána alternativní hypotéza  $\bar{H}$  na hladině významnosti  $\alpha$ . Nezamítnutí hypotézy neznamená prokázání její platnosti, je tím vyjádřeno pouze to, že není dostatek podkladů k jejímu zamítnutí.

Při testování hypotéz můžou nastat čtyři varianty:

- je nezamítnuta platná hypotéza  $H$  – tato situace je v pořádku;
- je zamítnuta neplatná hypotéza  $H$  – tato situace je v pořádku;
- chyba prvního druhu - je zamítnuta platná hypotéza  $H$ . Pravděpodobnost výskytu této chyby je rovna hladině významnosti  $\alpha$
- chyba druhého druhu - není zamítnuta neplatná hypotéza  $H$ . Pravděpodobnost výskytu této chyby je  $\beta = P(T \notin W_\alpha | \bar{H})$ , tj. pravděpodobnost, že hodnota testového kritéria nepadne do kritického oboru  $W_\alpha$  za podmínky, že hypotéza  $H$  platí. Hodnota  $1 - \beta$  je nazývána silou testu.

Jestliže hypotéza  $H$  závisí na hodnotě parametru  $\theta$ , hovoří se o tzv. parametrických testech.

### Parametrické statistické metody – odhady parametrů

U parametrických metod se předpokládá, že data pocházejí z určitého známého pravděpodobnostního rozdělení, obvykle z normálního rozdělení. [56].

Úkolem použitého testu hypotézy je nejen potvrdit příslušnou hypotézu, ale i nalézt příslušný parametr (vektor parametrů)  $\theta$ .

Příklady parametrických metod zahrnují:

- **T-test** – je používán pro srovnání průměrů dvou skupin.
- **Analýza rozptylu – ANOVA** – používá se pro srovnání průměrů více než dvou skupin.
- **Lineární regrese** – je využívána pro modelování vztahu mezi dvěma nebo více proměnnými.

### **Neparametrické statistické metody**

Neparametrické metody nekladou žádné předpoklady o rozdělení dat a často se používají, když data nejsou normálně distribuována nebo jsou ve skutečnosti kategoriální (nominální nebo ordinální) [51].

Neparametrické metody jsou méně citlivé na porušení předpokladů o rozdělení dat, což je jejich hlavní výhoda. Na druhou stranu mohou být méně silné než parametrické metody, pokud jsou předpoklady splněny a data skutečně pocházejí z určitého parametrického rozdělení [56].

Příklady neparametrických metod zahrnují:

- **Mann-Whitney U test** – používá se pro srovnání mediánů dvou skupin.
- **Kruskal-Wallis test** – je využíván pro srovnání mediánů více než dvou skupin.
- **Spearmanova korelace** – je používána pro měření korelace mezi dvěma proměnnými, jež nejsou normálně distribuované.

Většina z popisovaných statistických nástrojů předpokládá dostatečně početný statistický soubor. Pod pojmem dostatečně početný statistický soubor je míněno zpravidla minimálně 30–40 pozorování, ale v některých případech i minimálně stovky pozorování. V případě řešení disertačního úkolu, a to v analýze a vyhodnocení dat získaných dlouhodobým měřením v přístupové síti jsou k dispozici data za časový interval, jenž se rovná období půl roku. Pro každý den v týdnu po dobu půl roku je tak k dispozici 26 záznamů, což je mírně pod hranicí doporučené velikosti statistického souboru. Z tohoto důvodu byly pro analýzu získaných dat použity metody numerické matematiky.

## 4 Zaměření a cíle disertační práce

V rámci předchozí teoretické části disertační práce byla analyzována teoretická východiska jako nezbytný výchozí bod vědeckého bádání na dané téma. Nejprve byl stručně podán vhléd 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 měřících a testovacích metod přenosových parametrů dle *ISO/OSI*, dle *RFC 2544*, *ITU-T Y.1564b* – *Ethernet SAM* a taktéž podle *RFC 6349* a dle *Narřízení Evropského parlamentu a Rady EU 2015/2120*. Krátce byly popsány služby streamování video obsahu v přístupové síti, zvláště pak problematika prostupnosti a kapacity 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 a 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. Nyní je možno kvalifikovaně stanovit hlavní cíl disertační práce a cíle parciální.

Tato kapitola je klíčová pro celou disertační práci, poněvadž je v ní nejprve na základě popsaných teoretických východisek a současného stavu poznání stručně vymezeno zaměření disertační práce a poté jsou v tomto kontextu formulovány hlavní cíl a z něj vyplývající cíle parciální tak, aby bylo možno v navazujících kapitolách postupně navrhnout a rozpracovat jejich vhodná řešení. To znamená, aby byly následně prezentovány a diskutovány konkrétní zvolené postupy, jak dosáhnout úspěšného řešení hlavního cíle i cílů parciálních, aby byla specifikována možná úskalí a problémy, na něž je při řešení stanovených cílů nutno brát zřetel.

Po provedení analýzy naměřených dat v dlouhodobém časovém intervalu v reálné přístupové síti je nyní možno stanovit hlavní cíl disertační práce – 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 telekomu-

nikáčních 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 disertační práci bude při řešení těchto disertačních 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 na fáze a cíle procesu dle *ITU-T E.600*. 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.



## 5 Vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě

Poskytovatelé 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.

Poskytovatelé 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 [1]. Více k problematice regulace je uvedeno v kapitole 1.3. 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. [9].

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)* [28], *ITU (ITU-T Y.1731)* [30] nebo *IETF (RFC 2544)* [25], *IETF (RFC 6349)* [29]. 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.

## 5.1 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 [57].

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 přesměřován 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 [61].

Pro obsluhu a pro potřebný výpočet hlasových telekomunikačních služeb jsou

využívány modely, jež vycházejí z Erlangových vzorců 5.2.1, a taktéž metoda označovaná jako Call-seconds (CCS) 5.2.2.

## 5.2 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**. [58].

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 5.1 a pomocí vzorce – viz níže: [58]

$$A = C \cdot T \quad (5.1)$$

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 5.1 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 hovorů 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 Krapupem Erlangem, jenž se řadí k inovátorům v oborech jako je matematika, teorie dopravního inženýrství, zejména pak problematika řazení do front. [59]

### 5.2.1 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 [61].

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 5.2.

$$P_b = B(E, m) = \frac{\frac{E^m}{m!}}{\sum_{i=0}^m \frac{E^i}{i!}} \quad (5.2)$$

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 5.3.

$$P_w = \frac{\frac{E^m}{m!} \frac{m}{m-E}}{\left(\sum_{i=0}^{m-1} \frac{E^i}{i!}\right) + \frac{E^m}{m!} \frac{m}{m-E}} \quad (5.3)$$

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 [60],[61].

## 5.2.2 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 uživatelích. 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 [62].

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 [63].

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.

## 5.3 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 intenzita 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 intenzitu provozu TCP/IP sítí možno vyjádřit jako poměr mezi průměrnou vytížeností 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 [64] a mohou být využívány různé metody výpočtu. Jejich stručná charakteristika je provedena níže.

### **5.3.1 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 čtvrtodín pro všechny dotčené dny s výběrem maximálních 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. [64]

### **5.3.2 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

čtvrthodin, 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 výhodou metody ADPH spočívá v průběžném získávání reprezentativnější hodnoty v situaci nestabilních provozních profilů. [64]

### 5.3.3 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. Nevýhodou 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 [64].

V IP síti je intenzita provozu definována vztahem:

$$\rho = \frac{a \cdot L}{R} \quad (5.4)$$

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.

## 5.4 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.

### 5.4.1 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. [66].
- **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 pře-



vládajícimu 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 [66].

- **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 [66].
- **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, jež je vybrán z možných alternativních postupů. Optimalizací je realizováno použití vhodných technik a postupů, jimiž je zajišťováno řízení poskytovaného provozu sítě, nebo je jimi managováno 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 [66].

#### 5.4.2 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 pro-

vozními změnami v sítích.

V tomto doporučení jsou formulovány definice a termíny pro použití v oblasti TE, jenž 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 [65].

## 6 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* [64] a *ITU-T E.600* [65]. Filozofie návrhu vychází taktéž z Average Daily Peak Hour – ADPH a Time-Consistent Busy Hour – TCBH, jimž byla věnována pozornost v podkapitole 5.3.

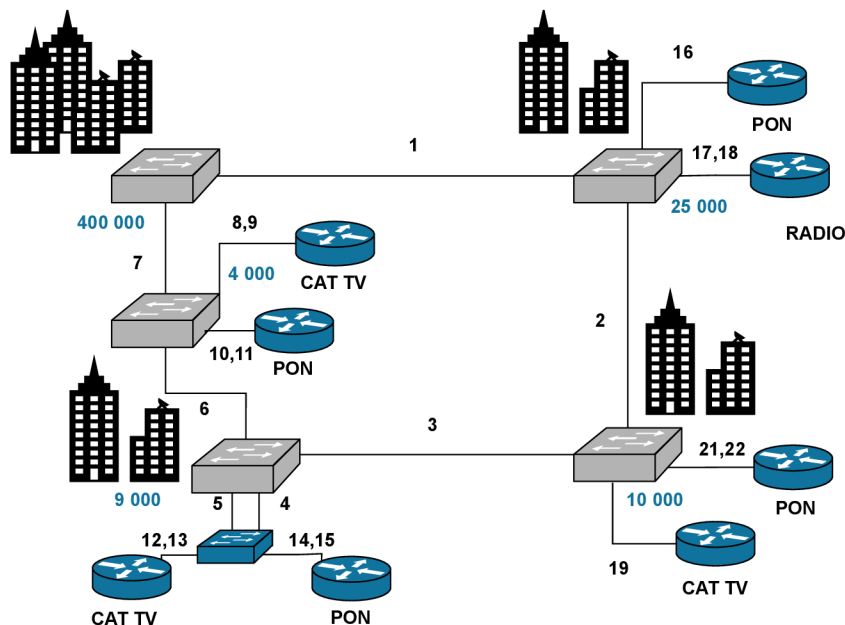
Dále je zapotřebí vzít v úvahu skutečnost, že v případě datové komunikace nelze využít všechny principy, jež jsou běžně aplikovány v klasickém telefonním provozu. Termíny jako počet připojení a doba připojení nenabývají v přístupových IP sítích takového významu, tj. nenaplňují roli klíčových identifikátorů.

Pro konstrukci metrik vycházejících z ADPH a TCBH [68], [69] 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.

### 6.1 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 6.1 a počet přípojek podle jednotlivých technologií je uveden v grafu na obrázku 6.2. Přehled jednotlivých rozhraní, jež jsou použity pro analýzu datového provozu, je uveden v tabulce 6.1.

Sběr provozních údajů sítě byl prováděn na síťových rozhraních v jednotlivých



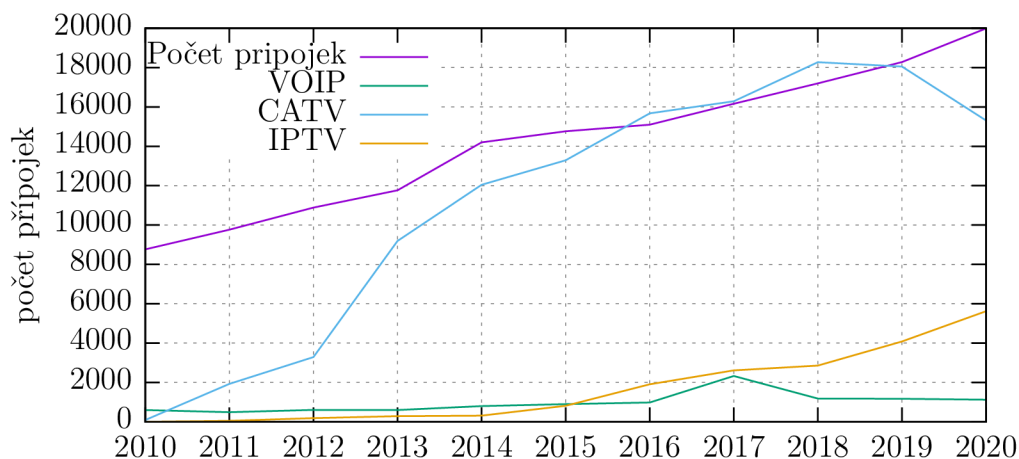
Obr. 6.1: Blokové schéma analyzované topologie sítě s velmi vysokou kapacitou – VHCN.

segmentech sítě 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 míli používána pasivní optická síť a bezdrátové rádiové systémy. Na obrázku 6.1 je zobrazena topologie měřené sítě.

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.

### 6.1.1 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



Obr. 6.2: Složení dle typů služeb v přístupové síti.

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 problematiku ukazatele části

Tab. 6.1: Rozpis použitých rozhraní v analyzované přístupové síti.

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

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.

## 6.2 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 6.1.

$$y_i = \frac{Y_i}{\sum_{i=1}^{96} Y_i} \quad (6.1)$$

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

6.2, kde váhová funkce  $w_j$  nabývá postupně hodnot 0, 1; 0, 2; 0, 4; 0, 2; 0, 1.

$$x_i = \sum_{j=i-2}^{i+2} w_j y_j \quad (6.2)$$

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 6.2. 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.

Tab. 6.2: 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

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 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.

### 6.2.1 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 6.3. 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 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 6.4 pro kompenzace hodnot pro přechod z příslušného časového pásma do letního času.

Tab. 6.3: Kompenzace hodnot pro návrat z letního času do příslušného časového pásma.

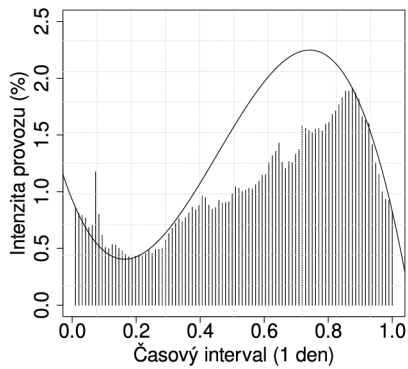
Časový interval	Aplikované data	Popis
2:00 - 2:15	2:00 - 2:15	Zpracované hodnoty ze záznamu
2:15 - 2:30	2:15 - 2:30	Zpracované hodnoty ze záznamu
2:30 - 2:45	-	Odstranění hodnoty ze záznamu
2:45 - 3:00	-	Odstranění hodnoty ze záznamu
2:00 - 2:15	-	Odstranění hodnoty ze záznamu
2:15 - 2:30	-	Odstranění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

Tab. 6.4: Kompenzace hodnot pro přechod z příslušného časového pásma do letního času.

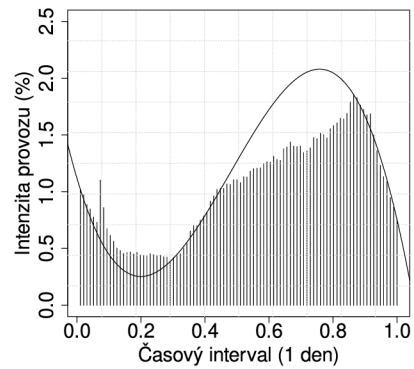
Časový interval	Aplikované data	Popis
1:45 - 2:00	1:45 - 2:00	Zpracované hodnoty ze záznamu
2:00 - 2:15	1:45 - 2:00	Substituce z předchozího záznamu
2:15 - 2:30	1:45 - 2:00	Substituce z předchozího záznamu
2:30 - 2:45	3:00 - 3:15	Substituce z následujícího záznamu
2:45 - 3:00	3:00 - 3:15	Substituce z 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 6.3a a 6.3b.

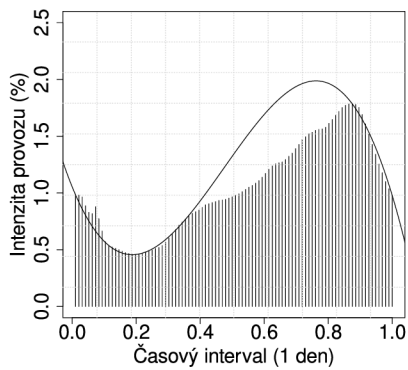


(a) Pracovní den (pondělí)

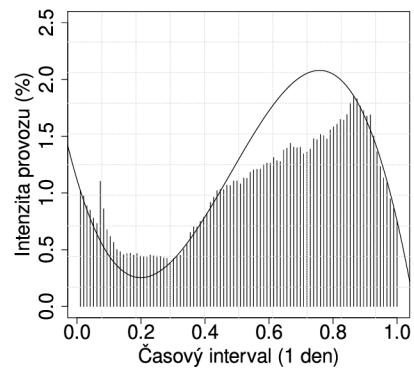


(b) Víkendový den (neděle)

Obr. 6.3: Vyhledávání bodů polynomů denního datového provozu v pracovních a ve víkendových dnech na portu 10 v PON síti pomocí numerických metod.



