

**eské vysoké u ení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická**

**DISERTA NÍ PRÁCE**

**Praha, únor 2014**

**Ing. Jaroslav Krej í**

eské vysoké u ení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunika ní techniky

**MODELOVÁNÍ IMPULSNÍHO RUTENÍ V  
Ú ASTNICKÝCH P ÍPOJKÁCH**

Diserta ní práce

**Ing. Jaroslav Krej í**

Praha, únor 2014

Doktorský studijní program: (P2612) Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: (2601V013) Telekomunika ní technika

<sup>TM</sup>kolitel: Ing. Tomá–Zeman Ph.D.

## **Podkování**

Rád bych chtěl podkovat kolektivi Ing. Tomáši Zemanovi Ph.D., za celkové vedení a koordinaci práce, v novém období i trpělivost, cenné rady a konzultace během celého doktorského studia. Dále bych chtěl podkovat Ing. Jiřímu Vodráfkovi Ph.D. a Ing. Pavlovi Lafatovi Ph.D. za cenné rady, náměty a připomínky. Také bych rád podkovoval svým rodičům a přátelům za morální podporu.

## **Anotace**

Tato diserta ní práce se zabývá analýzou a modelováním impulsního rušení injektovaného do účastnických pářípojek xDSL v blízkosti uživateleova modemu. Zdrojem tohoto impulsního rušení jsou nejastěji zařizení a přístroje běžně se vyskytující v domácnostech. Modely popsané v této diserta ní práci vychází z reálného impulsního rušení od vybraného souboru elektrických spotřebičů. Tyto impulsní rušení byly podrobně analyzovány. Vytvořený model zohledňuje spektrální hustotu výkonu PSD reálného impulsního rušení a přidává náhodně modelovanou fázovou funkci s příslušným pravděpodobnostním rozdělením. Při modelování celkového průběhu impulsního rušení zohledňuje bílý Gaussovský šum mezi impulsy a doby mezi příchody impulsů jsou modelovány Poissonovským tokem, deterministickým a Paretovým rozdělením.

## **Annotation**

This doctoral thesis deals with the analyses and modelling of the impulse noise injected into the xDSL subscriber lines near to the user modem. The equipment and devices commonly found in households are the sources of this impulse noise. The models described in this thesis are based on the real impulse noises from a selected set of domestic appliances. These impulse noises have been analysed in detail. The newly created model considers the power spectral density PSD of real impulse noise and adds a random modelled phase function with appropriate probability distribution. The new model also considers the white Gaussian noise between impulses during modelling, the total impulse noise and the inter-arrival time is modelled by the Poisson flow, the deterministic and the Pareto distribution.

# Obsah

<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....</b>	<b>7</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ .....</b>	<b>8</b>
<b>1 ÚVOD K PRÁCI.....</b>	<b>10</b>
<b>2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....</b>	<b>12</b>
2.1 xDSL SYSTÉMY.....	13
2.1.1 <i>Symetrické páry</i> .....	13
2.1.2 <i>ADSL2+</i> .....	14
2.1.3 <i>VDSL2</i> .....	15
2.1.4 <i>Nové směry DSL systémů</i> .....	17
2.2 RUŠENÍ.....	22
2.3 IMPULSNÍ RUŠENÍ .....	23
2.3.1 <i>Rušení REIN, SHINE a PEIN</i> .....	24
2.3.2 <i>Testování odolnosti proti impulsnímu rušení</i> .....	25
2.3.3 <i>Cookův impuls</i> .....	26
2.3.4 <i>Model impulsního rušení Henkel/Kessler</i> .....	27
2.4 METODY OCHRANY PROTI IMPULSNÍMU RUŠENÍ .....	35
2.4.1 <i>Ochrana proti impulsnímu rušení INP</i> .....	36
2.4.2 <i>Opětovný přenos (Retransmission)</i> .....	37
<b>3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....</b>	<b>40</b>
<b>4 ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ A POUŽITÉ PROSTŘEDKY .....</b>	<b>41</b>
4.1 ÚČINEK IMPULSNÍHO RUŠENÍ NA IPTV .....	41
4.1.1 <i>Měřicí pracoviště</i> .....	41
4.1.2 <i>Vliv ochrany proti impulsnímu rušení na přenosovou rychlost</i> .....	44
4.1.3 <i>Dílčí závěr experimentu</i> .....	44
4.2 IMPULSNÍ RUŠENÍ TESTOVANÝCH VZORKŮ .....	45
4.2.1 <i>Vzorky elektrických spotřebičů</i> .....	45
4.2.2 <i>Měřicí pracoviště</i> .....	46
4.2.3 <i>Naměřená rušení od testovaných vzorků</i> .....	47
4.3 POSTUP ANALÝZY NAMĚŘENÝCH RUŠENÍ A MODELOVÁNÍ IMPULSŮ.....	49
4.3.1 <i>Výpočet spektrální hustoty výkonu (PSD)</i> .....	50
<b>5 ANALÝZA IMPULSNÍHO RUŠENÍ .....</b>	<b>52</b>
5.1 ANALÝZA AMPLITUDY IMPULSNÍHO RUŠENÍ .....	52
5.1.1 <i>Dílčí závěr</i> .....	55
5.2 ANALÝZA DOBY TRVÁNÍ IMPULSŮ .....	56
5.2.1 <i>Dílčí závěry</i> .....	57
5.3 ANALÝZA DOB MEZI PŘÍCHODY IMPULSŮ (INTER-ARRIVAL TIME) .....	58
5.3.1 <i>Dílčí závěry</i> .....	60
5.4 ANALÝZA ŠUMU NA POZADÍ.....	61
5.4.1 <i>Dílčí závěr</i> .....	62
<b>6 MODELOVÁNÍ IMPULSNÍHO RUŠENÍ .....</b>	<b>63</b>
6.1 MODELOVÁNÍ IMPULSŮ.....	64
6.1.1 <i>Spektrální hustota výkonu PSD impulsů</i> .....	65
6.1.2 <i>Modelování náhodné fáze a impulsu</i> .....	72

6.2	MODELOVÁNÍ ŠUMU NA POZADÍ .....	78
6.3	MODELOVÁNÍ DOBY MEZI IMPULSY .....	80
6.3.1	<i>Poissonovský tok</i> .....	80
6.3.2	<i>Paretovo rozdělení</i> .....	83
6.3.3	<i>Deterministické rozdělení</i> .....	84
6.3.4	<i>Výsledné modelování impulsního rušení</i> .....	84
6.4	SHRNUTÍ A VYHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A NASTÍNĚNÍ SMĚRŮ DALŠÍHO VÝZKUMU V DANÉ OBLASTI.....	87
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR PRÁCE .....</b>	<b>90</b>
7.1	SPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	90
7.2	SHRNUTÍ PŘÍNOSŮ DISERTAČNÍ PRÁCE A JEJICH PRAKTICKÉ VYUŽITÍ .....	93
7.3	DALŠÍ VÝZKUM.....	94
<b>8</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>95</b>
<b>9</b>	<b>PUBLIKACE AUTORA.....</b>	<b>98</b>
9.1	PUBLIKACE AUTORA TÝKAJÍCÍ SE NÁPLNĚ A TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE.....	98
9.1.1	<i>Publikace v recenzovaných časopisech</i> .....	98
9.1.2	<i>Publikace excerpované WOS</i> .....	98
9.1.3	<i>Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí</i> .....	98
9.1.4	<i>řešené granty</i> .....	99
9.2	OSTATNÍ PUBLIKACE.....	99
9.2.1	<i>Publikace v recenzovaných časopisech</i> .....	99
9.2.2	<i>Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí</i> .....	99
9.2.3	<i>řešené granty</i> .....	99
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>101</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>102</b>
	<b>PŘÍLOHA.....</b>	<b>103</b>

## Seznam poufitych zkratek

ADSL2+	Asymmetric Digital Subscriber Line 2+	Digitální ústnická p ípojka ADSL druhé generace s vylep-ením
ARQ	Automatic Repeat reQuest	Automatický op tovný p enos
ATU-R	ADSL2+ Transceiver Unit Remote side	ADS2+ modem
AWGN	Additive White Gaussian Noise	P ídavný bílý Gaussovský -um
BER	Bit error ratio	Bitová chybovost
CE	Cyclic extension	Cyklické prodloužení
CRC	Cyclic Redundancy Check	Kontrola cyklickým kódem
DMT	Discrete Multi-Tone Modulation	Diskrétní multitónová modulace
DPBO	Downstream Power Back-off	Omezení vysílaného výkonu v sestupném sm ru
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer	Ústnický multiplexor
DTU	Data Transfer Unit	Datový p enosový rámec
ES	Errored Second	Chybová sekunda
ETR	Expected throughput	O ekávaná propustnost
FEC	Forward error correction	Chybová korekce
FEXT	Far-End Crosstalk	P eslech na vzdáleném konci
FTTcurb	Fiber to the Curb	Optické vlákno je zakon eno ve rozvad i
FTTdp	Fiber to the Distribution Point	Optika do distribu ního bodu
HDSL	High speed digital subscriber line	Vysokorychlostní digitální ústnická p ípojka
INP	Impulse Noise protection	Ochrana proti impulsnímu ru-ení
IPTV	Internet Protocol television	Televize p es internetový protokol
ISDN-BRA	Integrated Services Digital Network - Basic Rate Access	Základní p ípojka k digitální síti integrovaných slufleb
MNLT	Memoryless nonlinear transform	Bezpečná ová nelineární transformace
NDR	Net Data Rate	Ústá užívatelská p enosová rychlost bez záhlaví
NEXT	Near-End Crosstalk	P eslech na blízkém konci
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	Ortogonalní multiplex s kmito tovným d lením
POTS	Plain Old Telephone Service	Analogová telefonní p ípojka
PSD	Power Spectral Density	Spektrální hustota výkonu
QAM	Quadrature amplitude modulation	Kvadrurní amplitudová modulace
QoE	Quality of experience	Kvalita poskytovaných slufleb
rDSLAM	remote DSLAM	Vysunutý ústnický multiplexor
REIN	Repetitive Electrical Impulse Noise	Opakující se impulsní ru-ení
RFI	Radio Frequency Interference	Rádiové ru-ení
RS	Reed-Solomon coding	Reed-Solomonovo kódování
RTX	Retransmission	Op tovný p enos
SID	Sequence Identifier	Identifikace sekvence
UPBO	Upstream Power Back-off	Omezení vysílaného výkonu ve vzestupném sm ru
VDMT	Vectored Discrete Multi-Tone Modulation	Vektorová DMT modulace
VDSL2	Very High Speed Digital Subscriber Line 2	Vysokorychlostní digitální ústnická p ípojka druhé generace
VTU-C	VDSL Transceiver Unit - Central	Ústnický multiplexor
VTU-R	VDSL2 Transceiver Unit ó Remote side	VDS2+ modem
xDSL	x Digital Subscriber Line	Obecné ozna ení celé skupiny digitálních ústnických p ípojek

## Seznam použitých symbol

$\Phi(\omega)$	fázová funkce
$\sigma(\Delta t)$	Landa v symbol
$\lambda, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	p evracená st ední hodnota exponenciálního rozd lení
$\theta, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$	parametr tvaru hustoty pravd podobnosti Paretova rozd lení
$\sigma^2$	rozptyl
$\alpha_i$	kmito et cosinu v modelu aproximované autokorela ní funkce
$\beta_i$	rozklad exponenciální funkce modelu aproximované autokorela ní funkce
$\lambda_o$	odhad p evracené st ední hodnoty exponenciálního rozd lení
$\mu_o$	odhad st ední hodnoty exponenciálního rozd lení
$\Delta t$	asový interval
$\mathbf{B}_{*j}$	sloupcový vektor obsahující indexy impuls , které mají podobné odhady spektrální hustoty výkonu
$\mathbf{C}$	matice odhad spektrálních hustot výkonu
$C_{(d)}$	spektrální hustota výkonu vzork signálu
$C_{(s)}$	spektrální hustota výkonu signálu s(t)
$C_{avg,N}$	zpr m rovaná spektrální hustota výkonu
$C_i, C_j$	odhady spektrální hustoty výkonu
$\mathbf{C}_{N,i}$	sloupcový vektor obsahující odhady spektrální hustoty výkonu
$C_{xx}$	výkonové spektrum
$\mathbf{D}$	matice obsahující pr m rné kvadratické odchylky
$\mathbf{D}_{*j}$	sloupcový vektor matice $\mathbf{D}$
$D_p$	hloubka prokládání
$d_{i,j}$	pr m rná kvadratická odchylka
$E$	pravd podobnost, fle b hem jakékoliv náhodn zvolené sekundy dojde k chyb
$erfc$	chybová funkce
$f$	frekvence
$F(x)$	distribu ní funkce
$f_{exp}$	hustota pravd podobnosti exponenciálního rozd lení
$f_i$	hustota pravd podobnosti amplitudy impulsního ru-ení modelu Henkel/Kessler
$f_t$	hustota pravd podobnosti doby trvání impulsu modelu Henkel/Kessler
$f_{par}$	hustota pravd podobnosti Paretova rozd lení
$f_s$	symbolová datová rychlost
$f_{Ti}$	hustota pravd podobnosti Markovova stavu
$f_{wbl}$	symetrický model hustoty pravd podobnosti Weibullova rozd lení
$H_n$	Hermitovy polynom $n$ -tého stupn
$INP$	ochrana proti impulsnímu ru-ení
$K_C$	konstanta definovaná pro Cookov impuls
$K$	celkový počet datových bajt v Reed-Solomonovu slovu $N_{FEC}$
$L_p$	po et bit ze zpofd né cesty $p$ p ená-ených v kařdém datovém symbolu
$ S(\omega) $	amplitudové spektrum
$\mathbf{M}$	pomocná matice obsahující řádkové vektory $\mathbf{M}_{min}$



$\mathbf{M}_{\min}$	vektor obsahující minimální hodnoty pro každý vektor matice $\mathbf{D}$
$N_{FEC}, N_{FECp}$	Reed-Solomovo slovo
$N_S$	počet stavů Markovova modelu
$\mathbf{P}$	pravděpodobnostní matice Markovova modelu
$p$	zpoždění cesta
$P_0(\Delta t)$	Poissonovský tok elementární pravděpodobnosti přechodu žádného impulsu asového intervalu $\Delta t$
$P_1(\Delta t)$	Poissonovský tok elementární pravděpodobnosti přechodu jednoho impulsu asového intervalu $\Delta t$
$\mathbf{P}_{2st}$	dvou-stavová pravděpodobnostní matice Markovova modelu
$\mathbf{P}_{4st}$	čtyřstavová pravděpodobnostní matice Markovova modelu
$P_{i>1}(\Delta t)$	Pravděpodobnost výskytu více než jednoho impulsu na intervalu $\Delta t$
$p_{ij}$	pravděpodobnosti přechodu ze stavu $i$ do stavu $j$
$P_k(t)$	Poissonova pravděpodobnost přechodu $k$ impulsů vase $t$
$\mathbf{Q}$	matice, která obsahuje indexy impulsů s podobnou spektrální hustotou výkonu
$\mathbf{Q}_{*j}$	sloupcový vektor matice $\mathbf{Q}$
$R_p$	celkový počet zabezpečovacích bajtů v Reed-Solomonovu slovu $N_{FEC}$
$R_{n[k]}$	autokorelační funkce $n[k]$
$R_{xx}$	autokorelační funkce
$\hat{R}_{xx}$	aproximovaná autokorelační funkce
$S(\omega)$	Fourierův obraz signálu $s(t)$
$S_d(a)$	spektrum vzorkovacího signálu $s(t)$ , $s(kT_v) = s[k]$
$S_s(\omega)$	spektrum signálu $s(t)$
$s(t)$	obecný signál v asové oblasti
$s_1, s_2$	parametry určující tvar hustoty pravděpodobnosti doby trvání modelu HK
$S_p$	počet datových symbolů ve zpožděvací cestě $p$
$t$	čas
$t_0$	parametr Paretova rozdělení
$t_1, t_2$	střední hodnota hustoty pravděpodobnosti doby trvání modelu Henkel/Kessler
$T_i$	intervaly dob mezi přechody impulsů Markovova obnovovacího procesu
$t_p$	střední hodnota deterministického rozdělení
$T_v, T_{Sa}$	vzorkovací perioda
$u_0$	parametr udávající tvar funkce hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení
$u_e; u_{e1}, u_{e2}$	amplituda tvaru impulsu; amplituda tvaru impulsu pro impulsy 1 a 2
$U_{-}$	–přímkové napětí impulsu
$V$	průměr h Cookova impulsu
$\mathbf{W}$	matice vzniklá odečtením matice $\mathbf{M}$ od matice $\mathbf{D}$
$\mathbf{W}_{*j}$	sloupcový vektor matice $\mathbf{W}$

# 1 Úvod k práci

Předložená disertační práce se zabývá problematikou modelování impulsního rušení injektovaného do ústřednických pářek xDSL (*Digital Subscriber Line*) v blízkosti uživatele modemu. Zdrojem tohoto rušení jsou proto nejčastěji zařízení a přístroje běžně se vyskytující v domácnostech. Impulsní rušení se vyskytuje jednotlivě nebo ve skupinách tzv. *burstech* s náhodnou amplitudou a spektrálním obsahem. Impulsní rušení dále s přeslech<sup>1</sup> mají negativní dopad a limitují výkonost xDSL pářek.

Již v sedesátých letech 20. století byly provedeny první studie a statistický popis impulsního rušení v etně chyb způsobené impulsním rušením v digitálním přenosu po telefonních pářkách. Tento statistický popis byl použitý pro služby v telefonním pásmu. Avšak jak se později ukázalo, tento popis se ukázal být nedostatečný pro širokopásmový přenos a vysoké přenosové rychlosti. To vedlo v roce 1980 k výzkumu rušení v systému ISDN-BRA (*Integrated Services Digital Network ó Basic Rate Access*) s frekvencním pásmem o šířce 80 kHz, která ve své době postupně nahrazovala přenosní službu analogové telefonie v hovorovém pásmu 300 ó 3400 Hz. [1]

S postupným vývojem vzniká od 90. let minulého století v přístupových sítích skupina digitálních ústřednických pářek oznaovaných xDSL. Byly provedeny další výzkumy impulsního rušení, které přinesly tzv. šCook v impulsě navržený J. Cookem [2]. Další model byl publikován v roce 1999 Wernerem Henkelem a Thomasem Kesslerem z Deutsche Telekom, kteří provedli měření v německé telefonní síti. Ze získaných hodnot odvodili rozložení pravděpodobnosti pro amplitudu impulsu, délku impulsu a intervaly mezi příchody impulsů, více v [3]. Na jejich výzkum bylo navázáno Iainem Mannem a Stephenem McLaughlinem, kteří provedli měření rušení v síti British Telecom. Jejich závěry jsou uvedeny v [4] a potvrdili platnost modelu Henkel-Kessler a přicházejí s n kterými novými postupy modelování impulsního rušení. David B. Levey a Stephen McLaughlin ze získaných dat rušení v síti British Telecom navrhli model dob mezi příchody impulsů jako Markovský proces obnovy (*Markov renewal process*) popsáný v [5].

---

<sup>1</sup> Přeslech (*crosstalk* nebo *xtalk*) představuje rušení vznikající pronikáním signálu z vysílače na sousední páry ve stejném kabelu vlivem kapacitních a indukčních vazeb mezi jednotlivými páry.

Testování odolnosti modemů proti impulsnímu rušení provozované na pásově ADSL2+ (Asymmetric DSL2+) je možné realizovat pomocí impulsů popsaných v doporučení ITU-T G.996.1, které definuje dva základní impulsy [8].

V oblasti standardizace zabývající se impulsním rušením byla velká pozornost věnována rušení REIN (*Repetitive Electrical Impulse Noise*), SHINE (*Single High Impulse Noise*) a PEIN (*Prolonged Electrical Impulse Noise*) podrobněji popsány v [6].

Vzhledem k závažnosti dopadu impulsního rušení byly vytvořeny mechanismy pro ochranu proti impulsnímu rušení v xDSL systémech, především v nejrozšířenějších variantách ADSL2+ a VDSL2 (*Very High Speed DSL2+*). Jedná se o detekci a opravu chyb pomocí chybové korekce FEC (*Forward error correction*) s metodou prokládání. Pro systém VDSL2 byl aplikován nový způsob ochrany proti impulsnímu rušení s opakováním (retransmission) (RTX případně také ARQ).

V této disertační práci jsou navrženy a podrobně popsány možnosti modelování impulsního rušení. Tyto modely vychází z reálného impulsního rušení od vybraného souboru elektrických spotřebičů, které byly podrobně analyzovány. Navržený způsob modelování je matematicky popsán a odvozen.

Průběhem celého výzkumu modelování impulsního rušení byla provedena měření v různých provozních stavech zapojení vybraných elektrických spotřebičů. Nový model zohledňuje spektrální hustotu výkonu PSD reálného impulsního rušení a předpokládá náhodně modelovanou fázovou funkci s příslušným pravděpodobnostním rozdělením. Při modelování celkového průběhu impulsního rušení zohledňuje bílý Gaussovský šum mezi impulsy a doby mezi příchody impulsů jsou modelovány Poissonovským tokem, deterministickým a Paretovým rozdělením. Na základě těchto vlastností se model přibližuje k reálnému impulsnímu rušení. Bylo připraveno několik pomocných a podpůrných výpočetních programů pomocí prostředí Matlab. Konečné výsledky z průběhu celého výzkumu byly průběžně publikovány v domácích i mezinárodních odborných časopisech a na prestižních vědeckých konferencích. Práce byla též podpořena interním grantem VUT CTU0914013. Dále byl umožněn přístup do výpočetní laboratoře společnosti Telefónica Czech Republic a. s., ve které probíhala vybraná měření.

## 2 Současný stav e-éné problematiky

V současnosti se přístup k informacím prostřednictvím datových sítí, zejména internetu, stal pro většinu lidí přirozenou součástí života. To dokazuje i vývoj telekomunikační techniky, který je charakterizován nárůstem poskytovaných telekomunikačních služeb založených na rychlém přenosu dat.

Přístup uživatelů k telekomunikačním službám je zprostředkován prostřednictvím přístupové sítě. Účelem přístupové sítě je soustavit provoz z dané oblasti k obsluhovanému uzlu telekomunikační sítě a tím umožnit přístup koncovému uživateli k telekomunikačním službám [7]. Přístupová síť zpravidla překonává kratší nebo střední vzdálenosti mezi uživatelem a síťovým přístupovým uzlem, je proto často nazývána jako poslední (nebo první) míle (*last, first mile*). Pro fyzický přenos je možné využít různá přenosová média – optická vlákna, metalická vedení nebo bezdrátový přenos. [7]

Jednou z nejrozšířenějších technologií v přístupové síti je širokopásmový přenos dat po digitálních přístupových systémech označovaných xDSL. Výhodou xDSL systému je možnost využít stávající metalické infrastruktury. V současné době je nejrozšířenější variantou pro připojení běžných domácích a koncových uživatelů v České republice varianta ADSL2+ a varianta VDSL2, která na kratších vzdálenostech dosahuje vyšších přenosových rychlostí. Vzhledem k neustálému navyšování požadavků na rychlý přenos dat roste i potřeba zvyšovat poskytované přenosové rychlosti. Hlavním důvodem jsou nově vznikající multimediální služby, jako je například poskytování televizního vysílání ve vysoké kvalitě nebo online přenos audio a video vysílání a další. Současně používané digitální připojky xDSL výhledově nebudou tomuto požadavku na přenosové rychlosti postačovat. Náhradou by mohl být přenos dat prostřednictvím optických přístupových sítí, zde ale nastává ekonomický problém při budování nové optické infrastruktury. Proto je snaha maximalizovat využití stávající metalické infrastruktury a vznikají nové postupy, které umožní systémům xDSL dosáhnout dalšího zvyšování rychlostí: vektorování (*Vectoring*), více párový přenos (*Bonding*), fantomové okruhy a zcela nový systém G.fast (známý také jako *G.Fast*). U těchto xDSL systémů bude limitní překlenutelná vzdálenost.

Přenos dat v xDSL systémech je negativně ovlivován různými rušivými vlivy. Mezi základní rušivé vlivy patří vzájemné ovlivňující pronikání signálu ze sousedních párů ve stejném kabelu – tzv. přeslechy na blízkém (FEXT) resp. vzdáleném konci (NEXT), mezi další rušivé vlivy patří vysokofrekvenční rušení (RFI) a impulsní rušení.

## 2.1 xDSL systémy

Digitální přenosové systémy xDSL zahrnují skupinu technologií umožňující širokopásmový přenos v přístupové síti. K přenosu jsou využita ústřednická připojovací vedení a přenos probíhá v symetrických párech místních kabelů. Původně bylo ústřednické připojovací vedení vytvořeno pro poskytování služeb analogové telefonie využívající kmitočtové pásmo 300 až 3400 Hz. Digitální přenosové systémy xDSL využívají ústřednické vedení efektivněji a umožňují přenos rychlostmi řádově desítek až staughtých podmínek dokonce až stovek Mbit/s. [7]

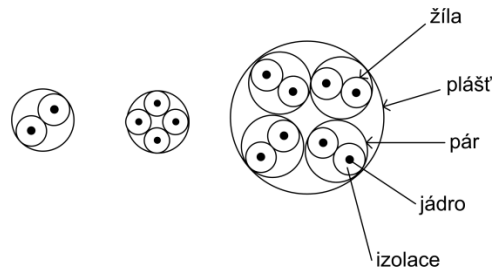
Digitální přenosové systémy xDSL představují tyto varianty:

- Základní připojka ISDN DSL (IDSL)
- Vysokorychlostní digitální ústřednická připojka (HDSL)
- Symetrická digitální ústřednická připojka (SHDSL/SDSL)
- Asymetrická digitální ústřednická připojka (ADSL, ADSL2, ADSL2+)
- Digitální ústřednická připojka s velmi vysokou přenosovou rychlostí (VDSL, VDSL2)
- Ústřednická připojka G.fast

### 2.1.1 Symetrické páry

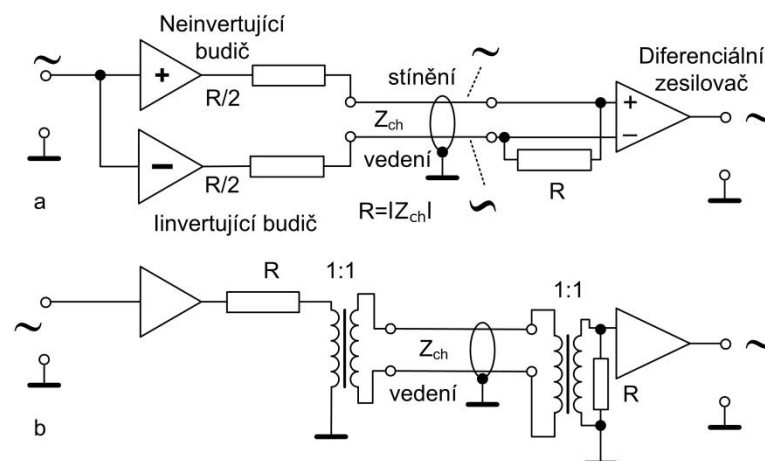
Jak již bylo dříve zmíněno, xDSL systémy využívají k přenosu signálu ústřednická vedení. Úspořádání místních kabelů je přizpůsobeno tak, aby byl využit co nejefektivněji přenos vhodně modulované elektromagnetické vlny po tomto vedení. Toto vedení může být zjednodušeně pokládáno za homogenní vedení s rovnoměrně rozloženými elektrickými parametry. Homogenní vedení vykazuje ve všech svých částech identické elektrické vlastnosti. Vedení obsahující dva signálové vodiče s totožnými vlastnostmi vzhledem k zemi představuje symetrický pár. [7]

Signálové vodiče symetrického páru mají proti zemi stejné impedance, jsou tedy vzhledem k zemi symetrické. Typické úspořádání symetrického vedení je znázorněno na obr. 1. [7]



Obr. 1 Typické uspořádání symetrického vedení [7]

Symetrické vedení se vyznačuje odolností proti souhlasnému rušení, jak je zobrazeno na obr. 2. Obr. 2a zobrazuje přenos po symetrickém vedení, kde každý vodič z páru vedení je buzen signálem opačné fáze, které lze dosáhnout prostřednictvím transformátoru nebo pomocí invertujícího a neinvertujícího buďiče. Přijímací strana obsahuje diferenciální zesilovač, pomocí kterého bude souhlasně indukované rušení na oba vodiče páru potlačeno. Přímé napětí mezi vodičem a zemí je v daném momentu napětí na jednotlivých vodičích v protifázi a přímé napětí mezi jednotlivými vodiči páru je napětí dvojnásobné než, když je přímé napětí mezi vodičem a zemí. Obr. 2b zobrazuje další variantu přenosu po symetrickém vedení, kde je použit symetrický transformátor oddávající galvanicky obvody koncových zařízení od vedení. Pro symetrické vedení je podstatné, aby bylo impedančně přizpůsobeno na vstupních a výstupních koncových zařízeních charakteristickou impedancí  $Z_{ch}$  pomocí odporů  $R$  jak je zobrazeno na obr. 2. [7]



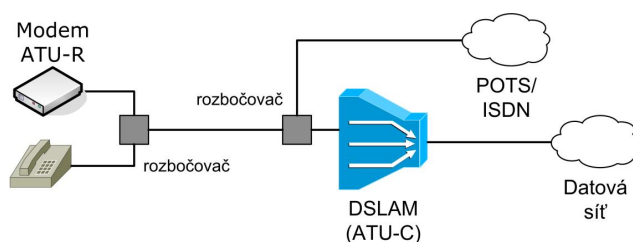
Obr. 2 Přenos po symetrickém páru [7]

### 2.1.2 ADSL2+

Digitální systém ADSL2+ umožní širokopásmový přenos dat po jifi metalických symetrických pářkách. Tento systém je evolucí předěých variant

ADSL a ADSL2. Charakteristické uspořádání pro spojení využívající jednu z variant ADSL technologie je na obr. 3.

Technologie ADSL2+ také umožňuje současně používání klasické telefonní spojení POTS (*Plain Old Telephone Service*) nebo základní spojení ISDN pomocí rozbočovače (*splitteru*), podrobněji o rozbočovačích v [9]. Pro širokopásmový přenos dat se využívá část pásma od 25 kHz do 2,208 MHz pro spojení POTS a pásmo od 138 kHz do 2,208 MHz je využito pro základní spojení ISDN.



Obr. 3 Charakteristické uspořádání ADSL pro spojení [7]

Přenos digitálního signálu je pomocí modulace DMT (*Discrete Multi-Tone*) využívající více nosných kmitočet. Použití přenosové pásma je rozděleno do subkanálů (podobně jako u modulace OFDM) o šířce 4,3125 kHz. Přenos datového signálu v každém subkanále probíhá pomocí kvadrurní amplitudové modulace QAM s modulací rychlostí 4 kBd. V ADSL2+ je tedy celé použité pásmo rozděleno do 512 subkanálů. [10]

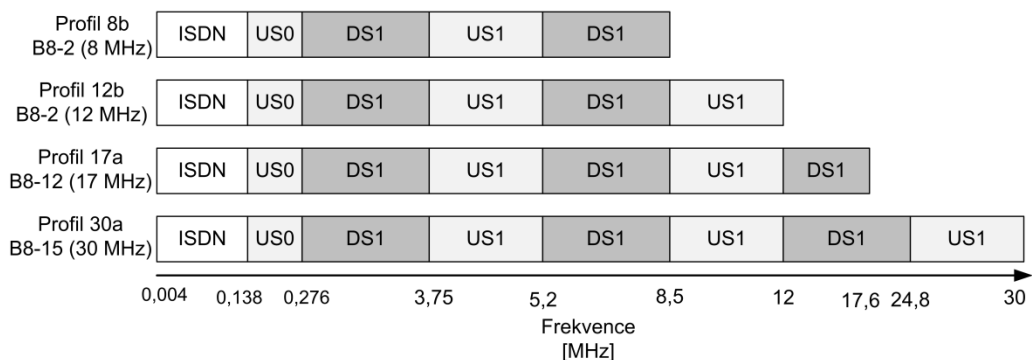
Tato technologie umožňuje poskytovat přenosové rychlosti ve směru od ústřednického multiplexoru DSLAM (*DSL Access Multiplexor*) ke koncovému uživateli až 25 Mbit/s (směr downstream) a od koncového uživatele k ústřednickému multiplexoru DSLAM až 1 Mbit/s. Podrobnější popis variant technologie ADSL je například v [7], [8] nebo [10].

### 2.1.3 VDSL2

Digitální systém VDSL2 je rozšířením varianty VDSL. Obě varianty VDSL technologie opět zachovávají koexistenci telefonní spojení POTS nebo základní spojení ISDN, zde je ale třeba použít jiný rozbočovač vhodný pro technologii VDSL, podrobněji o rozbočovačích pro VDSL v [11]. Uspořádání VDSL pro spojení je podobné, jako je uvedeno na obr. 3, jen je třeba zajistit výměnu modem ATU-R za modem VTU-R a na ústřednickém multiplexoru DSLAM použít modem VTU-C.

Rozdíl oproti ADSL2+ technologii je v rozšíření kmitočtového pásma až ke 12 MHz (VDSL) resp. k 30 MHz (VDSL2) a tím se zajistí i vyšší přenosové rychlosti, ale jen do vzdálenosti 1,6 km od uflivatele k ústřednímu multiplexoru [7]. Dalším rozdílem je, že technologie VDSL používají dvě vzájemně nekompatibilní metody modulace a to modulace s více nosnými (tj. DMT) nebo modulaci s jednou nosnou (tj. QAM nebo CAP), podrobnější popis je ve standardu ITU-T G.993.1. [8]

Varianta VDSL2 jífl dovoluje jen modulaci s více nosnými (DMT) a rozdíl je použité pásmo na subkanály o šířce 4,3125 kHz (VDSL2 umožní i šířku subkanálu 8,625 kHz). VDSL2 frekvenční pásmo je rozděleno do několika profilů např. obr. 4.



Obr. 4 Výběr některých profilů frekvenčního pásma VDSL2

Každý profil má specifikovaná subpásma pro vzestupný (US – upstream) a sestupný (DS – downstream) směr, jak je uvedeno na obr. 4. Dále je třeba je rozlišit symetrický (symetrické přenosové rychlosti) frekvenční plán (označovaný 997 nebo B7-x) a asymetrický (asymetrické přenosové rychlosti) frekvenční plán (označovaný 998 nebo B8-x). Podrobný popis jednotlivých frekvenčních plánů se nachází v [29].

V České republice jsou podle [12] použity tyto profily frekvenčního plánu v síti telekomunikačního operátora Telefónica CZ a. s.:

- Profil 8b (maska PSD 998-M2x-B)
- Profil 17a (maska PSD 998ADE17-M2x-B)
- Profil 12a (maska PSD 998-M2x-B)

Obr. 5 zobrazuje dosahované přenosové rychlosti při injektovaném bílém šumu (ó140 dBm/Hz) na straně modemu a na straně ústředního multiplexoru DSLAM. O technologii VDSL2 je více popsáno např. v [13] nebo [29].



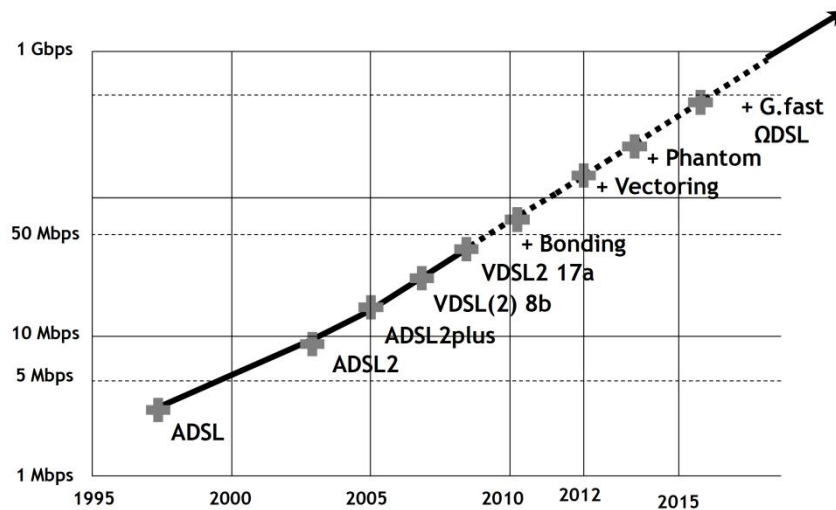
Obr. 5 Pásmové rychlosti na profilech 17a a 8b při rušení bílým šumem  $0.140 \text{ dBm/Hz}$

#### 2.1.4 Nové směry DSL systémů

Nástup požadavků na přenos objemných dat směřuje k neustálému zvyšování přenosových rychlostí. Je patrné, že nebude možné dostatečně poskytovat přenosové rychlosti na současných digitálních systémech ADSL2+ a VDSL2. Náměnou metalických přístupových sítí budou dříve či později optické přístupové sítě. Horizont úplného přechodu na optickou přístupovou síť je otázkou ekonomickou. Proto je snaha maximalizovat využití stávajících metalických vedení za použití nových vyvíjených DSL systémů. Jedná se o tyto nové technologie [14]:

- Vysunutý ústřední multiplexor DSLAM (*rDSLAM* či *remote DSLAM*)
- Vícepárový přenos (Bonding)
- Vektorování (Vectoring)
- Fantomový mód
- G.fast

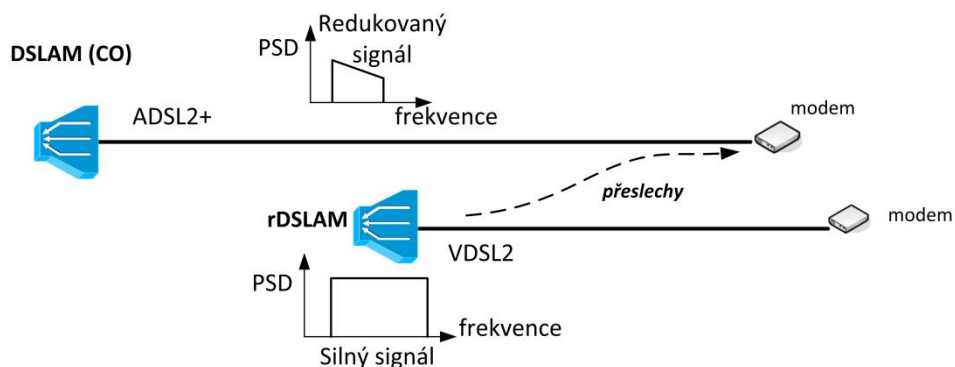
Na obr. 6 je zobrazen vývoj systémů na ústředním vedení v etn dosahovaných přenosových rychlostí.



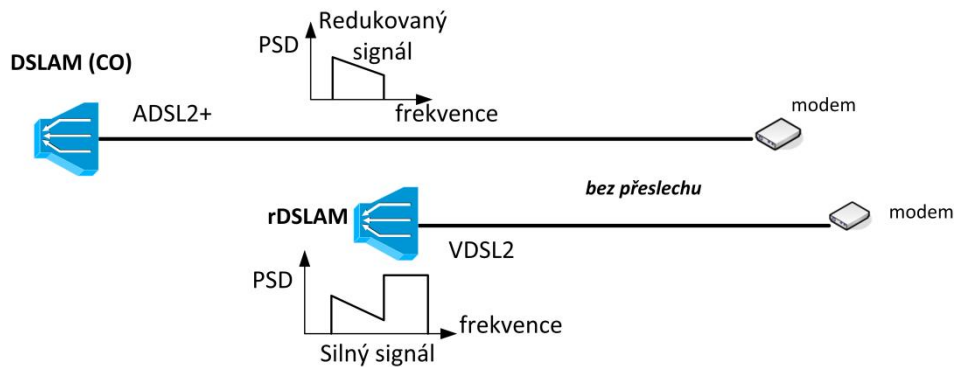
Obr. 6 Vývoj technologií na ústředních přípojkách [14]

### Vysunutý ústřední multiplexor rDSLAM

Vysunutý ústřední multiplexor rDSLAM (*remote DSLAM*) může být vysunut od centrálního (CO – central office) ústředního multiplexoru DSLAM do rozvaděče prostřednictvím optického vlákna (tzv. koncepce FTTCab) [8]. V takovéto struktuře dochází k ovlivňování ústředních vedení přeslechy, jak je uvedeno v [8]. Aby došlo k omezení těchto přeslechů, je třeba využít tzv. mechanismus PBO (*Power Back-off*) omezující vysílaný výkon – pro sestupný směr DPBO (*Downstream PBO*) nebo vzestupný směr UPBO (*Upstream PBO*). Na obr. 7 je znázorněn případ koexistence systému ADSL2+ z centrálního ústředního multiplexoru DSLAM a systému VDSL2 z vysunutého ústředního multiplexoru rDSLAM, kdy vlivem různých výkonových úrovní PSD masky dochází ke vzájemnému ovlivňování a vzniku přeslechů. Obr. 8 zobrazuje využití mechanismu DPBO, kde dochází k přizpůsobení výkonové úrovně PSD masky v sestupném směru pro systém VDSL2. Podrobnější informace je možno nalézt v [8].



Obr. 7 Vysunutý ústřední multiplexor bez využití mechanismu PBO

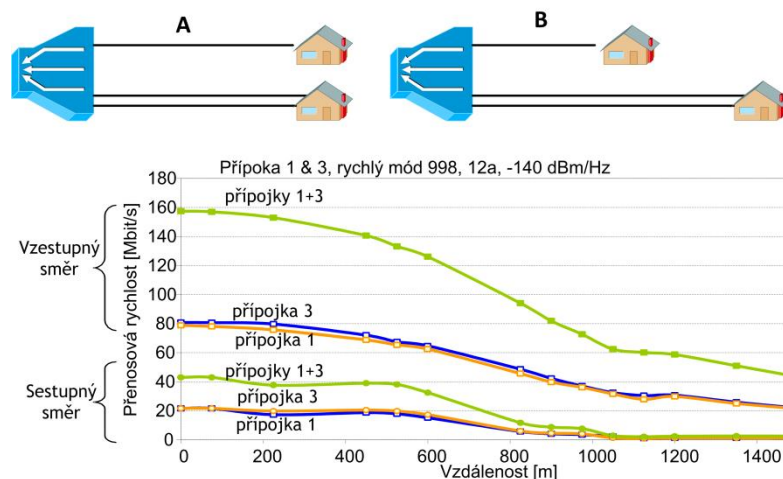


Obr. 8 Vysunutý ústřednický multiplexor s využitím mechanismu DPBO

### Vícepárové DSL (Bonding)

Jde o metodu, která vyutilizuje dvou symetrických párů vodičů od ústřednického multiplexoru DSLAM ke koncovému uživateli. Cílem této technologie je zvýšit přenosovou rychlost při zachování stejné vzdálenosti, jak je znázorněno na obr. 9 a v grafu nebo při zachování přenosové rychlosti navýšit vzdálenost mezi ústředním a ústřednickým multiplexorem DSLAM. Technologie vícepárového spojení je popsána v těchto standardech:

- G.998.1 *ATM-based multipair bonding*
- G.998.2 *Ethernet-based multipair Bonding (ADSL2+, VDSL2)*
- G.998.3 *Multipair bonding using time-division inverse multiplexing*



Obr. 9 Technologie vícepárového DSL na systému VDSL2

### Vektorování (Vectoring)

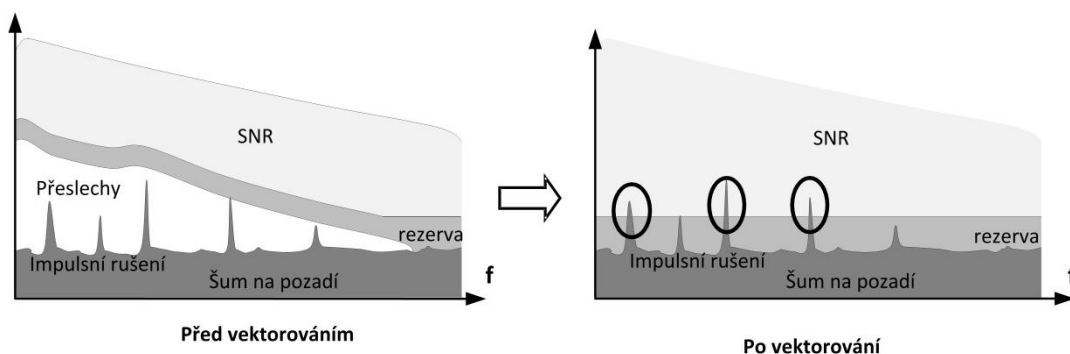
Technologie vektorování (Vectoring) se zaměřuje na potlačení vlivu přeslechu na vzdáleném konci (FEXT) v rámci celého svazku vodičů. Ve svazku je více symetrických párů, na kterých jsou provozovány DSL systémy, které vysílají signály pronikající ven ze symetrického páru a působící rušivě na sousední symetrické páry.

Vlivem tohoto rušení dochází ke snížení dosažitelné provozní rychlosti. Vyvinuté technologie vektorování pro systémy VDSL2 potlačují rušení FEXT a tím výrazně zlepšují podmínky pro provoz vyšších provozních rychlostí. Vektorování bylo standardizováno mezinárodní organizací ITU-T ve standardu ITU-T G.993.5.

Stručný princip vektorování je následující: nejprve je provedeno rušení na všech symetrických párech ze svazku vodičů, zde se vyvíjí spolupráce mezi ústředním multiplexorem DSLAM a modemem na straně uživatele s podporou vektorování. V dalším kroku dojde ke zpracování všech naměřených rušení a k odhadu přeslechů na jednotlivých symetrických párech přes celé použité frekvenční pásmo. V posledním kroku dochází v reálném čase ke generování rušivého signálu v protifázi, který vzniká kombinováním reálných signálů přeslechů od všech symetrických párů. Poté dojde k potlačení přeslechů FEXT.

Technologie vektorování využívá vektorovou modulaci VDMT (Vectored DMT), která je rozšířením klasické DMT modulace, kterou využívá celá skupina systémů xDSL. Model provozního kanálu a popis VDMT modulace je podrobněji popsán například v [15].

Vektorováním dochází k potlačení přeslechů FEXT, ale také k odhalení impulsního rušení, které bylo skryto pod přeslechovým rušením, jak je zjednodušeně poplááno na obr. 10. Proto se pro ochranu před impulsním rušením používá tzv. adaptivní provoz (retransmission) ARQ (Automatic Repeat reQuest). Metoda adaptivního provozu bude stručně popsána v kapitole 2.4.2 a je standardizována v [28].

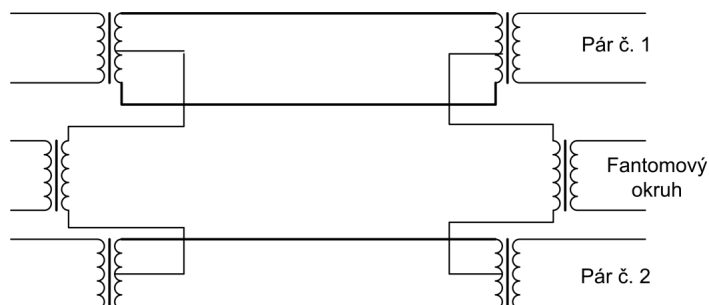


Obr. 10 Odhalení impulsního rušení

### Fantomový mód

Tato technologie přidává virtuální fantomový pár ke dvěma symetrickým pářům. Tyto dva symetrické páry pracují v rozdílovém režimu, přičemž každý signál je vyslán v

souhlasném režimu přes fantomové zapojení, jak je ukázáno na obr. 11. Souhlasný režim je méně citlivý na přeslech NEXT a FEXT, ale vysílá rušení do rozdílového režimu symetrických párů 1 a 2. Proto je vhodné použít vektorování ke snížení přeslechů ve vázané skupině dvou symetrických párů. [14]



Obr. 11 Fantomový okruh vytvořený pomocí dvou párů, typický v rámci jedné tyčky [16]

Fantomové okruhy se využívaly v minulosti u dálkových telefonních vedení, aby bylo dosaženo vyšší přenosové kapacity. Principem je navázání signálu do středů transformátoru dvou symetrických vedení a tím vytvoření dalšího okruhu, jak ukazuje obr. 11. [16]

Při nasazení na systém VDSL2 a současném použití fantomových okruhů a vektorování dojde ke zvýšení přenosové rychlosti. Ke reálnému nasazení není potřeba další standardizace pro fantomové okruhy, protože jsou použity již existující standardy VDSL2 (ITU-T G.993.2), vícepárové spojení (bonding ITU-T G.998.2) a vektorování (ITU-T G.993.5).

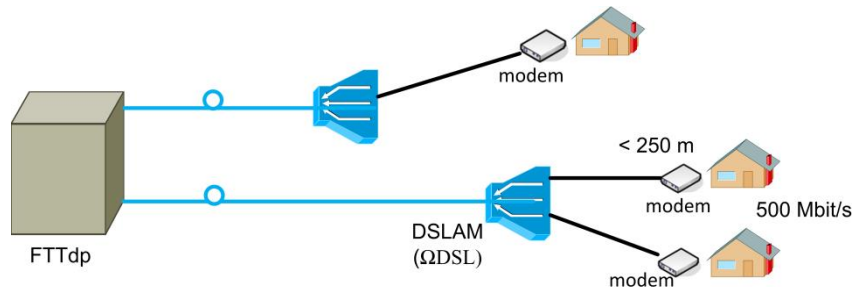
Nevýhodou je zejména nutnost impedance přizpůsobení fantomových okruhů, použití nových uživatelských modemů využívajících třípárové (i více párové) zapojení.

### Budoucí systém á DSL (G.Fast)

Budoucí systém á DSL (pracovní název G.fast) je nově vznikající technologie zaměřující se na poskytování přenosových rychlostí až do 500 Mbit/s a do vzdálenosti 250 metrů při použití vektorování [17]. Vysoké rychlosti jsou dosažovány na krátkých vzdálenostech, protože útlum smyčky je závislý na frekvenci a nová technologie bude používat šířku pásma od 100 MHz až do 300 MHz [16].

Aby byla zachována komplexnost implementace, je v nové technologii použita bitová alokace na 12 bitů na subkanál, u systému VDSL2 je až 15 bitů na subkanál. Nasazení technologie G.fast je uvažováno v souvislosti s technologií FTTP (*Fiber to*

the Distribution Point). Distribučním bodem může být například venkovní rozvaděč (FTTcurb), ke kterému je přivedeno optické vlákno a který je schopen převést připojení na již stávajících metalických rozvodech obr. 12.



Obr. 12 Koncepte nasazení technologie G.fast.

Technologie G.fast by měla být standardizována na úrovni ITU v roce 2014. V případě, že k tomu opravdu dojde, lze počítat s praktickým využitím ke konci roku 2015. [17]

## 2.2 Rušení

Přenos dat v xDSL systémech je negativně ovlivěn vlastností symetrického vedení a dalšími rušivými elementy, jako jsou například vazby mezi symetrickými páry v ústředním vedení a rušení okolní. Dopad vnitřního rušení přenosových systémů je relativně malý, jedná se obvykle o bílý šum pasivních i aktivních elektrických součástí, který se projevuje spektrální hustotou výkonu  $\approx 140$  dBm/Hz AWGN (Additive White Gaussian Noise). Modernější systémy mají vnitřní rušení je nižší spektrální výkonovou hustotu  $\approx 160$  dBm/Hz. [8]

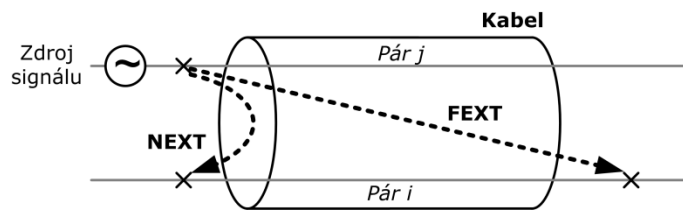
Přenos dat je pak ovlivněn především externími zdroji, kterými jsou [8]:

- Pronikání signálu ze sousedních párů ve stejném kabelu a tzv. přeslechů na blízkém (NEXT) resp. vzdáleném konci (FEXT)
- Rádiové rušení (RFI)
- Impulsní rušení

### Přeslech

Přeslech vznikají při přenosu signálu z ostatních přenosových systémů (vyskytujících se ve stejném kabelu) na ostatní páry ve stejném vícepárovém kabelu vlivem kapacitních a induktivních vazeb mezi jednotlivými páry. Jednotlivé páry jsou rušeny rozdílně, závisí to na vzájemném umístění v kabelu, přesnosti při výrobě atd.

Přeslechy se rozdělují na přeslechy na blízkém konci (NEXT) a na přeslechy na vzdáleném konci (FEXT), jak je naznačeno v obr. 13. [8]



Obr. 13 Přeslechy NEXT a FEXT mezi páry v kabelu

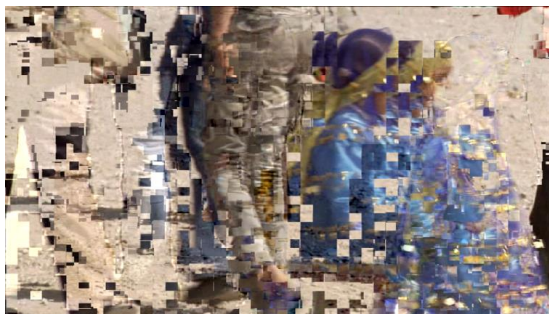
## Rádiové rušení

Ústřednické vedení je ovlivováno rádiovým rušením RFI (Radio Frequency Interference) v celém kmitočtovém pásmu s rozdílnou intenzitou. Vzhledem k této skutečnosti se pak v jednotlivých párech může vyskytnout rušení s různou silou a časovou proměnlivostí. Nejhorším typem tohoto rušení je to rušení, které leží ve stejném frekvenčním pásmu jako přenášený signál. Z tohoto důvodu by měly být digitální systémy odolné proti určité výši vysokofrekvenčního rušení předepsané v normách elektromagnetické kompatibility. [8]

## 2.3 Impulsní rušení

Impulsní rušení je velmi specifické rušení skládající se z náhodného výskytu energetických impulzů s náhodnou amplitudou a spektrálním obsahem. Úroveň tohoto rušení velmi záleží například na místě uložení metalického vedení. Příčiny vzniku impulsního rušení v telefonních přípojkách jsou různé. Zdrojem může být například elektromagnetické vyzařování silnoproudých kabelů, vyzvednutí/zavěšení mikrotefonu, vyzvánění telefonního přístroje, vysokonapávaná vedení, spínání a regulace velkých výkonů, rušení od domácích, kancelářských a průmyslových elektrických spotřebičů, atmosférické výboje apod. Pro impulsní rušení je také typická krátká doba trvání a napávané impulzy se strmými náběhy i sestupnými hranami, které se navíc vyskytují ve shlucích, což způsobuje v přenášených datech tzv. blokové chyby.

Impulsní rušení má značný vliv na kvalitu poskytovaných služeb QoE (Quality of Experience) v xDSL systémech. Výsledně ovlivňuje výrazně zhoršuje chybovost xDSL systému. Je proto důležité znát statistickou povahu impulsního rušení, aby bylo možné zhodnotit jeho dopad na přenosové systémy.



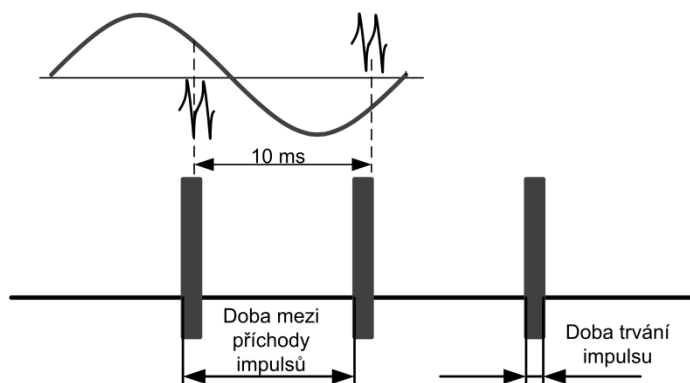
Obr. 14 Dopad impulsního rušení na přenos televizního vysílání v systémech xDSL [18]

### 2.3.1 Rušení REIN, SHINE a PEIN

Společnostmi British Telecom, Deutsche Telekom, NYNEX, France Telecom a dalšími společnostmi byla provedena rozsáhlá měření za účelem analyzování impulsního rušení. Cílem bylo následně vytvoření modelu impulsního rušení. [19]

Analyzováním impulsního rušení bylo zjištěno, že impulsní rušení není stacionární náhodný proces. Proto nemá přesně stanovenou spektrální hustotu výkonu PSD. Nicméně je možné vytvořit pravděpodobnostní odhady spektrální hustoty výkonu tzv. pseudo PSD. V oblasti standardizace byla velká pozornost také věnována rušení REIN (Repetitive Electrical Impulse Noise), SHINE (Single High Impulse Noise Event) a PEIN (Prolonged Electrical Impulse Noise). [19]

**Rušení REIN** je definováno jako opakující se impulsní rušení skládající se z krátkých dávek rušení (bursts) obr. 15, kratších než 1 ms při konstantní frekvenci opakování (např.: 100 Hz nebo 120 Hz). Frekvence opakování rušení 100 Hz nebo 120 Hz je odvozená od frekvence elektrické sítě, tj. 50 Hz nebo 60 Hz, viz obr. 15.



Obr. 15 Opakující se rušení REIN

**Rušení SHINE** bylo definováno jako individuální impulsní rušení s délkou větší než 10 ms. **Rušení PEIN** je složeno z neopakujících se impulsního rušení ve skupině



(burst). Trvání skupiny je mezi 1 ms a 10 ms. Vzájemné porovnání všech ru-ení je uvedeno v tab. 1. [19]

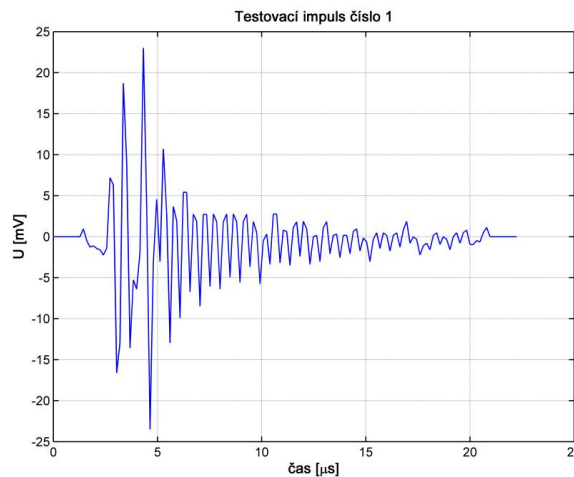
Tab. 1 Vzájemné porovnání uvedených impulsních ru-ení [19]

Typ impulsního ru-ení	Typická doba skupiny ru-ení	Opakování	Požadované chování modemu
REIN	< 1 ms	Ano	Bez bitových chyb
PEIN	1ó10 ms	Ne	Bez bitových chyb
SHINE	> 10 ms	Ne	Bez ztráty synchronizace

### 2.3.2 Testování odolnosti proti impulsnímu ru-ení

Metodika testování je podrobně popsána v doporučení ITU-T G.996.1, kde jsou popsány laboratorní metody pro otestování schopnosti systému minimalizovat bitové chyby vzniklé p eslechy, vysokofrekvenčním ru-ením, -umem na pozadí a impulsním ru-ením.

Testování je provedeno v laboratorním prostředí na ústnickém vedení, kde je provozován systém DSL za výskytu impulsního ru-ení a p edepsanému p eslechovému ru-ení. Testování spoívá v injekci impulsního ru-ení a současném zji-ování bitové chybovosti. V [20] jsou definovány dva testovací impulsy íslo 1 (obr. 16) a íslo 2 (obr. 17).



Obr. 16 Testovací impuls íslo 1 [20]

Samostatné testování probíhá následujícím způsobem. Do vedení je injektován testovací impuls s proměnnou amplitudou a náhodnou fází a p íslu-ným p eslechovým ru-ením. Pro každou napíovou amplitudu je impuls ísen 15 krát s pauzami o dobu trvání alespo 1 s a současně dochází k zji-ování chybovosti nebo po tu chybových

sekund ES (Errored seconds). Každému tvaru impulsu odpovídá amplituda  $u_e$  v milivoltech, při které polovina impulsů způsobí vznik chyby. [20], [21]

Na základě popsané metodiky testování, může být odhadnuta pravděpodobnost  $E$ , během jakékoliv náhodně zvolené sekundy dojde k chybě podle vztahu: [20]

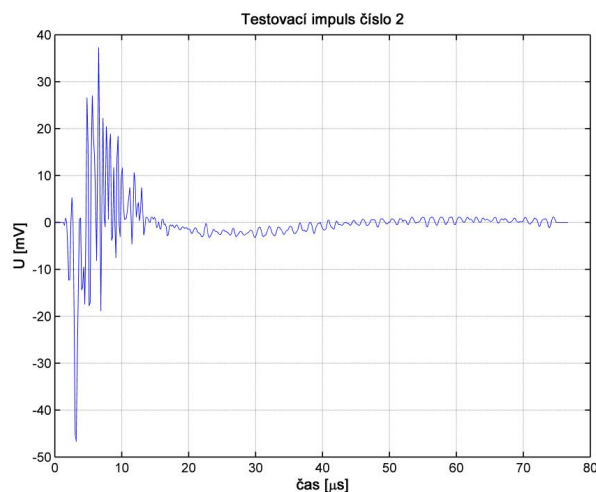
$$E = 0,0037 \cdot P(u > u_{e1}) + 0,0208 \cdot P(u > u_{e2}) \quad (1)$$

kde

$$P(u > u_e) = \frac{25}{u_e^2} \quad \text{pro } 5\text{mV} \leq u_e \leq 40\text{mV} \quad (2)$$

$$P(u > u_e) = \frac{0,625}{u_e} \quad \text{pro } u_e > 40\text{mV} \quad (3)$$

$u_{e1}$  pro impuls číslo 1,  $u_{e2}$  pro impuls číslo 2.



Obr. 17 Testovací impuls číslo 2 [20]

Výsledná pravděpodobnost výskytu chybových sekund ES (errored seconds) by měla být menší než 0,14 %. Oba testovací impulsy mají intervaly mezi vzorky 160 nanosekund, což odpovídá vzorkovací frekvenci 6,25 MHz. [20]

### 2.3.3 Cook v impuls

Analytický model impulsního rušení navržený Johnem Cookem z British Telecom, který byl navržen na základě měření a analýz, je šCook v impulsů. Tento testovací impuls je popsán v doporučení ITU-T G.991.1 pro testování systému HDSL a je matematicky popsán takto [2]:

$$V(t) = +K_C |t|^{-3/4} \quad \text{pro } t > 0 \quad (4)$$

$$V(t) = 0 \quad \text{pro } t = 0 \quad (5)$$

$$V(t) = -K_C |t|^{-3/4} \quad \text{pro } t < 0, \quad (6)$$

kde  $t$  je as v sekundách a  $K_C$  je konstanta definovaná podle tab. 2.