(a) Pracovní dny



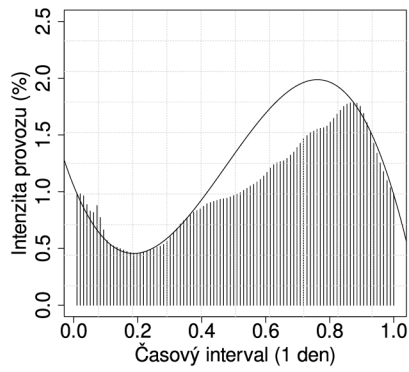
(b) Víkendové dny

Obr. 6.4: Vyhledávání bodů polynomů denního datového provozu v pracovních a ve víkendových dnech na portu 10 v PON síti pomocí numerických metod.

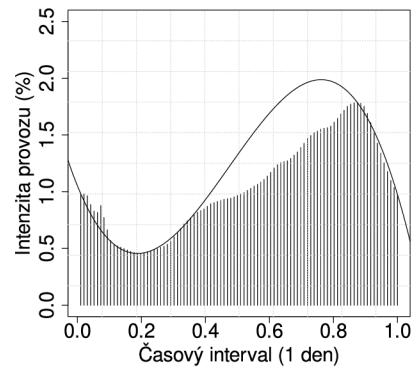
### 6.3 Matematický model profilu datového provozu přístupové sítě

Pro vytvoření matematického modelu profilu datového provozu byl použit softwarový statistický nástroj Projekt R [70]. 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.

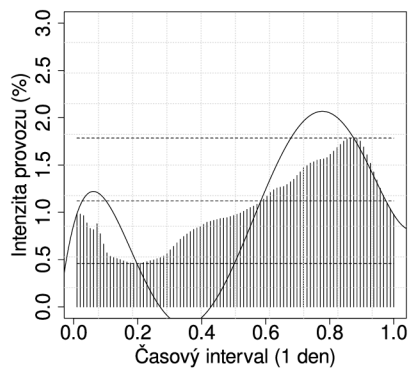
Denní doba je rozdělena na posloupnost 96 časových intervalů o délce 15 minut



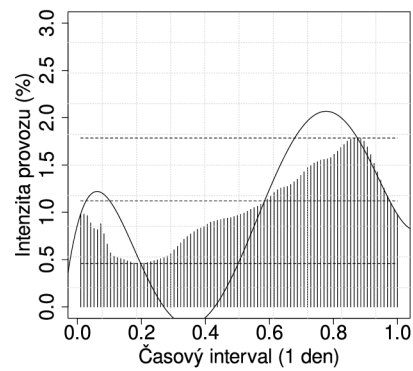
(a) P0 IN



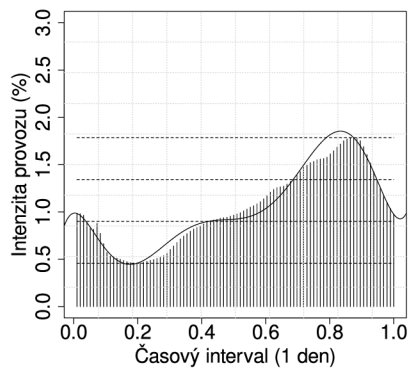
(b) P0 OUT



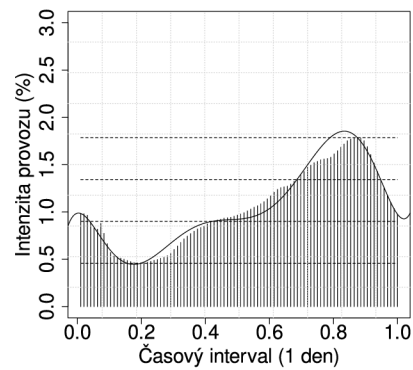
(c) P1 IN



(d) P1 OUT



(e) P2 IN



(f) P2 OUT

Obr. 6.5: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy P0, P1 a P2.

$T_1 = \langle 00 : 00 - 00 : 15 \rangle$ ,  $T_2 = \langle 00 : 15 - 00 : 30 \rangle$ , ...,  $T_{96} = \langle 23 : 45 - 00 : 00 \rangle$ . 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 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 6.3, 6.4 a 6.5.

Výběrová směrodatná odchylka:

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \sum (x_i - X_i)^2} \quad (6.3)$$

Relativní odchylka:

$$r_i = \frac{s_i}{X_i} \quad (6.4)$$

Průměrný relativní objem datového provozu v intervalu  $T_i$ :

$$X_i = \frac{1}{n_i} \sum x_i \quad (6.5)$$

kde:

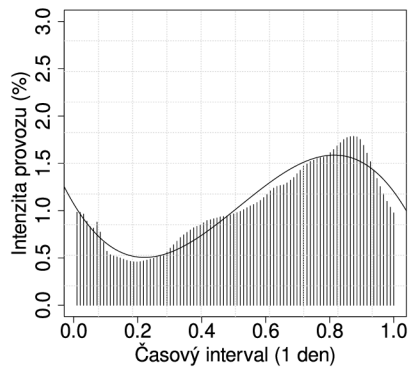
$n_i$  – počet měření v intervalu  $i$ ,

$x_i$  - relativní objem provozu v intervalu  $T_i$ .

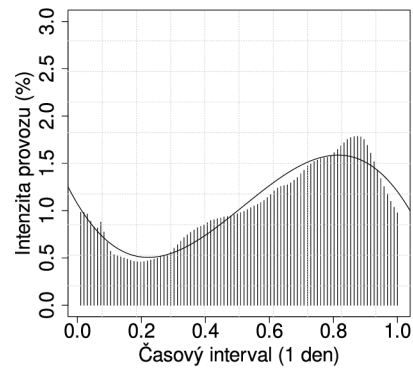
Tyto statistiky jsou uvedeny v příloze B. Při analýze objemu datového provozu nebyly zohledněny státní svátky a významné dny, zejména pak svátky připadající na první či poslední pracovní den týdne, jež jsou v práci souhrnně označovány jako prodloužený víkend. Při podrobné analýze objemu datového provozu 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 6.5 pro pracovní dny.

### 6.3.1 Aproximace pomocí Lagrangeových polynomů

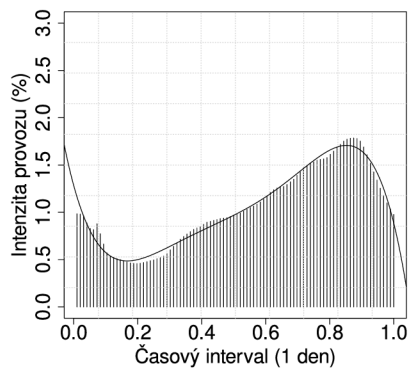
Pro aproximaci funkce pomocí Lagrangeova polynomu je třeba stanovit množinu tzv. uzlových bodů, tj. množinu dvojic  $(t_i, x_i)$ , v nichž bude hodnota Lagrangeova polynomu  $P_K$  dosahovat přesné hodnoty aproximované funkce, tedy  $P_K(t_i) = x_i$ . Stupeň polynomu  $K$  je v tomto případě určen počtem uzlových bodů. Jako vhodné



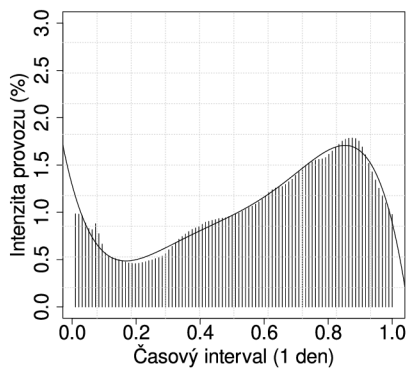
(a) PS3 IN



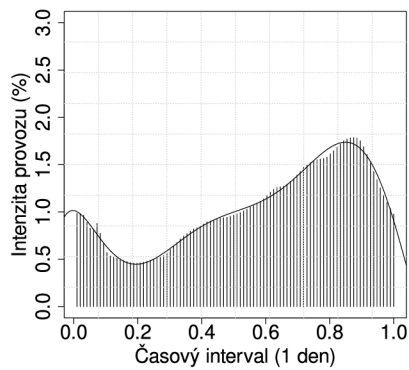
(b) PS3 OUT



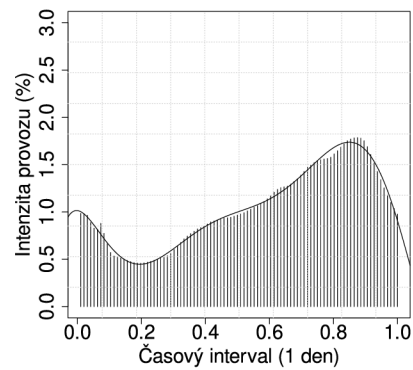
(c) PS5 IN



(d) PS5 OUT



(e) PS7 IN



(f) PS7 OUT

Obr. 6.6: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy PS3, PS5 a PS7.

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  $\langle x_{i_1}, \dots, x_{i_{k-1}} \rangle$
- 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 6.6. 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 [71], 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 6.6a, 6.6c a 6.6e.

Aproximační polynomy získané výše uvedenými metodami pro jednotlivé typy přístupových sítí jsou uvedeny v příloze A.1, A.3 a A.5.

Tab. 6.5: 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 6.6, 6.8, 6.10 a víkendové 6.7, 6.9, 6.11 dny.

Tab. 6.6: 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. 6.7: 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. 6.8: 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. 6.9: 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. 6.10: 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. 6.11: 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	$0.5188911 + 12.18892 * x - 277.193 * x^2 + 1801.502 * x^3 - 5122.769 * x^4 + 7292.195 * x^5 - 5105.66 * x^6 + 1400.101 * x^7$

### 6.3.2 Analýza kvality aproximace

Pro všechny aproximační polynomy zkonstruované v kapitolách 6.3 a 6.3.1 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. Výsledné hodnoty RMSE pro všechny typy polynomů jsou uvedeny v tabulkách A.7, A.11 a A.15.

Tab. 6.12: Analýza aproximačních polynomů portu 10 v přístupové síti PON – výpis polynomů.

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
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 6.13, síť PON 6.17 a pro síť rádiové 6.21.

Tab. 6.13: Analýza aproximačních polynomů pro přístupové sítě 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. 6.17: Analýza aproximačních polynomů pro přístupové sítě PON.

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.03506391	7	0.03424031	7	0.06288095	7	0.04580523

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

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

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

Tab. 6.21: Analýza aproximačních polynomů pro rádiové přístupové sítě.

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

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
PS7	7	0.0966361	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 6.23. Hodnoty RMSE těchto polynomů a rozdíl hodnot RMSE těchto polynomů a polynomů konstruovaných „na míru“ jednotlivým přístupovým sítím je v tabulkách 6.24, 6.25 a 6.26.

Tab. 6.23: 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. 6.24: Analýza aproximačních polynomů společných pro sítě CATV.

Port	Směr	Den	RMSE pol. PS7	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. 6.25: Analýza aproximačních polynomů společných pro síť 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. 6.26: Analýza aproximačních polynomů společných pro rádiové přístupové síť.

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



## 7 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* [64], 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 (viz příloha A a B), 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* [28]. 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 7.1, 7.3 a pro víkendové dny 7.2, 7.4.

Tab. 7.1: 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. 7.2: 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. 7.3: 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. 7.4: 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	13.6177
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 7.1 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**.

## 7.1 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 nejvhodnější 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 7.1.

$$\int_0^1 P(x) dx \approx 1 \quad (7.1)$$

Pro zjednodušení zápisu bude dále místo symbolu  $\approx$  používán symbol  $=$ . Časový interval  $\langle t_1, t_2 \rangle$ , v němž se přenesou  $V_{10} = 10\%$  objemu provozu, je hledán pomocí vztahu 7.2. Obdobně lze postupovat při výpočtu jiných hodnot relativního objemu

dat  $V_{25} = 25 \%$ ,  $V_{50} = 50 \%$ .

$$\int_{t_1}^{t_2} P(x)dx = 0,1 \quad (7.2)$$

Tento interval je minimální, pokud  $T_{max} \in \langle t_1, t_2 \rangle$ , kde  $T_{max}$  je časový interval, v němž se přenesou největší relativní objem dat. Pro relativní objem intenzity provozu  $V_r = r$  je možno interval  $\langle t_1, t_2 \rangle$  najít pomocí vztahů 7.3.

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_2} P(x)dx &= r \\ P(t_1) &= P(t_2) \\ T_{max} &\in \langle t_1, t_2 \rangle \end{aligned} \quad (7.3)$$

Pro menší hodnoty relativního objemu intenzity přenesených dat  $V_r$  lze vztahy 7.3 pro výpočet nejkratšího časového intervalu, v němž se přenesou  $r \%$  objemu dat s dostatečnou přesností, nahradit vztahem 7.4, který je vhodnější pro praktický výpočet.

$$\int_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} P(x)dx = r \quad (7.4)$$

Podobným způsobem lze nalézt maximální časový interval  $\langle T_1, T_2 \rangle$ , v němž se přenesou  $r \%$  objemu dat pomocí vztahu 7.5, kde  $T_{min}$  je časový interval, ve kterém je přenesen největší relativní objem dat.

$$\int_{T_{min}-t}^{T_{min}+t} P(x)dx = r \quad (7.5)$$

Pro výpočet hodnoty  $t$ , z níž jsou následně určeny hodnoty  $t_1$  a  $t_2$ , jsou použity známé vztahy 7.6.

$$\begin{aligned}
\int_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} P(x)dx &= \int_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} \sum_{i=0}^7 a_i x^i dx \\
&= \left[ \sum_{i=0}^7 \frac{a_i}{i+1} x^{i+1} \right]_{T_{max}-t}^{T_{max}+t} \\
&= \sum_{i=0}^7 \frac{a_i}{i+1} \left[ (T_{max}+t)^{i+1} - (T_{max}-t)^{i+1} \right]
\end{aligned} \tag{7.6}$$

Hodnota  $t$  je pak získána řešením rovnice 7.7. Rovnice 7.7 obecně nemá analytické řešení a je třeba ji řešit numerickými metodami.

$$\sum_{i=0}^7 \frac{a_i}{i+1} \left[ (T_{max}+t)^{i+1} - (T_{max}-t)^{i+1} \right] = r \tag{7.7}$$

Pro řešení rovnice 7.7 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* [21].

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. Tyto hodnoty, jež

odpovídají charakteru rozložení objemu provozu během dne, jsou zachyceny graficky v přílohách B.

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 nejméně do hodnoty přibližně 10 %.

Intervaly HT10, HT25, LT10 a LT05 pro stanovení intenzity různých typů přístupových sítí jsou shrnuty v tabulkách 7.5 – 7.9.

Tab. 7.5: 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. 7.7: 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. 7.9: 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 7.5 – 7.9 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 v přílohách B 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.



## 8 Shrnutí výsledků disertační práce

Po teoretickém vhledu do stavu poznání v oblasti přístupové sítě, služeb streamování video obsahu v přístupové sítě a po provedení základní charakteristiky matematických metod použitých pro zpracování dat z přístupové sítě byl ve čtvrté kapitole formulován hlavní cíl práce spolu s cíli parciálními.

V této osmé kapitole bude přistoupeno k diskusi o splnění hlavního cíle i cílů parciálních. Kapitulu je možno považovat za nosnou část celé disertační práce, poněvadž jsou v ní vedle vyhodnocení naplnění hlavního cíle a z něj vyplývajících cílů parciálních diskutovány taktéž 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. Zároveň je vhodné shrnujícím způsobem na tomto místě upozornit i na možné problémy, na něž bylo při řešení stanovených cílů nutno brát zřetel a jež bude 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 sítě, 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 8.1, návrh doporučených metrik pro stanovení hlavní provozní hodiny v přístupové sítě pak v podkapitole 8.2. 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 práce.
- Realizovat rozbor stávajících řešení pro provoz hlasového provozu v telekomunikačních sítích dle jednotlivých metod – parciálního cíle bylo dosaženo, o čemž svědčí pátá kapitola v této disertační práci.
- 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 v šesté kapitole práce.
- 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 sedmá a tato osmá kapitola v praktické části disertační práce.
- Sestavit metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě – tento parciální cíl byl úspěšně splněn, jak je doloženo v sedmé kapitole práce.
- Ověřit sestavené metriky pro určení provozního profilu přístupové sítě pomocí výpočtů a jednotlivých dílčích zpracování – ověření sestavené metriky bylo provedeno v podkapitole 8.2 – 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 v šesté kapitole a v příloze A a B v předkládané disertační práci.

Na závěr je zapotřebí zdůraznit skutečnost, že navržený funkční matematický model pro vyhodnocování datového provozního profilu přístupové sítě na základě kritéria intenzita 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.

## **8.1 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 vyrovňování 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 vyrovňovány

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 víkend, 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.

## **8.2 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 disertační práce

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 osmé kapitole disertační práce. V uvedené 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.

Všechny stanovené parciální cíle byly splněny – viz výše osmá kapitola.