Tab. 2 P ehled parametr pro testovací Cook v impuls pro systémy HDSL [2]

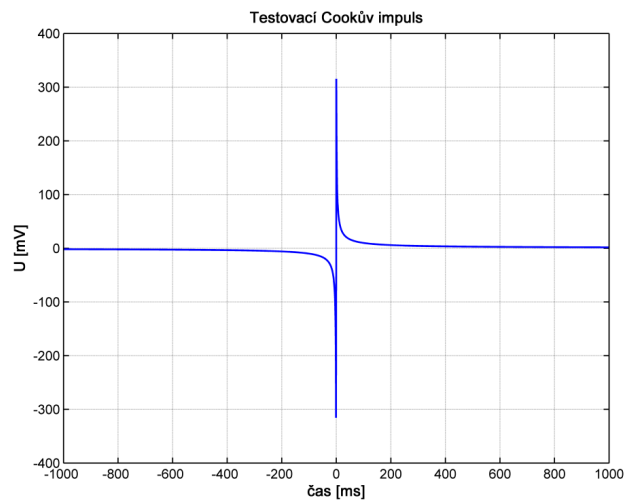
$U_-$ [mV]	$K_C$ [-]	$BER_{\max}$ [-]
320	$1775 \cdot 10^{-6}$	$(9/N) \cdot 10^{-4}$
160	$8875 \cdot 10^{-7}$	$(12/N) \cdot 10^{-5}$
80	$44375 \cdot 10^{-7}$	$(14/N) \cdot 10^{-6}$

Pozn. 1:  $U_-$  se li-í v závislosti na vzorkovací frekvenci a m fe být snadno vypo tená z následujícího výrazu pro vzorkovací frekvenci jinou než 2 MHz. Jestliffe je vzorkovací frekvence  $1/T$ , pak

$$U_- = 2K_C |T/2|^{-3/4}.$$

Pozn. 2:  $N = 1$  pro jedno-párový systém s p enosovou rychlostí 2320 kbit/s;  $N = 2$  pro dvou-párový systém s p enosovou rychlostí 1168 kbit/s;  $N = 3$  pro t í-párový systém s p enosovou rychlostí 784 kbit/s. [2]

B hem testování impulsního ru-ení v systému HDSL je zku-ební Cook v impuls injektován periodicky s opakovacím kmito tem 10 Hz. Tvar Cookova impulsu je zobrazen na obr. 18.



Obr. 18 Tvar testovacího Cookova impulsu pro  $K_C = 1775 \cdot 10^{-6}$

### 2.3.4 Model impulsního ru-ení Henkel/Kessler

V minulosti byla provedena m ení impulsního ru-ení v p ístupových sítí Deutsche Telekom, British Telecom a na dal-í metalických p ístupových sítí r zných společností. Na základ t chto m ení byl zve ejn n v letech 1999 ó 2000 model impulsního ru-ení Wernera Henkela a Thomase Kesslera [3], [22], [23]. Tento model

zahrnuje hustoty pravděpodobností pro amplitudu, délku impulsu a dobu mezi příchozími impulsy (tzv. inter-arrival time).

Na Henkel/Kessler model impulsního rušení bylo později navázáno Iainem Mannem a Stephenem McLaughlinem, jak je uvedeno v [4]. Výsledkem bylo potvrzení modelu Henkel/Kessler a zároveň navržení některých nových postupů. V této podkapitole bude dále podrobněji popsán popis těchto poznatků.

### Hustota pravděpodobnosti pro amplitudu impulsního rušení

Ze záznamů impulsního rušení v pístupové síti Deutsche Telekom sestavili Henkel a Kessler histogram amplitud, jehož aproximací získali popis hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení popsáný následující funkcí [3]:

$$f_i(u) = \frac{1}{240 u_0} \cdot e^{-|u/u_0|^{1/5}} \quad (7)$$

kde  $u_0$  je parametr udávající tvar funkce. Tento model pro amplitudu impulsního rušení se ukázal být dobrou volbou pro všechny měření impulsního rušení získaná v obou pístupových metalických sítích Deutsche Telekom a British Telecom. Nicméně aby se usnadnilo náhodné generování rušení s předepsanou amplitudou a spektrální charakteristikou, byla jako alternativa ke vzorci (7) uvedena možnost použití hustoty pravděpodobnosti Weibullova rozdělení. [4]

Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení je definována takto:

$$f(y) = \begin{cases} 0, & y < 0 \\ \alpha b y^{\alpha-1} e^{-b y^\alpha}, & y \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

Pro potřeby modelování amplitudy impulsního rušení je v [4] vzorec upraven do symetrického tvaru a má následující podobu:

$$f_{wbl}(u) = \frac{1}{2} \alpha b |u|^{\alpha-1} e^{-b|u|^\alpha} \quad (9)$$

Tento model s hustotou pravděpodobnosti Weibullova rozdělení má dva parametry místo jednoho parametru v originálním Henkel/Kessler modelu. Parametry  $a$  a  $b$ , pro které platí  $a > 0$  a  $b > 0$ , oba parametry ovlivňují tvar. [4]

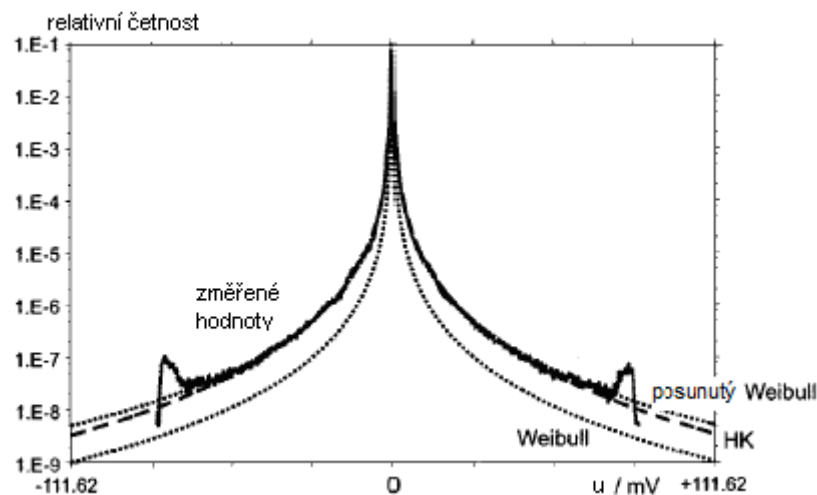
Aby mohla být provedena aproximace hustoty pravděpodobnosti p. amplitudy Weibullovým rozdělením, byly nalezeny parametry  $a$  a  $b$  korespondující s parametrem  $u_0$ . V tab. 3

převzaté z [4] jsou uvedeny hodnoty  $u_0$  získané z naměřených dat z p ístupových metalických sítí Deutsche Telekom a British Telecom pro stranu uřivivatele (xTU-R) a pro stranu ú astnického multiplexoru DSLAM (xTU-C). Tabulka také obsahuje odpovídající parametry  $a$  a  $b$  pro Weibullovo rozdělení.

Tab. 3 Model parametrů pro Weibullovo rozdělení a Henkel/Kessler model [4]

P ístupová metalická sí	Weibull		Model Henkel/Kessler
	$a$	$b$	$u_0$
<b>British Telecom</b> (xTU-R)	0,263	4,77	9,12 V
<b>Deutsche Telekom</b> (xTU-R)	0,486	44,40	23,23 nV
<b>Deutsche Telekom</b> (xTU-C)	0,216	12,47	30,67 nV

Na obr. 19 je zobrazeno porovnání aproximace změřených dat pomocí hustoty pravděpodobnosti podle modelu Henkel/Kessler a Weibullovým rozdělením. Na obr. 19 je šárková šára hustota pravděpodobnosti modelu Henkel/Kessler podle vztahu (7), která lépe aproximuje změřená data než hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení (spodní te šovaná šára), což je způsobeno charakteristikou Weibullova rozdělení v oblasti nuly. [4]



Obr. 19 Aproximace změřených dat pomocí hustoty pravděpodobnosti podle modelu Henkel/Kessler, Weibullovým rozdělením a posunutým Weibullovým rozdělením [4]

Na obr. 19 je také zobrazena tzv. posunutá šhustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení (posunutý Weibull), která také vhodně aproximuje změřená data jako hustota pravděpodobnosti modelu Henkel/Kessler. Problém ale je, že tzv. posunutá hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení vlastně není hustota pravděpodobnosti podle [4].

### Hustota pravd podobnosti pro dobu trvání impulsu

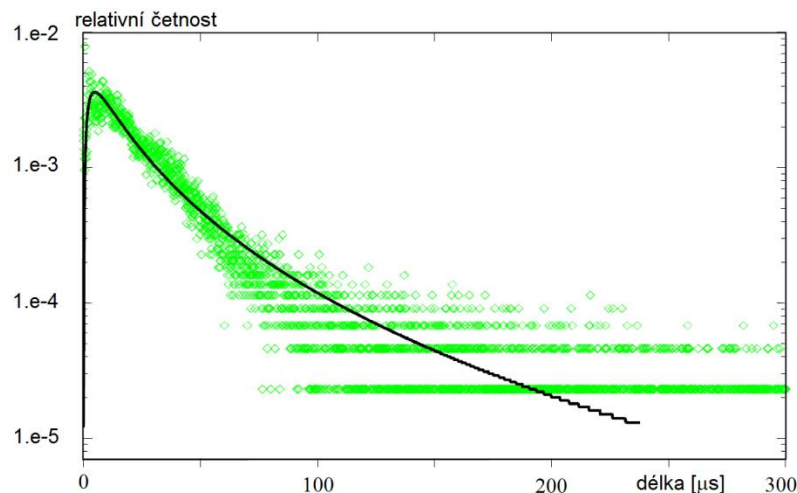
Pro hustotu pravd podobnosti doby trvání impulsu je pro model Henkel/Kessler dán následující vztah vycházející z logaritmicko-normálního rozdělení [3]:

$$f_I(t) = B \frac{1}{\sqrt{2\pi} s_1 t} e^{-\frac{1}{2s_1^2} \ln^2(t/t_1)} + (1-B) \frac{1}{\sqrt{2\pi} s_2 t} e^{-\frac{1}{2s_2^2} \ln^2(t/t_2)} \quad (10)$$

kde parametry  $t_1$ ,  $t_2$  jsou střední hodnoty, parametry  $s_1$  a  $s_2$  určují tvar a parametr  $B$  určuje, zda se jedná o ústřední stranu uřivitele (xTU-R) nebo stranu ústředního multiplexoru DSLAM (xTU-C). Pro stranu uřivitele je  $B=1$ , p i kterém se druhý člen ve vzorci (10) neuplatní. P ehled zji-t ných parametrů pro p ístupové metalické sít Deutsche Telekom a British Telecom jsou uvedené v tab. 4 [4].

Tab. 4 Model parametrů pro hustotu pravd podobnosti logaritmicko-normálního rozdělení [4].

Model	B	$s_1$	$t_1$	$s_2$	$t_2$
British Telecom (xTU-R)	0,45	1,25	1,3 $\mu$ s	21,5	129 $\mu$ s
Deutsche Telekom (xTU-R)	1	1,15	18 $\mu$ s	–	–
Deutsche Telekom (xTU-C)	0,25	0,75	8 $\mu$ s	1,0	125 $\mu$ s



Obr. 20 Výsledek prolofení nam ěných dat logaritmicko-normálním rozdělením pro druhý ádek z tab. 4, p evzato z [3]

### Modelování impulsů s p íslu-nými časovými a spektrálními charakteristikami

Statistické modelování spektra impulsu je navrženo v [4], kde návrh spo ívá v generování spektra impulsního ru-ení prost ednictvím autokorela ní funkce. Vychází se z vlastností výkonového spektra a autokorela ní funkce pouřitím Fourierovy transformace podle vzorce [1]:

$$C_{xx}(f) = \mathfrak{F}[R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (11)$$

kde  $R_{xx}(\tau)$  je autokorelační funkce a  $C_{xx}(f)$  je výkonové spektrum. Normalizovaná autokorelační funkce (vztah (12)) může být realizována exponenciálními funkcemi modulované cosinem, podle [1], [4]:

$$\hat{R}_{xx}(\tau) = \sum_{i=1}^m \cos(2\pi\alpha_i \tau) e^{-\beta_i |\tau|} \quad (12)$$

kde  $\hat{R}_{xx}(\tau)$  je aproximovaná autokorelační funkce impulsu,  $\tau$  je časové zpoždění, které by bylo v diskrétním čase nahrazeno vzorky. Parametry  $\alpha_i$  a  $\beta_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , kde  $\alpha_i$  určuje kmitočet kosinu a  $\beta_i$  představuje rozklad exponenciální funkce. Hodnota  $m$  představuje přesnost modelu a také záleží, zda se jedná o postupovou síť British Telecom nebo Deutsche Telekom. [1]

Pro generování impulsu s příslušnými časovými a spektrálními charakteristikami, kde dochází ke kombinaci spektrálních vlastností a vlastností v časové oblasti stochastického signálu, byla použita metoda Tough-Ward, podrobně o této metodě v [24]. Pomocí této metody je možné vytvářet stochastické procesy s předdefinovanými rozděleními a korelačními vlastnostmi. Tato metoda využívá bezpaměťovou nelineární transformaci (MNLT – memoryless nonlinear transform) tak, jak používá společnou nulovou střední hodnotu, hustotu pravděpodobnosti Gaussovského rozdělení a požadovanou hustotu pravděpodobnosti rozdělení (v tomto případě Weibullovo rozdělení). Toto je pak využito k výpočtu vztahu mezi korelačními koeficienty dvou procesů. Požadované MNLT je nalezeno porovnáním distribuční funkce Gaussova rozdělení a distribuční funkce požadovaného rozdělení. [1], [4]

MNLT pro Weibullovo rozdělení popsané ve vzorci (9) je pak v [1] a [4]:

$$\int_y^{\infty} \frac{1}{2} \alpha b |y'|^{\alpha-1} e^{-b|y'|^{\alpha}} dy' = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-x'^2/2} dx' \quad (13)$$

číslicí rovnice (13) je pak v [1] a [4]:

$$y = \begin{cases} \left( \frac{1}{b} \ln \left( \frac{1}{\operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})} \right) \right)^{1/\alpha}, & x \geq 0, \quad y \geq 0 \\ - \left( \frac{1}{b} \ln \left( \frac{1}{2 - \operatorname{erfc}(x/\sqrt{2})} \right) \right)^{1/\alpha}, & x < 0, \quad y < 0 \end{cases} \quad (14)$$

Vztah mezi vstupními korelovanými Gaussovskými koeficienty,  $R_G$  a pořadovaných výstupními Weibullovi korelovanými koeficienty  $\langle y(0)y(t) \rangle$  je dán v [1], [4] takto:

$$\langle y(0)y(t) \rangle = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{R_G(t)}{2^n n!} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2/2} H_n \left( \frac{x}{\sqrt{2}} \right) y \, dx \right]^2, \quad (15)$$

kde  $y$  je uvedeno v (14) a  $H_n$  jsou Hermitovy polynomy  $n$ -tého stupně definované v [1] takto:

$$H_n(z) = (-1)^n \exp(z^2) \frac{d^n}{dz^n} \exp(-z^2) \quad (16)$$

### Model pro stanovení doby mezi p íchody impuls (inter-arrival time)

Impulsní rušení se vyskytuje samostatně nebo ve skupinách. Výskyt těchto impulsů je považován za události, které jsou navzájem nezávislé a mají stejné rozdělení doby výskytu. Hustotu pravděpodobnosti doby mezi p íchody impulsů pro model Henkel/Kessler vychází z Poissonova toku s exponenciální hustotou pravděpodobnosti [1], [3] a [25]:

$$f_{\text{exp}}(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad (17)$$

kde  $\lambda$  je p evrácená střední doba p íchodů.

Vzhledem k tomu, že se vyskytují různé rozsahy doby mezi p íchody se stejným modelem dob mezi p íchody impulsů, byla navržena vedle exponenciální hustoty pravděpodobnosti hustota pravděpodobnosti Paretova rozdělení jako další možná varianta [1]:

$$f_{\text{par}}(t) = \frac{\theta t_0^\theta}{t^{\theta+1}}, \quad t \geq t_0, \quad t_0 > 0, \quad \theta > 0 \quad (18)$$

kde  $t_0$  je stupnice, a  $\theta$  je parametr tvaru. Po zjednodušení podle [25] dostáváme ze vztahu (18) následující vztah:



$$f_{par}(t) = \alpha \left( \frac{t}{1 \text{ ms}} \right)^{-(\alpha+1)}, \quad \alpha = 1,5; \quad t \geq 1 \text{ ms} \quad (19)$$

kde  $\alpha$  odpovídá parametru  $\theta$  a odpovídá parametru tvaru. Parametry stanovené z naměřených dat v p ístupové síti Deutsche Telekom a British Telecom jsou pro jednotlivá rozdělení uvedené v tab. 5 [25]. Z tab. 5 je patrné, že pro dobu mezi p íchody impuls (inter-arrival time)  $t < 1 \text{ ms}$  je vhodné použít Poissonovo rozdělení a pro dobu mezi p íchody impuls  $t \geq 1 \text{ ms}$  je vhodné použít Paretovo rozdělení.

Tab. 5 Stanovené parametry pro Poissonovo a Paretovo rozdělení [25]

Pravd podobnostní rozdělení	Parametr	Podmínka
Poissonovo	$\lambda = 0,16 \text{ ms}^{-1}$	$t < 1 \text{ ms}$
Paretovo	$\alpha = 1,5$	$t \geq 1 \text{ ms}$

Posloupnost impuls je možné považovat za proces obnovy. To znamená že, posloupnost impuls je možné uvažovat jako sérii náhodných jev , ve které jsou intervaly mezi událostmi nezávislé se stejným rozdělením. Doby mezi p íchody impuls byly analyzovány ze získaných dat z p ístupových metalických sítí, výsledné hodnoty se pohybují v rozmezí od  $\sim 10^{-5} \text{ s}$  až do  $\sim 10^5 \text{ s}$ . Modelování dob mezi p íchody impuls pomocí Markovova procesu obnovy (Markov Renewal Process) bylo představeno D. Leveim a S. McLaughlinem v [5]. Více o Markovských modelech nap .: v [26] a [27].

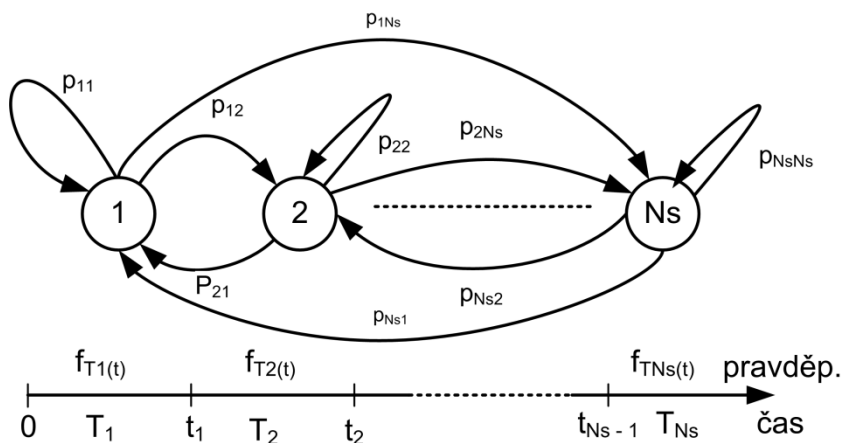
Pomocí Markovova procesu obnovy jsou doby mezi p íchody impuls rozděleny do interval  $T_i$ , tak že [1]:

$$T_i \equiv \langle t_{i-1}, t_i \rangle, \quad i = 1, 2, \dots, N_S; \quad 0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{N_S} \rightarrow \infty \quad (20)$$

kde  $N_S$  je počet stav . Každý Markovský stav odpovídá časovému intervalu a konkrétní čas v každém intervalu je stanoven p íslu-ným rozdělením a hustotou pravd podobnosti  $f_{T_i}(t)$ ,  $i = 1, \dots, N_S$ ;  $t \in T_i$ . Markovský model obnovy pro doby mezi p íchody impuls je zobrazen na obr. 21. Markovský model je uvažován jako et zec, který je popsán pravd podobnostní maticí p echod  $\mathbf{P}$  [1]:

$$\mathbf{P} = \{p_{ij}\} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1N_s} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2N_s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{N_s1} & p_{N_s2} & \cdots & p_{N_sN_s} \end{bmatrix} \quad (21)$$

kde  $p_{ij}$  jsou pravd podobnosti p echodu ze stavu  $i$  do stavu  $j$ , které musí spl ovat následující podmínku  $p_{ij} \geq 0$  a  $\sum_{j=1}^{N_s} p_{ij} = 1$  pro  $i, j = 1, \dots, N_s$ . [1]



Obr. 21 Markovský model obnovy pro doby mezi p íchody impuls [1]

Stanovením hustoty pravd podobnosti  $f_{T_i}(t)$  pro dobu mezi p íchody impuls v každém stavu je zoben ný Markov v et zec (Markov chain), který je ekvivalentní k semi-Markovu procesu (semi-Markov process) známý jako Markov v proces obnovy (Markov renewal process). Pro stanovení Markova procesu obnovy je t eba stanovit po et stav a asových interval pro každý stav s odpovídajícím pravd podobnostním rozd lením. [1]

Tab. 6 Parametry pro ty -stavový model [5]

Stav	1	2	3	4
<b>Interval</b> (doby mezi p íchody impuls )	$t < 1s$	$1 \leq t < 10s$	$10 \leq t < 100s$	$100s \leq t$
<b>Typ 1</b>	<b>Paretovo rozd lení</b>			
	$\theta_1 = 0,874$	$\theta_2 = 1,539$	$\theta_3 = 01,531$	$\theta_4 = 2,513$
<b>Typ 2</b>	<b>Exponenciální rozd lení</b>	<b>Paretovo rozd lení</b>	<b>Exponenciální rozd lení</b>	<b>Paretovo rozd lení</b>
	$\lambda_1 = 2,0042$	$\theta_2 = 1,539$	$\lambda_3 = 0,0170$	$\theta_4 = 2,513$

Ze získaných dat z p ístupových metalických sítí byly navrženy dva modely a to ty -stavový model a dvou-stavový model pro modelování dob mezi p íchody impuls . Parametry pro ty -stavový model jsou uvedeny v tab. 6 a p echodová matice se nachází v (22).

$$\mathbf{P}_{4st} = \begin{bmatrix} 0,801 & 0,038 & 0,061 & 0,100 \\ 0,470 & 0,123 & 0,221 & 0,186 \\ 0,375 & 0,068 & 0,281 & 0,276 \\ 0,350 & 0,045 & 0,217 & 0,388 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Dvou-stavový model je navržen a standardizován ETSI v [25] uvedeny v tab. 7 a p echodová matice se nachází v (23).

Tab. 7 Parametry pro dvou-stavový model [25]

Stav	1	2
<b>Interval</b> (doby mezi p íchody impuls )	$t < 1ms$	$t \geq 1ms$
<b>Typ 1</b> (základní)	<b>Exponenciální rozdělení</b>	<b>Paretovo rozdělení</b>
	$\lambda_1 = 0,16 s^{-1}$	$\theta_2 = 1,5$
<b>Typ 2</b> (alternativní)	<b>Exponenciální rozdělení</b>	<b>Exponenciální rozdělení</b>
	$\lambda_1 = 0,16 s^{-1}$	$\lambda_2 = 0,16 s^{-1}$

$$\text{základní } \mathbf{P}_{2st} = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,2 \\ 0,4 & 0,6 \end{bmatrix} \quad \text{alternativní } \mathbf{P}_{2st} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,5 \\ 0,2 & 0,8 \end{bmatrix} \quad (23)$$

## 2.4 Metody ochrany proti impulsnímu ru-ení

Impulsní ru-ení ovliv uje kvalitu služeb poskytovaných prostřednictvím xDSL systém , naru-uje datové rámce a způsobuje bitové chyby. U skupiny systém ADSL a VDSL byla stanovena přípustná hodnota bitové chybovosti BER (Bit Error Ratio) na hodnotu  $10^{-7}$ , tato hodnota nesmí být překročena. Proto byly vyvinuty dvě metody pro ochranu proti impulsnímu ru-ení. První metoda se nazývá **ochrana proti impulsnímu ru-ení** INP (Impulse Noise protection) a je založena na chybové korekci FEC (Forward error correction) a prokládání (Interleaving). Druhou metodou je metoda **optovného**

**p enosu** (Retransmission), která využívá kanál pro optický p enos tzv. DTU (Data Transfer Unit) rámec .

### 2.4.1 Ochrana proti impulsnímu rušení INP

Metoda INP (Impulse noise protection) je založena na specifických funkcích jako jsou skramblování, rámcování (framing), kódování pomocí Reed-Solomonovy chybové korekce FEC a prokládání (interleaved). Soubor těchto funkcí je umístěn v PMS-TC podvrstvě, která je umístěna mezi / rozhraním a rozhraním referenčního modelu VDSL2 (Obrázek 9-1 v [29]).

INP je možné vymezit pro každou zpořádanou cestu  $p$  v systému VDSL2 (podrobněji v [29]). INP je definována, jako počet sobě jdoucích DMT symbolů nebo jejich zlomek, na kterých mohou být kompletně opravené chyby, bez ohledu na počet chyb během p enosu chybných DMT symbolů. časové rozpětí ochrany proti impulsnímu rušení (v milisekundách) je závislé na rozestupu subnosných (Tabulka 6-1 v [29]) a délkou cyklického prodloužení CE (Cyclic extension). Výpočet parametru INP je uveden ve vzorci (24).

$$INP = \frac{8 \times D_p \times \left\lfloor \frac{R_p}{2 \times q_p} \right\rfloor}{L_p} = \frac{S_p \times D_p \times \left\lfloor \frac{R_p}{2 \times q_p} \right\rfloor}{N_{FECp}} \quad \left[ \begin{array}{c} \text{DMT} \\ \text{symbol} \end{array} \right], \quad (24)$$

kde parametry  $D_p$  je hloubka prokládání,  $R_p$  je počet redundantních oktětů,  $L_p$  je počet bitů ze zpořádané cesty  $p$  přenášených v každém datovém symbolu,  $S_p$  je počet datových symbolů, které obsahují RS kódové slovo zpořádané cesty  $p$ ,  $q_p$  je počet bloků prokládání ve FEC kódovém slově pro zpořádanou cestu  $p$  (latency path) a  $N_{FECp}$  je Reed-Solomonovo slovo, kde  $N_{FEC} = K + R$  bajtů, složených ze zabezpečovacích  $R$  bajtů připojených ke  $K$  datovým bajtům. [29]

#### Prokládání (Delay)

Pokud je prokládání vypnuto (hloubka prokládání = 1) pak zpořádaní mezi  $\alpha$  a  $\beta$  rozhraním nepřesáhne 2 ms. Aktuální zpořádaní v milisekundách zavedené v prokládání na zpořádané cestě  $p$  je vypočítáno podle [29]:

$$delay_p = \frac{S_p \times (D_p - 1)}{q_p \times f_s} \times \left( 1 - \frac{q_p}{N_{FECp}} \right) \quad [\text{ms}] \quad (25)$$

kde  $D_p$  je hloubka prokládání nastavená pro zpoždění ovací cestu  $p$ ,  $S_p$  je počet datových symbolů, které obsáhne RS kódové slovo zpoždění ovací cesty  $p$ ,  $q_p$  je počet bloků prokládání ve FEC kódovém slově pro zpoždění ovací cestu  $p$  (latency path),  $N_{FECp}$  je velikost FEC kódového slova pro zpoždění ovací cestu  $p$  a  $f_s$  je datová symbolová rychlost udávaná v ksymbolech/s. [29]

## 2.4.2 Op tovný p enos (Retransmission)

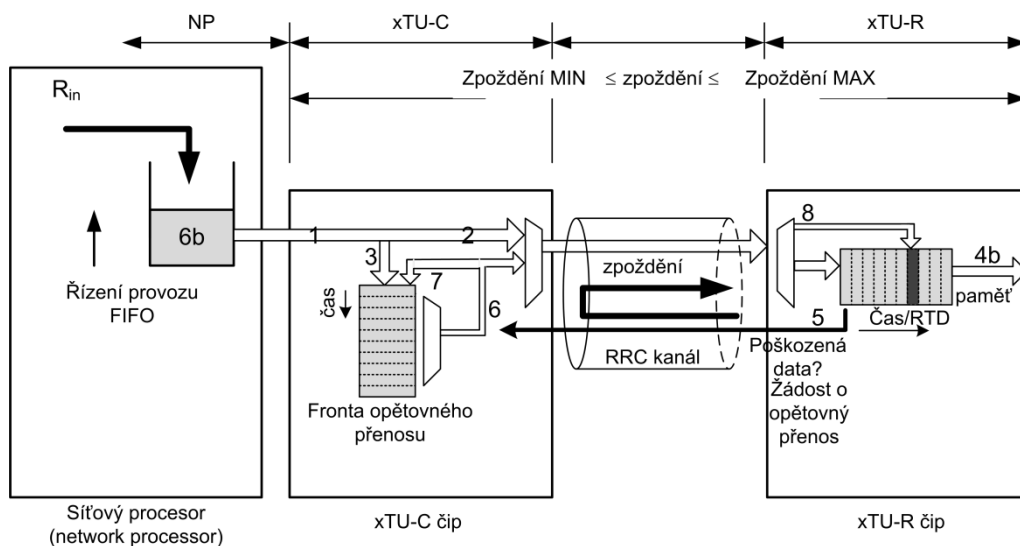
Další metodou pro ochranu proti impulsnímu rušení je tzv. op tovný p enos (RTX ó retransmission nebo také ARQ ó Automatic Repeat reQuest). Tato metoda předpokládá impulsní rušení typu REIN, SHINE nebo oba typy rušení souasn. Pro správnou funkci op tovného p enosu je nezbytné, aby xDSL připojka měla v této p enosovou kapacitu nejlépe rychlost, se kterou přichází užívatelská data. Poměr mezi konfigurovanou rychlostí linky a maximální rychlostí užívatelských dat je definován parametry NDR (Net Data Rate ó čistá užívatelská p enosová rychlost bez záhlaví) a očekávanou propustnost ETR (Expected Throughput). Během inicializace musí příjemce vybrat takové parametry, aby byla garantována ochrana proti nejhoršímu případu impulsního rušení.

### Princip op tovného p enosu (obr. 22)

1. V síťovém procesoru jsou užívatelská data konvertována do DTU rámečků, ke kterým je připojena část RS kódu a dodatečně i CRC pro detekci chyb v případě poškození DTU rámečků. Dále je přidána identifikační značka (time stamp) a identifikace sekvence. Typ DTU rámečků a jeho konstrukce se liší v závislosti na implementaci. Konkrétní typ je stanoven xTU-C a xTU-R během inicializace a není tedy možné toto nastavení konfigurací změnit. Pozn.: V doporučení ITU-T G.998.4 jsou definovány čtyři typy DTU rámečků.
2. DTU rámeček je vyslán.
3. Zároveň je DTU rámeček uložěn do fronty op tovného p enosu (retransmission queue) na straně vysílatele.
4. Na straně xTU-R je DTU rámeček přijat a uložěn do přijímací fronty op tovného p enosu.
 

**4b)** V případě, že DTU rámeček neobsahuje žádnou CRC chybu, jsou data odeslána z přijímací fronty tak, aby byly dodrženy pořadí na p enos týkající se maximálního zpoždění.
5. V případě, že DTU rámeček je poškozen a CRC kontrola hlásí chybu, následuje ze strany xTU-R k op tovnému vyslání požadavku (request) směrem k xTU-C, který obsahuje SID (identifikace sekvence) číslo. K tomuto kroku se používá RRC kanál. Zároveň se ve výstupní frontě na straně xTU-R rezervuje prázdný slot (označený tmavě šedě).