Předkládaná disertační práce se sestává z teoretické a praktické části. Teoretická část práce je tvořena prvními třemi kapitolami, jež se soustředily na stav současného poznání dané oblasti. V jejich rámci byla nejprve 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. Taktéž byly stručně představeny matematické metody, jež byly použity pro zpracování dat z přístupové sítě. V kon-

textu těchto matematických metod byla charakterizována aproximace měřených dat prostřednictvím vybraných konkrétních polynomů, aproximace polynomem daného stupně a taktéž bylo provedeno měření kvality aproximace. Postupně pak bylo přistoupeno ke stručnému popisu statistických metod, postupů a statistických termínů jako je teorie pravděpodobnosti, číselná charakteristika náhodných veličin, popisná neboli deskriptivní statistika, inferenční neboli induktivní statistika, a to včetně popisu regrese, korelace a testování hypotéz. V závěru této teoretické části předkládané disertační práce je formulováno zdůvodnění, proč byly pro analýzu a vyhodnocování dat z přístupové sítě získaných během opakovaných dlouhodobých měření v časovém intervalu půl roku nakonec zvoleny metody numerické matematiky.

V praktické části, jež představuje stěžejní jádro disertační práce, bylo nejdříve vymezeno zaměření, hlavní cíl a parciální cíle disertační práce. Následně bylo provedeno vyhodnocování a modelování dat z přístupové sítě. Byl uskutečněn rozbor stávajícího způsobu měření a vyhodnocování hlasového telefonního provozu v přístupových sítích. Dále bylo přistoupeno k provedení komparace jednotlivých v provozu dlouhodobě ověřených typů měření a používaných modelů pro vyhodnocování intenzity hlasového provozu. Poté byla realizována 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. Dále 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 užití metody vyrovnání časových změn v přístupové síti. Poté byl v praktické části 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 v sedmé kapitole, jež zároveň tvoří jeden z praktických výstupů. Na ni navazuje poslední, tj. osmá, kapitola praktické části, 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. Procedury pro zpracování vstupních dat, tj. matematické zpracování dat a výpočet hlavní provozní hodiny a provozního

sedla, a výsledky a výstupy zpracovaných dat jsou k dispozici v přílohách. V závěru disertační práce jsou formulována zjištění a doporučení pro další praxi a případné vědecké aktivity. Tyto aktivity a navazující odborná práce autora budou implementovat nabyté poznatky, dosažené výsledky a získané zkušenosti do odborných aktivit zaměřených na sestavování funkčních modelů intenzity datového provozu pro další typy komunikačních sítí.

Na úplný závěr předkládané disertační práce 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 5.2. Pro tyto hlasové služby byly stručně popsány jednotlivé metody vyhodnocování, a to včetně specifikace pro výpočet telefonního provozu – viz podkapitola 5.3. 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 (podrobněji viz sedmá kapitola) odpovídající doporučení *ITU-T E.500* vycházejí z analýzy datového provozu konkrétního poskytovatele internetových služeb po dobu šesti měsíců, tj. za časové období půl roku. Prostřednictvím analyzovaných přístupových sítí jsou připojovány rezidenční oblasti, jež jsou poplatné chování uživatelů daného demo-

grafického 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.

## Literatura

- [1] 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>>.
- [2] 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>>.
- [3] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *Y.2001: General overview of NGN Network Working Group* [online]. 2004 [cit. 23. 9. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2001>>.
- [4] International Telecommunication Union *Infrastructure sharing and co-deployment in Europe: good practices based on collaborative regulation*[online]. ITU, 2020 [cit. 23. 9. 2022], Dostupné z URL:<[https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2020/RRF/20-12-21%20Background%20Paper\\_Infrastructure%20sharing%20and%20co-deployment%20in%20Europe\\_final\\_v2\\_%28clean%29.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Events/2020/RRF/20-12-21%20Background%20Paper_Infrastructure%20sharing%20and%20co-deployment%20in%20Europe_final_v2_%28clean%29.pdf)>.
- [5] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky *I. výzva Digitální vysokokapacitní sítě z komponenty 1.3 Národního plánu obnovy*[online]. MPO, 2022 [cit. 23. 9. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.mpo.cz/cz/podnikani/narodni-plan-obnovy/vyzvy/i--vyzva-digitalni-vysokokapacitni-site-z-komponenty-1-3-narodniho-planu-obnovy--267008/>>.
- [6] European Commission - Digital Strategy *Connectivity for a European Gigabit Society*[online]. EC EU, 2021 [cit. 11. 10. 2022], Dostupné z URL:<<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/connectivity-european-gigabit-society-brochure>>.
- [7] International Telecommunication Union *Establishing or Strengthening National Broadband Mapping Systems*[online]. ITU, 2022 [cit. 11. 10. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Europe/Documents/Publications/2022/ITU%20Guidelines%20to%20establish%20broadband%20mapping.pdf>>.

- [8] FILKA, Miloslav a kol., *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno 2009. ISBN: 978-80-86785-14-1*, 462 stran. Praha: Profiber, 2017.
- [9] 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>>.
- [10] The Digital Europe Programme *The Digital Europe Programme (DIGITAL)*[online]. EC EU, 2021 [cit. 25.10.2022], Dostupné z URL:<<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme>>.
- [11] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky *Národní plán rozvoje sítí s velmi vysokou kapacitou*[online]. MPO ČR, 2021 [cit. 14.11.2022], Dostupné z URL:<<https://www.mpo.cz/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/narodni-plan-rozvoje-siti-s-velmi-vysokou-kapacitou--259858/>>.
- [12] The International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector *Study Group 3 - Over-the-Top Communications*[online]. 2020 [cit. 14.11.2022], Dostupné z URL:<<https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2013-2016/03/Pages/ott.aspx>>.
- [13] Český telekomunikační úřad: *Výroční zpráva Českého telekomunikačního úřadu za rok 2021*[online]. Služby vysokorychlostního přístupu k internetu v pevném místě, [cit. 14.11.2022]. Dostupné z URL:<<https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah/stranky/424163/soubory/vyrocnizpravaceskehoatelekomunikacnihouraduzarok2021.pdf>>.
- [14] Český telekomunikační úřad: *Počet širokopásmových přístupů k síti Internet* [online]. Počet širokopásmových přístupů k síti Internet podle jednotlivých technologií. [cit. 14.11.2022]. Dostupné z URL:<<https://data.ctu.cz/dataset/pocet-sirokopasmovych-pristupu-k-siti-internet>>.
- [15] European Commission *Broadband Coverage in Europe in 2020*[online]. [cit. 23.11.2022], Dostupné z URL:<<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi-connectivity>>.
- [16] BEREC - Body of European Regulators for Electronic Communications *BEREC Guidelines on Regulation (EU) 2022/612 and Commission Implementing Regulation (EU) 2016/2286 (Retail Roaming Guidelines)*[online]. BEREC,

- 2022 [cit. 23. 11. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.berec.europa.eu/en/document-categories/berec/regulatory-best-practices/guidelines>>.
- [17] Official Journal of the European Union *DIRECTIVE (EU) 2018/1972 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 establishing the European Electronic Communications Code*[online]. EECC, 2018 [cit. 29. 11. 2022], Dostupné z URL:<<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L1972>>.
- [18] KECHICHE Sylwia - A Gigabit Society Requires a Data-Driven Regulatory Approach *Key Takeaways From Ookla's Southeastern Europe Regulatory Summit*[online]. Ookla, 2022 [cit. 29. 11. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.ookla.com/articles/southeastern-europe-regulatory-gigabit-5g-fibre-performance-digital-divide-q4-2022>>.
- [19] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky *Národní plán rozvoje sítí s velmi vysokou kapacitou* Národní plán rozvoje sítí NGA[online]. 2022 [cit. 29. 11. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.mpo.cz/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/narodni-plan-rozvoje-siti-s-velmi-vysokou-kapacitou--259858/>>.
- [20] *SHAPING POLICIES TO SUPPORT INVESTMENT IN VERY HIGH CAPACITY NETWORKS* Frontier Economics Ltd,[online]. 2021 [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<[https://www.etno.eu/downloads/reports/frontier%20economics%20report\\_investment%20in%20vhcn\\_january%202022.pdf](https://www.etno.eu/downloads/reports/frontier%20economics%20report_investment%20in%20vhcn_january%202022.pdf)>.
- [21] 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/?>>.
- [22] Mapa internetu *Pokrytí ČR sítěmi elektronických komunikací umožňující přístup v pevném místě*[online]. [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.mapainternetu.cz/>>.
- [23] IKKI, Salama a Mohamed H. AHMED *Performance Analysis of Dual-Hop Relaying Communications Over Generalized Gamma Fading Channels*. In *IEEE GLOBECOM 2007* IEEE Global Telecommunications Conference. [online]. IEEE. [cit. 15. 12. 2022], ISBN 978-1-4244-1042-2. Dostupné z URL:<<https://doi.org/10.1109/glocom.2007.739>>.

- [24] LAFATA, Pavel a Jiří VODRÁŽKA, *Optické přístupové sítě a přípojky FTTx*. Praha 2014. ISBN 978-800-1054-635,[online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2014.
- [25] 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>>.
- [26] Metro Ethernet Forum (MEF) *Implementation Agreement MEF 23.1 Carrier Ethernet Class of Service*[online]. 2012 [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<[https://mef.net/Assets/Technical\\_Specifications/PDF/MEF\\_23.1.pdf](https://mef.net/Assets/Technical_Specifications/PDF/MEF_23.1.pdf)>.
- [27] VODRÁŽKA, Jiří a Petr JAREŠ *Testování nové generace internetových přípojek (NGA)*[online]. [cit. 15. 12. 2022], Dostupné z URL:<<https://www.vovcr.cz/odz/tech/521/page00.html>>.
- [28] 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>>.
- [29] 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>>.
- [30] 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>>.
- [31] Český telekomunikační úřad *Narižením 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](https://www.ctu.cz/sites/default/files/obsah_stranky/36864/soubory/vos1final.pdf)>.
- [32] BERAN Josef. *Akceptační testy sítě NGA/NGN/VHCN po výstavbě a při aktivaci*[online]. FTTx, 2023 [cit. 5. 4. 2023], Dostupné z URL:<[https://www.profiber.eu/files/akcie/2023/FTTx/Sbornik/F04\\_Beran\\_Aktivacni-testy-NGA-NGN-VHCN.pdf](https://www.profiber.eu/files/akcie/2023/FTTx/Sbornik/F04_Beran_Aktivacni-testy-NGA-NGN-VHCN.pdf)>.



- [33] 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>>.
- [34] 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>>.
- [35] 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>>.
- [36] *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-video-a-cloudova-dvr-uloziste>>.
- [37] 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](https://www.fcc.gov/sites/default/files/broadband_speed_guide.pdf)>.
- [38] *A cooperative approach to content delivery* A Netflix briefing paper 2021[online]. [cit. 9. 1. 2023], Dostupné z URL: <<https://openconnect.netflix.com/OpenConnect-Briefing-Paper.pdf>>.
- [39] *Cisco Annual Internet Report*[online]. 2018-2023 [cit. 9. 1. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html>>.
- [40] *Cisco Annual Internet Report White Paper 2018-2023*[online]. 2018, [cit. 9. 1. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>>.
- [41] *Internet connection speed recommendations* Netflix Help Center[online]. 2022 [cit. 9. 1. 2023], Dostupné z URL: <<https://help.netflix.com/en/node/306>>.

- [42] PATHAN, A.-S. K., PATHAN, M., & LEE, H. Y. (Eds.). *Advancements in Distributed Computing and Internet Technologies*[online]. IGI Global [cit. 9. 1. 2023]. Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.4018/978-1-61350-110-8>>
- [43] Cisco VNI Complete Forecast Highlights[online]. [cit. 9. 1. 2023]. Dostupné z URL: <[https://www.cisco.com/c/dam/m/en\\_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Global\\_Device\\_Growth\\_Traffic\\_Profiles.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Global_Device_Growth_Traffic_Profiles.pdf)>.
- [44] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky *Analýza stavu rozvoje sítí NGA v ČR pro zajištění přístupu k vysokorychlostnímu internetu dostupným v pevném místě*[online]. [cit. 25. 1. 2023]. Dostupné z URL: <[https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/2/Zaverecna-zprava\\_GTA\\_12\\_12\\_2019.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/2/Zaverecna-zprava_GTA_12_12_2019.pdf)>.
- [45] IBM Video Streaming Support Center *Internet connection and recommended encoding settings*[online]. [cit. 25. 1. 2023]. Dostupné z URL: <<https://support.video.ibm.com/hc/en-us/articles/207852117-Internet-connection-and-recommended-encoding-settings>>.
- [46] Federal Communications Commission - FCC *A Report on Consumer Fixed Broadband Performance in the United States - Office of Engineering and Technology 2022*[online]. [cit. 9. 2. 2023], Dostupné z URL: <[https://www.fcc.gov/reports-research/reports/measuring-broadband-america/measuring-fixed-broadband-eleventh-report#\\_Toc43144651](https://www.fcc.gov/reports-research/reports/measuring-broadband-america/measuring-fixed-broadband-eleventh-report#_Toc43144651)>.
- [47] SKOUFIS, Aggelos, Georgios CHATZITHANASIS, Georgia DEDE, Thomas KAMALAKIS a Christos MICHALAKELIS. *Technoeconomic analysis of a VDSL2/G.fast vectoring network: a case study from Greece. Netnomics 21, 83–101*. [cit. 9. 2. 2023] ISSN 1385-9587, Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.1007/s11066-020-09142-8>>.
- [48] *Analýza stavu rozvoje sítí NGA v ČR pro zajištění přístupu k vysokorychlostnímu internetu dostupným v pevném místě*[online]. MPO 2019 [cit. 9. 2. 2023], Dostupné z URL: <[https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/2/Zaverecna-zprava\\_GTA\\_12\\_12\\_2019.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/e-komunikace-a-posta/elektronicke-komunikace/koncepce-a-strategie/narodni-plan-rozvoje-siti-nga/2020/2/Zaverecna-zprava_GTA_12_12_2019.pdf)>.
- [49] DINC, Ergin, Syed Sheheryar BUKHARI, Anas Al RAWI a Eloy DE LERA ACEDO. *Investigating the upper bound of high-frequency electromagnetic waves*

- on unshielded twisted copper pairs*. Nat Commun 13, 2164 (2022) [cit. 9. 2. 2023], Dostupné z URL: <<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29631-8>>.
- [50] *Harmful Interference and Infringements of the Radio Regulations* Harmful Interference / Infringement - ITU-R[online]. 2015 [cit. 9. 2. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/en/ITU-R/terrestrial/workshops/RRS-15-Asia/Documents/Harmful%20Interference.pdf>>.
- [51] KLADIVO, Petr *Základy statistiky; Katedra geografie Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci* [cit. 16. 2. 2023], Dostupné z URL: <<https://geography.upol.cz/soubory/studium/e-ucebnice/978-80-244-3842-9.pdf>>.
- [52] BUDÍKOVÁ, Marie, Štěpán MIKOLÁŠ a Pavel OSECKÝ *Popisná statistika. 4. vyd.*, Brno: Masarykova univerzita, 2007, ISBN 978-80-210-4246-9
- [53] BUDÍKOVÁ, Marie, Pavel OSECKÝ a Štěpán MIKOLÁŠ *Teorie pravděpodobnosti a matematická statistika: sbírka příkladů. Vyd. 3.*, Brno: Masarykova univerzita, 2004, ISBN 80-210-3313-4.
- [54] HOROVÁ, Ivana a Jiří ZELINKA *Numerické metody. 2., rozš. vyd.*, Brno: Masarykova univerzita, 2004, ISBN 80-210-3317-7
- [55] JARUŠKOVÁ, Daniela a Martin HÁLA *Pravděpodobnost a matematická statistika: příklady* [online]. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, ISBN 978-80-01-04828-3
- [56] PREM S. Mann *Introductory Statistics. 2nd Edition.* (1995), ISBN 0-471-31009-3
- [57] 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>>
- [58] 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>>
- [59] 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>>

- [60] SYSKI, R. *Introduction to congestion theory in telephone systems (Vol. 4)* Elsevier Science Limited 1986
- [61] 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>>
- [62] 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](https://documentation.avaya.com/en-US/bundle/AvayaAuraCoreSolutionDescription_r8.0/page/ErlangAndCcsDefinitions.html)>
- [63] 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>>.
- [64] 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>>.
- [65] 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>>.
- [66] 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>>.
- [67] Internet Society *RFC 3271 : The Internet is for Everyone*[online]. [cit. 17. 3. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3271>>.
- [68] 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>>
- [69] *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

- [70] *The R Project for Statistical Computing*[online]. [cit. 10. 4. 2023], Dostupné z URL: <<https://www.r-project.org/>>
- [71] *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>>



## Seznam symbolů a zkratek

<b>4G</b>	fourth generation of broadband cellular network technology
<b>4K</b>	4K resolution
<b>5G</b>	fifth-generation technology standard for broadband cellular networks
<b>ADPH</b>	Average Daily Peak Hour
<b>AP</b>	Access point
<b>BCO</b>	Broadband Competence Office
<b>BDR</b>	běžně dostupná rychlost
<b>BEREC</b>	Body of European Regulators for Electronic Communications
<b>BERT</b>	Bidirectional Encoder Representations from Transformers
<b>BTS</b>	Base transceiver station
<b>BW</b>	Band Width
<b>CATV</b>	Cable Analog Television
<b>CCS</b>	Centa Call-seconds
<b>CIR</b>	Committed Information Rate
<b>CO</b>	Central office
<b>ČTU</b>	Český telekomunikační úřad
<b>DP</b>	Distribution point
<b>DVB</b>	Digital Video Broadcasting
<b>DVR</b>	Digital Video Recorder
<b>EIR</b>	Excess Information Rate
<b>EPG</b>	Electronic Program Guide
<b>EU</b>	Evropská unie
<b>FDMP</b>	Fixed Daily Measurement Period

<b>FEC</b>	Forward error correction
<b>FTTA</b>	Fiber to the Antena
<b>FTTB</b>	Fiber to the Building
<b>FTTx</b>	Fiber to the x
<b>FWA</b>	Fixed Wireless Access
<b>HD</b>	High Definition
<b>HDPE</b>	Chráníčky z vysokohustotního polyetylenu
<b>HT</b>	High traffic profile
<b>IEC</b>	Committed Information Rate
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>IPTV</b>	Internet Protocol television
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>ISP</b>	Internet service provider
<b>ITU</b>	International Telecommunication Union
<b>KPI</b>	key performance indicator
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>LT</b>	Low traffic profile
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MAE</b>	Mean absolute error
<b>MEF</b>	Metro Ethernet Forum
<b>MPO</b>	Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky
<b>MSE</b>	Mean squared error



<b>NGA</b>	Next Generation Access
<b>NGN</b>	Next Generation Network
<b>ODN</b>	Optical Distribution Network
<b>OP PIK</b>	Operační program - Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost
<b>OTT</b>	Over-the-top
<b>PON</b>	Passive Optical Networking
<b>PT</b>	Performance Tier
<b>QoE</b>	Quality of Experience
<b>QoS</b>	Quality of Services
<b>RFC</b>	Request For Comments
<b>RMSE</b>	Root-mean-square deviation
<b>RR</b>	Radio Regulations
<b>RTT</b>	Round-Trip Time
<b>SAM</b>	Service Activation Test Methodology
<b>SD</b>	Standard Definition
<b>STB</b>	set-top-box
<b>TCBH</b>	Time-Consistent Busy Hou
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TE</b>	Traffic Engineering
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>UHD</b>	Ultra High Definition
<b>VHCN</b>	Very High Capacity Network
<b>VoD</b>	Video on Demand
<b>VoIP</b>	Voice over Internet Protocol
<b>VO-S</b>	Všeobecná oprávnění

<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>DSL</b>	Digital Subscriber Line
<b>xPON</b>	Passive Optical Network

# Seznam příloh

<b>A</b>	<b>Procedury pro zpracování vstupních dat</b>	<b>135</b>
A.1	Příprava dat . . . . .	135
A.2	Matematické zpracování dat . . . . .	144
A.3	Výpočet hlavní provozní hodiny a provozního sedla . . . . .	152
<b>B</b>	<b>Výsledky a výstupy zpracovaných dat</b>	<b>167</b>



# A Procedury pro zpracování vstupních dat

V této příloze jsou uvedeny zdrojové kódy skriptů pro analýzu měřených dat. Získaná vstupní data byla upravena do vhodného tvaru pomocí sady shell skriptů a následně zpracována v nástroji R.

## A.1 Příprava dat

Jednotlivé shell skripty jsou pojmenovány podle kroku zpracování, ve kterém byly použity. Prvním krokem byla úprava formátu dat a odstranění diakritiky z názvu souborů.

Výpis A.1: Ošetření znaku % a odstranění diakritiky z názvu souborů.

```
for f in * ;
do
cat $f/$f\_in/Pondělí_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_in/
Pondeli.csv2 ;
cat $f/$f\_in/Úterý_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_in/
Utery.csv2 ;
cat $f/$f\_in/Středa_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_in/
Streda.csv2 ;
cat $f/$f\_in/Čtvrtek_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_in/
Ctvrtek.csv2 ;
cat $f/$f\_in/Pátek_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_in/
Patek.csv2 ;
cat $f/$f\_in/Sobota_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_in/
Sobota.csv2 ;
cat $f/$f\_in/Neděle_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_in/
Nedele.csv2 ;
cat $f/$f\_out/Pondělí_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_
_out/Pondeli.csv2 ;
cat $f/$f\_out/Úterý_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_out/
Utery.csv2 ;
cat $f/$f\_out/Středa_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_out/
Streda.csv2 ;
cat $f/$f\_out/Čtvrtek_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_
_out/Ctvrtek.csv2 ;
cat $f/$f\_out/Pátek_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_out/
Patek.csv2 ;
cat $f/$f\_out/Sobota_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_out/
Sobota.csv2 ;
```

```

cat $f/$f\_out/Neděle_table.csv | sed 's/\%/ /g' > $f/$f\_out/
Nedele.csv2 ;
done
}

```

Jednotlivé procedury jsou spouštěny z adresáře, v němž se nachází měřená data.

Dalším krokem byla náhrada desetinné čárky desetinnou tečkou, uspořádání sloupců a vynechání nepotřebných sloupců. Následně jsou data chronologicky seřazena. Jednotlivé dílčí kroky generují jednotlivé dílčí soubory s upravenými vstupními daty. Tento postup byl zvolen z důvodu snadné vizuální kontroly správné činnosti dané procedury.

Výpis A.2: Uspořádání sloupců a vynechání nepotřebných sloupců.

```

for f in * ;
do
cat $f/$f\_in/Pondeli.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_in/
Pondeli.csv3 ;
cat $f/$f\_in/Utery.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_in/Utery.
csv3 ;
cat $f/$f\_in/Streda.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_in/
Streda.csv3 ;
cat $f/$f\_in/Ctvrtek.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_in/
Ctvrtek.csv3 ;
cat $f/$f\_in/Patek.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_in/Patek.
csv3 ;
cat $f/$f\_in/Sobota.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_in/
Sobota.csv3 ;
cat $f/$f\_in/Nedele.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_in/
Nedele.csv3 ;
cat $f/$f\_out/Pondeli.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_out/
Pondeli.csv3 ;
cat $f/$f\_out/Utery.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_out/
Utery.csv3 ;
cat $f/$f\_out/Streda.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_out/
Streda.csv3 ;
cat $f/$f\_out/Ctvrtek.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_out/
Ctvrtek.csv3 ;
cat $f/$f\_out/Patek.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_out/
Patek.csv3 ;
cat $f/$f\_out/Sobota.csv2 | sed 's/\,/\/g' > $f/$f\_out/
Sobota.csv3 ;

```

```

cat $f/$f\_out/Nedele.csv2 | sed 's/\\,/\\. /g' > $f/$f\_out/
Nedele.csv3 ;

cat $f/$f\_in/Pondeli.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $
5, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_in/Pondeli.csv4 ;
cat $f/$f\_in/Utery.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $5,
_ $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_in/Utery.csv4 ;
cat $f/$f\_in/Streda.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $5
, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_in/Streda.csv4 ;
cat $f/$f\_in/Ctvrtek.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $
5, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_in/Ctvrtek.csv4 ;
cat $f/$f\_in/Patek.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $5,
_ $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_in/Patek.csv4 ;
cat $f/$f\_in/Sobota.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $5
, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_in/Sobota.csv4 ;
cat $f/$f\_in/Nedele.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $5
, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_in/Nedele.csv4 ;
cat $f/$f\_out/Pondeli.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $
5, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_out/Pondeli.csv4 ;
cat $f/$f\_out/Utery.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $5
, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_out/Utery.csv4 ;
cat $f/$f\_out/Streda.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $
5, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_out/Streda.csv4 ;
cat $f/$f\_out/Ctvrtek.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $
5, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_out/Ctvrtek.csv4 ;
cat $f/$f\_out/Patek.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $5
, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_out/Patek.csv4 ;
cat $f/$f\_out/Sobota.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $
5, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_out/Sobota.csv4 ;
cat $f/$f\_out/Nedele.csv3 | awk '/_{print_ $4, $1, $2, $3, $
5, $6, $7, $8}' | sort -n > $f/$f\_out/Nedele.csv4 ;

done

```

Z důvodu nemožnosti použití vnořených cyklů v shell skriptech byl v některých případech použit pomocný skript, který volá vlastní výkonný skript na jednotlivé datové soubory.

Výpis A.3: Pomocný „vnější“ skript pro výběr jednotlivých 15minutových měřených intervalů

```
for f in *interface ;
do
../SCRIPTS/Third_step_inside $f;
done
```

Výpis A.4: Výběr jednotlivých 15minutových měřených intervalů.

```
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_in/Pondeli.csv4 >
  $1/$1\_in/Pondeli.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_in/Utery.csv4 >
  $1/$1\_in/Utery.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_in/Streda.csv4 >
  $1/$1\_in/Streda.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_in/Ctvrtek.csv4 >
  $1/$1\_in/Ctvrtek.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_in/Patek.csv4 >
  $1/$1\_in/Patek.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_in/Sobota.csv4 >
  $1/$1\_in/Sobota.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_in/Nedele.csv4 >
  $1/$1\_in/Nedele.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_out/Pondeli.csv4 >
  $1/$1\_out/Pondeli.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_out/Utery.csv4 >
  $1/$1\_out/Utery.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_out/Streda.csv4 >
  $1/$1\_out/Streda.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_out/Ctvrtek.csv4 >
  $1/$1\_out/Ctvrtek.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_out/Patek.csv4 >
  $1/$1\_out/Patek.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_out/Sobota.csv4 >
  $1/$1\_out/Sobota.$i.csv ; done
for i in `seq 1 96` ; do grep "^$i_" $1/$1\_out/Nedele.csv4 >
  $1/$1\_out/Nedele.$i.csv ; done
```



Výpis A.5: Roztřídění dat podle dnů v týdnu a časových intervalů.

```
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_in/Pondeli.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_in/Pondeli.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_in/Utery.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_in/Utery.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_in/Streda.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_in/Streda.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_in/Ctvrtek.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_in/Ctvrtek.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_in/Patek.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_in/Patek.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_in/Sobota.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_in/Sobota.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_in/Nedele.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_in/Nedele.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_out/Pondeli.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_out/Pondeli.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_out/Utery.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_out/Utery.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_out/Streda.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_out/Streda.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_out/Ctvrtek.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_out/Ctvrtek.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_out/Patek.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_out/Patek.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_out/Sobota.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_out/Sobota.$i.csv1 ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat $1/$1\_out/Nedele.$i.csv | awk '{print_␣$8}' > $1/$1\_out/Nedele.$i.csv1 ; done
```

Výpis A.6: Výpočet základních popisných statistik potřebných pro další zpracování dat – pomocný skript.

```
for f in *interface ;
do
cd $f/$f\_in;
echo IN;
echo $f;
../../../../../SCRIPTS/Fifth_step_inside $f;
cd ../../..;
cd $f/$f\_out;
echo OUT;
```

```

echo \ $f;
../../../../../SCRIPTS/Fifth_step_inside $f;
cd ../../..;

done

```

Výpis A.7: Výpočet základních popisných statistik potřebných pro další zpracování dat.

```

for f in *csv1 ; do cat $f | awk 'BEGIN_{s=0;n=0;}_{s=s+$0;n=n+1;}END_{a=s/n;print a,n;}' > $f.avg ; done

for f in *csv1 ; do A='cat $f.avg | awk '{print $1}''; cat $f | awk -v avg="$A" 'BEGIN_{s=0;n=0;}_{s=s+($0-avg)^2;n=n+1;}END_{a=sqrt(s/(n-1));print a,n;}' > $f.std ; done

for i in `seq 1 96` ; do cat Pondeli.$i.csv1 | sort -n | head -1 > Pondeli.$i.csv1.min ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Pondeli.$i.csv1 | sort -n | tail -1 > Pondeli.$i.csv1.max ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Utery.$i.csv1 | sort -n | head -1 > Utery.$i.csv1.min ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Utery.$i.csv1 | sort -n | tail -1 > Utery.$i.csv1.max ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Streda.$i.csv1 | sort -n | head -1 > Streda.$i.csv1.min ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Streda.$i.csv1 | sort -n | tail -1 > Streda.$i.csv1.max ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Ctvrtek.$i.csv1 | sort -n | head -1 > Ctvrtek.$i.csv1.min ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Ctvrtek.$i.csv1 | sort -n | tail -1 > Ctvrtek.$i.csv1.max ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Patek.$i.csv1 | sort -n | head -1 > Patek.$i.csv1.min ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Patek.$i.csv1 | sort -n | tail -1 > Patek.$i.csv1.max ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Sobota.$i.csv1 | sort -n | head -1 > Sobota.$i.csv1.min ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Sobota.$i.csv1 | sort -n | tail

```

```
-1 > Sobota.$i.csv1.max ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Nedele.$i.csv1 | sort -n | head
-1 > Nedele.$i.csv1.min ; done
for i in `seq 1 96` ; do cat Nedele.$i.csv1 | sort -n | tail
-1 > Nedele.$i.csv1.max ; done
```

Výpis A.8: Agregace popisných statistik –pomocný skript.

```
for f in *interface ;
do
cd $f/$f\_in;
pwd
../../../../../SCRIPTS/Sixth_step_inside $f;
cd ../../..;
cd $f/$f\_out;
pwd
../../../../../SCRIPTS/Sixth_step_inside $f;
cd ../../..;

done
```

### Výpis A.9: Agregace popisných statistik AVG a STD.

```
rm Pondeli.avg
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Pondeli.$i.csv1
.avg ; done >> Pondeli.avg
rm Utery.avg
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Utery.$i.csv1.
avg ; done >> Utery.avg
rm Streda.avg
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Streda.$i.csv1.
avg ; done >> Streda.avg
rm Ctvrtek.avg
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Ctvrtek.$i.csv1
.avg ; done >> Ctvrtek.avg
rm Patek.avg
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Patek.$i.csv1.
avg ; done >> Patek.avg
rm Sobota.avg
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Sobota.$i.csv1.
avg ; done >> Sobota.avg
rm Nedele.avg
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Nedele.$i.csv1.
avg ; done >> Nedele.avg
rm Pondeli.std
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Pondeli.$i.csv1
.std ; done >> Pondeli.std
rm Utery.std
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Utery.$i.csv1.
std ; done >> Utery.std
rm Streda.std
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Streda.$i.csv1.
std ; done >> Streda.std
rm Ctvrtek.std
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Ctvrtek.$i.csv1
.std ; done >> Ctvrtek.std
rm Patek.std
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Patek.$i.csv1.
std ; done >> Patek.std
rm Sobota.std
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Sobota.$i.csv1.
std ; done >> Sobota.std
rm Nedele.std
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i " " ; cat Nedele.$i.csv1.
std ; done >> Nedele.std
```

### Výpis A.10: Agregace popisných statistik – MIN a MAX.

```
rm Pondeli.min
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Pondeli.$i.csv1
.min ; done >> Pondeli.min
rm Utery.min
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Utery.$i.csv1.
min ; done >> Utery.min
rm Streda.min
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Streda.$i.csv1.
min ; done >> Streda.min
rm Ctvrtek.min
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Ctvrtek.$i.csv1
.min ; done >> Ctvrtek.min
rm Patek.min
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Patek.$i.csv1.
min ; done >> Patek.min
rm Sobota.min
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Sobota.$i.csv1.
min ; done >> Sobota.min
rm Nedele.min
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Nedele.$i.csv1.
min ; done >> Nedele.min
rm Pondeli.max
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Pondeli.$i.csv1
.max ; done >> Pondeli.max
rm Utery.max
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Utery.$i.csv1.
max ; done >> Utery.max
rm Streda.max
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Streda.$i.csv1.
max ; done >> Streda.max
rm Ctvrtek.max
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Ctvrtek.$i.csv1
.max ; done >> Ctvrtek.max
rm Patek.max
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Patek.$i.csv1.
max ; done >> Patek.max
rm Sobota.max
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Sobota.$i.csv1.
max ; done >> Sobota.max
rm Nedele.max
for i in `seq 1 96` ; do echo -n $i "␣" ; cat Nedele.$i.csv1.
max ; done >> Nedele.max
```

Výpis A.11: Sumarizace pracovních dní a víkendových dní – pomocný skript.

```
for f in *interface ;
do
cd $f/$f\_in;
pwd
../../../../SCRIPTS/Seventh_step_inside $f;
cd ../../;
cd $f/$f\_out;
pwd
../../../../SCRIPTS/Seventh_step_inside $f;
cd ../../;

done
```

Výpis A.12: Sumarizace pracovních dní a víkendových dní.

```
for i in `seq 1 96` ; do cat Pondeli.$i.csv1.avg Utery.$i.
csv1.avg Streda.$i.csv1.avg Ctvrtek.$i.csv1.avg Patek.$i.csv1
.avg | awk 'BEGIN{us=0;}{us=us+$1;}END{a=us/5;
print a;}' > WeekDay.$i.avg ; done

for i in `seq 1 96` ; do cat Sobota.$i.csv1.avg Nedele.$i.
csv1.avg | awk 'BEGIN{us=0;}{us=us+$1;}END{a=us
/2;print a;}' > WeekEnd.$i.avg ; done
```

## A.2 Matematické zpracování dat

Pro zpracování měřených dat byl použit nástroj R v dávkovém režimu (Rscript). Vlastní zpracování dat je rozděleno do dvou procedur: vyhlazení dat pomocí váženého klouzavého průměru, viz A.15 a nalezení aproximačních polynomů, viz A.14.