6. Jakmile xTU-C strana obdrží požadavek (request), vyhledá dané DTU ve vstupní frontě opotovního p enosu a dojde k op otovnímu posláání DTU rámece. **6b)** Uživatelská data stále p ícházejí do sí ového procesoru, ale neodcházejí ven, protože do ú astnického vedení se vysílá z fronty op otovního p enosu. (jedná se o FIFO frontu).
7. Vyslaný DTU rámece v bod (6) je sou asn taktéfl uložen do fronty op otovního p enosu pro možné dal-í vysláání DTU rámece.
8. Na stran xTU-R je DTU rámece p íjat. Jestliffe je DTU rámece v po ádku a neobsahuje CRC chybu, je uloženo na pat í né místo ve front p íjímá e. Jestliffe je DTU rámece op t po-kozen, je poslán nový požadavek. Prove se kontrola asové zna ky tmav -ed ozna eného slotu, a pokud je v t-í nefl konfigurované maximální zpofld ní, bude DTU rámece zahozen.



Obr. 22 Princip op otovního p enosu

*O ekávaná propustnost (ETR ó Expected throughput) je aktuální NDR bez záhlaví odpovídající nastavení minimální INP hodnot . Tato propustnost je zaru ena, pokud délka a frekvence impuls odpovídá minimálnímu nastavení INP, tj. pokud je prost edí bez impuls bude ETR rovna hodnot NDR. U ú astnické p ípojky zaru-ené impulsním ru-ením na hranici konfigurovaného nastavení INP bude  $ETR = NDR$  ó *záhlaví*.*

EFTR (Error-Free Throughput) ó je propustnost pozorovatelná na p íjímáací stran a pokud konfigurace INP spl uje podmínky impulsního ru-ení pak je  $EFTR \geq ETR$ . Pokud je na ú astnické p ípojce impulsní ru-ení v t-í, nefl nastavená ochrana prost ednictvím op otovního p enosu, EFTR je snížena o zahozené DTU rámece, které nebylo možno p eposlat.

**Výhody a nevýhody optického přenosu**

Tab. 8 Výhody a nevýhody optického přenosu

<b>Výhody</b>	<b>Nevýhody</b>
Výrazně snižuje chybovost na zaručené ústnické připojení v porovnání s FEC za shodných podmínek. Díky nižší chybovosti zvyšuje propustnost uřivatelských dat.	Neodstraní všechny následky impulsního rušení.
Snižuje zpoždění v porovnání s FEC. Zpoždění se projeví pouze v případě detekce CRC chyby a aktivního optického přenosu DTU rámcem.	Zvyšuje jitter v případě optického přenosu.
Zvyšuje přenosovou rychlost oproti FEC, kde je konstantní RS kód.	Optický přenos má nižší bitové osazování nosných a v krajních délkách ústnické připojení.

Poznámka: FEC obvykle představuje ochranu proti impulsnímu rušení založenou na chybové korekci FEC a prokládání

### 3 Cíle diserta ní práce

Existuje mnoho různých zdroj ru-ení, které negativně ovlivují p enosové vlastnosti metalické p enosové cesty. Jedním z těchto zdrojů je impulsní ru-ení, které je velmi specifické a má značný vliv na kvalitu služeb poskytovaných prostřednictvím xDSL systémů. Impulsní ru-ení nemusí zúžit dostupné p enosové pásmo, ale p edevším vede k narušení p ená-ených rámců a tím i k výskytu bitových chyb a ztrát paketů. Důsledkem toho je negativní ovlivnění kvality poskytovaných multimediálních služeb prostřednictvím xDSL systémů. Příčiny impulsního ru-ení na ústnických p ípojkách jsou různé: od vzniku ru-ení při vyzvánění telefonního p ístroje, přes ru-ení elektrickými spotřebiči, atmosférické ru-ení z elektrických výbojů, vysokonapíťových vedení ať po regulaci a spínání vyšších výkonů. Proto je nezbytné analyzovat charakter impulsního ru-ení tak, aby mohly být vytvořeny modely pro ověření dopadu impulsního ru-ení na p enosové systémy. Dominantní vliv na vysokorychlostní datové p enosy má impulsní ru-ení injektované do vedení v blízkosti uživatelského modemu. Proto jsou velmi častým zdrojem impulsního ru-ení zařízení, systémy a p ístroje, které se běžně vyskytují v domácnostech. Proto je účelné tuto impulsní ru-ení analyzovat a na základě získaných analýz pak navrhnout optimalizovaný model impulsního ru-ení, který bude vycházet z reálných podmínek.

Pro téma diserta ní práce jsem zvolil tyto cíle:

1. Provést měření impulsního ru-ení od vybraného souboru elektrických spotřebičů a prověřit jeho vliv na ústnické p ípojky.
2. Analyzovat naměřené výsledky z pohledu spektrálního i časového rozložení.
3. Na základě získaných analýz vytvořit modely impulsního ru-ení založené na impulsích s definovaným výkonovým spektrem a náhodně vygenerovanou fází.
4. Modelovat rozložení doby mezi generováním impulsů.
5. Shrnout a vyhodnotit dosahené výsledky a nastínit směry dalšího výzkumu v dané oblasti.



## 4 Zvolené metody zpracování a použití prostředí

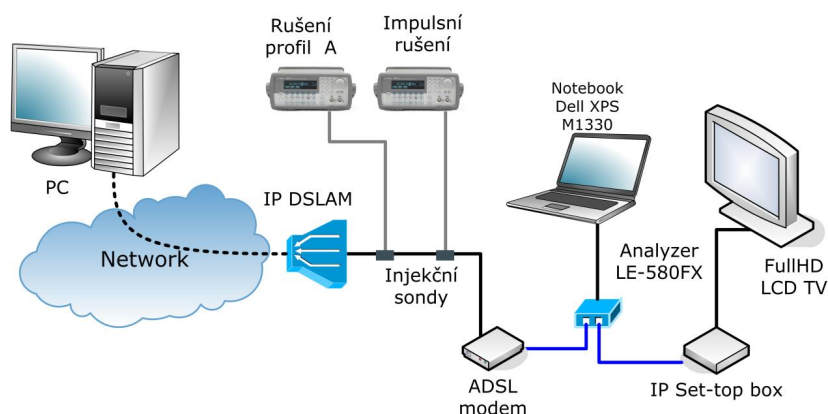
Jak bylo uvedeno v předchozích částech, velmi častým zdrojem impulsního rušení jsou zařízení, systémy a přístroje, které se běžně vyskytují v domácnostech. Nejprve jsem se okrajově vnoval dopadu impulsního rušení na IPTV (IP televize). Experiment je popsán v kapitole 4.1.

Jádrem disertační práce je především analýza a modelování impulsního rušení. Zdrojem impulsního rušení byly elektronické spotřebiče typicky se vyskytující v domácnostech. Měření impulsního rušení bylo prováděno v laboratorních podmínkách.

### 4.1 Úinek impulsního rušení na IPTV

#### 4.1.1 Měřící pracoviště

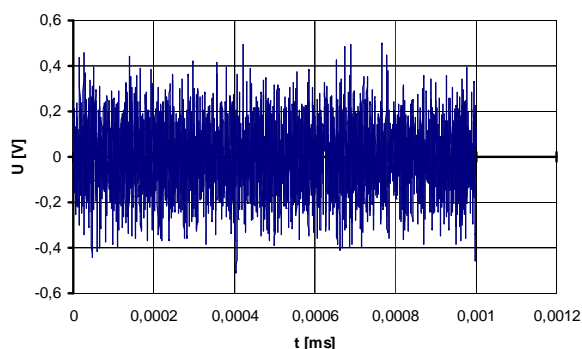
Měřící pracoviště bylo navrženo pro pozorování vlivu impulsního rušení na televizní vysílání tzv. IPTV, které bylo poskytováno prostřednictvím ústřednické připojky ADSL2+. Schéma tohoto pracoviště je znázorněno na obr. 23. Měřící pracoviště vychází z doporučení ITU-T G.996.1 a je modifikováno pro testování provozu IPTV televize.



Obr. 23 Měřící pracoviště pro pozorování vlivu impulsního rušení na IPTV [30]

Délka ústřednického vedení byla nastavena na 1,2 km. Měřící pracoviště obsahuje počítač (PC), který vysílá televizní přenos a simuluje IPTV televizi, dále obsahuje dva generátory rušení jeden pro rušící profil model A, a druhý pro impulsní rušení, dále injekční sondy k navázání rušení do ústřednické připojky, ADSL2+ modem a ústřednický multiplexor DSLAM ADSL2+, analyzátor datového proudu LE-580FX,

notebook pro zaznamenání datového toku a IPTV settop box s LCD televizí. Jako testovací impuls byl použit impuls  $U_{imp}$  (obr. 16) a rušící profil podle modelu A (obr. 24), který představuje vysokou úroveň peslechového rušení. Rušící profil šmodel A obsahuje peslechy od těchto xDSL systémů: 90 SDSL, 90 ISDN-BA s linkovým kódem 2B1Q, 40 HDSL a dále 90 ADSL systémů s POTS a 90 ADSL pápojok s ISDN-BA [31].

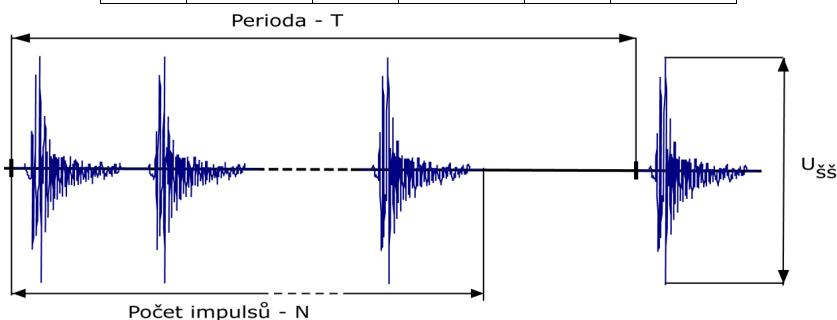


Obr. 24 Rušící profil šmodel A

Generování impulsního rušení bylo nastaveno podle parametrů uvedených v tab. 9 a na obr. 25. Kde  $U_{imp}$  představuje amplitudu napětí impulsu,  $T$  představuje opakující se periodu generování impulsů z generátoru a  $N$  představuje počet impulsů v jedné periodě.

Tab. 9 Nastavení impulsního rušení

Perioda $T = 0.5s$		Perioda $T = 1s$		Perioda $T = 60s$	
$U_{imp}$ [mV]	$N$ (počet impulsů)	$U_{imp}$ [mV]	$N$ (počet impulsů)	$U_{imp}$ [mV]	$N$ (počet impulsů)
50	15	50	15	50	15
	500		500		500
150	15	150	15	150	15
	500		500		500



Obr. 25 Nastavení impulsního rušení

Jak je z obr. 25 patrné, skupiny impulsů jsou vysílány deterministicky s periodou  $T$ . Tento experiment vychází z testování pravidelně se opakujícího impulsního rušení, jako je rušení REIN. Důsledkem působení impulsního rušení se v televizním obrazu objevují různé artefakty, jako jsou kostičky, rozmazaný obraz, vypadávání zvukové stopy, ztráta paketů atd. Příklad důsledku působení impulsního rušení je zobrazen na obr. 26.

Obr. 26 Působení impulsního rušení ( $T = 1$  s,  $U_{pp} = 50$  mV,  $N=15$ )

Závazná podmínka experimentu, pokud není nastavena na úrovni ústřední ochrana proti impulsnímu rušení INP a prokládání (delay) a na úrovni spojení působí impulsní rušení, dochází k narušení rámců. Narušené rámce jsou identifikovány a pořízány tzv. řezáním, které se nachází na ušlechtilém modemu i na úrovni ústředního multiplexoru DSLAM. Při každé zjištěné anomálii, při kontrole rámce pomocí CRC, je příslušný řez (CV ó Code Violation) zvýšen o jedna. Dále je také vyhodnoceno počet chybných jedno-secundových intervalů, během kterých jsou detekovány CRC anomálie, pomocí řezání ES (Errored Second). Jestliže je během jedno-secundového intervalu detekováno více jak 50 CRC anomálií, je toto indikováno řezáním SES (Severely Errored Second).

Jestliže má ústřední ochrana nastavenou ochranu proti impulsnímu rušení INP a prokládání (delay) a na úrovni spojení působí impulsní rušení, dochází také k narušení rámců, ale v těchto narušených rámcích jsou chyby detekovány a opravovány. Opravené rámce jsou pořízány řezáním FEC-C (Forward Error Correction ó Channel), který ukazuje počet opravených kódových slov.

Oprava a detekce chyb závisí na nastavených parametrech INP a prokládání (delay), na úložné rezervě (tzv. noise margin), pořadovaných pruhových rychlostí a především na charakteru impulsního rušení. Impulsní rušení může působit na různých kmitočtech a s různou výkonovou úrovní. Při zvyšující se intenzitě a vysokých úrovních impulsního rušení, bude docházet k větší chybivosti a může se stát, že mechanismus INP nebude schopen opravovat všechny chyby. To se pak projeví na již zmíněných

ítaých CV, ES, kde se evidují poškozené rámce a opravené rámce FEC-C. Jestliže se bitová chybovost BER zvýší nad  $10^{-7}$ , dochází k rozpadu synchronizace spojení mezi uživatelským modemem a ústřednickým multiplexorem DSLAM.

#### 4.1.2 Vliv ochrany proti impulsnímu rušení na provozní rychlost

Vliv ochrany proti impulsnímu rušení INP a zpoždění (delay) na provozní rychlost jsem testoval na modemu (VTU-R) Comtrend VR-3026e v laboratoři společnosti Telefonica CZ a. s. Vzdálenost mezi modemem (VTU-R) a ústřednickým multiplexorem DSLAM (VTU-C) byla na umístění vedení (Spirent DLS8234 VDSL2 simulátor vedení PE04mm) nastavena na 100 metr bez předaného rušení. Výsledné ovlivnění provozní rychlosti na VDSL profilu 17a je uvedeno v tab. 10.

Tab. 10 Ovlivnění provozní rychlosti při nastavení INP a zpoždění na VDSL2

Prokládání/ INP		INP <sub>min</sub> [symboly]											
		0		1		2		4		8		12	
		DS [kbit/s]	US [kbit/s]	DS [kbit/s]	US [kbit/s]	DS [kbit/s]	US [kbit/s]	DS [kbit/s]	US [kbit/s]	DS [kbit/s]	US [kbit/s]	DS [kbit/s]	US [kbit/s]
Prokládání <sub>max</sub> [ms]	1	99998 1/0.3	60015 0/0.0	24337 1/1.0	12145 1/1.0	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	99998 2/0.6	60015 0/0.0	73298 2/1.0	36625 2/1.0	24337 2/2.0	12145 2/2.0	-	-	-	-	-	-
	4	99998 4/1.3	60015 0/0.0	99998 4/1.3	56572 4/1.0	73298 4/2.0	36625 4/2.0	24337 4/4.1	12145 4/4.0	-	-	-	-
	8	99998 7/0.0	60015 0/0.0	100000 3/1.0	60014 7/1.0	88169 5/2.0	45040 5/2.0	55390 7/4.0	28210 7/4.0	24337 8/8.2	12145 8/8.0	-	-
	16	99998 7/0.0	60015 0/0.0	100000 3/1.0	60012 7/1.0	88169 5/2.0	45040 5/2.0	55390 7/4.0	28210 7/4.0	31987 10/8.0	15970 10/8.0	22293 12/12.0	11097 12/12.0
	32	99998 7/2.1	60015 0/0.0	100000 3/1.0	59989 7/1.0	88169 5/2.0	45040 5/2.0	55390 7/4.0	28210 7/4.0	31987 10/8.0	15970 10/8.0	22293 12/12.0	11097 12/12.0
	63	99998 7/2.1	60015 0/0.0	100000 3/1.0	59952 7/1.0	88169 5/2.0	45040 5/2.0	55390 7/4.0	28210 7/4.0	31987 10/8.0	15970 10/8.0	22293 12/12.0	11097 12/12.0

Pozn.: Vysvětlení uspořádání v tab. 10: INP<sub>min</sub> (0, 1, 2, 4, 8 a 12) a Zpoždění<sub>max</sub> (1, 2, 4, 8, 16, 32 a 63) jsou výchozí nastavené parametry v profilech na ústřednickém multiplexoru DSLAM. DS a US jsou zkratky pro provozní rychlosti v sestupném (DS) a vzestupném (US) směru. Hodnoty uvedené v buňce jsou: 1. řádek: provozní rychlost v kbit/s; 2. řádek: aktuální hodnota zpoždění [ms] / aktuální hodnota parametru INP [symboly].

#### 4.1.3 Dílčí závěr experimentu

Z experimentu je patrné, že je nutné znát charakter impulsního rušení, aby byla na ústřednické přípojce správně nastavena ochrana proti tomuto typu rušení, a aby byl zaručen bezchybný provoz signálu na ústřednické přípojce. Vzhledem k tomu, že velký

podíl impulsního rušení je od zařízení, která se typicky vyskytují v domácnostech, (vyplývá z [21]), jsem se rozhodl pro měření a analyzování tohoto impulsního rušení a následně modelování impulsního rušení pro vybrané vzorky elektrických spotřebičů.

## 4.2 Impulsní rušení testovaných vzorků

### 4.2.1 Vzorky elektrických spotřebičů

Celkový počet testovaných vzorků elektrických spotřebičů bylo 6. Testování bylo prováděno v několika krocích v závislosti na konkrétním zařízení. Prvním krokem bylo vyloučení rušení bez příslušného zařízení zapojeného tak, aby se minimalizovalo zkreslení naměřených hodnot. V tomto klidovém stavu nebylo pozorováno impulsní rušení na osciloskopu. Impulsní rušení bylo naopak zaznamenáno v různých provozních stavech elektrického spotřebiče.

Tab. 11 Vzorky elektrických spotřebičů a stav záznamu impulsního rušení

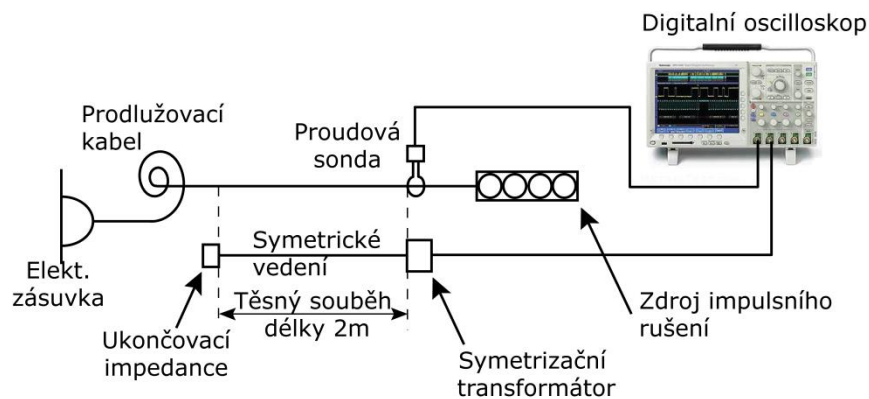
Elektrický spotřebič	Situace záznamu impulsního rušení	Výskyt impulsního rušení
<b>Vzorek s nabíječkou elektronikou</b> ( <i>Universální nabíječka baterií</i> )	Vzorek v el. síti: 1. Vložením baterií 2. Vyndáním baterií	Nevhodné k analýze Nevhodné k analýze
<b>*Vzorek I s komutátorovým motorem</b> ( <i>Ruční mixér</i> )	1. Zapojení do el. sítě 2. <u>Rozběh</u> 3. <u>V provozu (mixování)</u> 4. <u>Změna rychlosti otáček</u> 5. <u>Vypínání</u>	Ne <u>Ano</u> <u>Ano</u> <u>Ano</u> <u>Ano</u>
<b>*Vzorek II s komutátorovým motorem</b> ( <i>Vysokorychlostní vrtačka</i> )	1. <u>Rozběh</u> 2. <u>V provozu bez zatížení</u> 3. V provozu pod zatížením (vrtání) 4. <u>Regulace otáček za běhu</u> 5. <u>Regulace otáček za běhu na maximum</u> 6. <u>Regulace otáček za běhu na minimum</u> 7. <u>Vypínání</u>	<u>Ano</u> <u>Ano</u> Není impulsní rušení <u>Ano</u> <u>Ano</u> <u>Ano</u> <u>Ano</u>
<b>*Vzorek III s komutátorovým motorem</b> ( <i>Fén</i> )	1. Zapojení do el. sítě 2. <u>Rozběh</u> 3. <u>V provozu (fénování)</u> 4. <u>Vypínání</u>	Ne Nevhodné k analýze <u>Ano</u> <u>Ano</u>
<b>Vzorek IV s komutátorovým motorem</b> ( <i>Ventilátor</i> )	1. Zapojení do el. sítě 2. <u>Rozběh</u> 3. V provozu 4. Vypínání	Ne Nevhodné k analýze Nevhodné k analýze Nevhodné k analýze
<b>Vzorek se spínaným zdrojem</b> ( <i>Monitor</i> )	1. Zapojení do el. sítě 2. V provozu 3. Zapojený vypnutý monitor do zapnutého PC 4. Zapojený vypnutý monitor nepojený do PC	Ne Není impulsní rušení Ne Ne

\* Pozn.: Dále v textu budu používat zkratky: Vzorek KM I, Vzorek KM II a Vzorek KM III.

Použití vzorky elektrických spotřebičů a podmínky pro měření impulsního rušení jsou uvedeny v tab. 11. V textu budu dále používat označení vzorky z pohledu použití elektroniky.

#### 4.2.2 Měřící prostředí

Měřící prostředí je uvedené na obr. 27. Skládá se ze standardního prodlužovacího napájecího kabelu, který je v tomto soubhu se symetrickým telefonním vedením. Délka soubhu byla stanovena na 2 metry (hodnota soubhu byla ověřena po etných experimenty a praktickými zkouškami, které dokazují, že pro délky přes 2 m a dále je další zvyšování dopadu impulsního rušení minimální). Blízký konec symetrického kabelu je zakončen symetrickým transformátorem (balun, balanced, unbalanced), který je připojen na 50  $\Omega$  vstup digitálního osciloskopu (obr. 27). Vzdálený konec symetrického telefonního vedení je zakončen ukončovací impedancí. Zdrojem impulsního rušení jsou elektrické spotřebiče uvedené v tab. 11 zapojené do elektrické zásuvky podle obr. 27. Rušení na symetrickém vedení je zaznamenáno do paměti digitálního osciloskopu; soubhu je také zaznamenáno rušení na napájecím kabelu přes proudovou sondu.



Obr. 27 Měřící prostředí pro diagnostiku impulsního rušení.

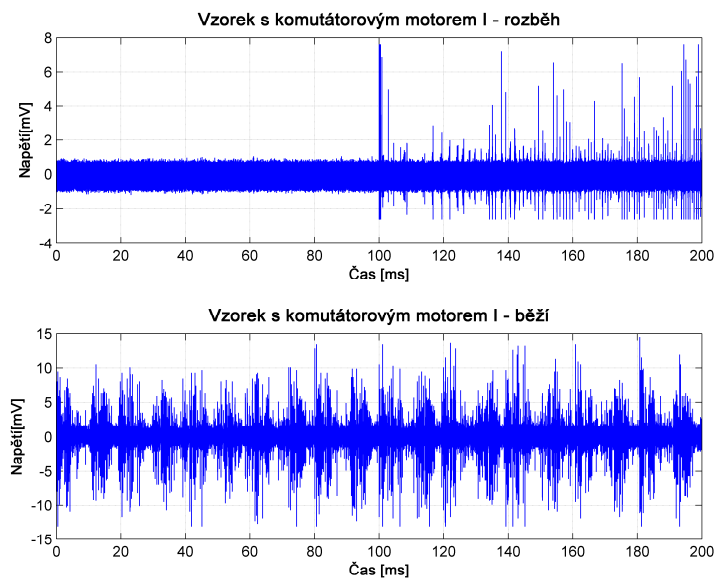
Pro měření byl použit digitální osciloskop Tektronix DPO4032 s pamětí na 10 milionů vzorků s použitou vzorkovací frekvencí 50 MS/s a vstupní impedancí digitálního osciloskopu  $Z_C = 50 \Omega$ . Pro lepší synchronizaci a snadnější identifikaci impulsního rušení je vhodné nastavit práh spouštění (TRIGGER) na hodnoty v této nevl 0 mV a poté měřit pomocí módu SINGLE (záznam hodnot šeká na úroveň, která je v této nevl spouštění).

### 4.2.3 Naměřená rušení od testovaných vzorků

Každý záznam rušení od testovaných vzorků rušení obsahují  $10^7$  vzorků při vzorkovací frekvenci 50 MHz a vstupní impedanci osciloskopu  $Z_C = 50 \Omega$ . Vzorkovací frekvence je dána digitálním osciloskopem a je dostatečná, protože v metalické přístupové síti společnosti Telefonica CZ a. s. je použitý VDSL2 profil 17a.

Pro další zpracování zaznamenaných rušení jsem bral v úvahu jenom ty případy, kde bylo zjevně ovlivněno impulsním rušením. Časové případy rušení všech testovaných vzorků elektrických spotřebičů se nacházejí v příloze na DVD.

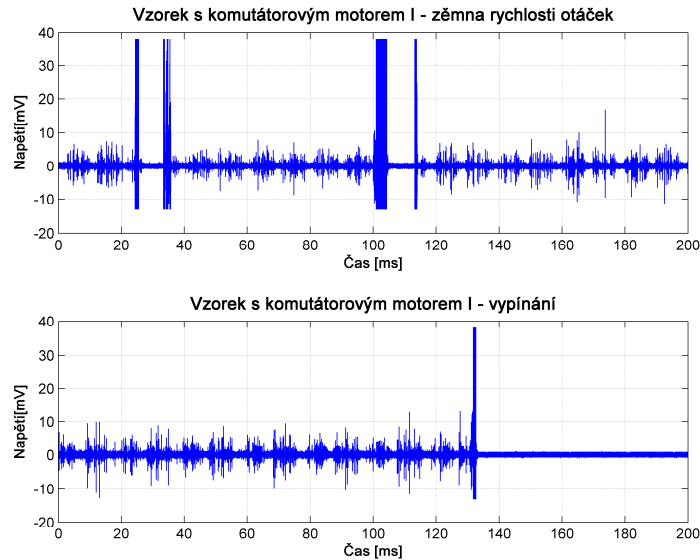
Pro další zpracování a modelování jsou vhodné časové případy: Vzorek KM I, Vzorek KM II, Vzorek KM III.



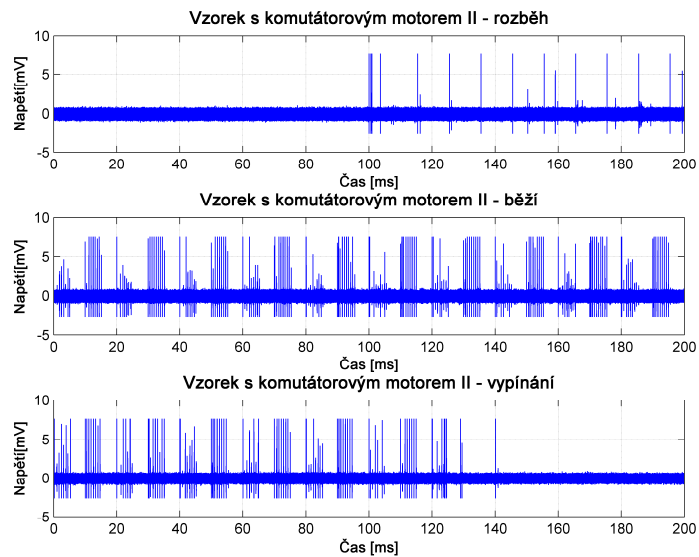
Obr. 28 Zaznamenaný časový průběh Vzorku KM I ve stavech o rozběhu a běhu

časové případy Vzorku KM I jsou zobrazeny na obr. 28 (v provozním stavu o rozběhu a běhu) a na obr. 29 (v provozním stavu o změna otáček a vypínání). časové případy Vzorku KM II jsou zobrazeny na obr. 30 (v provozním stavu o rozběhu, běhu a vypínání) a na obr. 31 (v provozním stavu o změna otáček za běhu, změna otáček za běhu minimální výkon a změna otáček za běhu maximální výkon). časové případy Vzorku KM III jsou zobrazeny na obr. 32 (v provozním stavu o běhu a vypínání).

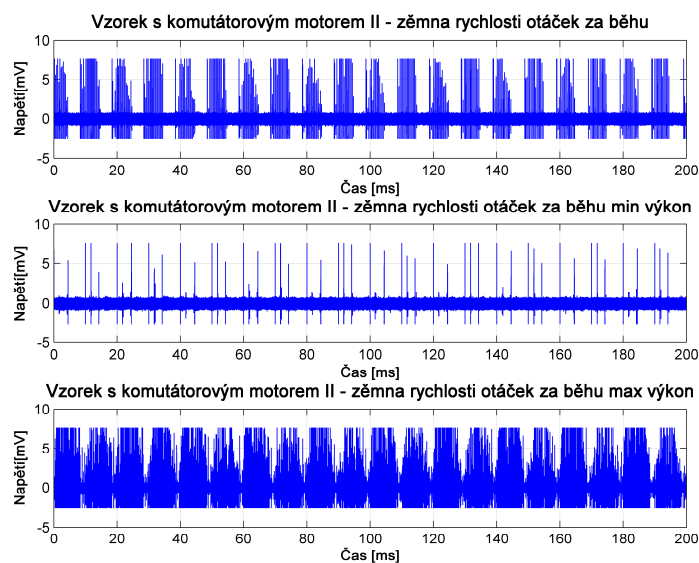
Všechny zaznamenané případy jednotlivých vzorků byly podrobeny analýze impulsního rušení (kapitola 5) a byly východiskem pro modelování impulsního rušení (kapitola 6).



Obr. 29 Zaznamenaný časový průběh Vzorku KM I ve stavech změna rychlosti otáček a vypínání

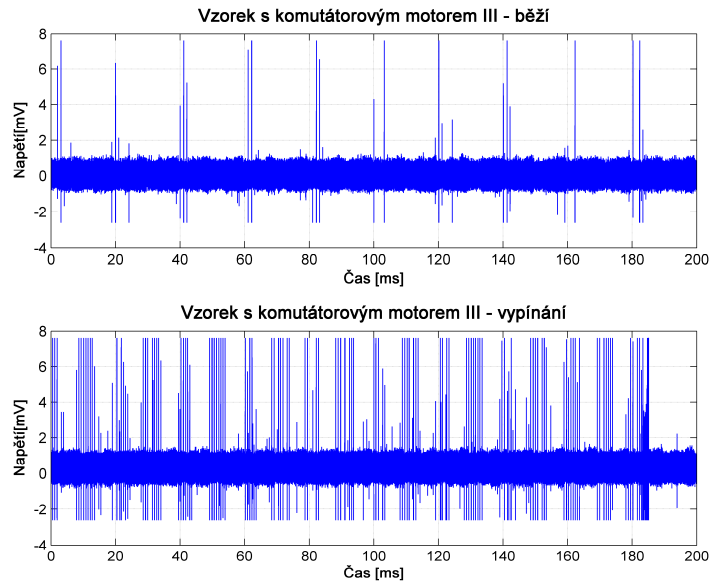


Obr. 30 Zaznamenaný časový průběh Vzorku KM II ve stavech rozběh, v běhu a vypínání



Obr. 31 časový průběh Vzorku KM II ve stavech změna rychlosti otáček, otáčky min. a otáčky max.