Výpis A.13: Vyhlazení dat pomocí klouzavého průměru.

```
#!/usr/bin/env Rscript
args = commandArgs(trailingOnly=TRUE)

library(data.table)
library(Metrics)
library(Polynomial)
library(stringr)
```

```

library(pracma)

f0 <- args[1]
f0

f_in <- str_c(f0, ".avg")
# output analysis
f_out <- str_c(f0, ".flt.avg")

IN <- read.table(f_in)

x <- as.numeric(IN[,1])
y <- as.numeric(IN[,2])

y2 <- filter(y, c(1/10, 2/10, 4/10, 2/10, 1/10), method="c", sides
=2, circular=TRUE)

OUT <- data.table(x, y2)

write.table(OUT, f_out, row.names = FALSE, sep = "␣", col.
names = FALSE)

```

Výpis A.14: Nalezení aproximačních polynomů.

```

#!/usr/bin/env Rscript
args = commandArgs(trailingOnly=TRUE)

library(data.table)
library(Metrics)
library(PolynomF)
library(stringr)
library(pracma)

f0 <- args[1]
f0

# input data
f_in <- str_c(f0, ".avg")
# output analysis
f_out <- str_c(f0, ".fract.out")

```

```

IN <- read.table(f_in)

x <- as.numeric(IN[,1])
y <- as.numeric(IN[,2])

xf <- x/96

# Smer INPUT

f_p0 <- str_c(f0,"_p0.fract.png")
f_p1 <- str_c(f0,"_p1.fract.png")
f_p2 <- str_c(f0,"_p2.fract.png")

f_ps3 <- str_c(f0,"_ps3.fract.png")
f_ps5 <- str_c(f0,"_ps5.fract.png")
f_ps7 <- str_c(f0,"_ps7.fract.png")

# Aproximace Lagrangeovym polynomem
# P0 - krajni body + minimum + maximum
# P1 - pridavame dalsi body - pruseciky s vodorovnou primkou
v polovine intervalu <min,max>
# P2 - pruseciky se dvema vodorovnymi primkami

# Aproximace polynomem daneho stupne - linearni model
# PS3, PS5, PS7 - polynomy tretiho, pateho a sedmeho stupne

# U polynome vyssich stupnu nasobime y pred fitovanim
polynomu 10^n a po fitovani zase delime. Je to potreba pro
zachovani numericke stability

png(file=f_p0);
plot(data.table(xf,y),type="h",xlab="Time_interval",ylab="
Relative_traffic_volume",ylim=c(0,2.5))
grid(10)
mi <- which.min(y)
ma <- which.max(y)
z <- data.table(c(1,mi,ma,96), c(y[1],y[mi],y[ma],y[96]))
a <- as.numeric(unlist(z[,1]))
b <- as.numeric(unlist(z[,2]))
P0 <- poly_calc(a/96,b)

```



```

lines(P0,ylim=3.0)
dev.off()

sgm_x1 <- c(1:mi)
sgm_x2 <- c((mi+1):ma)
sgm_x3 <- c((ma+1):96)
sgm_y1 <- y[sgm_x1]
sgm_y2 <- y[sgm_x2]
sgm_y3 <- y[sgm_x3]
sgm_z1 <- data.table(sgm_x1, sgm_y1)
sgm_z2 <- data.table(sgm_x2, sgm_y2)
sgm_z3 <- data.table(sgm_x3, sgm_y3)

l1 <- y[mi] + (y[ma] - y[mi])/2
a1 <- c(1)
if ( l1 < y[1] ) { a1 <- c(a1, which.min(abs((as.numeric(
unlist(sgm_z1[,2])) -
l1)))) }
a1 <- c(a1,mi)
a1 <- c(a1, which.min(abs((as.numeric(unlist(sgm_z2[,2])) -l1
))))+mi)
a1 <- c(a1,ma)
if ( l1 > y[96] ) { a1 <- c(a1, which.min(abs((as.numeric(
unlist(sgm_z3[,2]))
-l1))))+ma) }
a1 <- c(a1,96)

l21 <- y[mi] + (y[ma] - y[mi])/3
l22 <- y[mi] + 2*(y[ma] - y[mi])/3

l12 <- c(l21,l22)
lr2 <- c(l22,l21)

a2 <- c(1)
for ( i in lr2 ) { if ( i < y[1] ) { a2 <- c(a2, which.min(
abs((as.numeric(unlist(sgm_z1[,2])) - i)))) } }
a2 <- c(a2,mi)
for ( i in l12 ) { a2 <- c(a2, which.min(abs((as.numeric(
unlist(sgm_z2[,2])) - i
))))+mi) }
a2 <- c(a2,ma)

```

```

for ( i in lr2 ) { if ( i > y[96] ) { a2 <- c(a2, which.min(
abs((as.numeric(unlist(sgm_z3[,2])) - i))) + ma) }}
a2 <- c(a2,96)

b1 <- y[a1]
b2 <- y[a2]

P1 <- poly_calc(a1/96,b1)
P2 <- poly_calc(a2/96,b2)

png(file=f_p1);
plot(data.table(xf,y),type="h",xlab="Time_interval",ylab="
Relative_traffic_volume",ylim=c(0,3.0
))
grid(10)
lines(P1)
lines(a1/96,rep(c(l1),length(a1)),typ="l",lty=2)
lines(a1/96,rep(c(y[mi]),length(a1)),typ="l",lty=2)
lines(a1/96,rep(c(y[ma]),length(a1)),typ="l",lty=2)
dev.off()

png(file=f_p2);
plot(data.table(xf,y),type="h",xlab="Time_interval",ylab="
Relative_traffic_volume",ylim=c(0,3.0
))
grid(10)
lines(P2)
lines(a2/96,rep(c(l21),length(a2)),typ="l",lty=2)
lines(a2/96,rep(c(l22),length(a2)),typ="l",lty=2)
lines(a2/96,rep(c(y[mi]),length(a2)),typ="l",lty=2)
lines(a2/96,rep(c(y[ma]),length(a2)),typ="l",lty=2)
dev.off()

# Aproximace polynomem tretiho, pateho a sedmeho stupne

PS3 <- polynomial(coef(lm(y ~ poly(xf, 3, raw = TRUE))))
PS5 <- polynomial(coef(lm(y ~ poly(xf, 5, raw = TRUE))))
PS7 <- polynomial(coef(lm(y ~ poly(xf, 7, raw = TRUE))))

```

```

png(file=f_ps3);
plot(data.table(x,y),type="h",xlab="Time_interval",ylab="
Relative_traffic_volume",ylim=c(0,3.0
))
grid(10)
lines(PS3)
dev.off()

png(file=f_ps5);
plot(data.table(x,y),type="h",xlab="Time_interval",ylab="
Relative_traffic_volume",ylim=c(0,3.0
))
grid(10)
lines(PS5)
dev.off()

png(file=f_ps7);
plot(data.table(x,y),type="h",xlab="Time_interval",ylab="
Relative_traffic_volume",ylim=c(0,3.0
))
grid(10)
lines(PS7)
dev.off()

# Analiza chyby

sink(f_out)

cat("Polynom_P0_analysis:_RMSE,_MAE\n")
P0
t <- x
r0 <- P0(t)
s <- y
rmse(r0,s)

cat("Polynom_P1_analysis:_RMSE,_MAE\n")
P1
r1 <- P1(t)
rmse(r1,s)

```

```

cat("Polynom_P2_analysis: RMSE, MAE\n")
P2
r2 <- P2(t)
rmse(r2,s)

cat("Polynom_PS3_analysis: RMSE, MAE\n")
PS3
rs3 <- PS3(t)
rmse(rs3,s)

cat("Polynom_PS5_analysis: RMSE, MAE\n")
PS5
rs5 <- PS5(t)
rmse(rs5,s)

cat("Polynom_PS7_analysis: RMSE, MAE\n")
PS7
rs7 <- PS7(t)
rmse(rs7,s)

sink()

```

Výpis A.15: Skripty pro spouštění výpočtu polynomiální aproximace.

```

for f in *interface ;
do
cd $f/$f\_in;
pwd
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Pondeli
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Utery
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Streda
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Ctvrtek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Patek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Sobota
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Nedele
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter WeekDay
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter WeekEnd
#
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Pondeli
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Utery
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Streda

```

```

Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Ctvrtek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Patek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Sobota
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Nedele
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekDay
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekEnd
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Pondeli.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Utery.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Streda.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Ctvrtek.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Patek.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Sobota.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Nedele.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekDay.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekEnd.flt
cd ../..;
cd $f/$f\_out;
pwd
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Pondeli
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Utery
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Streda
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Ctvrtek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Patek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Sobota
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter Nedele
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter WeekDay
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-filter WeekEnd
#
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Pondeli
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Utery
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Streda
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Ctvrtek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Patek
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Sobota
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Nedele
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekDay
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekEnd
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Pondeli.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Utery.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Streda.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Ctvrtek.flt

```

```

Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Patek.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Sobota.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract Nedele.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekDay.flt
Rscript ../../../../SCRIPTS/R-script-final-fract WeekEnd.flt
cd ../../;

done

```

### A.3 Výpočet hlavní provozní hodiny a provozního sedla

Tab. A.1: Aproximační polynomy pro přístupové sítě CATV v pracovních dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
8	IN	P0	$1.14073 - 7.63818 * x + 23.10538 * x^2 - 15.55742 * x^3$
8	IN	P1	$1.02382 + 4.569729 * x - 73.94974 * x^2 + 230.6499 * x^3 - 252.7448 * x^4 + 91.50152 * x^5$
8	IN	P2	$1.112467 - 4.230075 * x - 48.82809 * x^2 + 502.6391 * x^3 - 1642.762 * x^4 + 2530.072 * x^5 - 1866.943 * x^6 + 529.9908 * x^7$
8	IN	PS3	$1.02622 - 5.574211 * x + 16.28409 * x^2 - 10.49599 * x^3$
8	IN	PS5	$1.314327 - 13.87302 * x + 74.25679 * x^2 - 165.6225 * x^3 + 175.164 * x^4 - 70.26724 * x^5$
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	P0	$1.13623 - 10.31515 * x + 33.53274 * x^2 - 23.2891 * x^3$
8	OUT	P1	$0.7852898 + 26.32656 * x - 257.0693 * x^2 + 681.5225 * x^3 - 686.769 * x^4 + 236.2687 * x^5$
8	OUT	P2	$1.102426 - 5.89653 * x - 89.14436 * x^2 + 973.9469 * x^3 - 3367.476 * x^4 + 5364.067 * x^5 - 4030.214 * x^6 + 1154.679 * x^7$
8	OUT	PS3	$0.9056864 - 6.07497 * x + 17.89567 * x^2 - 11.17012 * x^3$
8	OUT	PS5	$1.382225 - 20.69516 * x + 124.4457 * x^2 - 304.8664 * x^3 + 338.9492 * x^4 - 138.2595 * x^5$
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	P0	$1.146419 - 8.236736 * x + 25.77058 * x^2 - 17.62766 * x^3$
9	IN	P1	$0.8828609 + 19.17879 * x - 182.3682 * x^2 + 486.3989 * x^3 - 496.3582 * x^4 + 173.3184 * x^5$

9	IN	P2	$1.098051 - 2.426773 * x - 94.93188 * x^2 + 845.766 * x^3 - 2752.064 * x^4 + 4284.424 * x^5 - 3202.164 * x^6 + 921.3515 * x^7$
9	IN	PS3	$1.062162 - 6.31296 * x + 17.94787 * x^2 - 11.38177 * x^3$
9	IN	PS5	$1.301734 - 14.37145 * x + 79.96538 * x^2 - 188.4514 * x^3 + 209.4196 * x^4 - 86.97501 * x^5$
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	P0	$1.10746 - 10.29993 * x + 33.93088 * x^2 - 23.69763 * x^3$
9	OUT	P1	$0.8204345 + 19.74555 * x - 211.3944 * x^2 + 576.5066 * x^3 - 586.5976 * x^4 + 201.9601 * x^5$
9	OUT	P2	$1.068355 - 5.328226 * x - 93.24631 * x^2 + 999.6389 * x^3 - 3461.562 * x^4 + 5532.819 * x^5 - 4171.087 * x^6 + 1198.739 * x^7$
9	OUT	PS3	$0.8716786 - 6.028086 * x + 18.12671 * x^2 - 11.43588 * x^3$
9	OUT	PS5	$1.349243 - 20.72356 * x + 125.4288 * x^2 - 307.5839 * x^3 + 342.092 * x^4 - 139.6375 * x^5$
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	P0	$1.17726 - 9.222803 * x + 29.05905 * x^2 - 19.9673 * x^3$
12	IN	P1	$0.8854956 + 21.37224 * x - 225.8597 * x^2 + 629.3572 * x^3 - 661.8181 * x^4 + 237.1091 * x^5$
12	IN	P2	$1.129807 - 3.45458 * x - 96.95062 * x^2 + 932.5017 * x^3 - 3142.894 * x^4 + 4993.537 * x^5 - 3778.708 * x^6 + 1095.884 * x^7$
12	IN	PS3	$1.017237 - 6.369787 * x + 18.45986 * x^2 - 11.77278 * x^3$
12	IN	PS5	$1.364062 - 17.117 * x + 97.27894 * x^2 - 229.9524 * x^3 + 252.5594 * x^4 - 103.254 * x^5$
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	P0	$1.131076 - 10.09944 * x + 32.95634 * x^2 - 22.93515 * x^3$
12	OUT	P1	$0.7972398 + 24.76516 * x - 244.3878 * x^2 + 653.6926 * x^3 - 663.4332 * x^4 + 229.6188 * x^5$
12	OUT	P2	$1.086221 - 4.436766 * x - 108.4499 * x^2 + 1087.785 * x^3 - 3703.025 * x^4 + 5875.714 * x^5 - 4416.171 * x^6 + 1268.551 * x^7$
12	OUT	PS3	$0.9229766 - 6.080409 * x + 17.90027 * x^2 - 11.23293 * x^3$
12	OUT	PS5	$1.385085 - 20.20695 * x + 120.6161 * x^2 - 293.92 * x^3 + 325.8792 * x^4 - 132.8165 * x^5$
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	P0	$1.091064 - 8.408429 * x + 27.16316 * x^2 - 18.85176 * x^3$

13	IN	P1	$0.8580721 + 16.01343 * x - 175.3515 * x^2 + 492.2731 * x^3 - 516.378 * x^4 + 183.579 * x^5$
13	IN	P2	$1.057408 - 4.220302 * x - 72.61201 * x^2 + 765.2401 * x^3 - 2639.389 * x^4 + 4238.491 * x^5 - 3225.906 * x^6 + 938.3336 * x^7$
13	IN	PS3	$0.9347674 - 5.581784 * x + 16.95552 * x^2 - 11.01358 * x^3$
13	IN	PS5	$1.288647 - 16.50426 * x + 96.86102 * x^2 - 231.8323 * x^3 + 255.3109 * x^4 - 104.2863 * x^5$
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	P0	$1.113102 - 10.27055 * x + 33.78142 * x^2 - 23.58787 * x^3$
13	OUT	P1	$0.7823756 + 24.27764 * x - 241.8398 * x^2 + 652.5965 * x^3 - 666.8826 * x^4 + 232.1019 * x^5$
13	OUT	P2	$1.075566 - 5.385688 * x - 100.1942 * x^2 + 1066.95 * x^3 - 3707.309 * x^4 + 5954.883 * x^5 - 4514.102 * x^6 + 1305.118 * x^7$
13	OUT	PS3	$0.8829152 - 6.051504 * x + 18.21423 * x^2 - 11.54973 * x^3$
13	OUT	PS5	$1.373219 - 20.95925 * x + 126.2343 * x^2 - 308.133 * x^3 + 341.317 * x^4 - 138.9302 * x^5$
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. A.2: Aproximační polynomy pro přístupové sítě CATV ve víkendových dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
8	IN	P0	$1.00198 - 6.863414 * x + 20.84952 * x^2 - 14.01683 * x^3$
8	IN	P1	$1.032311 - 9.968079 * x + 39.67844 * x^2 - 44.17562 * x^3 + 14.4042 * x^4$
8	IN	P2	$0.9682926 - 2.968853 * x - 46.67572 * x^2 + 391.4475 * x^3 - 1082.334 * x^4 + 1432.778 * x^5 - 924.8225 * x^6 + 232.5791 * x^7$
8	IN	PS3	$0.8779597 - 4.640079 * x + 15.25557 * x^2 - 10.43024 * x^3$
8	IN	PS5	$1.242487 - 13.42886 * x + 68.19042 * x^2 - 135.6392 * x^3 + 127.3715 * x^4 - 46.7107 * x^5$
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	P0	$0.9862456 - 8.725905 * x + 27.74409 * x^2 - 19.05193 * x^3$
8	OUT	P1	$1.033033 - 13.56394 * x + 61.73037 * x^2 - 89.59508 * x^3 + 57.54294 * x^4 - 16.19483 * x^5$



8	OUT	P2	$0.9608503 - 5.580868 * x - 45.39385 * x^2 + 501.7427 * x^3 - 1568.703 * x^4 + 2278.675 * x^5 - 1586.626 * x^6 + 425.8774 * x^7$
8	OUT	PS3	$0.6995091 - 4.113181 * x + 14.90109 * x^2 - 10.30346 * x^3$
8	OUT	PS5	$1.363795 - 20.54122 * x + 116.2812 * x^2 - 255.5864 * x^3 + 254.8079 * x^4 - 95.28227 * x^5$
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	P0	$0.9486354 - 7.101322 * x + 22.85468 * x^2 - 15.77785 * x^3$
9	IN	P1	$0.9700238 - 9.295987 * x + 36.68203 * x^2 - 40.40666 * x^3 + 15.63854 * x^4 - 2.663807 * x^5$
9	IN	P2	$0.9123648 - 2.912603 * x - 49.53406 * x^2 + 433.329 * x^3 - 1272.663 * x^4 + 1808.318 * x^5 - 1259.234 * x^6 + 342.708 * x^7$
9	IN	PS3	$0.8624138 - 4.931302 * x + 16.37016 * x^2 - 11.27056 * x^3$
9	IN	PS5	$1.171092 - 12.62171 * x + 64.15541 * x^2 - 127.6019 * x^3 + 121.5256 * x^4 - 45.67322 * x^5$
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	P0	$0.9675623 - 8.807013 * x + 28.17158 * x^2 - 19.39091 * x^3$
9	OUT	P1	$1.020644 - 14.30297 * x + 67.45711 * x^2 - 104.065 * x^3 + 72.75594 * x^4 - 21.9245 * x^5$
9	OUT	P2	$0.944841 - 5.931735 * x - 43.74972 * x^2 + 505.2864 * x^3 - 1598.178 * x^4 + 2339.368 * x^5 - 1640.007 * x^6 + 443.2085 * x^7$
9	OUT	PS3	$0.667921 - 4.087624 * x + 15.14172 * x^2 - 10.54962 * x^3$
9	OUT	PS5	$1.346774 - 20.9444 * x + 119.562 * x^2 - 264.0555 * x^3 + 264.1678 * x^4 - 99.06044 * x^5$
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	P0	$1.011874 - 7.932208 * x + 24.55633 * x^2 - 16.67537 * x^3$
12	IN	P1	$1.016067 - 8.309712 * x + 21.85306 * x^2 + 12.48154 * x^3 - 51.80546 * x^4 + 25.72513 * x^5$
12	IN	P2	$0.9956823 - 5.881716 * x - 26.81493 * x^2 + 354.5255 * x^3 - 1130.573 * x^4 + 1672.074 * x^5 - 1193.925 * x^6 + 330.5603 * x^7$
12	IN	PS3	$0.8557725 - 5.325485 * x + 17.48775 * x^2 - 11.94803 * x^3$
12	IN	PS5	$1.263367 - 15.44996 * x + 80.22388 * x^2 - 164.2979 * x^3 + 158.7975 * x^4 - 59.56113 * x^5$
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	P0	$0.9657428 - 8.604268 * x + 28.11174 * x^2 - 19.53826 * x^3$

12	OUT	P1	$0.9829371 - 10.34396 * x + 36.66996 * x^2 - 20.4299 * x^3 - 18.92338 * x^4 + 12.97928 * x^5$
12	OUT	P2	$0.9320908 - 4.400508 * x - 72.88113 * x^2 + 731.5304 * x^3 - 2390.334 * x^4 + 3660.236 * x^5 - 2675.391 * x^6 + 751.2426 * x^7$
12	OUT	PS3	$0.7004541 - 3.991079 * x + 14.58204 * x^2 - 10.12565 * x^3$
12	OUT	PS5	$1.337946 - 19.89225 * x + 113.4925 * x^2 - 251.1526 * x^3 + 252.0073 * x^4 - 94.78633 * x^5$
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	P0	$0.9157958 - 7.039583 * x + 23.01717 * x^2 - 15.99078 * x^3$
13	IN	P1	$0.9559694 - 11.21211 * x + 54.08915 * x^2 - 88.62152 * x^3 + 68.81474 * x^4 - 23.12362 * x^5$
13	IN	P2	$0.8992297 - 4.940128 * x - 29.77423 * x^2 + 372.3187 * x^3 - 1197.203 * x^4 + 1777.94 * x^5 - 1266.284 * x^6 + 347.946 * x^7$
13	IN	PS3	$0.7630171 - 4.299003 * x + 15.26562 * x^2 - 10.66824 * x^3$
13	IN	PS5	$1.180634 - 14.84379 * x + 81.58868 * x^2 - 173.8805 * x^3 + 172.1405 * x^4 - 65.25092 * x^5$
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	P0	$0.9603288 - 8.608978 * x + 27.76612 * x^2 - 19.18342 * x^3$
13	OUT	P1	$1.006624 - 13.38759 * x + 60.51751 * x^2 - 83.38471 * x^3 + 47.92202 * x^4 - 11.73979 * x^5$
13	OUT	P2	$0.9294206 - 4.675415 * x - 72.60152 * x^2 + 734.4525 * x^3 - 2382.665 * x^4 + 3611.687 * x^5 - 2612.076 * x^6 + 725.883 * x^7$
13	OUT	PS3	$0.6693668 - 3.862062 * x + 14.45461 * x^2 - 10.09037 * x^3$
13	OUT	PS5	$1.352053 - 20.90801 * x + 120.5858 * x^2 - 268.9306 * x^3 + 270.8359 * x^4 - 101.9371 * x^5$
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. A.3: Aproximační polynomy pro přístupové sítě PON v pracovních dnech.

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	$1.100219 - 6.501653 * x - 37.10758 * x^2 + 480.5081 * x^3 - 1581.149 * x^4 + 2347.539 * x^5 - 1632.806 * x^6 + 429.3556 * x^7$
14	IN	P0	$1.062303 - 8.561204 * x + 29.18106 * x^2 - 20.68597 * x^3$
14	IN	P1	$0.6210238 + 37.53425 * x - 338.4449 * x^2 + 880.7191 * x^3 - 888.7441 * x^4 + 309.3107 * x^5$
14	IN	P2	$1.012331 - 2.1349 * x - 140.7947 * x^2 + 1330.675 * x^3 - 4496.141 * x^4 + 7117.8 * x^5 - 5347.734 * x^6 + 1538.313 * x^7$
14	IN	PS3	$0.9908762 - 6.087765 * x + 17.63002 * x^2 - 11.12485 * x^3$
14	IN	PS5	$1.278763 - 16.34158 * x + 98.95653 * x^2 - 247.5815 * x^3 + 283.057 * x^4 - 118.5737 * x^5$
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	P0	$1.121884 - 9.859985 * x + 32.3353 * x^2 - 22.56387 * x^3$
14	OUT	P1	$0.6919285 + 34.94138 * x - 314.7948 * x^2 + 817.9739 * x^3 - 822.4441 * x^4 + 284.665 * x^5$
14	OUT	P2	$1.067615 - 3.09274 * x - 129.656 * x^2 + 1217.324 * x^3 - 4085.855 * x^4 + 6455.777 * x^5 - 4849.648 * x^6 + 1395.118 * x^7$
14	OUT	PS3	$0.9244991 - 5.839945 * x + 17.27368 * x^2 - 10.88366 * x^3$
14	OUT	PS5	$1.394703 - 20.22514 * x + 121.9223 * x^2 - 298.9875 * x^3 + 332.2042 * x^4 - 135.4191 * x^5$
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	P0	$1.097175 - 8.32892 * x + 26.88881 * x^2 - 18.66802 * x^3$

16	IN	P1	$0.8531377 + 17.20115 * x - 180.3625 * x^2 + 506.7494 * x^3 - 535.9564 * x^4 + 192.5042 * x^5$
16	IN	P2	$1.034195 - 0.9457815 * x - 111.1349 * x^2 + 940.9441 * x^3 - 3044.111 * x^4 + 4745.717 * x^5 - 3557.581 * x^6 + 1027.066 * x^7$
16	IN	PS3	$0.9930796 - 5.759808 * x + 17.20009 * x^2 - 11.21408 * x^3$
16	IN	PS5	$1.36508 - 16.43527 * x + 91.57817 * x^2 - 209.8561 * x^3 + 223.974 * x^4 - 89.74527 * x^5$
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	P0	$1.132192 - 9.633272 * x + 30.2373 * x^2 - 20.67965 * x^3$
16	OUT	P1	$0.9550269 + 8.984838 * x - 128.4877 * x^2 + 380.918 * x^3 - 404.1029 * x^4 + 142.7893 * x^5$
16	OUT	P2	$1.098348 - 5.385428 * x - 74.04691 * x^2 + 814.6465 * x^3 - 2817.945 * x^4 + 4499.648 * x^5 - 3393.51 * x^6 + 976.5513 * x^7$
16	OUT	PS3	$0.8652076 - 5.19172 * x + 15.97641 * x^2 - 10.21405 * x^3$
16	OUT	PS5	$1.389462 - 20.3679 * x + 122.364 * x^2 - 295.6145 * x^3 + 322.8811 * x^4 - 129.7168 * x^5$
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	P0	$1.062777 - 7.744125 * x + 25.17322 * x^2 - 17.53508 * x^3$
21	IN	P1	$0.909678 + 8.334148 * x - 111.0677 * x^2 + 340.6922 * x^3 - 376.4972 * x^4 + 138.5856 * x^5$
21	IN	P2	$1.039175 - 4.800757 * x - 45.46248 * x^2 + 538.6192 * x^3 - 1871.887 * x^4 + 3005.634 * x^5 - 2288.261 * x^6 + 666.0746 * x^7$
21	IN	PS3	$0.9002427 - 5.030165 * x + 15.933 * x^2 - 10.61373 * x^3$
21	IN	PS5	$1.225115 - 14.67523 * x + 84.73024 * x^2 - 197.4641 * x^3 + 213.3371 * x^4 - 86.31631 * x^5$
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	P0	$1.061805 - 9.353015 * x + 30.70084 * x^2 - 21.41935 * x^3$
21	OUT	P1	$0.9023185 + 7.417774 * x - 113.2758 * x^2 + 348.069 * x^3 - 377.004 * x^4 + 134.881 * x^5$
21	OUT	P2	$1.044573 - 7.0033 * x - 42.48945 * x^2 + 619.0039 * x^3 - 2258.868 * x^4 + 3698.912 * x^5 - 2833.695 * x^6 + 824.0858 * x^7$
21	OUT	PS3	$0.8183692 - 5.266493 * x + 16.8361 * x^2 - 11.02251 * x^3$
21	OUT	PS5	$1.273021 - 18.63494 * x + 111.5701 * x^2 - 267.1332 * x^3 + 291.422 * x^4 - 117.6021 * x^5$

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. A.4: Aproximační polynomy pro přístupové sítě PON ve víkendových dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
10	IN	P0	$1.035353 - 6.965502 * x + 22.78021 * x^2 - 15.85051 * x^3$
10	IN	P1	$0.9749235 - 0.640218 * x - 28.94055 * x^2 + 121.5946 * x^3 - 146.9973 * x^4 + 55.00808 * x^5$
10	IN	P2	$1.009385 - 3.689537 * x - 58.7765 * x^2 + 619.0081 * x^3 - 2114.119 * x^4 + 3365.043 * x^5 - 2542.251 * x^6 + 734.7751 * x^7$
10	IN	PS3	$1.010301 - 5.327441 * x + 15.81396 * x^2 - 10.32886 * x^3$
10	IN	PS5	$1.265902 - 11.95431 * x + 58.47016 * x^2 - 117.4051 * x^3 + 114.8846 * x^4 - 44.20135 * x^5$
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	P0	$0.9827676 - 8.053743 * x + 24.86829 * x^2 - 16.83976 * x^3$
10	OUT	P1	$1.02803 - 12.69402 * x + 53.67817 * x^2 - 62.98507 * x^3 + 21.93044 * x^4$
10	OUT	P2	$0.9591917 - 5.25151 * x - 30.34358 * x^2 + 325.7328 * x^3 - 890.6519 * x^4 + 1118.709 * x^5 - 674.9945 * x^6 + 156.798 * x^7$
10	OUT	PS3	$0.730624 - 4.043006 * x + 14.69817 * x^2 - 10.29485 * x^3$
10	OUT	PS5	$1.340731 - 18.62005 * x + 101.7122 * x^2 - 214.3472 * x^3 + 205.8742 * x^4 - 74.90849 * x^5$
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	P0	$0.9457568 - 6.960881 * x + 23.39566 * x^2 - 16.46634 * x^3$
14	IN	P1	$0.9422964 - 6.590396 * x + 19.58229 * x^2 - 3.036773 * x^3 - 17.52973 * x^4 + 7.546511 * x^5$
14	IN	P2	$0.9172489 - 3.518941 * x - 49.70201 * x^2 + 519.6948 * x^3 - 1726.345 * x^4 + 2687.182 * x^5 - 1996.569 * x^6 + 569.2552 * x^7$
14	IN	PS3	$0.8301902 - 4.635144 * x + 15.47788 * x^2 - 10.54803 * x^3$
14	IN	PS5	$1.186399 - 14.21479 * x + 79.03216 * x^2 - 174.0709 * x^3 + 179.0711 * x^4 - 70.09027 * x^5$

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	P0	$0.9751436 - 8.361824 * x + 26.97273 * x^2 - 18.64467 * x^3$
14	OUT	P1	$1.011618 - 12.10322 * x + 50.39564 * x^2 - 57.16412 * x^3 + 20.00291 * x^4 - 1.201446 * x^5$
14	OUT	P2	$0.9322054 - 3.046079 * x - 96.61127 * x^2 + 872.8445 * x^3 - 2769.346 * x^4 + 4161.019 * x^5 - 2994.208 * x^6 + 829.3574 * x^7$
14	OUT	PS3	$0.730312 - 3.959595 * x + 14.16338 * x^2 - 9.749424 * x^3$
14	OUT	PS5	$1.35014 - 19.52316 * x + 111.5617 * x^2 - 248.3744 * x^3 + 250.6966 * x^4 - 94.6991 * x^5$
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	P0	$0.9833234 - 7.589849 * x + 24.08616 * x^2 - 16.54635 * x^3$
16	IN	P1	$0.9877724 - 7.999581 * x + 22.16254 * x^2 + 8.512038 * x^3 - 45.50562 * x^4 + 22.77613 * x^5$
16	IN	P2	$0.9436767 - 3.089298 * x - 46.79057 * x^2 + 398.9718 * x^3 - 1125.876 * x^4 + 1547.559 * x^5 - 1053.632 * x^6 + 282.8456 * x^7$
16	IN	PS3	$0.8421101 - 4.818842 * x + 16.20563 * x^2 - 11.19565 * x^3$
16	IN	PS5	$1.30572 - 16.15557 * x + 85.4263 * x^2 - 177.0431 * x^3 + 170.7533 * x^4 - 63.32913 * x^5$
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	P0	$0.990942 - 8.23156 * x + 25.85937 * x^2 - 17.66018 * x^3$
16	OUT	P1	$1.027062 - 11.94986 * x + 50.34666 * x^2 - 57.48712 * x^3 + 19.02182 * x^4$
16	OUT	P2	$0.9611497 - 4.681702 * x - 45.17521 * x^2 + 458.5563 * x^3 - 1375.699 * x^4 + 1938.723 * x^5 - 1320.949 * x^6 + 349.2222 * x^7$
16	OUT	PS3	$0.7005519 - 3.654983 * x + 13.66158 * x^2 - 9.570418 * x^3$
16	OUT	PS5	$1.38403 - 20.37331 * x + 115.7716 * x^2 - 254.2847 * x^3 + 252.0164 * x^4 - 93.48983 * x^5$
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	P0	$0.9053241 - 6.360311 * x + 20.56404 * x^2 - 14.21041 * x^3$
21	IN	P1	$0.9559418 - 11.61254 * x + 59.23 * x^2 - 105.8518 * x^3 + 88.6812 * x^4 - 30.50413 * x^5$
21	IN	P2	$0.8979958 - 5.314875 * x - 14.9861 * x^2 + 255.7863 * x^3 - 814.2242 * x^4 + 1172.851 * x^5 - 811.6524 * x^6 + 217.5413 * x^7$
21	IN	PS3	$0.7861025 - 4.244983 * x + 15.17272 * x^2 - 10.74099 * x^3$