Obr. 32 Zaznamenaný časový průběh Vzorku KM III ve stavech oběhu a vypnutí

### 4.3 Postup analýzy naměřených rušení a modelování impulsů

Věchna uvažovaná naměřená rušení byla analyzována z hlediska hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsů, hustoty pravděpodobnosti doby mezi příchody impulsů a doby trvání impulsů. Také jsem provedl analýzu rušení na pozadí, který se nachází mezi jednotlivými impulsy. Výsledky analýz jsou v kapitole 5.

Při modelování impulsního rušení jsem vycházel z modelu Henkel/Kessler, kde byla před vlastním modelováním analyzována zaznamenaná rušení na ústnických vedeních v sítích telekomunikačních operátorů (více v kapitole 2.3.4). Na základě toho rušení byl pak vytvořen model Henkel/Kessler.

Modely impulsního rušení jsem vytvářel v prostředí Matlab následujícím způsobem: každé zaznamenané rušení bylo zkoumáno samostatně. Postup modelování modelu impulsního rušení jsem rozdělil do několika kroků:

1. Nejprve jsem hledal impulsy s podobnými odhady spektrální hustoty výkonu a rozdělil jsem je do skupin.
2. Pro každou skupinu jsem vytvořil zprůměrovanou spektrální hustotu výkonu.
3. Ze získaných zprůměrovaných spektrálních hustot výkonu jsem vybral tu s nejvyšším výkonem a vytvořil jsem z ní amplitudové spektrum a náhodně jsem k ní modeloval fázi s reálným pravděpodobnostním rozdělením.
4. Pomocí IFFT (inverzní rychlá Fourierova transformace) jsem získal způsoby impulsy v časové oblasti.

5. Nakonec jsem vygeneroval stejné počet impulsů, které dopovídaly počet impulsů v původní skupině (v 1. bodě) a porovnal jsem s původní zprůměrovanou spektrální hustotou výkonu (z 3. bodu) se zprůměrovanou spektrální hustotou výkonu získanou z nově vygenerovaných časových impulsů.
6. Modelování celkového průběhu impulsního rušení bylo rozděleno do těchto částí:
  - a. Modelování doby mezi příchody impulsů (inter-arrival time)
  - b. Modelování bílého Gaussovského šumu mezi impulsy
  - c. Modelování impulsu na základě získání parametrů z bodu 3 v místech, kde má impuls vzniknout; na základě bodu 6a

Výpočet spektrální hustoty výkonu je popsáno v části 4.3.1. Pro modelování impulsního rušení jsem použil následující pravděpodobnostní rozdělení. Rovnoměrné, deterministické, Paretovo rozdělení a Pissonovský tok jsem použil při modelování doby mezi příchody impulsů. Normální (Gaussovo) rozdělení jsem použil při modelování bílého Gaussovského šumu. Weibullovo, exponenciální, logaritmicko-normální a normální (Gaussovské) rozdělení jsem použil při modelování náhodné fázové funkce. Použitá pravděpodobnostní rozdělení jsou uvedeny v příloze.

### 4.3.1 Výpočet spektrální hustoty výkonu (PSD)

Impulsy je možné pojmout jako náhodné signály z hlediska amplitudové struktury a z hlediska frekvenční nebo časové struktury. Amplitudová struktura (hustota pravděpodobnosti amplitudy) nesouvisí obecně s popisem v časové a frekvenční oblasti, protože náhodné signály mající stejnou hustotu pravděpodobnosti amplitud mohou mít rozdílné tvary v časové a známé autokorelační funkce a odlišné spektrální hustoty výkonu. Pro charakteristiku náhodných signálů je možné použít hustotu pravděpodobnosti amplitudy, korelační a kovarianční funkce, spektrální hustotu výkonu a dále také střední hodnotu a rozptyl. [32]

Nalezené impulsy v zaznamenaných rušeních jsou pojaty jako neperiodické signály s konečným počtem vzorků. Výpočet spektrální hustoty výkonu je pak dán jen odhadem spektrální hustoty výkonu. Odhad spektrální hustoty výkonu je prováděn pomocí prostředí Matlab. Výpočet odhadu spektrální hustoty výkonu pomocí DFT ze signálu  $s(t)$  a jeho spektra  $S_{(s)}(\omega)$  a  $S_{(d)}(\Omega)$  jeho vzorků  $s(kT_v) = s[k]$  pomocí vzorce: [37]

$$\begin{aligned}
C_{(s)}(n\omega_0) &\approx T_{Sa} C_{(d)}(n\omega_0 T_{Sa}) = T_{Sa} C_{(d)}(n\Omega_0) \approx \\
&\approx T_{Sa} \frac{1}{N} |DTF\{s_N[k]\}|^2 = \frac{T_{Sa}}{N} |DTF\{s_{NT_{Sa}}[kT_{Sa}]\}|^2,
\end{aligned} \tag{26}$$

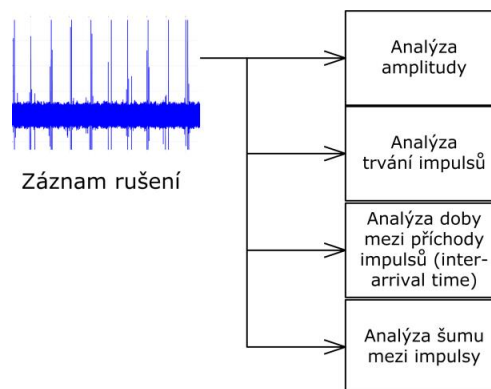
$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{N} = \omega_0 T_{Sa}, \Rightarrow \omega_0 = \frac{2\pi}{T_{Sa}} \frac{1}{N} = \frac{\omega_{Sa}}{N} \tag{27}$$

kde  $T_{Sa}$  je perioda vzorkování,  $C_{(d)}(\Omega) \approx 1/N |S_{(d),N}(\Omega)|^2$  je spektrální hustota výkonu vzork signálu,  $N$  je počet vzork signálu v časové doméně,  $k$  je jeden ze vzorků,  $\omega_0$  je vzdálenost mezi vzorky ve spektru a DFT je diskretní Fourierova transformace. [37]

## 5 Analýza impulsního rušení

Při analýze impulsního rušení (obr. 33) z vybraných záznamů rušení jsem se zaměřil na analýzu hustoty pravděpodobnosti amplitudy, časové doby trvání impulsů a hustoty pravděpodobnosti doby mezi příchody impulsů (tzv. intr-arrival time). Analyzoval jsem, zda impulsy zachycené v zaznamenaném rušení, mají hustotu pravděpodobnosti amplitudy a doby mezi příchody impulsů jako model Henkel-Kessler (hypotéza).

Dále jsem provedl analýzu šumu na pozadí, který se nachází mezi impulsy v jednotlivých záznamech rušení. Zjišťoval jsem, zda se jedná o bílý Gaussovský šum (hypotéza). Vytvořil jsem histogram a k němu jsem generoval hustotu pravděpodobnosti pro vybraný úsek šumu na pozadí. Ověřil jsem, zda se jedná o bílý Gaussovský šum, jsem stanovil pomocí odhadu spektrální hustoty výkonu (PSD).

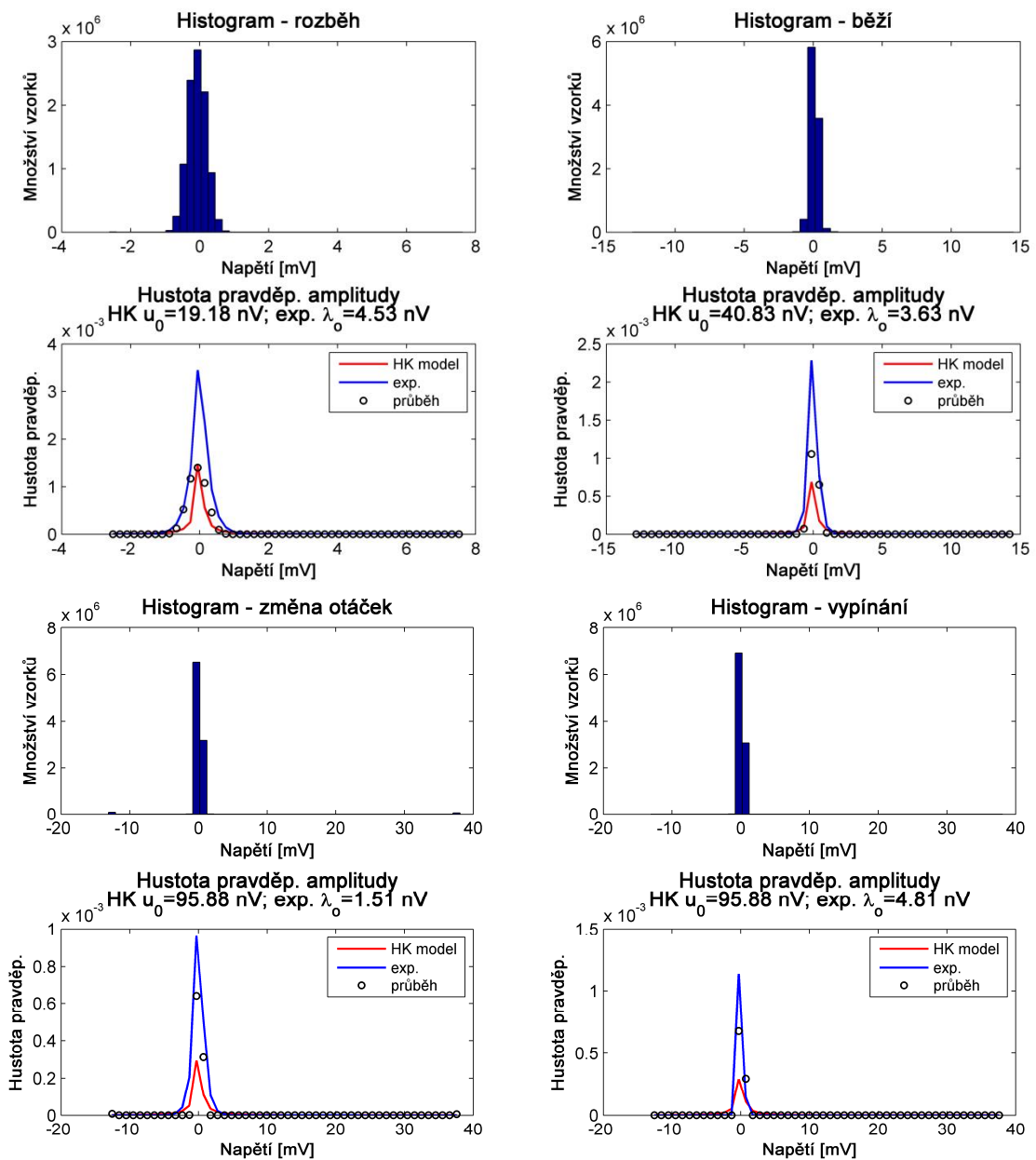


Obr. 33 Blokové schéma o Analýza zaznamenaného rušení

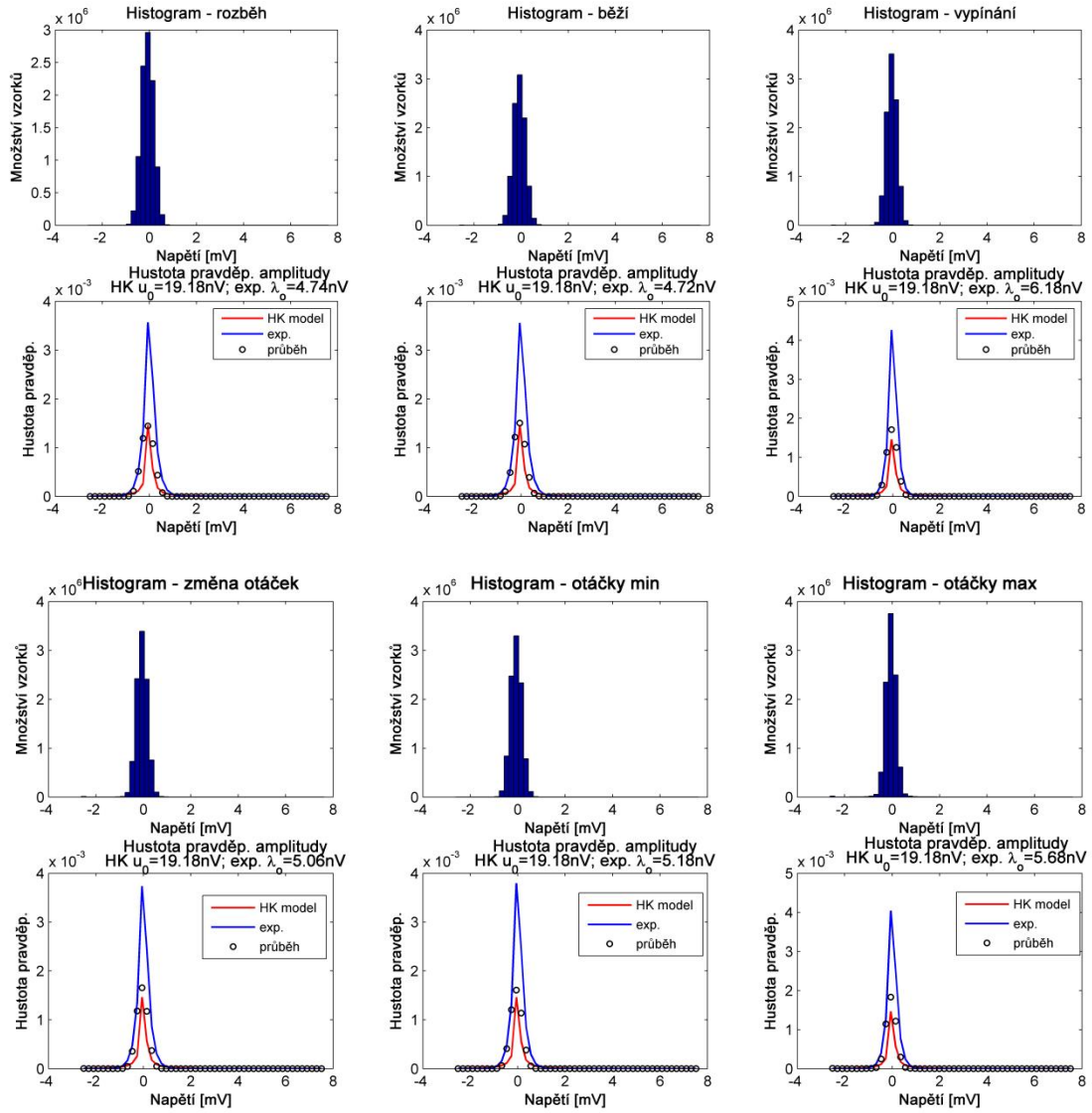
### 5.1 Analýza amplitudy impulsního rušení

Analýzu amplitudy impulsního rušení jsem realizoval pomocí histogramu a hustoty pravděpodobnosti. Ze zaznamenaného rušení vytvářím hustotu pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení (průběh černá křivka) a z těchto hodnot odhaduji nejlepší možnou aproximaci pomocí oboustranné hustoty pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení  $f(x) = \frac{1}{2} \lambda e^{-\lambda|x|}$  (exp. šedá křivka) a aproximaci pomocí nejlepšího odhadu modelu Henkel/Kessler (HK model červená křivka).

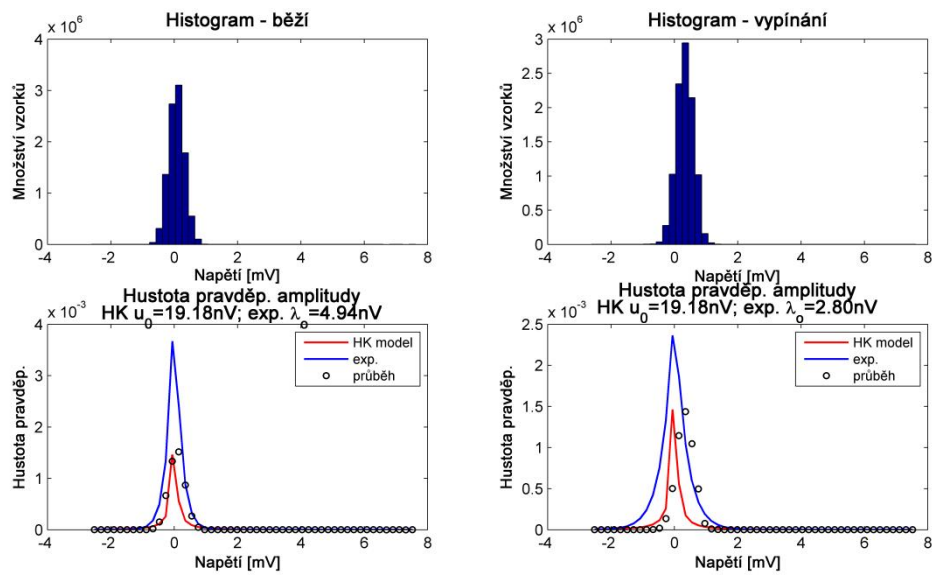
Obr. 34 zobrazuje výsledek analýzy hustoty pravděpodobnosti amplitudy pro Vzorek KM I v příslušných provozních stavech. Jak je z obrázků patrné, nejlepší aproximace pro provozní stavy *rozběh* a *běží* je aproximace pomocí hustoty pravděpodobnosti amplitudy modelem Henkel/Kessler. U provozního stavu *změna rychlosti otáček* a *vypínání* je vhodnější aproximace pomocí hustoty pravděpodobnosti oboustranného exponenciálního rozdělení. Parametry  $\lambda_0$  (oboustranného exponenciálního rozdělení) a  $u_0$  (model Henkel/Kessler) obsažené v grafech znázorňují nejlepší odhady aproximace pro *běhu*.



Obr. 34 Hustota pravděpodobnosti amplitudy u Vzorek KM I



Obr. 35 Hustota pravd podobnosti amplitudy  $\sigma$  Vzorek KM II



Obr. 36 Hustota pravd podobnosti amplitudy  $\sigma$  Vzorek KM III

Obr. 35 zachycuje výsledek analýzy hustoty pravd podobnosti amplitudy pro Vzorek KM II. Zprůměřená hustota pravd podobnosti amplitudy je patrné, že nejlepší aproximace pro všechny stavy, je aproximace pomocí hustoty amplitudy modelu Henkel/Kessler. Parametr tvaru  $u_0$  modelu Henkel/Kessler byl pro všechny provozní stavy odhadnutý na hodnotu  $u_0 = 19,18$  nV.

Obr. 36 představuje aproximaci hustoty pravd podobnosti amplitudy pro Vzorek KM III. Nejlepší aproximace hustoty pravd podobnosti amplitudy Vzorku KM III je aproximace pomocí modelu Henkel/Kessler. Parametr tvaru  $u_0$  modelu Henkel/Kessler byl pro všechny provozní stavy odhadnutý na hodnotu  $u_0 = 19,18$  nV.

### 5.1.1 Dílčí závěr

Z provedené analýzy hustoty pravd podobnosti amplitudy impulsního rušení vyplývá, že nejvhodnější aproximací hustoty pravd podobnosti amplitudy je použití modelu Henkel/Kessler, jak je patrné z obr. 34, obr. 35, obr. 36 a tab. 12. Tab. 12 představuje vhodné aproximace pro jednotlivé záznamy v etn hodnoty příslušných parametrů tvaru.

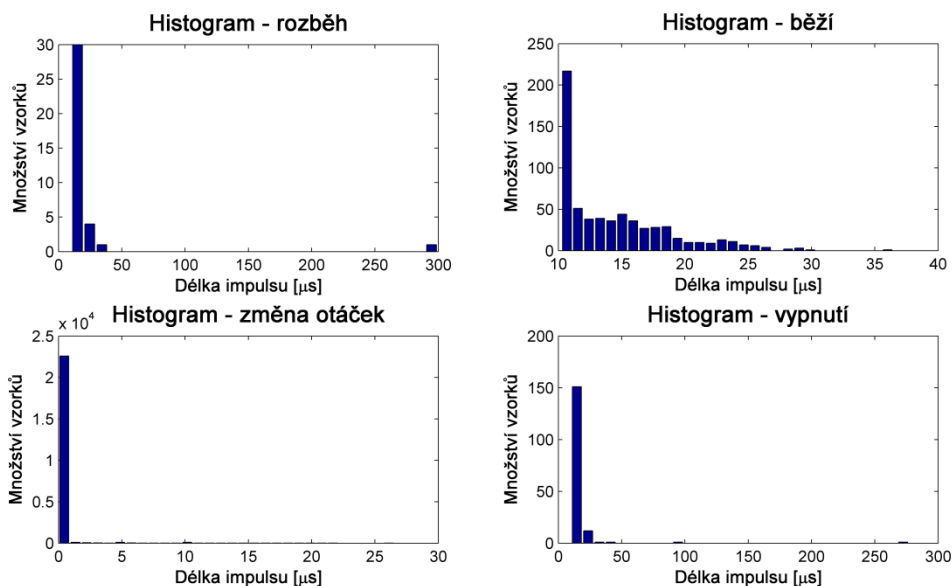
Tab. 12 Aproximace hustoty pravd podobnosti amplitudy impulsního rušení

Elektrický spotřebič	Situace záznamu impulsního rušení	Aproximace hustoty pravd podobnosti amplitudy	Parametr
Vzorek KM I	<u>Rozběh</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
	<u>V provozu (mixování)</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 40,83$ nV
	<u>Změna rychlosti otáček</u>	Exponenciální rozdělení	$\lambda = 1,51$ nV
	<u>Vypínání</u>	Exponenciální rozdělení	$\lambda = 4,81$ nV
Vzorek KM II	<u>Rozběh</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
	<u>V provozu bez zatížení</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
	<u>Regulace otáček za běhu</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
	<u>Regulace otáček za běhu na max</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
	<u>Regulace otáček za běhu na min</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
	<u>Vypínání</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
Vzorek KM III	<u>V provozu (fénování)</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV
	<u>Vypínání</u>	Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18$ nV

Jedinou výjimkou, kdy by mohlo být vhodné použít aproximaci pomocí oboustranné hustoty pravd podobnosti exponenciálního rozdělení, je pro Vzorek KM I ve stavu *změna rychlosti otáček* a při *vypínání*. Lze tedy prohlásit, že rušení způsobené komutátorovými motory je možné dobře aproximovat pomocí hustoty pravd podobnosti amplitudy modelu Henkel/Kessler s parametrem  $u_0 = 19,18$  nV.

## 5.2 Analýza doby trvání impuls

Na základ provedeného podrobného rozboru jednotlivých impuls jsem stanovil délku impulsu na  $N = 512$  vzork (tj.  $10,24 \mu s$  doba trvání impulsu). Pro každý provozní stav Vzorku KM I, Vzorku KM II, Vzorku KM III jsem vytvořil histogramy znázorující rozložení dob trvání impuls. Obr. 37 zobrazuje rozložení dob trvání impuls pro Vzorek KM I. Jak je vidět v histogramu pro provozní stav *zm na otá ek*, vychází podle analýzy doba impulsu na hodnotu  $t \sim 1 \mu s$ . Tato hodnota je zřejmě sobě sama n kolika  $1 \mu s$  periodicitou *zm na otá ek*. V ostatních histogramech je evaluuje doba trvání impulsu  $t \sim 10 \mu s$ .

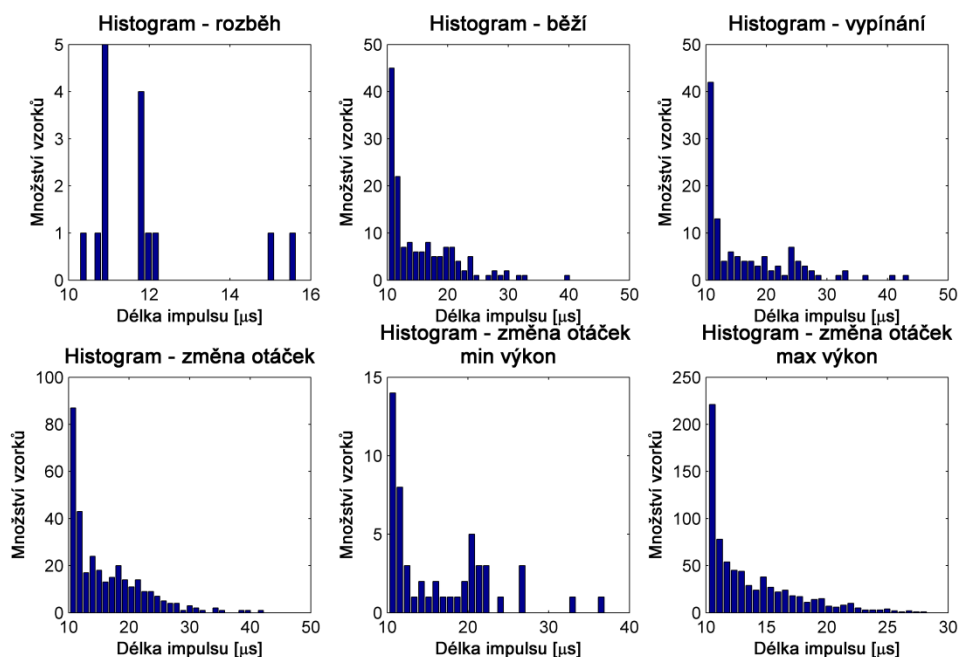


Obr. 37 Histogramy rozložení dob trvání impulsů u Vzorku KM I

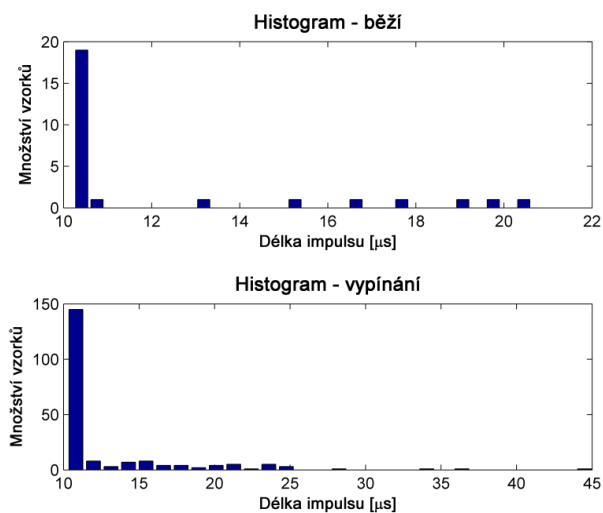
Obr. 38 znázorňuje rozložení dob trvání impulsů pro Vzorek KM II. Jak je vidět v histogramu pro provozní stav *rozb h*, zde vychází podle analýzy doba impulsu na hodnotu  $t \sim 11$  až  $12 \mu s$ . Tato hodnota může být zřejmě sobě sama n kolika  $1 \mu s$  periodicitou *rozb hem komutátorového motoru*, kdy vznik impuls je je-t mén etný. V ostatních histogramech je evaluuje doba trvání impulsu  $t \sim 10 \mu s$ .

Obr. 39 představuje rozložení dob trvání impulsů pro Vzorek KM III. Jak je vidět v histogramech, vychází podle analýzy doba impulsu  $t \sim 10 \mu s$ .





Obr. 38 Histogramy rozlofení dob trvání impuls ů Vzorek KM II



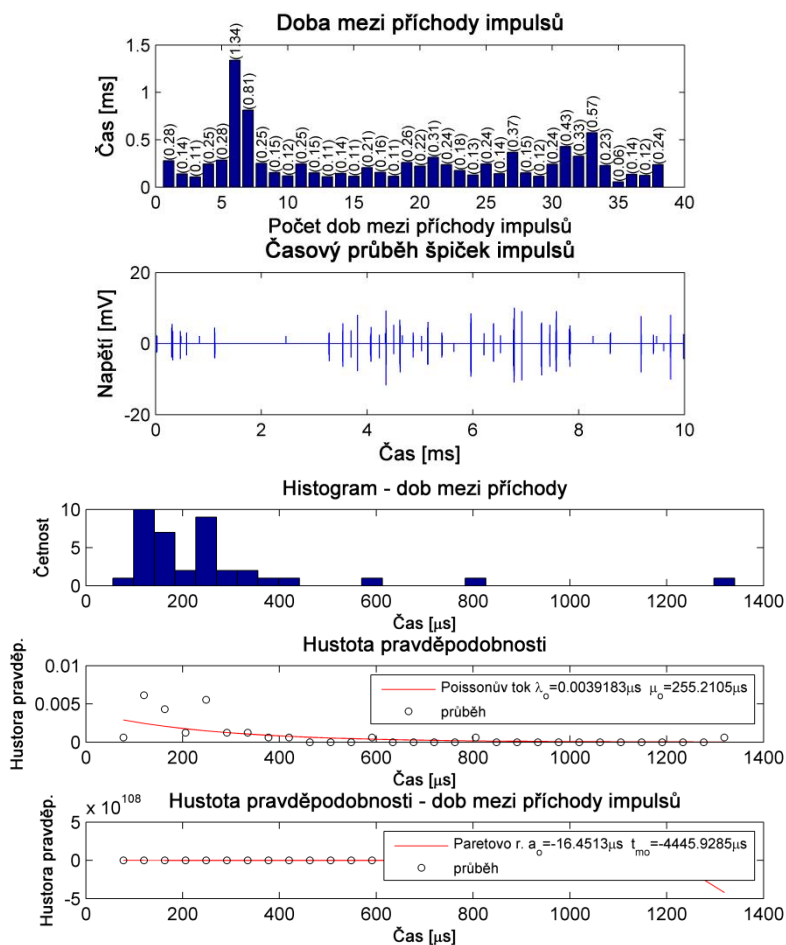
Obr. 39 Histogramy rozlofení dob trvání impuls ů Vzorek KM III

### 5.2.1 Díl í záv ry

Z analýzy doby trvání impuls ů od v-ech ru-ení je moŕné povaŕovat dobu trvání impulsu  $t = 10,24 \mu s$  (na základ ů výsledk ů z histogram ů) jako výchozí hodnotu pro dal-í pouŕití v modelování impulsního ru-ení.

### 5.3 Analýza dob mezi příchody impulsů (inter-arrival time)

Analýzu dob mezi příchody impulsního rušení jsem realizoval pomocí histogramu a hustotou pravděpodobnosti Poissonova toku a Paretova rozdělení. Abych mohl udělat tuto analýzu, provedl jsem rozdělení jednotlivých záznamů rušení od Vzorků KM I, II a III do 10ms intervalů. Rozdělení na 10ms intervaly jsem uskutečnil na základě podrobnějšího zkoumání.