21	IN	PS5	$1.107967 - 11.9333 * x + 61.05509 * x^2 - 118.3121 * x^3 + 108.5069 * x^4 - 39.47219 * x^5$
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	P0	$0.9190849 - 7.758607 * x + 25.04513 * x^2 - 17.31209 * x^3$
21	OUT	P1	$0.9655041 - 12.56882 * x + 59.77717 * x^2 - 89.98078 * x^3 + 59.39055 * x^4 - 16.6901 * x^5$
21	OUT	P2	$0.9027989 - 5.711418 * x - 25.00298 * x^2 + 339.9232 * x^3 - 1043.198 * x^4 + 1459.313 * x^5 - 979.1998 * x^6 + 253.8666 * x^7$
21	OUT	PS3	$0.6455974 - 3.66374 * x + 14.46866 * x^2 - 10.40754 * x^3$
21	OUT	PS5	$1.244239 - 18.18686 * x + 102.4722 * x^2 - 219.7618 * x^3 + 214.1234 * x^4 - 78.92565 * x^5$
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. A.5: Aproximační polynomy pro rádiové přístupové sítě v pracovních dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
17	IN	P0	$0.8090573 - 8.954706 * x + 35.1229 * x^2 - 26.18321 * x^3$
17	IN	P1	$0.07359361 + 68.31676 * x - 621.9484 * x^2 + 1627.181 * x^3 - 1653.045 * x^4 + 580.2161 * x^5$
17	IN	P2	$3.94618 - 347.0271 * x + 3731.895 * x^2 - 15073.56 * x^3 + 29743.86 * x^4 - 30792.18 * x^5 + 16054.68 * x^6 - 3320.814 * x^7$
17	IN	PS3	$0.5309004 - 2.818976 * x + 12.08623 * x^2 - 8.438541 * x^3$
17	IN	PS5	$1.067026 - 20.23348 * x + 143.4856 * x^2 - 378.9813 * x^3 + 434.5466 * x^4 - 179.3702 * x^5$
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	P0	$0.7287927 - 8.934245 * x + 35.20236 * x^2 - 26.3533 * x^3$
17	OUT	P1	$0.5525356 + 9.678908 * x - 131.8375 * x^2 + 416.5034 * x^3 - 464.0088 * x^4 + 169.7551 * x^5$
17	OUT	P2	$0.7226309 - 7.458461 * x - 59.74016 * x^2 + 979.0564 * x^3 - 3923.712 * x^4 + 6865.253 * x^5 - 5528.203 * x^6 + 1674.725 * x^7$
17	OUT	PS3	$0.4926341 - 3.876695 * x + 16.20059 * x^2 - 11.6533 * x^3$
17	OUT	PS5	$1.046321 - 21.56696 * x + 148.3889 * x^2 - 382.0973 * x^3 + 432.5516 * x^4 - 177.9805 * x^5$

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	P0	$0.9115738 - 6.441291 * x + 23.84932 * x^2 - 17.55663 * x^3$
18	IN	P1	$1.051423 - 20.93415 * x + 128.9264 * x^2 - 270.4469 * x^3 + 242.0366 * x^4 - 79.87048 * x^5$
18	IN	P2	$1.428242 - 62.29916 * x + 655.0864 * x^2 - 3022.526 * x^3 + 7510.324 * x^4 - 10263.2 * x^5 + 7194.158 * x^6 - 2012.213 * x^7$
18	IN	PS3	$0.7098991 - 1.114182 * x + 7.422487 * x^2 - 6.328727 * x^3$
18	IN	PS5	$1.313306 - 14.92069 * x + 86.19851 * x^2 - 182.79 * x^3 + 169.9909 * x^4 - 59.03415 * x^5$
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	P0	$0.997514 - 9.196696 * x + 31.2284 * x^2 - 22.16952 * x^3$
18	OUT	P1	$0.311076 + 64.02414 * x - 690.8638 * x^2 + 1830.893 * x^3 - 1837.295 * x^4 + 633.7898 * x^5$
18	OUT	P2	$1.276343 - 39.6243 * x + 397.6402 * x^2 - 1493.65 * x^3 + 2576.084 * x^4 - 2055.342 * x^5 + 614.4753 * x^6$
18	OUT	PS3	$0.7320782 - 3.854694 * x + 13.65093 * x^2 - 9.251063 * x^3$
18	OUT	PS5	$1.232318 - 19.223 * x + 125.7504 * x^2 - 318.4251 * x^3 + 356.9616 * x^4 - 145.6528 * x^5$
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. A.6: Aproximační polynomy pro rádiové přístupové sítě ve víkendových dnech.

Port	Směr	Ozn.	Polynom
17	IN	P0	$0.6556684 - 6.557395 * x + 25.33074 * x^2 - 18.82402 * x^3$
17	IN	P1	$0.7042176 - 11.63836 * x + 66.71275 * x^2 - 119.4973 * x^3 + 97.59548 * x^4 - 33.27177 * x^5$
17	IN	P2	$0.4372954 + 17.80425 * x - 320.7926 * x^2 + 1950.554 * x^3 - 5455.91 * x^4 + 7805.711 * x^5 - 5546.849 * x^6 + 1549.65 * x^7$
17	IN	PS3	$0.3254925 - 0.9967557 * x + 9.817399 * x^2 - 8.266621 * x^3$
17	IN	PS5	$1.053939 - 20.8916 * x + 143.4182 * x^2 - 355.315 * x^3 + 382.9705 * x^4 - 150.8421 * x^5$



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	P0	$0.6665629 - 8.144213 * x + 32.71918 * x^2 - 24.60369 * x^3$
17	OUT	P1	$0.6482536 - 6.09508 * x + 3.315179 * x^2 + 114.3895 * x^3 - 206.4332 * x^4 + 94.8132 * x^5$
17	OUT	P2	$0.1951268 + 44.39849 * x - 708.1921 * x^2 + 4079.379 * x^3 - 11059.7 * x^4 + 15418.33 * x^5 - 10696.53 * x^6 + 2922.756 * x^7$
17	OUT	PS3	$0.2141629 - 0.6653248 * x + 9.589101 * x^2 - 8.178112 * x^3$
17	OUT	PS5	$1.168907 - 25.871 * x + 174.3193 * x^2 - 426.9254 * x^3 + 454.0441 * x^4 - 176.2594 * x^5$
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	P0	$0.7659795 - 4.690199 * x + 19.41944 * x^2 - 14.76074 * x^3$
18	IN	P1	$0.6153854 + 11.45817 * x - 147.3633 * x^2 + 413.4383 * x^3 - 420.5124 * x^4 + 143.0984 * x^5$
18	IN	P2	$-0.6491164 + 153.4054 * x - 2236.083 * x^2 + 11797 * x^3 - 29781.69 * x^4 + 39028.2 * x^5 - 25629.25 * x^6 + 6669.809 * x^7$
18	IN	PS3	$0.6825134 - 2.605789 * x + 11.00662 * x^2 - 8.050562 * x^3$
18	IN	PS5	$1.070887 - 13.01171 * x + 79.8375 * x^2 - 184.7302 * x^3 + 193.1068 * x^4 - 75.46395 * x^5$
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	P0	$0.8279481 - 7.968092 * x + 26.19936 * x^2 - 18.23682 * x^3$
18	OUT	P1	$0.9321039 - 18.74962 * x + 103.02 * x^2 - 182.3167 * x^3 + 137.9482 * x^4 - 40.01156 * x^5$
18	OUT	P2	$1.280709 - 56.12974 * x + 494.4991 * x^2 - 1720.567 * x^3 + 2859.663 * x^4 - 2254.354 * x^5 + 676.43 * x^6$
18	OUT	PS3	$0.4688324 - 2.143725 * x + 11.96759 * x^2 - 9.401974 * x^3$
18	OUT	PS5	$1.267805 - 21.93203 * x + 134.2538 * x^2 - 305.6383 * x^3 + 308.091 * x^4 - 115.3262 * x^5$
18	OUT	PS7	$0.5188911 + 12.18892 * x - 277.193 * x^2 + 1801.502 * x^3 - 5122.769 * x^4 + 7292.195 * x^5 - 5105.66 * x^6 + 1400.101 * x^7$

Tab. A.7: Analýza aproximačních polynomů pro přístupové sítě CATV.

<b>Port</b>	Pracovní dny				Víkendové dny			
<b>8</b>	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.2225613	3	0.4773221	3	0.1343182	3	0.271889
P1	5	0.06138407	5	1.073436	5	0.2043554	5	0.3805298
P2	7	0.03898314	7	0.1301771	7	0.09180681	7	0.1432602
PS3	3	0.09881515	3	0.1803773	3	0.105538	3	0.1736202
PS5	5	0.03726149	5	0.05418515	5	0.07775275	5	0.1127738
PS7	7	0.02699115	7	0.03672566	7	0.03587698	7	0.04556715

<b>Port</b>	Pracovní dny				Víkendové dny			
<b>9</b>	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.2792908	3	0.4873399	3	0.1587906	3	0.2729083
P1	5	0.6231039	5	0.9679234	5	0.2189102	5	0.3756624
P2	7	0.06227062	7	0.1483979	7	0.1170057	7	0.1469992
PS3	3	0.1250497	3	0.1828764	3	0.1033077	3	0.1751757
PS5	5	0.04982828	5	0.05602675	5	0.08275419	5	0.1110505
PS7	7	0.03242594	7	0.03953598	7	0.04134039	7	0.04560206

<b>Port</b>	Pracovní dny				Víkendové dny			
<b>12</b>	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.343957	3	0.4705071	3	0.1664688	3	0.3047185
P1	5	0.8680984	5	0.9963081	5	0.3032353	5	0.4722439
P2	7	0.1107381	7	0.1460609	7	0.1201122	7	0.1528277
PS3	3	0.1381702	3	0.174682	3	0.1243635	3	0.1717128
PS5	5	0.04874231	5	0.05761263	5	0.09404581	5	0.114574
PS7	7	0.03629899	7	0.0393064	7	0.05010552	7	0.04711789

<b>Port</b>	Pracovní dny				Víkendové dny			
<b>13</b>	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE

P0	3	0.3148514	3	0.4822505	3	0.1664688	3	0.2839644
P1	5	0.7277468	5	0.9736701	5	0.3032353	5	0.4228934
P2	7	0.09577679	7	0.1654031	7	0.1201122	7	0.1311651
PS3	3	0.1413696	3	0.1825582	3	0.1243635	3	0.1785817
PS5	5	0.0549418	5	0.06137101	5	0.09404581	5	0.1143821
PS7	7	0.03765775	7	0.04204083	7	0.05010552	7	0.04776549

Tab. A.11: Analýza aproximačních polynomů pro přístupové sítě PON.

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
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

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.4609883	3	0.4710722	3	0.2238378	3	0.2838928
P1	5	1.261643	5	1.169458	5	0.2506544	5	0.4363069
P2	7	0.204315	7	0.1561274	7	0.09664404	7	0.1467999
PS3	3	0.1737002	3	0.1802541	3	0.1174226	3	0.1710094
PS5	5	0.06353725	5	0.06475933	5	0.08188412	5	0.1162004
PS7	7	0.04016152	7	0.04122978	7	0.04496753	7	0.04990303

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.3106775	3	0.3541386	3	0.1960587	3	0.2543055
P1	5	0.6645562	5	0.6883584	5	0.3172261	5	0.4115382
P2	7	0.1148908	7	0.1132188	7	0.1938247	7	0.1807725
PS3	3	0.1245873	3	0.1654207	3	0.1375621	3	0.1725565

PS5	5	0.06239138	5	0.05386284	5	0.1029031	5	0.107957
PS7	7	0.04082469	7	0.03793646	7	0.04876052	7	0.04114731

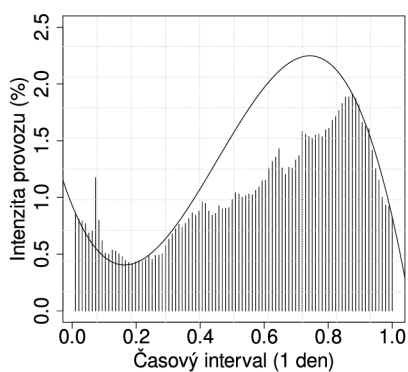
Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.2629431	3	0.3779476	3	0.129063	3	0.2154437
P1	5	0.470732	5	0.5914554	5	0.1497971	5	0.3131536
P2	7	0.07321341	7	0.104861	7	0.09803644	7	0.1597108
PS3	3	0.1146507	3	0.1510231	3	0.1008104	3	0.1508528
PS5	5	0.04519891	5	0.04905929	5	0.07871403	5	0.09472187
PS7	7	0.03583431	7	0.03665383	7	0.0392055	7	0.03921834

Tab. A.15: Analýza aproximačních polynomů pro rádiové přístupové sítě.

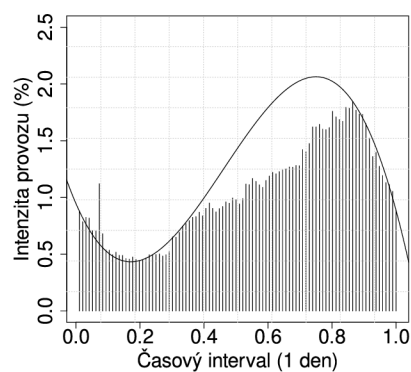
Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.7252778	3	0.6099754	3	0.3580347	3	0.5875471
P1	5	2.665573	5	0.7598933	5	0.396435	5	0.1.185954
P2	7	2.815115	7	0.3388821	7	0.2393624	7	0.3318643
PS3	3	0.2520267	3	0.2556197	3	0.2535724	3	0.2712605
PS5	5	0.09978059	5	0.1170718	5	0.1784254	5	0.1661932
PS7	7	0.08771386	7	0.1004237	7	0.1280988	7	0.1211532

Port	Pracovní dny				Víkendové dny			
	Uplink (IN)		Downlink (OUT)		Uplink (IN)		Downlink (OUT)	
Pol.	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE	St.	RMSE
P0	3	0.4533464	3	0.4577634	3	0.3154825	3	0.3111969
P1	5	0.3017307	5	4.71847	5	1.149805	5	0.4414166
P2	7	0.5669355	7	0.3558961	7	1.047768	7	0.5129563
PS3	3	0.1858198	3	0.2241623	3	0.1806286	3	0.2158507
PS5	5	0.1404529	5	0.131693	5	0.1561526	5	0.1459696
PS7	7	0.0966361	7	0.1213562	7	0.1080277	7	0.09086603

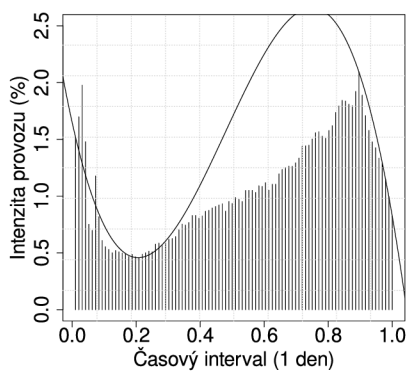
## B Výsledky a výstupy zpracovaných dat



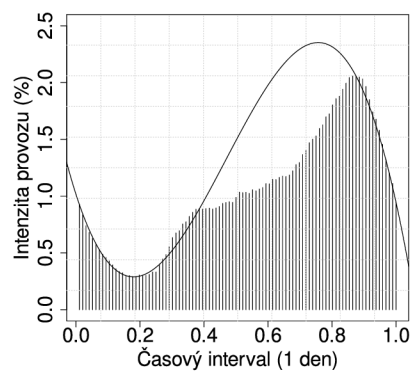
(a) Pondělí IN



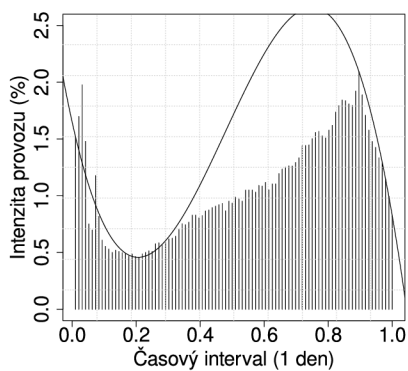
(b) Úterý IN



(c) Středa IN

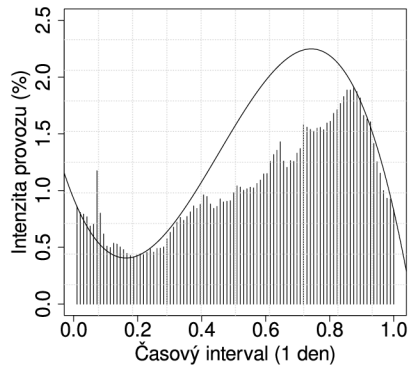


(d) Čtvrtek IN

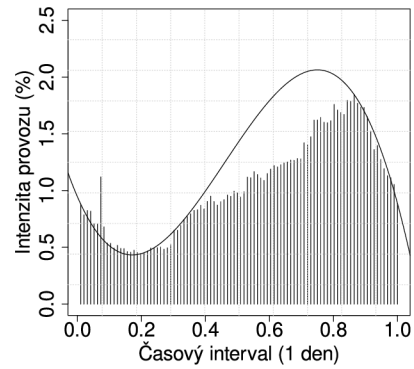


(e) Pátek IN

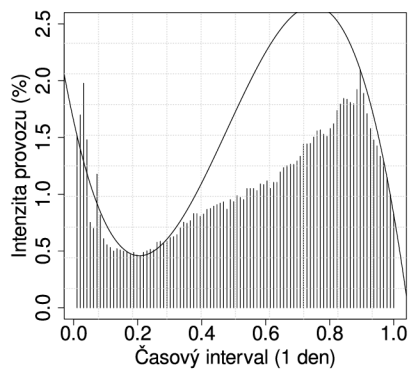
Obr. B.1: Polynom  $P_0$  pro port 10 v přístupové síti PON v jednotlivých dnech týdnu směr IN.