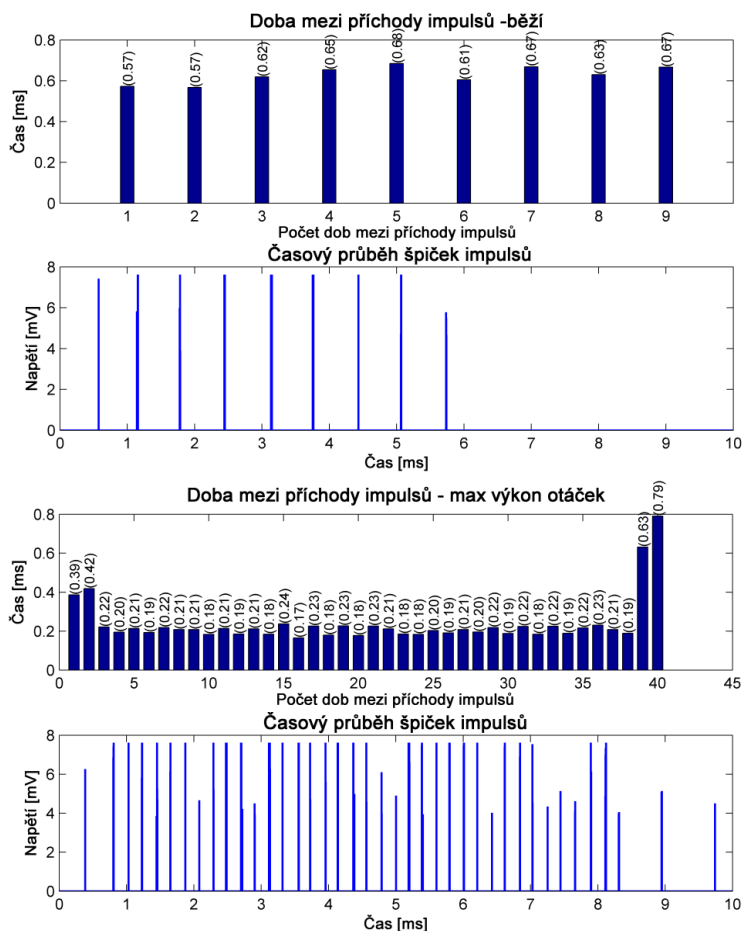


Obr. 40 Příklad analýzy doby mezi příchody impulsů pro Vzorek KM I (provozní stav obřív) pro jeden 10ms interval.

Obr. 40 zobrazuje příklad analýzy dob mezi příchody impulsů pro Vzorek KM I (provozní stav obřív). Na obr. 40 první graf ukazuje doby mezi impulsy na 10ms intervalu pro impulsy nacházející se ve druhém grafu, druhý graf znázorňuje 10ms interval impulsního rušení zbařeného úmu na pozadí, třetí graf je histogram a čtvrtý a pátý graf obsahuje hustotu pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení Poissonova toku a hustotu pravděpodobnosti Paretova rozdělení. Jak je vidět, dobu mezi příchody je vhodné aproximovat pomocí hustoty pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení

Poissonova toku. Pro Vzorek KM I se st ení hodnota  $\mu_o$  exponenciálního rozd lení Poissonova toku pohybovala ve v-ech provozních stavech v intervalu  $\mu_o \in \langle 193; 1235 \rangle \mu s$ . Hustota pravd podobnosti Paretova rozd lení se neprokázala.

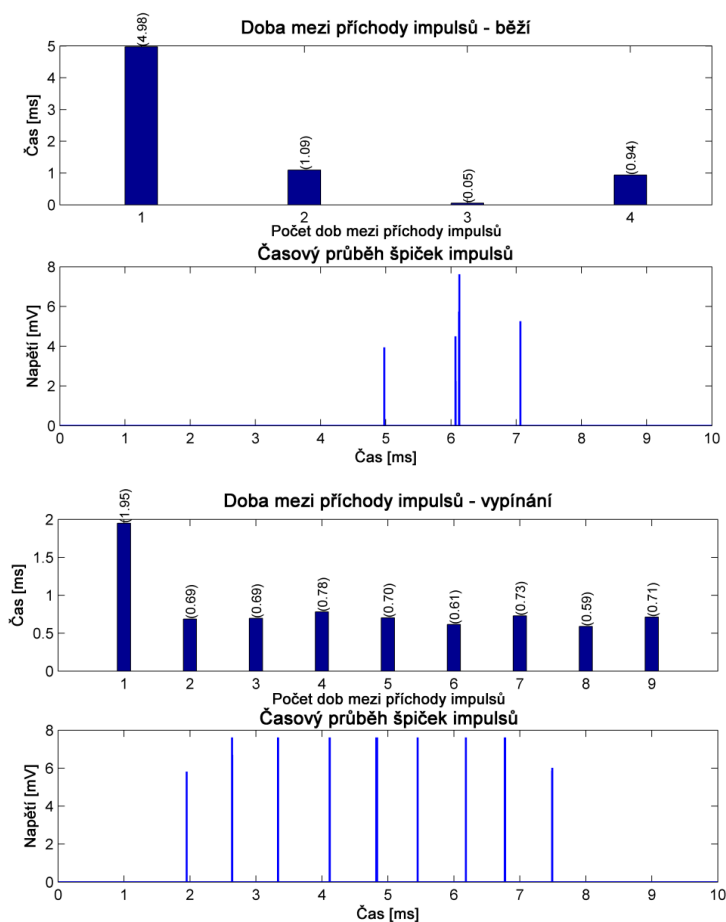
Obr. 41 p edstavuje p íklad analýzy dob mezi p íchody impulsů pro Vzorek KM II (provozní stav ó b flí a zm na otá ek maximální výkon). Na obr. 41 pat í provoznímu stavu ó b flí: první graf, který ukazuje doby mezi impulsy na 10ms intervalu pro impulsy nacházející se ve druhém grafu; a druhý graf, který znázor uje 10ms interval impulsního rušení zbaveného -umu na pozadí. Na obr. 41 pat í provoznímu stavu ó zm na otá ek max výkon: t etí graf, který ukazuje doby mezi impulsy na 10ms intervalu pro impulsy nacházející se ve tvrtém grafu; a tvrtý graf, který znázor uje 10ms interval impulsního rušení zbaveného -umu na pozadí. Výsledkem analýzy doby mezi p íchody u Vzorku KM II bylo stanoveno, že doba mezi p íchody má charakter deterministického rozd lení, kde pro parametr  $t_p$  byl zji-t n interval dob mezi p íchody  $t_p \in \langle 0,24; 0,63 \rangle ms$ .



Obr. 41 P íklad analýzy doby mezi p íchody impulsů pro Vzorek KM II provozní stav ó b flí a

maximální výkon otáček; pro jeden 10ms interval

Obr. 42 znázorňuje příklad analýzy doby mezi příchody impulsů pro Vzorek KM III (provozní stav oběh a vypínání). Na obr. 42 odpovídá provoznímu stavu *běž*: první graf, který ukazuje doby mezi impulsy na 10ms intervalu pro impulsy nacházející se ve druhém grafu; a druhý graf znázorňuje 10ms interval impulsního rušení zbařeného rušení na pozadí. Na obr. 42 patří provoznímu stavu *vypnutí*: třetí graf, který ukazuje doby mezi impulsy na 10ms intervalu pro impulsy nacházející se ve čtvrtém grafu; a čtvrtý graf znázorňuje 10ms interval impulsního rušení zbařeného rušení na pozadí. Výsledkem analýzy doby mezi příchody u Vzorku KM III bylo stanoveno, že doba mezi příchody má také charakter deterministického rozdělení, kde pro parametr  $t_p$  byl zjištěn interval dob mezi příchody  $t_p \in \langle 0,68; 1,02 \rangle$  ms.



Obr. 42 Příklad analýzy doby mezi příchody impulsů pro Vzorek KM III (provozní stav oběh a vypínání) pro jeden 10ms interval

### 5.3.1 Dílící závěry

Výsledkem analýz doby mezi příchody impulsů je, že všechny záznamy impulsního rušení se vyskytují ve skupinách. Z analyzovaných rušení mají skupiny

impuls hustotu pravd podobnosti doby mezi p íchody impuls exponenciální rozd lení Poissonova toku nebo deterministického rozd lení; Paretovo rozd lení se p í analýze neprokázalo. Sou asn skupina impulsního ru-ení s deterministickým rozd lením má periodu opakování 10 ms, což odpovídá ru-ení REIN. V tab. 13 je uveden p ehled získaných parametr analýzou pro dal-í modelování impulsního ru-ení.

Tab. 13 P ehled analýzy dob mezi p íchody impuls

Elektrický spot ebi	Situace záznamu impulsního ru-ení	Charakter doby mezi p íchody	Parametr
Vzorek KM I	<u>Rozb h</u> <u>V provozu</u> <u>Zm na rychlosti otá ek</u> <u>Vypínání</u>	Poisson v tok s exponenciálním rozd lením	$\mu_o \in \langle 193; 1235 \rangle \mu s$
Vzorek KM II	<u>Rozb h</u> <u>V provozu bez zatížení</u> <u>Regulace otá ek za b hu</u> <u>Regulace otá ek za b hu na max</u> <u>Regulace otá ek za b hu na min</u> <u>Vypínání</u>	deterministické	$t_p \in \langle 0,24; 0,63 \rangle ms$
Vzorek KM III	<u>V provozu</u> <u>Vypínání</u>	deterministické	$t_p \in \langle 0,68; 1,02 \rangle ms$

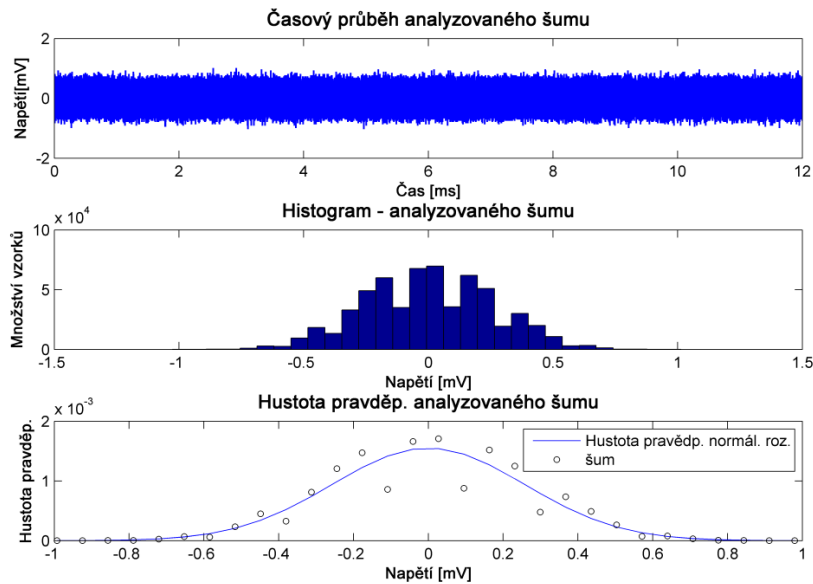
## 5.4 Analýza -umu na pozadí

V zaznamenaných ru-eních od elektrických spot ebi (tab. 11) se mezi impulsy nachází -um na pozadí nap . obr. 28. Tento -um jsem analyzoval z pohledu bílého Gaussovského -umu. Autokorela ní funkce bílého -umu je Diracova funkce o plo-ě  $\sigma^2$   $R(\tau) = \mathfrak{T}^{-1}[C(\omega)] = N_0/2 \delta(\tau)$ , jeho výkonová spektrální hustota je konstanta,  $C(\omega) = N_0/2$  [33].

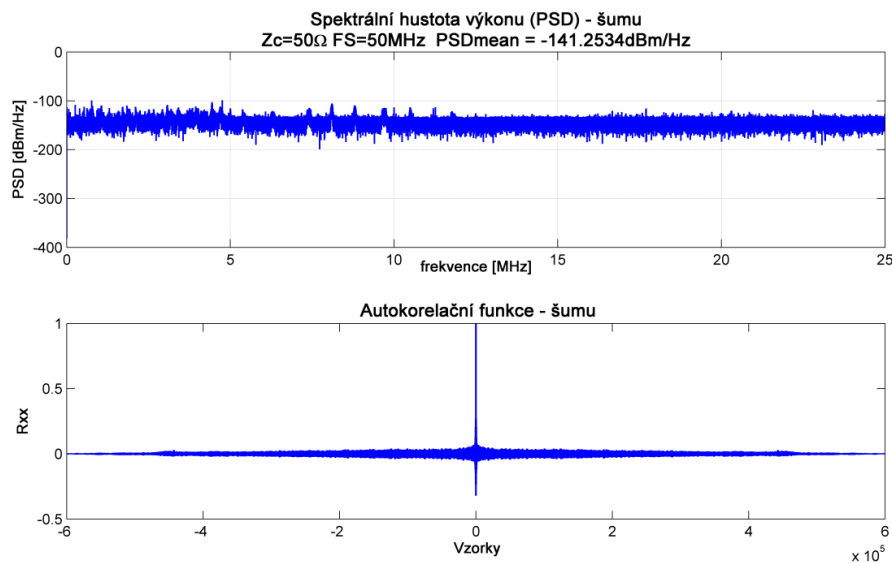
Obr. 43 znázor uje analyzovaný -um na pozadí, který se nachází mezi impulsy. První graf analýzy -umu ukazuje asový pr b h, druhým grafem je histogram rozložení amplitudy -umu a ve t etím grafu je vytvo ená hustota pravd podobnosti amplitudy -umu aproximovaná normálním Gaussovským rozd lením.

Z analýzy hustoty pravd podobnosti amplitudy -umu je vid t, že -um m fle edstavovat bílý Gaussovský -um. Proto jsem pro ov ení vytvo il spektrální hustotu výkonu (PSD) normovanou na  $Z_c = 50$  á a autokorela ní funkci (obr. 44). Z autokorela ní funkce (obr. 44) je patrné, že se -um na pozadí blíží bílému Gaussovskému -umu. Na pr b hu spektrální hustoty výkonu (obr. 44) je vid t, že se do kmito tu 12 MHz vyskytují skupiny -pi ek proti hladkému pr b hu ve druhé ásti PSD. Tyto -pi ky mohou zp sobovat blokové chyby v systému xDSL. St ední hodnota PSD

–umu na pozadí byla v rozptí  $PSD_{mean} \in \langle -138; -142 \rangle \text{ dBm/Hz}$ . Přesto však je možné aproximovat tento –um bílým Gaussovským –umem.



Obr. 43 Analýza –umu mezi impulsy



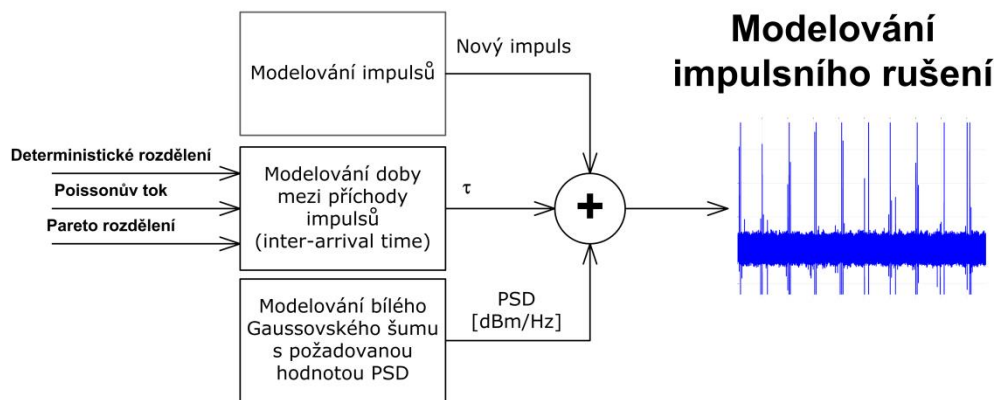
Obr. 44 Spektrální hustota výkonu (PSD) a autokorelační funkce –umu mezi impulsy

### 5.4.1 Díl í záv r

Cílem analýzy –umu mezi impulsy bylo ověřit, zda se rušení blíží bílému –umu. Výsledkem provedené analýzy hustoty pravděpodobnosti amplitudy a spektrální hustoty výkonu –umu mezi impulsy se prokázalo, že je možné –um mezi impulsy aproximovat pomocí bílého Gaussovského –umu. Stejná hodnota PSD –umu se pohybovala mezi  $-138 \text{ dBm/Hz}$  a  $-142 \text{ dBm/Hz}$  při  $Z_c = 50 \text{ } \Omega$ .

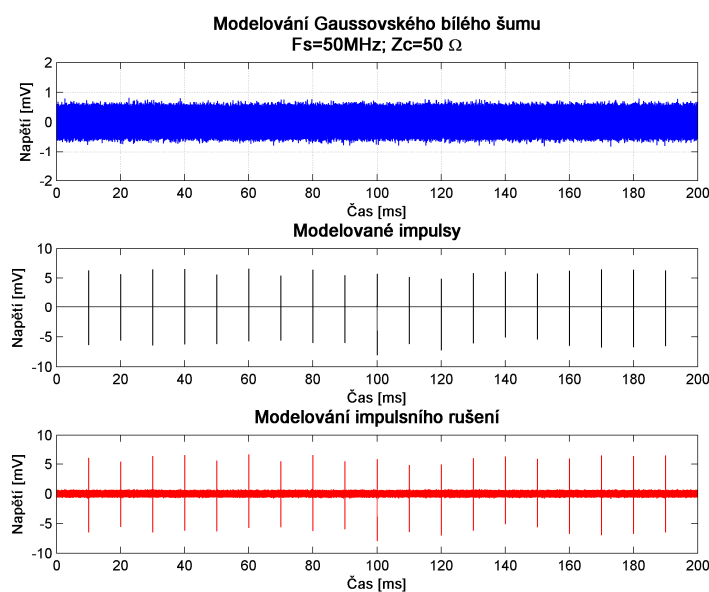
## 6 Modelování impulsního rušení

V této kapitole se budu podrobně zabývat novat vlastním procesem modelování impulsního rušení. Při modelování impulsního rušení jsem vycházel z postupu, který jsem stanovil v kapitole 4.3. Na obr. 45 je znázorněno blokové schéma modelování impulsního rušení. Cílem je emulovat rušení blízké reálným podmínkám zejména pro účely testování odolnosti xDSL při různých situacích.



Obr. 45 Blokové schéma modelování impulsního rušení

Proces modelování impulsního rušení je zahájen modelováním bílého Gaussovského šumu s požadovanou hodnotou PSD [dBm/Hz] normovanou pro  $Z_c = 50 \Omega$  na časovém intervalu délky  $T = 200$  ms (byl ponechán stejný časový interval jako u zaznamenaného rušení), obr. 46 (první graf). Modelování bílého Gaussovského šumu jsem podrobně popsal dále v kapitole 6.2.



Obr. 46 Modelování impulsního rušení: Gaussovský bílý šum; modelované impulsy s deterministickými doby příchodu mezi impulsy; výsledné modelované impulsní rušení

Dále jsou modelovány doby mezi příchody impulsů (tzv. inter-arrival time) na stejné délce časového intervalu  $T$ , jako má bílý Gaussovský šum. Doby mezi příchody impulsního rušení je možné modelovat pomocí Poissonovského toku nebo deterministickým a Paretovým rozdělením. Po stanovení doby mezi příchody (inter-arrival time) je generován impuls. Modelování impulsů je podrobně popsáno v kapitole 6.1.2. Modelování doby mezi příchody impulsů jsem podrobně popsal v kapitole 6.3. Příklad doby mezi příchody impulsů (inter-arrival time) s deterministickým rozdělením je na obr. 46 druhý graf. Výsledné impulsní rušení (bílý Gaussovský šum a impulsy) je zobrazeno na obr. 46 ve stejném grafu.

## 6.1 Modelování impulsů

Při modelování impulsů vycházím ze získané zprůměrované spektrální hustoty výkonu a následně náhodně modelované fáze. Na základě toho pak pomocí inverzní Fourierovy transformace získám signál (impuls) v časové oblasti.

Pro upřesnění uvádím obecný postup optimálního získání signálu do časové oblasti. Pro Fourierovu obraz  $S(\omega)$  obecného signálu  $s(t)$  platí:

$$S(\omega) = |S(\omega)| e^{j\Phi(\omega)} \quad (28)$$

kde  $|S(\omega)|$  je amplitudové spektrum, obecně pro výkonové spektrum platí  $C(\omega) = |S(\omega)|^2$  a  $\Phi(\omega)$  fázová funkce. Modelování fázové funkce  $\Phi(\omega)$  bude popsáno podrobně v kapitole 6.1.2. Převod z frekvenční oblasti do časové oblasti pomocí inverzní Fourierovy transformace je obecně:

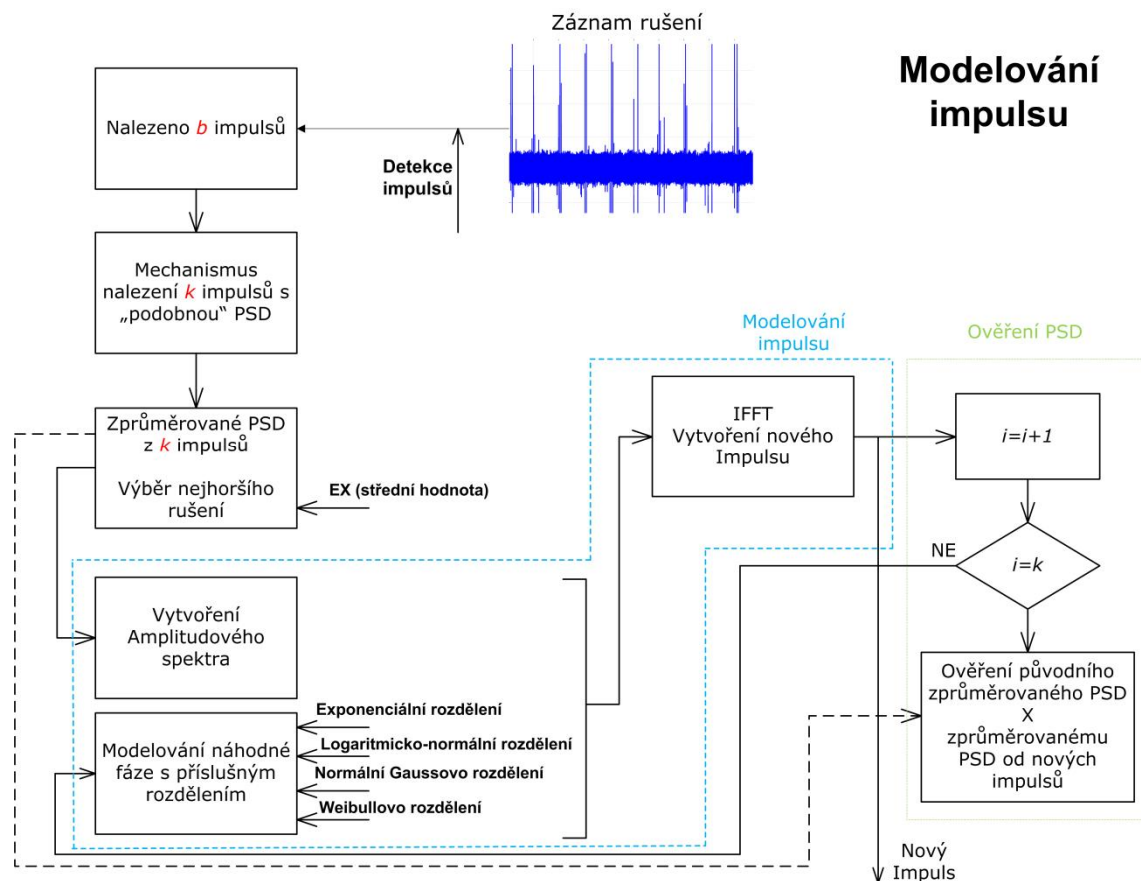
$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (29)$$

Podrobněji se budu dále zabývat získáním zprůměrované spektrální hustoty výkonu a modelování náhodné fáze.

Na obr. 47 je znázorněno blokové schéma modelování impulsů. Ze zaznamenaného rušení se detekuje pomocí prahové úrovně  $b$  impuls. Mechanismem, který bude dále podrobně vysvětlen (podkapitola 6.1.1), je nalezeno  $k$  impulsů s podobnými (ve smyslu, co nejvíce se sobě blíží) odhady spektrální hustoty výkonu PSD. Z těchto  $k$  impulsů se vytvoří zprůměrovaná spektrální hustota výkonu PSD, která



je dále poufita a upravena na amplitudové spektrum pro modelování nových impulsů. Pro vytvoření nového impulsu je modelována náhodná fáze s příslušným rozdělením (podrobněji kapitola 6.1.2). Pomocí inverzní Fourierovy transformace (IFFT) pak vzniká nový impuls v časové oblasti.



Obr. 47 Blokové schéma o modelování impulsu

Pro dodržení zprůměrované PSD u nových impulsů je provedeno ověření PSD na stejném počet vytvářených nových  $k$  impulsů. Pro modelování výsledného impulsního rušení (obr. 45) je pak část šověření PSD vynechána a uplatňuje se jen blok šModelování impulsu. Jak je znázorněno na obr. 47.

### 6.1.1 Spektrální hustota výkonu PSD impulsů

Postup modelování impulsů jsem stanovil na základě nalezení impulsů, které budou mít podobné (ve smyslu, co nejvíce se sobě blíží) odhady spektrální hustoty výkonu. Odhady spektrální hustoty výkonu těchto impulsů jsem zprůměroval a takto získaná zprůměrovaná spektrální hustota výkonu PSD byla poufita pro nově modelovaný impuls. Celý postup získání zprůměrovaného spektra je následně podrobně vysvětlen.

Nejprve bylo nezbytné lokalizovat jednotlivé impulsy v celém záznamu rušení. Proces hledání těchto impulsů spočíval v nastavení určité prahové hodnoty napětí nad úrovní na pozadí a nastavení délky impulsu. Stanovená prahová hodnota napětí určovala hranici pro hledání impulsů s vyšší hodnotou napětí, nežli úrovní na pozadí. Délka impulsu byla stanovena na základě provedených analýz na konstantní délku  $10,24 \mu\text{s}$  (tj.  $N = 512$  vzorků). Pro takto získané impulsy jsem pro každý impuls vytvořil odhad spektrální hustoty výkonu (PSD) normované na impedanci  $Z_c = 50 \Omega$ . Způsob získání zprůměrované spektrální výkonové hustoty je popsán v následujících odstavcích.

Matrice  $\mathbf{C}$  (30) tvoří matici odhadů spektrálních hustot výkonu (na impedanci  $Z_c = 50 \Omega$ ) typu  $N \times b$ , kde  $N$  reprezentuje délku impulsu tj.  $N = 512$  vzorků a  $b$  je počet nalezených impulsů, které v matici představují sloupcové vektory délky  $N$ .

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,b} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,b} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & \dots & c_{N,b} \end{pmatrix}, \quad (30)$$

kde pro řádek  $r$  a sloupec  $s$  v matici  $\mathbf{C}$  platí  $r \in \{1, 2, \dots, N\}$  a  $s \in \{1, 2, \dots, b\}$ . Pro nalezení impulsů s podobným (ve smyslu, co nejvíce se sobě blíffící) odhadem spektrální hustoty výkonu jsem použil obecný vzorec pro výpočet průměrné kvadratické odchylky. Upravený vzorec má následující tvar:

$$d_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_i(n) - C_j(n))^2}, \quad (31)$$

kde  $i$  a  $j$  jsou indexy vektorů, které jsou vzájemně porovnávány a platí pro  $n : i, j \in \{1, 2, \dots, b\}$ .  $C_i$  (resp.  $C_j$ ) je odhad spektrální hustoty výkonu  $j$ -tého (resp.  $i$ -tého) impulsu v matici  $\mathbf{C}$ .  $N$  je počet vzorků vektorů v matici  $\mathbf{C}$  a  $n$  je  $n$ -tý vzorek, pro který platí  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ .

Vznikne matice  $\mathbf{D}$  (32) typu  $b \times b$ , která obsahuje rozdílnost spektrálních hustot výkonu mezi jednotlivými sloupcovými vektory matice  $\mathbf{C}$ . Pro matici  $\mathbf{D}$  platí  $d_{i,j} = 0$  pro  $i=j$ .

$$\mathbf{D}_{(b,b)} = \begin{pmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \dots & d_{1,j} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \dots & d_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{i,1} & d_{i,2} & \dots & d_{i,j} \end{pmatrix}, \quad (32)$$

kde pro řádek  $i$  platí  $i \in \{1, 2, \dots, b\}$  a pro sloupec  $j$  platí  $j \in \{1, 2, \dots, b\}$ . Abych získal co nejvyšší podobnost (tím je myšleno, že se hodnoty sobě co nejvíce blíží) spektrální hustoty výkonu jednotlivých impulsů, je třeba najít minimální hodnotu v matici  $\mathbf{D}$  (vynechá se  $d_{i,j} = 0$  pro  $i=j$ ).

řádkový vektor  $\mathbf{M}_{\min}$  (33) obsahuje minimální hodnoty pro každý vektor matice  $\mathbf{D}$ . Matice  $\mathbf{M}$  (34) je typu  $b \times b$  a obsahuje řádkový vektor  $\mathbf{M}_{\min}$  ve všech řádcích. Matice  $\mathbf{M}$  je pomocná matice při hledání impulsů s podobným odhadem spektrální hustoty výkonu.

$$\mathbf{M}_{\min} = (\min\{d_{*1}\} \quad \dots \quad \min\{d_{*b}\}) \quad (33)$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{\min,1} \\ \vdots \\ \mathbf{M}_{\min,b} \end{pmatrix} \quad (34)$$

Matice  $\mathbf{W}$  (35) je typu  $b \times b$ , vznikne odečtením matice  $\mathbf{M}$  od matice  $\mathbf{D}$ .

$$\mathbf{W} = \mathbf{D} - \mathbf{M} \quad (35)$$

Sloupcový vektor  $\mathbf{B}_{*j}$  (36) je vektor, který obsahuje indexy impulsů, které mají podobné odhady spektrální hustoty výkonu. Sloupcový vektor  $\mathbf{B}_{*j}$  je vypočítán v prostředí Matlab použitím implementované funkce *find*. Funkce *find* vrací indexy nenulových prvků, je-li splněna podmínka uvedená ve vzorci (36) tak, že jsou vybrány ty prvky ve sloupcovém vektoru  $\mathbf{W}_{*j}$ , které jsou menší než maximální hodnota ve sloupcovém vektoru  $\mathbf{D}_{*j}$  vynásobená parametrem  $\alpha$ . Parametr  $\alpha$  je hodnota v procentech z maximální hodnoty ve sloupcovém vektoru  $\mathbf{D}_{*j}$ . Parametr  $\alpha$  jsem stanovil na hodnotu  $\alpha = 0,1$  (tj.  $\alpha = 0,1 = 10 \% / 100$ ).

$$\mathbf{B}_{*j} = \text{find}(\mathbf{W}_{*j} < \max\{\mathbf{D}_{*j}\} \cdot \alpha) \quad (36)$$

Matice  $\mathbf{Q}$  (37) je typu  $b \times b$  a obsahuje indexy impulsů, které mají podobné odhady spektrální hustoty výkonu (PSD).