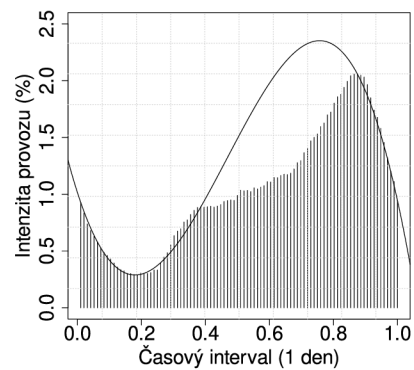
(a) Pondělí OUT



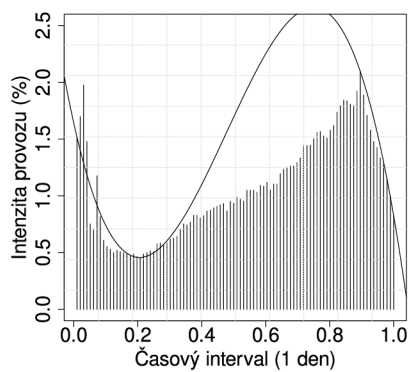
(b) Úterý OUT



(c) Středa OUT

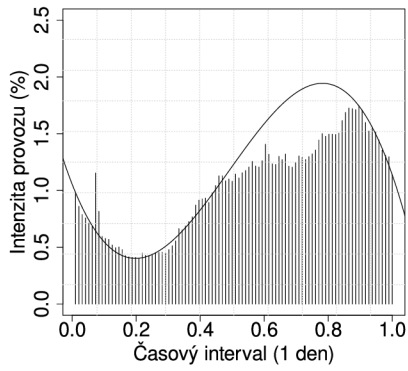


(d) Čtvrtek OUT

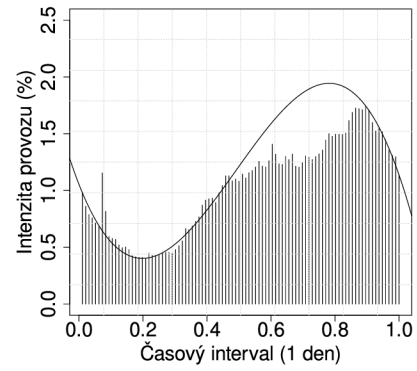


(e) Pátek OUT

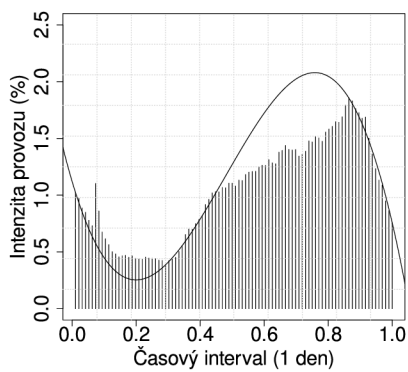
Obr. B.2: Polynom P0 pro port 10 v přístupové síti PON v jednotlivých dnech týdnu směr OUT.



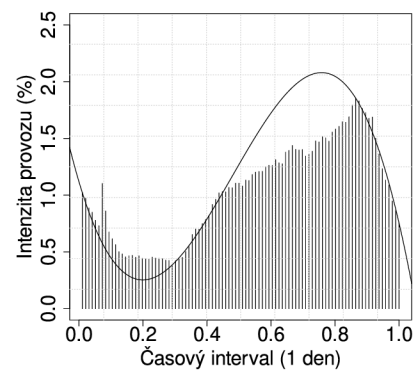
(a) Sobota IN



(b) Sobota OUT

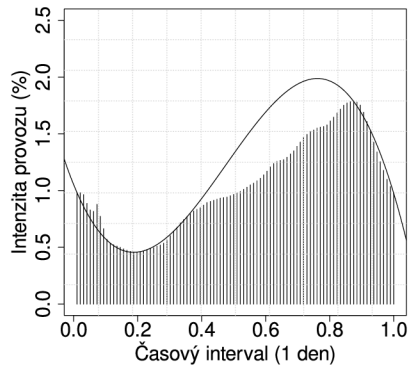


(c) Neděle IN

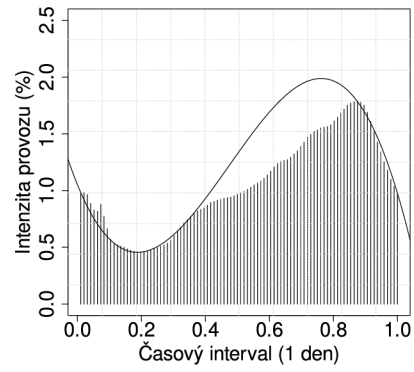


(d) Neděle OUT

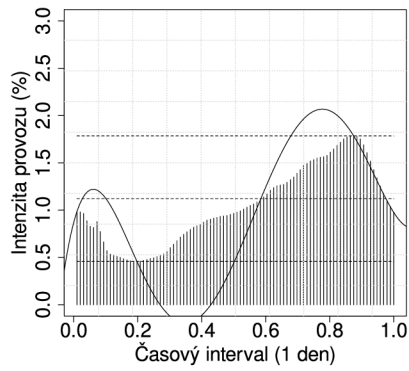
Obr. B.3: Polynom P0 pro port 10 v přístupové síti PON ve víkendových dnech.



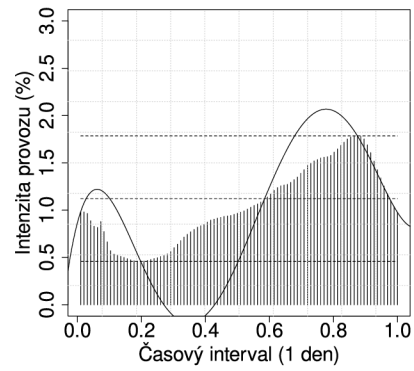
(a) P0 IN



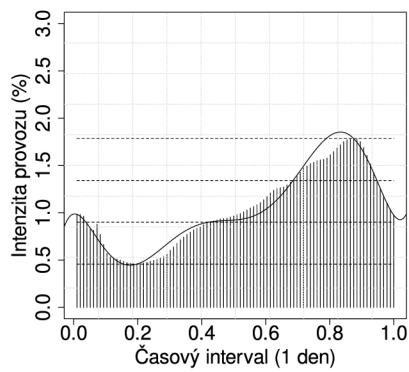
(b) P0 OUT



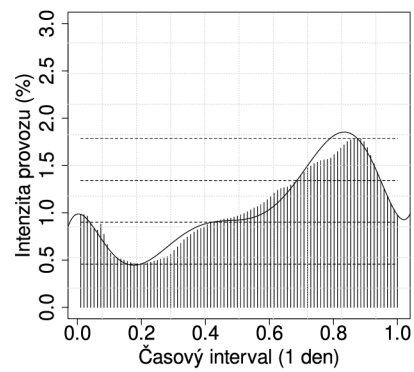
(c) P1 IN



(d) P1 OUT



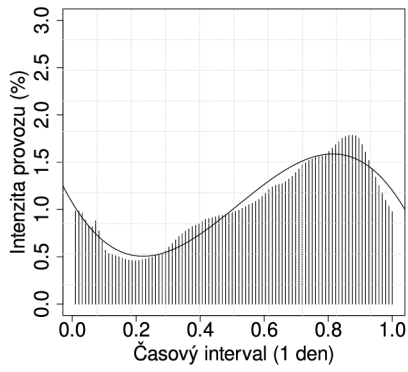
(e) P2 IN



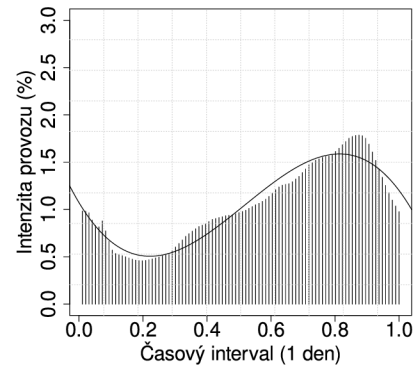
(f) P2 OUT

Obr. B.4: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy P0, P1 a P2.

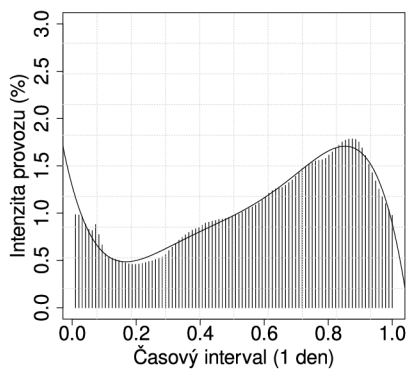




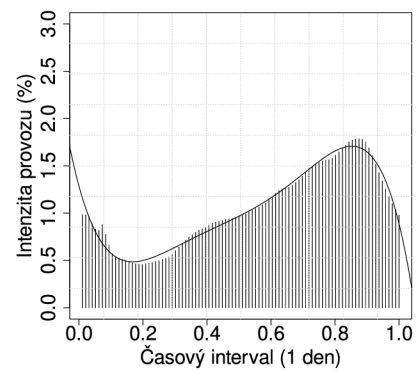
(a) PS3 IN



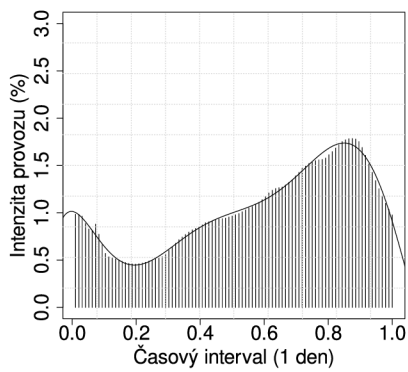
(b) PS3 OUT



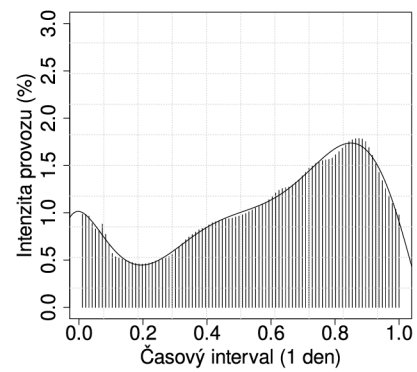
(c) PS5 IN



(d) PS5 OUT

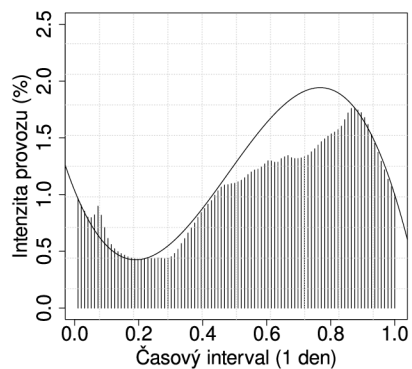


(e) PS7 IN

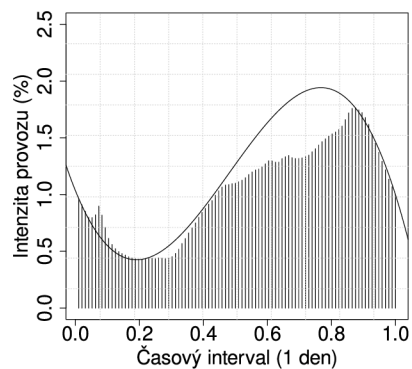


(f) PS7 OUT

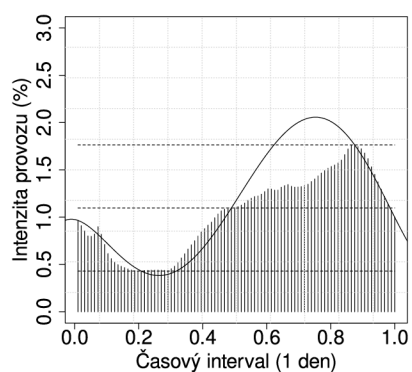
Obr. B.5: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON v pracovních dnech pro polynomy PS3, PS5 a PS7.



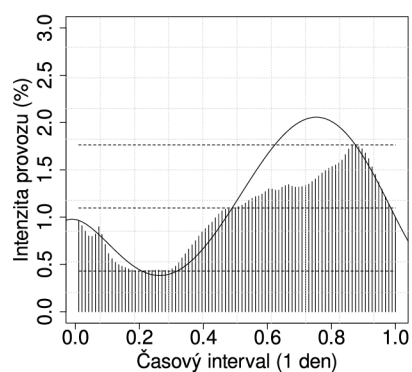
(a) P0 IN



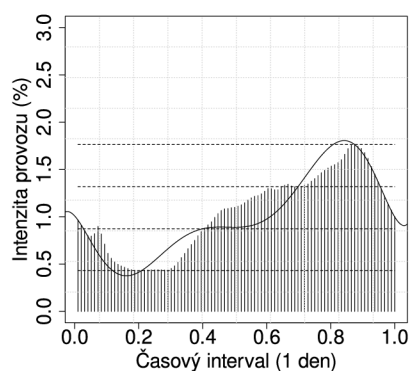
(b) P0 OUT



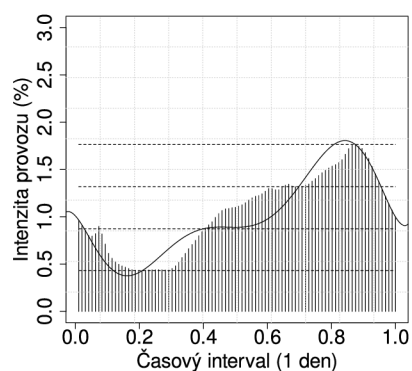
(c) P1 IN



(d) P1 OUT

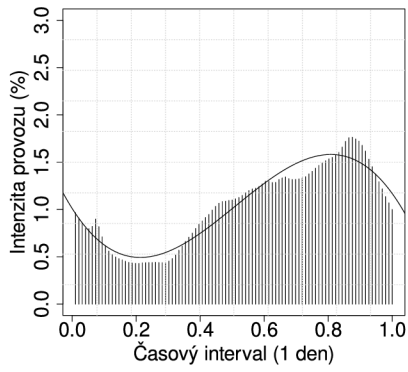


(e) P2 IN

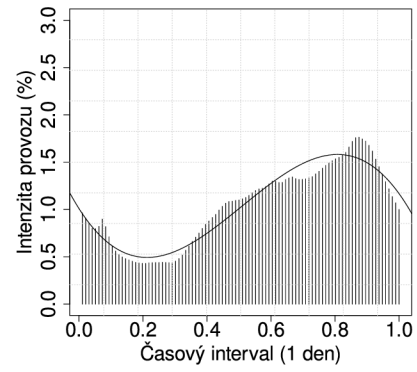


(f) P2 OUT

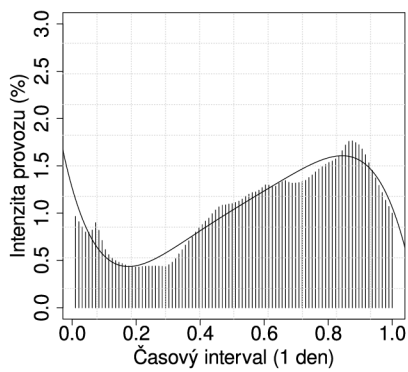
Obr. B.6: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON ve víkendových dnech pro polynomy P0, P1 a P2.



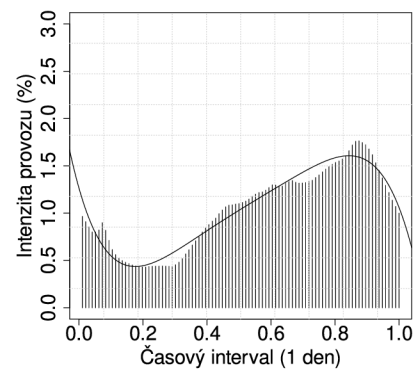
(a) PS3 IN



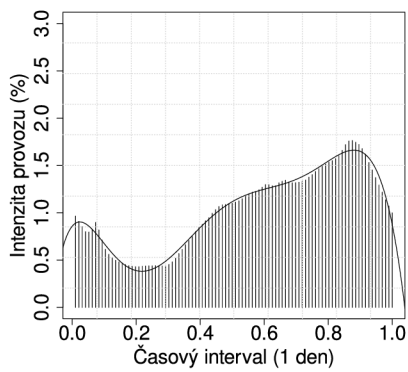
(b) PS3 OUT



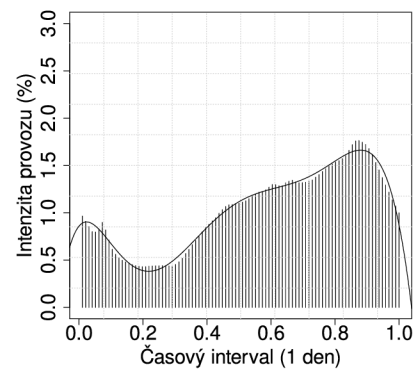
(c) PS5 IN



(d) PS5 OUT



(e) PS7 IN



(f) PS7 OUT

Obr. B.7: Aproximační polynomy pro port 10 v přístupové síti PON ve víkendových dnech pro polynomy PS3, PS5 a PS7.