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{B}_{*1} \quad \dots \quad \mathbf{B}_{*b}) \quad (37)$$

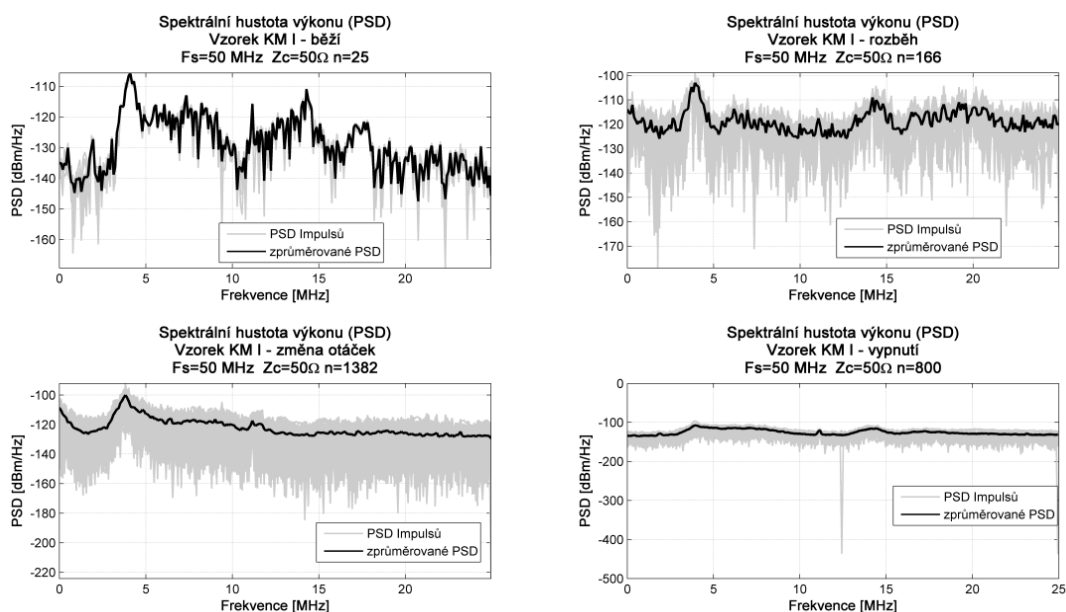
Zprůmrovaná spektrální hustota výkonu je pak vypočtena z impulsů s podobnými odhady spektrální hustoty výkonu pomocí následujícího vzorce:

$$C_{avg,N}(\omega) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k C_{N,i}(\omega), \quad (38)$$

kde  $C_{N,i}$  je sloupcový vektor obsahující odhady spektrální hustoty výkonu impulsů z matice  $C$ .  $k$  je počet impulsů z matice  $C$  obsažených ve sloupcovém vektoru  $Q_{*j}$ . Pro modelování impulsního ru-ení jsem pak zvolil na základě střední hodnoty tu zprůmrovanou spektrální hustotu výkonu s nejvyšší hodnotou.

### Výsledky nalezených zprůmrovaných spekter

Obr. 48 zobrazuje získané zprůmrované jednostranné spektrální hustoty výkonu (černý průběh) pro jednotlivé provozní stavy Vzorku KM I. Výpočet spektrální hustoty výkonu PSD byl vytvořen na základě vzorkovací frekvence  $F_s = 50$  MHz a normované na  $Z_c = 50 \Omega$ . Parametru  $n$  určuje počet impulsů s podobným průběhem PSD (šedý průběh).

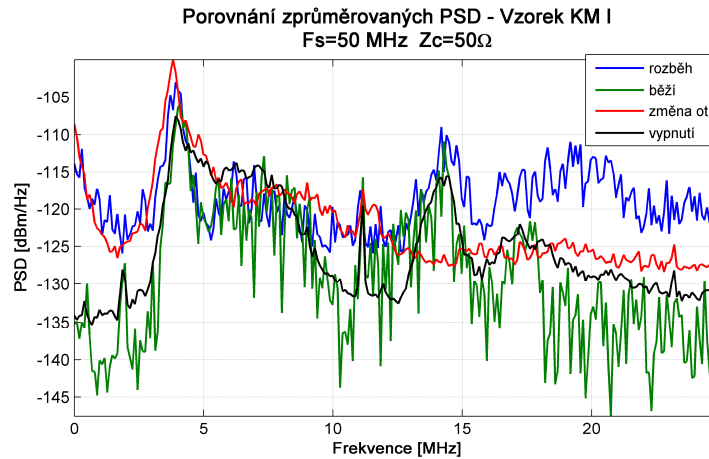


Obr. 48 Získané zprůmrované jednostranné spektrální hustoty výkonu u Vzorku KM I

Z grafu (obr. 48) je patrné, že impulsní ru-ení dosahuje vyšších hodnot spektrální hustoty výkonu PSD, které mohou způsobovat bitovou chybovost při přenosu dat. Střední hodnota PSD pro Vzorek KM I byla  $0,120$  dBm/Hz.

Obr. 49 znázorňuje porovnání zprůmrovaných jednostranných spektrálních hustot výkonu PSD pro Vzorek KM I ve všech provozních stavech. Nejvyšší úroveň

hodnotu ru-ení má spektrální hustota výkonu PSD v provozním stavu *zm na otá ek*, kde -pi ka dosahuje hodnoty afl 6100 dBm/Hz. Pro dal-í modelování impulsního ru-ení jsem zvolil pr b h zpr m rované spektrální hustoty výkonu PSD pro Vzorek KM I v provozním stavu *roz b h*, který vznikl ze 166 impuls . S tímto pr b hem budu dále pracovat p i modelování impulsního ru-ení.

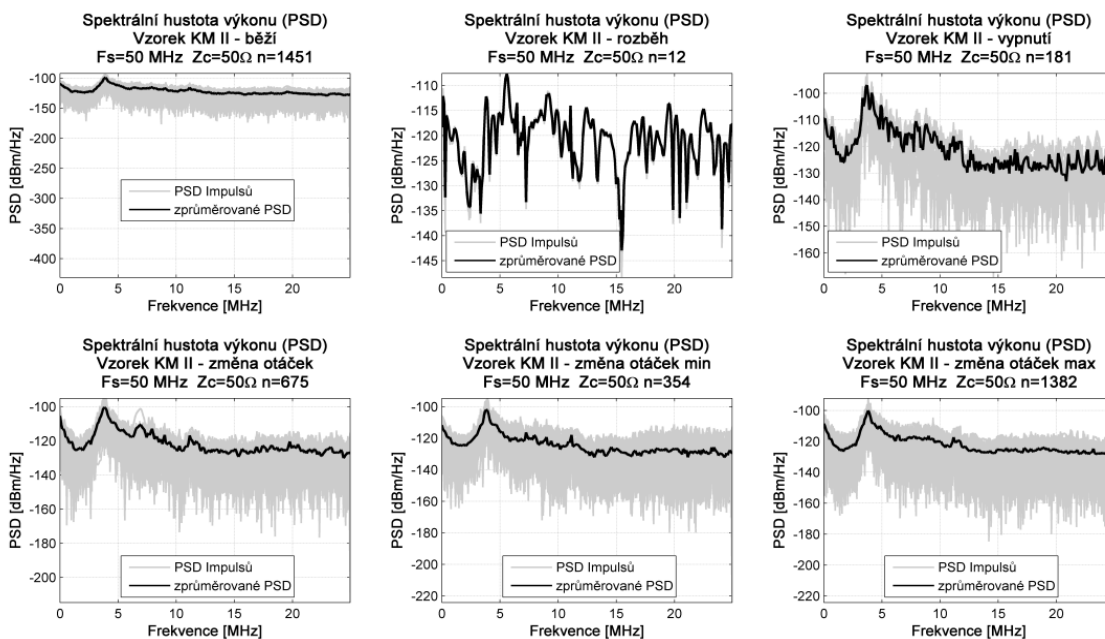


Obr. 49 Porovnání zpr m rovaných PSD pro Vzorek KM I

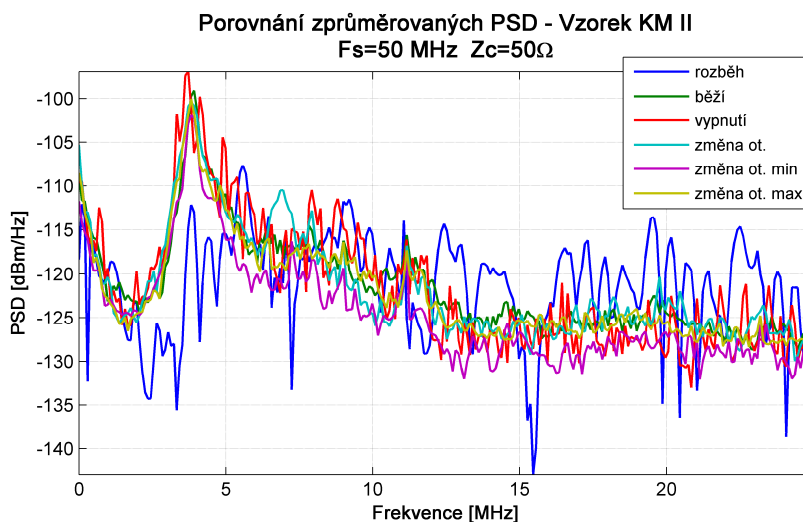
Obr. 50 znázor uje získané zpr m rované jednostranné spektrální hustoty výkonu PSD od Vzorku KM II ve v-ech provozních stavech. Z pr b h zpr m rovaných PSD je patrné, že pr b hy (krom stavu *roz b h*) mají velmi podobný tvar. Vzájemné porovnání zpr m rovaných spektrálních hustot výkonu je zobrazeno na obr. 51.

Obr. 51 znázor uje porovnání zpr m rovaných jednostranných spektrálních hustot výkonu PSD pro Vzorek KM II ve v-ech provozních stavech. Nejvy-í -pi kovou hodnotu PSD má provozní stav *vypnutí*, kde -pi ka dosahuje hodnoty PSD afl 696 dBm/Hz. Pro dal-í modelování impulsního ru-ení jsem zvolil pr b h zpr m rované spektrální hustoty výkonu PSD pro Vzorek KM II v provozním stavu *vypnutí*, který vznikl ze 181 impuls . S tímto pr b hem budu dále pracovat p i modelování nových impuls a impulsního ru-ení.

Obr. 52 znázor uje získané zpr m rované jednostranné spektrální hustoty PSD od Vzorku KM III ve v-ech provozních stavech. Z pr b h zpr m rovaných spektrálních hustot výkonu PSD je patrný velmi podobný tvar. Vzájemné porovnání pr b h zpr m rovaných jednostranných spektrálních hustot výkonu PSD je zobrazeno na obr. 53.

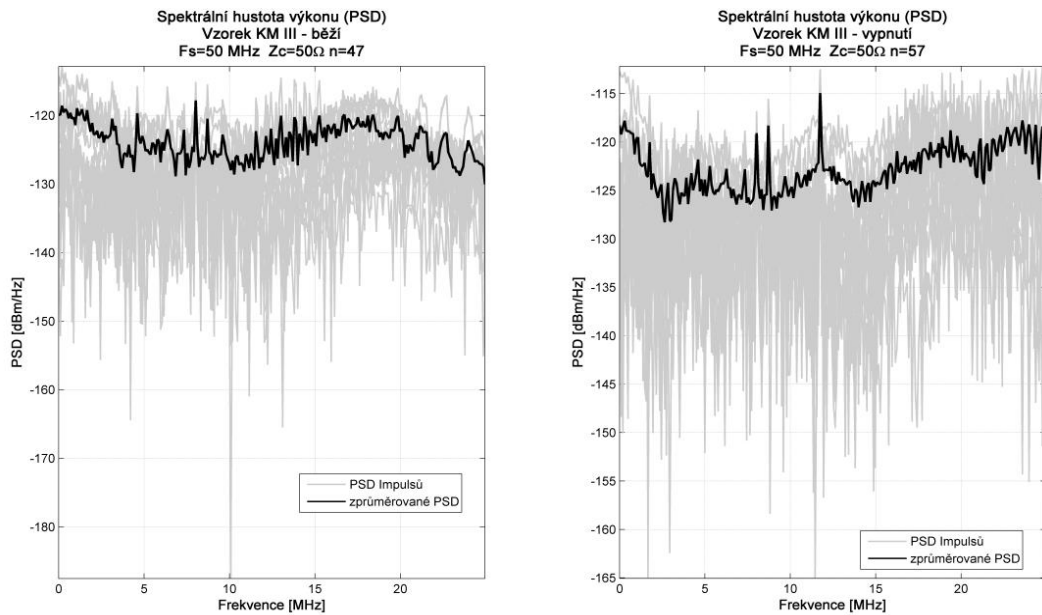


Obr. 50 Získané zpr m rované jednostranné spektrální hustoty výkonu ó Vzorek KM II

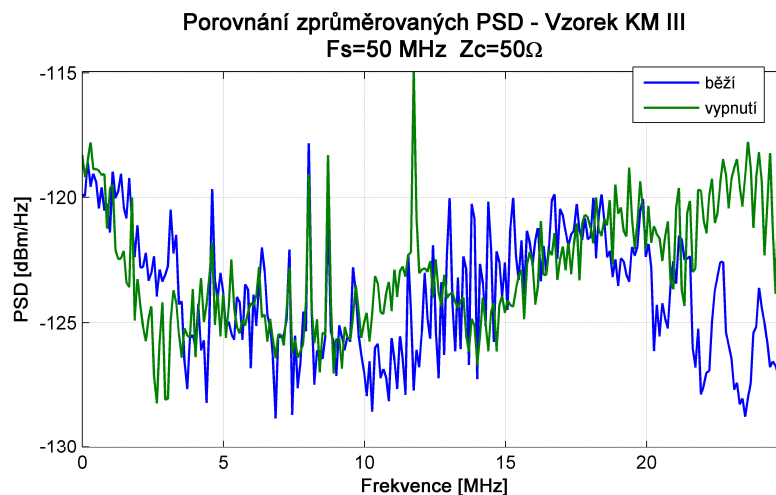


Obr. 51 Porovnání zpr m rovaných PSD pro Vzorek KM II

Obr. 53 znázorňuje porovnání zpr m rovaných jednostranných spektrálních hustot výkonu PSD pro Vzorek KM III ve všech provozních stavech. Nejvyšší –pi kovou hodnotu PSD má provozní stav *vypnutí*, kde –pi ka dosahuje hodnoty PSD 115 dBm/Hz. Pro další modelování impulsního ru-ení jsem zvolil pr b h PSD pro Vzorek KM III v provozním stavu *vypnutí*, který vznikl z 57 impulsů. S tímto pr b hem zpr m rované spektrální hustoty výkonu PSD budu dále pracovat.



Obr. 52 Získané zprůměrované jednostranné spektrální hustoty výkonu pro Vzorek KM III



Obr. 53 Porovnání zprůměrovaných PSD pro Vzorek KM III

## Díl í záv r

Z analyzovaných impulsních ru-ení Vzorek KM I, II, III je patrné, že jejich spektrální hustoty výkonu PSD dosahují vysokých hodnot ru-ení řádově 120 dBm/Hz až 130 dBm/Hz. Takto vysoké hodnoty narušují přenos dat a způsobí bitové chyby při přenosu dat prostřednictvím systému xDSL. Pro modelování impulsního ru-ení jsem zvolil pro každý Vzorek KM I, II, III zprůměrované jednostranné spektrální hustoty výkonu PSD s nejvyšším výkonem. Tyto zprůměrované spektrální hustoty výkonu PSD jsem použil jako výchozí spektrum modelovaného impulsu.

### 6.1.2 Modelování náhodné fáze a impulsu

V této kapitole se budu zabývat modelováním náhodné fáze a generováním signálu (impulsu) převodem z frekvenční oblasti do časové oblasti.

Obecný popis získání Fourierova obrazu obecného signálu  $s(t)$  je uveden ve vztahu (28). Modelování náhodné fázové funkce je založeno na generování náhodné posloupnosti s p-íslu-ným pravděpodobnostním rozdělením. Popis vybraných pravděpodobnostních rozdělení se nachází v příloze. Pro modelování náhodné fázové funkce jsem zvolil tato pravděpodobnostní rozdělení:

- Exponenciální rozdělení
- Normální rozdělení
- Logaritmicko-normální rozdělení
- Weibullovo rozdělení

Pro modelování náhodné fáze jsem využil prostředí Matlab, které má implementované funkce pro generování náhodné posloupnosti (matice) čísel s p-íslu-ným pravděpodobnostním rozdělením.

Pro generování náhodné posloupnosti čísel s exponenciálním rozdělením využívám implementovanou funkci  $\text{exprnd}(mu, m, n)$ , kde  $mu$  představuje střední hodnotu ( $EX = \mu = 1/\lambda$ ) a  $m, n$  jsou celá čísla určující počet řádků a sloupců generované posloupnosti (resp. matice).

Normální rozdělení má v prostředí Matlab pro generování náhodné posloupnosti implementovanou funkci  $\text{randn}(m, n)$ , která je definovaná pro  $N(\mu_x = 0, \sigma_x^2 = 1)$ . Pro generování náhodné posloupnosti s jinými parametry  $\mu_y, \sigma_y^2$  platí vztah  $Y = \mu_y + X \sigma_y^2$ , kde  $X$  je náhodná veličina s normálním rozdělením  $N(0,1)$ .

Logaritmicko-normální rozdělení má pro generování náhodné posloupnosti implementovanou funkci  $\text{lognrnd}(mu, sigma, m, n)$ , kde  $mu$  a  $sigma$  jsou parametry  $LN(\mu, \sigma^2)$  a  $m, n$  jsou celá čísla určující počet řádků a sloupců generované posloupnosti (resp. matice).

Weibullovo rozdělení má v prostředí Matlab pro generování náhodné posloupnosti implementovanou funkci  $\text{wblrnd}(a, b, m, n)$ , kde  $a$  a  $b$  jsou parametry



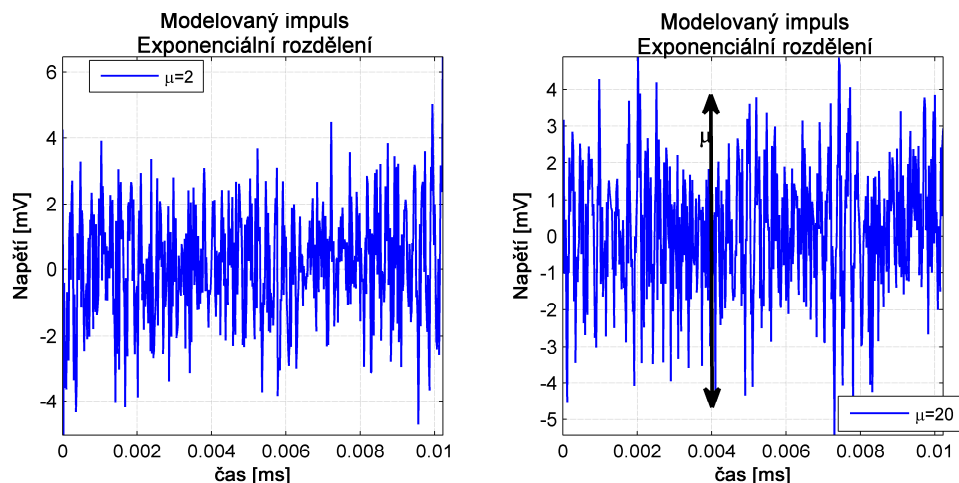
Weibullova rozdělení, a  $m, n$  jsou celá čísla určující počet řádků a sloupců generované posloupnosti (resp. matice).

Princip postupu modelování náhodné fázové funkce a vytvoření nového impulsu (v prostředí Matlab):

1. Je vygenerován vektor délky  $N = 512/2 - 1 = 255$  s náhodnou posloupností a p-íslu-ným rozdělením. (Pozn.: počet vzorků v jednom impulsu byl stanoven na  $N=512$  vzorků)
2. Je vytvořen vektor  $\mathbf{R}$ :  $\mathbf{R} = e^{j\Phi} 2\pi$
3. Vytvoří se výsledný vektor  $\mathbf{rot}$ :  $\mathbf{rot} = [1 \ \mathbf{R} \ 1 \ \text{fliplr}(\text{conj}(\mathbf{R}))]$
4. Zpracovaná spektrální hustota výkonu (PSD)  $C_{\text{avg}}$  ze vzorce (38) je upravena na oboustranné amplitudové spektrum  $|S(\omega)|$
5. Fourierův obraz pak získám pomocí operace:  $\mathbf{S} = |S(\omega)| \cdot \mathbf{rot}$
6. Pomocí inverzní Fourierovy transformace  $\text{ifft}$  získám signál v časové oblasti.

### Dopad parametrů podobnostního rozdělení na tvar impulsu v časové oblasti

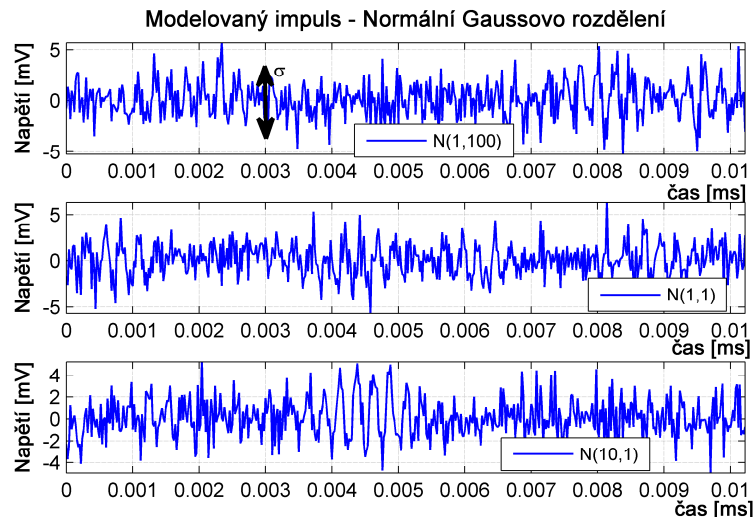
Obr. 54 zobrazuje nově vygenerovaný impuls s náhodně modelovanou fázovou funkcí s exponenciálním rozdělením. Všechny nově vygenerované impulsy mají dobu trvání  $10,24 \mu\text{s}$  ( $N = 512$  vzorků) na základě zjištěné analýzy. Na obr. 54 ve druhém grafu jsem šipkou znázornil vliv parametru  $\mu$  na výsledný časový průběh impulsu v časové oblasti. Pro exponenciální rozdělení dochází ke zvyšování amplitudy impulsu se zvyšující se střední hodnotou  $\mu$ .



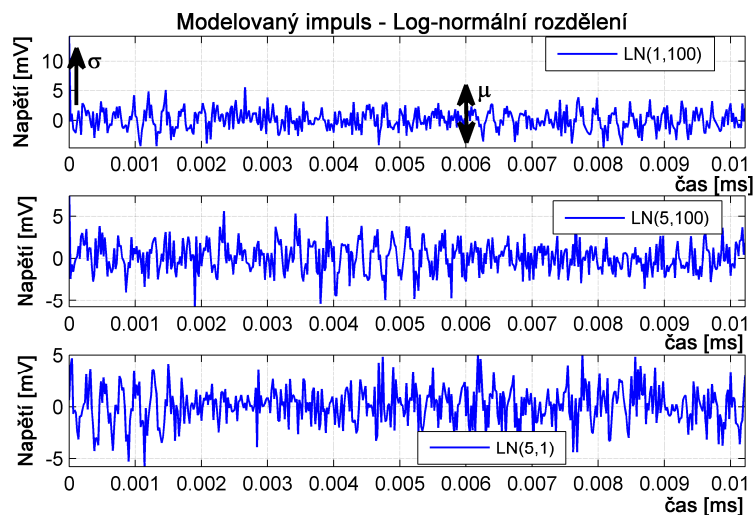
Obr. 54 Modelovaný impuls s fázovou funkcí má exponenciální rozdělení

Obr. 55 znázorní vygenerovaný nový impuls s náhodně vygenerovanou fázovou funkcí s normálním Gaussovským rozdělením. Na prvním grafu (obr. 55) je vyznačena šipkou změna tvaru impulsu na základě změny parametru normálního

rozdělení. Při změně velikosti rozptylu na vyšší hodnotu dochází ke zvýšení hodnot amplitudy v celé délce trvání impulsu, jak je naznačeno šipkou v obr. 55. Vliv střední hodnoty  $\mu$  se na tvar impulsu v časové oblasti neprojevil.



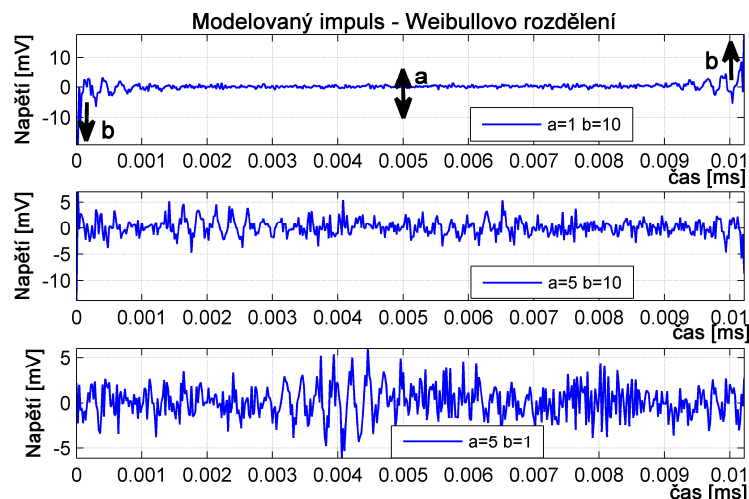
Obr. 55 Modelovaný impuls s fázovou funkcí má normální rozdělení



Obr. 56 Modelovaný impuls s fázovou funkcí má Log-normální rozdělení

Obr. 56 představuje impuls vytvořený náhodně vygenerovanou fázovou funkcí s log-normálním rozdělením. Zvýšením rozptylu log-normálního rozdělení představuje zvýšení a posunutí amplitudy na začátku průběhu impulsního rušení. Zvýšením střední hodnoty se dojde ke zvýšení amplitudy v ostatních částech průběhu impulsu.

Obr. 57 znázorňuje nově vygenerovaný impuls s náhodně vygenerovanou fází Weibullova rozdělení. Zvýšením parametru  $b$  dojde ke zvýšení amplitudy impulsu na začátku a na konci průběhu. Zvýšením parametru  $a$  dojde ke zvýšení amplitudy v ostatní části průběhu nového impulsu.



Obr. 57 Modelovaný impuls ó fázová funkce má Weibullovo rozd lení

Shrnutí vlivu pravd podobnostního rozd lení na modelování náhodné fázové funkce je uveden v p ehledné tab. 14.

Tab. 14 Vliv pravd podobnostního rozd lení na modelování náhodné fázové funkce

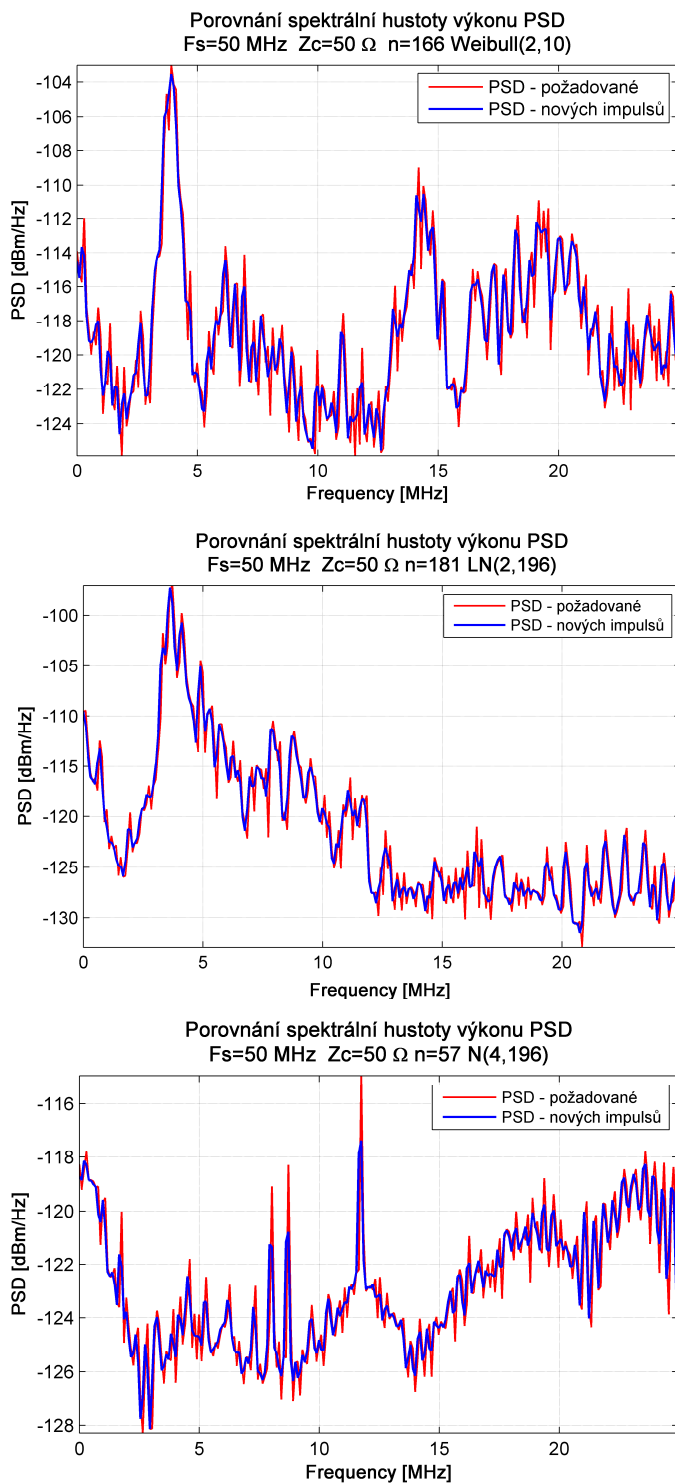
Pravd podobnostní rozd lení	Parametr	Ovlivn ní
Exponenciální	$\mu$	zvý-ením $\mu$ dochází ke zvý-ení amplitudy impulsu
Log-normální	$\mu; \sigma^2$	zvý-ením $\sigma^2$ dochází ke zvý-ení amplitudy impulsu, zm na $\mu$ se neprojevila
Normální rozd lení	$\mu; \sigma^2$	zvý-ením $\sigma^2$ dochází ke zvý-ení amplitudy impulsu na za átku impulsu, zvý-ením $\mu$ se zvyš-uje amplituda v ostatní ásti impulsu
Weibullovo rozd lení	a, b	Zvý-ením parametru b dojde ke zvý-ení amplitudy impulsu na za átku a na konci pr b hu. Zvý-ením parametru a dojde k navý-ení amplitudy v ostatní ásti pr b hu nového impulsu.

## Modelované impulsy

V procesu modelování impulsního rušení nejprve ov uji, zda je zachována zpr m rovaná spektrální hustota výkonu PSD (vybraná pro kařdý Vzorek KM, popsáno v ásti 6.1.1) u nov vznikajících impuls . Ov ení zpr m rované PSD je provedeno pro stejný po et impuls , ze kterého p vodní zpr m rovaná spektrální hustota výkonu PSD vznikla. Obr. 58 znázor uje porovnání pofladované zpr m rované PSD proti novým impuls m.

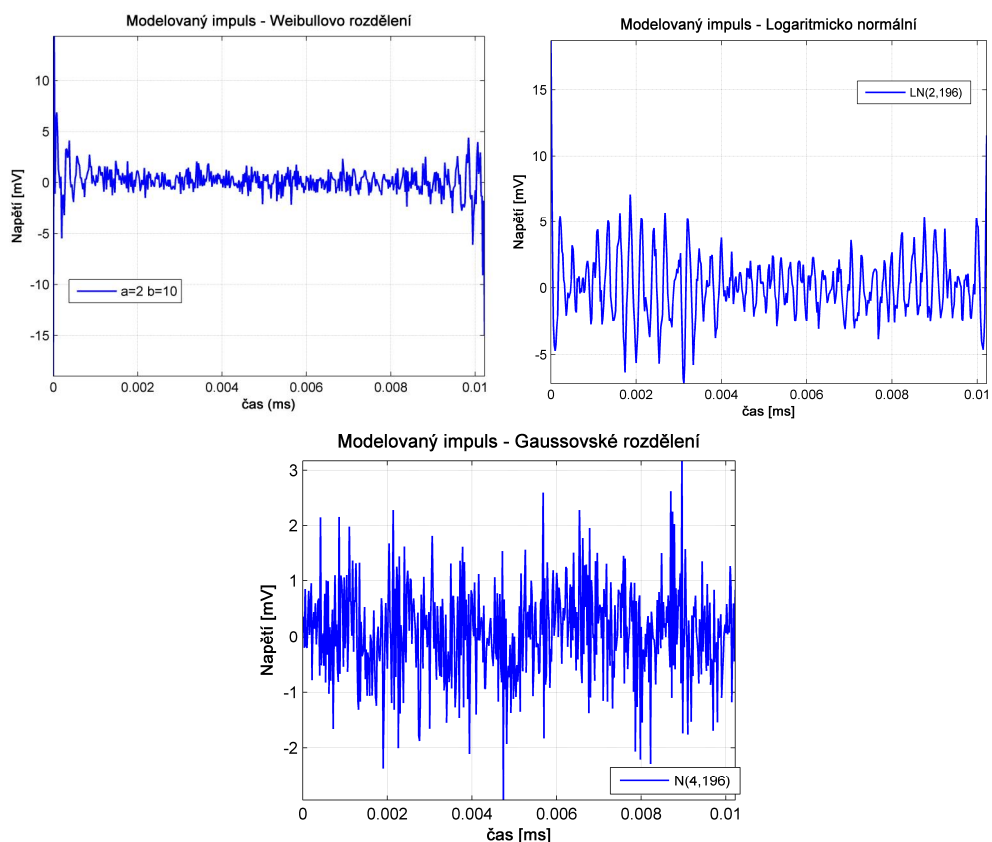
První graf na obr. 58 porovnává dodrření pofladované PSD zvoleného pro Vzorek KM I proti nov modelovaným impuls m, které mají pofladovanou spektrální hustotu výkonu PSD zachovávat. Pofladované PSD bylo vypo teno pro Vzorek KM I ze 166 impuls . Tento po et impuls byl zachován p i generování nov modelovaných impuls . Nov modelované impulsy pro Vzorek KM I m ly generovanou náhodnou fázovou funkcí s Weibullovým rozd lením s parametry  $W(2,10)$ . P íklad takto nov

vygenerovaného impulsu je na obr. 59 (první graf). Z obr. 58 (první graf) je tedy patrné, že požadovaná spektrální hustota výkonu PSD je u nov vygenerovaných impulsů zachována.



Obr. 58 Ověření dodržení požadovaného PSD u nov vygenerovaných impulsů: První graf – vzorek KM I realizováno pro počet impulsů  $n = 166$ , druhý graf – vzorek KM II realizováno pro počet impulsů  $n = 181$ , třetí graf – vzorek KM III realizováno pro počet impulsů  $n = 57$

Druhý graf na obr. 58 porovnává dodržení pořadované spektrální hustoty výkonu PSD zvolené pro Vzorek KM II proti nov modelovaným impuls m. Pořadované PSD bylo vypo teno pro Vzorek KM II ze 181 impuls . Tento po et impuls byl zachován p i generování nov modelovaných impuls . Nov modelované impulsy pro Vzorek KM II m ly generovanou náhodnou fázovou funkcí s log-normálním rozd lením s parametry LN(2,196). P íklad takto nov vygenerovaného impulsu je na obr. 59 (druhý graf). Z obr. 58 (druhý graf) je z ejmé, že pořadovaná spektrální hustota výkonu PSD je u nov vygenerovaných impuls zachována.



Obr. 59 Modelované impulsy: první ó Vzorek KM I, druhý ó Vzorek KM II, t etí ó Vzorek KM III.

T etí graf na obr. 58 porovnává dodržení pořadované spektrální hustoty výkonu PSD zvolené pro Vzorek KM III proti nov modelovaným impuls m. Pořadovaná PSD byla vypo tena pro Vzorek KM III z 57 impuls . Tento po et impuls byl zachován p i generování nov modelovaných impuls . Nov modelované impulsy pro Vzorek KM III m ly generovanou náhodnou fázovou funkcí s normálním rozd lením s parametry N(4,196). P íklad takto nov vygenerovaného impulsu je na obr. 59 (t etí graf). Z obr. 58 (t etí graf) je z etelné, že pořadovaná spektrální hustota výkonu PSD je u nov vygenerovaných impuls zachována. P i modelování impulsu je mofné využít vlastn

vytvoreny pr b h spektrální hustotu výkonu PSD za podmínky dodržení vzorkovací frekvence  $F_s = 50$  MHz, počet 512 vzorků a impedance  $Z_c = 50 \Omega$ .

## Díl í záv r

Generovaný impuls je modelován na základě získané zprůměrované spektrální hustoty výkonu PSD a modelováním náhodné fázové funkce s příslušným pravděpodobnostním rozdělením. Je třeba, aby nově modelované impulsy dodržovaly požadovanou spektrální hustotu výkonu PSD. Ověřením se potvrdilo, že nově modelované impulsy dodržují požadovanou zprůměrovanou spektrální hustotu výkonu PSD, jak je znázorněno na obr. 58. Při modelování fázové funkce jsem zvolil tyto pravděpodobnostní rozdělení: exponenciální rozdělení, normální rozdělení, logaritmicke-normální rozdělení, Weibullovo rozdělení. Každé toto pravděpodobnostní rozdělení ovlivuje časový průběh impulsu. Exponenciální pravděpodobnostní rozdělení fáze ovlivuje časový průběh impulsu (obr. 54) zvýšením střední hodnoty  $\mu$  zvýšením napětí impulsu. Normální pravděpodobnostní rozdělení fáze ovlivuje časový průběh impulsu (obr. 55) rozptylem  $\sigma^2$  a to tak, že při zvyšování rozptylu dochází ke zvýšení napětí impulsu. Logaritmicke-normální pravděpodobnostní rozdělení fáze ovlivuje časový průběh impulsu (obr. 56) tak, že při zvyšování rozptylu dochází ke zvýšení napětí amplitudy a dále k posunutí amplitudy směrem k vyšším kladným hodnotám na začátku časového průběhu impulsu, střední hodnotou  $\mu$  zvýšením napětí impulsu v ostatní části časového průběhu impulsu. Weibullovo pravděpodobnostní rozdělení fáze ovlivuje časový průběh impulsu (obr. 57) oběma parametry a to tak, že parametr  $b$  ovlivuje napětí amplitud na začátku a na konci časového průběhu impulsu a parametr  $a$  ovlivuje napětí impulsu mezi těmito amplitudami.

## 6.2 Modelování šumu na pozadí

Modelování šumu na pozadí tzv. bílého Gaussovského šumu představuje generování náhodného průběhu, který musí správně zastupovat chování signálu za přítomnosti aditivního bílého šumu s požadovanou oboustrannou spektrální výkonovou hustotou  $C(\omega) = N_0/2$ . Modelování šumu se provádí vzorkovacím kmitočtem  $f_{sa}$ . Spektrální funkce je nulová pro  $|f| > f_{sa}/2$ . Když se bude bílý šum aproximovat pásmově omezeným šumem s konstantní spektrální hustotou  $C(\omega) = N_0/2$  na intervalu

$|f| < f_{Sa}/2$ , chování se z pohledu zpracování signálu nezmění. Pásmovým omezením bílého šumu získáme fyzikálně existující signál (s konečným výkonem), který lze vzorkovat s  $f_{Sa}$ . Pásmově omezený šum  $n(t)$  má autokorelační funkci podle vzorce (39). [34], [37]

$$R_n(\tau) = f_{Sa} \frac{N_0}{2} \text{Sa}(\pi f_{Sa} \tau) \quad (39)$$

Vzorkováním šumu  $n(t)$  na násobcích  $1/f_{Sa}$ , získáme nekorelované vzorky šumu  $n[k] = n(k \cdot 1/f_{Sa})$ , autokorelační funkce vzorku  $n[k]$  je:

$$R_{n[k]}(\tau) = f_{Sa} \frac{N_0}{2} \delta[m] \quad (40)$$

Rozptyl vzorku šumu je:

$$\sigma^2 = R(0) = f_{Sa} \frac{N_0}{2} \quad (41)$$

rozptyl je i současně výkonem diskrétního signálu  $n[k]$ .

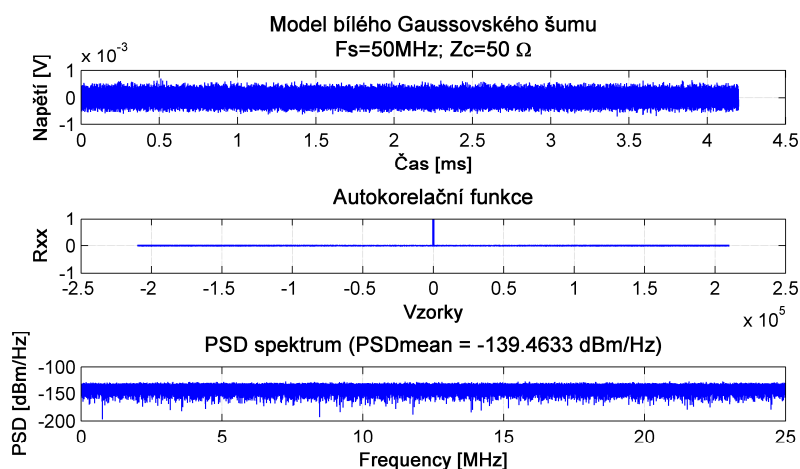
Výkon spojitěho signálu je úměrně roven výkonu jeho vzorků za předpokladu dodržení vzorkovací podmínky. Pak i výkon pásmově omezeného šumu na interval  $|f| < f_{Sa}/2$  je roven výkonu vzorků  $n[k]$  modelovaných s rozptylem  $\sigma^2 = N_0/2 \cdot f_{Sa}$ .

Pro modelování bílého Gaussovského šumu využívám funkci `wgn(m, n, p, imp, seed, type, output)` implementovanou v prostředí Matlab. Nastavení funkce `wgn` bílého Gaussovského šumu pro  $\text{PSD} = 0.140 \text{ dBm/Hz}$ ,  $f_{Sa} = 50 \text{ MHz}$ ,  $Z_c = 50 \Omega$  je následující:

$$\text{wgn}(1, 10^6, -140 + 10 \cdot \log_{10}(FS), 50, [], 'dBm', 'real') \quad (42)$$

kde první dva parametry představují úhlový vektor o počtu  $10^7$  vzorků; třetí parametr představuje výkon (výpočet pro dosažení  $\text{PSD} = 0.140 \text{ dBm/Hz}$ ); čtvrtý parametr je normování na impedanci  $Z_c$ ; pátý parametr je speciální parametr pro generování náhodnosti posloupnosti; šestý parametr určuje jednotku výkonu a poslední parametr určuje povahu rušení (reálný, komplexní, atd.). Modelovaný bílý Gaussovský šum je na obr. 60. Obr. 60 znázorňuje průběh bílého Gaussovského šumu v časové oblasti (první graf). Pro ověření jsem vypočetl autokorelační funkci na obr. 60 (druhý graf). Z průběhu autokorelační funkce je patrné, že se jedná o bílý Gaussovský šum. Na

t etím grafu v obr. 60 je znázorněn průběh spektrální hustoty výkonu PSD bílého Gaussovského šumu vztažený na  $Z_c = 50 \Omega$  při  $F_s = 50 \text{ MHz}$ .



Obr. 60 Modelování bílého Gaussovského šumu

## 6.3 Modelování doby mezi impulsy

Impulsní rušení je tvořeno posloupností impulzů vycházejících v náhodných časových okamžicích. Modelování doby mezi příchody impulzů (tzv. inter-arrival time) vychází z provedené analýzy impulzů. Výskyt impulzů je považován za náhodné jevy, které jsou navzájem nezávislé a mají stejné pravděpodobnostní rozdělení doby mezi příchody. Na základě výsledků analýzy záznamů rušení jsem zvolil modelování doby mezi příchody impulzů pomocí Poissonova toku, deterministického a Paretova rozdělení, i když se Paretovo rozdělení neprokázalo.

### 6.3.1 Poissonovský tok

Poissonovský tok je nejdůležitější rozdělení při modelování front. U Poissonovského toku nazýváme pravděpodobnost příchodu jednoho  $P_1(t)$  (případně  $P_0(t)$ ) impulsu časového intervalu  $\Delta t$  elementární pravděpodobností; ta je přímo úměrná době trvání časového intervalu  $t$  [35]:

$$P_1(\Delta t) = \lambda \Delta t + \sigma(\Delta t) \quad (43)$$

$$P_0(\Delta t) = 1 - \lambda \Delta t + \sigma(\Delta t) \quad (44)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sigma(\Delta t)}{\Delta t} = 0 \quad (45)$$



kde  $\sigma(\Delta t)$  je nekonečně malá hodnota ve srovnání s  $\Delta t$ .  $\sigma(\Delta t)$  je tzv. Landa v symbol, více zde [36]. Pravděpodobnost výskytu více než jednoho impulsu na intervalu  $\Delta t$  je zanedbatelná:

$$P_{i>1}(\Delta t) = \sigma(\Delta t) \quad (46)$$

Výskyt  $k$  impulsů v průběhu časového intervalu  $(t + \Delta t)$  je možný jenom tehdy, když  $k-i$  impulsů ( $0 \leq i \leq k$ ) přichází v intervalu  $t$  a  $i$  impulsů v intervalu  $\Delta t$ . Protože Poissonovský tok je tokem nezávislých událostí (tokem bez paměti, bez doznívání), nejsou příchody  $k-i$  impulsů během časového intervalu  $t$  a  $i$  impulsů během časového intervalu  $\Delta t$  navzájem závislé. Proto platí [35]:

$$P_k(t + \Delta t) = P_{k-i}(t)P_i(\Delta t) \quad (47)$$

Pro pravidlo celkové pravděpodobnosti (pro úplnou množinu jevů), lze zapsat následující rovnici:

$$P_k(t + \Delta t) = \sum_{i=0}^k P_{k-i}(t)P_i(\Delta t) \quad (48)$$

Konečných hodnot pro pravděpodobnosti  $P_i(\Delta t)$  je dosaženo jen pro  $i = 0$  a  $i = 1$ . Rovnici (48) lze za pomoci rovnic (43) a (44) pak přepsat na tvar [35]:

$$P_k(t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t)P_k(t) + \lambda \Delta t P_{k-1}(t) \quad (49)$$

pak když  $\Delta t \rightarrow 0$ , vznikne následující systém diferenciálních rovnic [35]:

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -\lambda P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) \quad (50)$$

Pro  $k = 0$ ,  $k = 1$  a vyšší hodnoty  $k$  vzniknou následující vztahy [35]:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (51)$$

$$P_1(t) = \lambda t e^{-\lambda t} \quad (52)$$

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (53)$$

kde rovnice (53) představuje Poissonovu rovnici pravděpodobnosti příchodu  $k$  impulsů vase  $t$ .

Distribuční funkce pro doby mezi příchody po sobě následujících impulsů  $F(t)$  je podle definice rovna pravdě podobnosti, že doba mezi příchody tohoto impulsu  $T$  bude kratší nežli daný čas  $t$ . Tato pravdě podobnost je totožná s pravdě podobností jevu, kdy jedno i více impulsů přichází během časového intervalu  $t$ . Podle Poissonovy rovnice pravdě podobnosti příchodů (53) vznikne následující distribuční funkce: [35]

$$F(t) = P(T < t) = \sum_{k=1}^{\infty} P_k(t) = 1 - P_0(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (54)$$

Vzniká distribuční funkce exponenciálního rozdělení. Hustota rozdělení pravdě podobnosti pro doby mezi příchody jednotlivých impulsů je pak:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (55)$$

Střední hodnota  $EX$  a rozptyl  $DX$  délky doby mezi příchody jednotlivých impulsů jsou  $EX[t] = 1/\lambda$  a  $DX[t] = 1/\lambda^2$ .

Modelování doby mezi příchody impulsního rušení s příslušným pravdě podobnostním rozdělením spoívá ve využití metody inverzní transformace, umožňující transformovat rovnoměrné rozdělení  $U$  nekorelované (nezávislé) náhodné posloupnosti na nekorelovanou (nezávislou) posloupnost  $X$  mající distribuční funkci  $F_X(x)$ . Požadované rušení je dáno podle vzorce (56). Podrobnější popis této metody se nachází v [34].

$$F_X(x) = \Pr\{F^{-1}(U) \leq x\} = \Pr\{U \leq F_X(x)\} = F_X(x) \quad (56)$$

Doby mezi příchody impulsního rušení mohou mít Poissonovský tok s exponenciálním rozdělením a exponenciální hustotou pravdě podobnosti. Pro modelování těchto dob jsem využil možnost transformovat rovnoměrné rozdělení, které je v prostředí Matlab definováno funkcí *rand* na intervalu (0; 1) na exponenciální rozdělení, pomocí metody inverzní transformace.

Hustota distribuční funkce:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} u(t), \quad \lambda > 0 \quad (57)$$

kde  $u(t)$  je definováno následovně :

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (58)$$

Distribuční funkce  $F(x)$  je pak:

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 - e^{-\lambda t} \quad (59)$$

Rovnost distribuční funkce k rovnoměrné náhodné proměnné  $U$ :

$$1 - e^{-\lambda t} = U \quad (60)$$

$$e^{-\lambda t} = 1 - U \quad (61)$$

e-ení je pak:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - U) \quad (62)$$

kde  $1/\lambda$  je střední doba přechodu mezi impulsy,  $U$  je náhodná proměnná s rovnoměrným rozdělením. (v prostředí Matlab generována funkcí *rand* na intervalu (0, 1)).

### 6.3.2 Paretovo rozdělení

Doby mezi příchody impulsního rušení mohou mít Paretovo rozdělení. Pro modelování těchto dob jsem použil transformaci rovnoměrného rozdělení na Paretovo rozdělení, pomocí metody inverzní transformace.

$$f_{par}(t) = \frac{\alpha t_0^\alpha}{t^{\alpha+1}} u(t) \quad t \geq t_0, \quad \alpha > 0 \quad (63)$$

kde  $u(t)$  je definováno ve vzorci (58). Distribuční funkce Paretova rozdělení je:

$$F(t) = \int_0^t \frac{\alpha x_0^\alpha}{x^{\alpha+1}} dx = 1 - \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha \quad (64)$$

Rovnost distribuční funkce k rovnoměrné náhodné proměnné  $U$ :

$$1 - \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha = U \quad (65)$$

$$\left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha = 1 - U \quad (66)$$

e-ení je pak:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt[\alpha]{1-U}} \quad (67)$$

kde  $\alpha$ ,  $t_0$  jsou parametry Paretovo rozdělení,  $U$  je náhodná proměnná s rovnoměrným rozdělením. (v prostředí Matlab generována funkcí *rand* na intervalu (0, 1)).

### 6.3.3 Deterministické rozdělení

Doby mezi příchody impulsního rušení mohou mít pravidelné příchody charakterizované deterministickým rozdělením. V tomto případě se jedná o impulsní rušení s periodickým opakováním. Takovéto impulsní rušení lze považovat za kvazi-impulsní rušení, u kterého se stejnou periodou opakují náhodné impulsy.

Distribuční funkce deterministického rozdělení je:

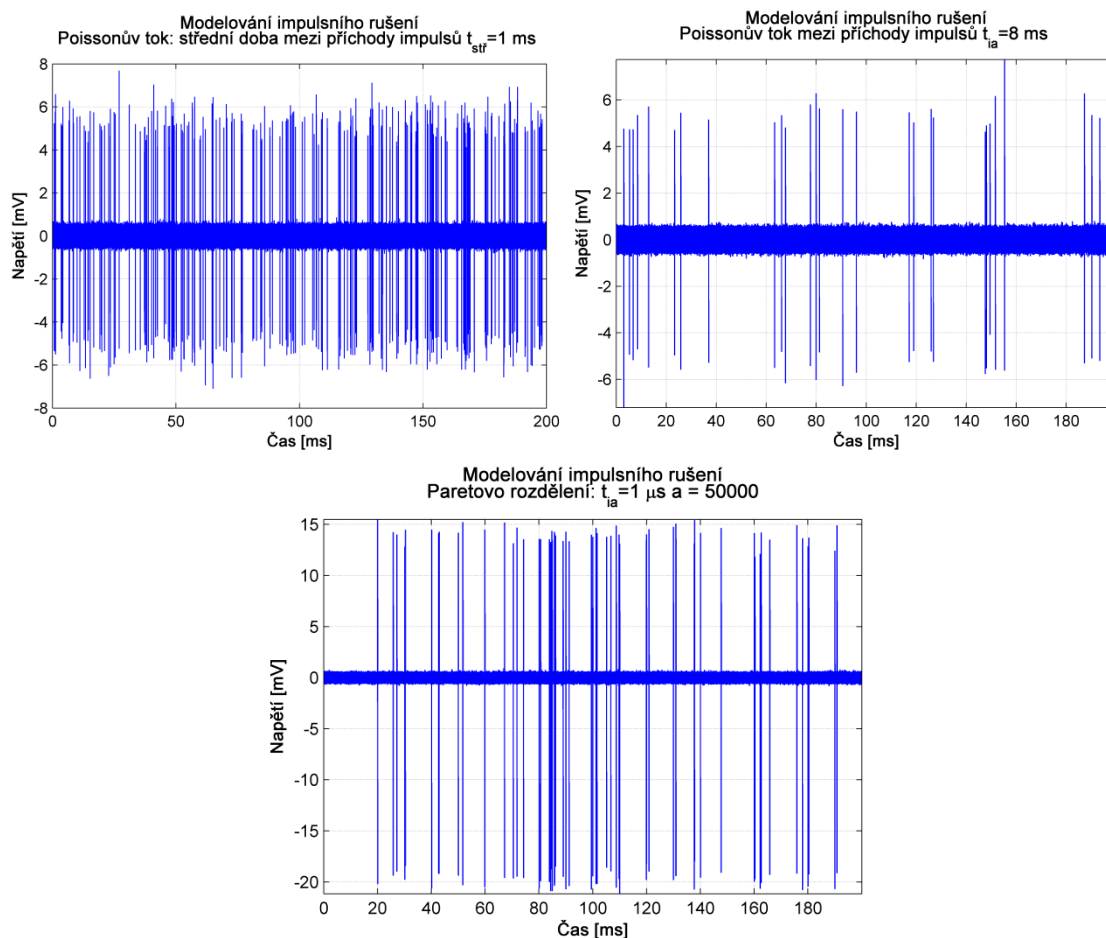
$$F(t) = \begin{cases} 1, & t \geq t_p = \frac{1}{\lambda} \\ 0, & t < t_p = \frac{1}{\lambda} \end{cases} \quad (68)$$

kde  $t_p$  je střední doba příchodů, což je střední hodnota  $EX[t] = 1/\lambda$ .

### 6.3.4 Výsledné modelování impulsního rušení

Modelování celkového průběhu impulsního rušení je založené na vytvoření bílého Gaussovského šumu s požadovanou hodnotou spektrální hustoty výkonu PSD a do tohoto šumu se náhodně generují impulsy. Časové okamžiky, kdy se impuls generuje, je založené na způsobu modelování dob mezi příchody impulsů.

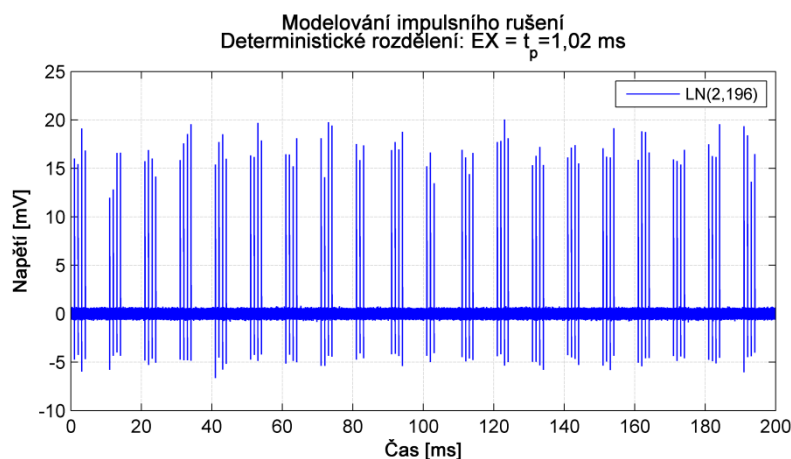
Časový úsek, ve kterém se generují impulsy, je stanoven na povodní časový interval 200 ms pro snadnější porovnání s naměřeným rušením. Tento časový interval je rozdělen po 10ms podintervalech. Generování impulsů v každém 10ms intervalu je možné nastavovat od 1 μs do 10 ms. Časový úsek 200 ms je možné v modelu mít narozdílný po jednotlivých podintervalech i dodržení určitých podmínek.



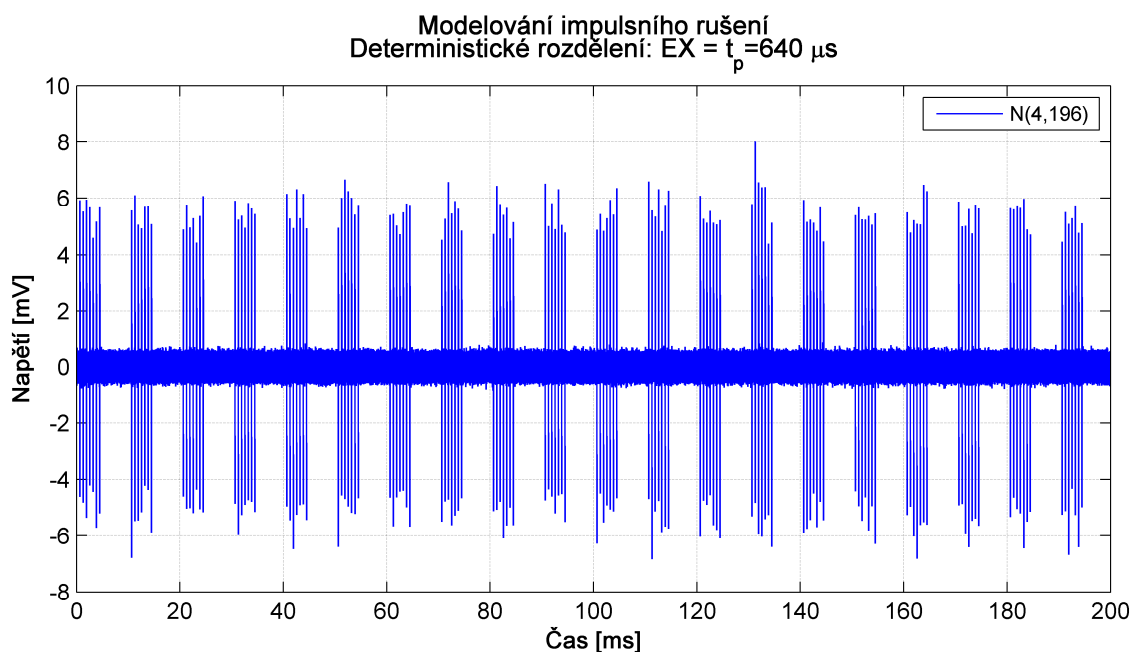
Obr. 61 Modelování celkového průběhu impulsního rušení pomocí Poissonova a Pareto rozdělení

Obr. 61 zobrazuje modelované impulsní rušení v časovém úseku 200 ms pro různé způsobů modelování dob mezi příchody. Z analýzy dob příchodů mezi impulsy v části 5.3 se prokázalo, že záznamy rušení analyzovaných vzorků KM I, II a III mají 10ms intervaly, ve kterých vznikají impulsy. Při modelování dob mezi impulsy byla tato vlastnost zapracována do modelu. První průběh impulsního rušení na obr. 61 je založen na modelování doby mezi příchody impulsů jako Poissonův tok se střední dobou příchodu  $t_{ia} = 1 \text{ ms}$ . Impulsy jsou modelovány s náhodnou fázovou funkcí s Weibullovým rozdělením  $W(2,10)$  jako v případě prvního průběhu na obr. 59. Druhý průběh impulsního rušení na obr. 61 je také založen na modelování doby mezi příchody impulsů jako Poissonův tok, ale se střední dobou příchodu  $t_{ia} = 8 \text{ ms}$ . Impulsy jsou modelovány jako v případě prvního průběhu impulsního rušení. Třetí průběh impulsního rušení na obr. 61 je založen na modelování doby mezi příchody impulsů s Paretoovým rozdělením s parametry  $t_0 = 8 \mu\text{s}$  a  $a = 50000$ . Impulsy jsou modelovány jako v případě prvního průběhu impulsního rušení na obr. 59.

Průběh impulsního rušení na obr. 62 je založen na modelování doby mezi příchody impulsů s deterministickým rozdělením se střední dobou příchodu  $t_p = 1,02 \text{ ms}$ . Impulsy jsou modelovány s náhodnou fázovou funkcí s log-normálním rozdělením LN(2,196) jako v případě druhého průběhu na obr. 59. Impulsní rušení na obr. 63 je také založeno na modelování doby mezi příchody impulsů s deterministickým rozdělením ale se střední dobou příchodu  $t_p = 0,64 \text{ ms}$ . Impulsy jsou modelovány s náhodnou fázovou funkcí s normálním rozdělením N(4,196) jako v případě třetího průběhu na obr. 59.



Obr. 62 Modelování celkového průběhu impulsního rušení s deterministickým rozdělením  $t_p = 1,02 \text{ ms}$



Obr. 63 Modelování celkového průběhu impulsního rušení s deterministickým rozdělením  $t_p = 0,64 \text{ ms}$

## 6.4 Shrnutí a vyhodnocení dosažených výsledků a nastínění směru dalšího výzkumu v dané oblasti

Nově vytvořený model impulsního rušení vychází z analýzy zaznamenaných rušení od různých elektrických spotřebičů v různých provozních stavech. Model je založen na zprohnané spektrální hustotě výkonu PSD a modelování náhodné fázové funkce. Impulzy jsou pak generované na základě modelu dob mezi příchody impulsů, tím vzniká výsledný časový průběh impulsního rušení.

Ze zprohnané spektrální hustoty výkonu PSD je vybrána ta s nejvyšším výkonem, které je získána od skupiny impulsů mající podobnou spektrální hustotu výkonu PSD. Modelování náhodné fázové funkce je založeno na pravděpodobnostním rozdělení, kterými jsou exponenciální, normální, log-normální a Weibullovo rozdělení. Každé toto rozdělení ovlivňuje časový průběh impulsů různě (tab 15).

Celkové modelování impulsního rušení je založeno na vygenerování průběhu bílého Gaussovského šumu, do kterého jsou pak na základě modelování dob mezi příchody generovány impulzy.

Výhodou tohoto modelu oproti modelu Henkel/Kessler je zohlednění spektrální hustoty výkonu PSD reálných rušení způsobených elektrickými spotřebiči a náhodné modelování fázové funkce s příslušným pravděpodobnostním rozdělením. Rušení způsobené tímto přístrojem má právě negativní dopad na přenos signálu prostřednictvím systému xDSL. Při modelování celkového průběhu impulsního rušení zohledňuje bílý Gaussovský šum mezi impulzy a doby mezi příchody impulsů jsou modelovány Poissonovským tokem, deterministickým a Paretovým rozdělením. Časový úsek, ve kterém se generují impulzy, je rozdělen na podintervaly, aby byla zachována souvislost zjištěná při analýze reálných rušení. Časový úsek a podintervaly je možné v modelu impulsního rušení různě nastavovat. Na základě těchto vlastností se model přibližuje k reálnému impulsnímu rušení. Další předností tohoto modelu je možnost vytvořit vlastní průběh spektrální hustoty výkonu, který bude model respektovat.

Prakticky navržený model umožní generování zvoleného typu rušení za účelem injekce do testovacích vedení pro testování reálných xDSL modemů proti rušení různého typu.

Tab. 15 uvádí souhrnn vliv pravd podobnostního rozd len na tvar impulsu p i modelování náhodné fázové funkce. Pro simulaci prost edí, kde jsou mén zaru-ená ú astnická vedené, doporu uji generování impulsního ru-ení podle parametr uvedených v tab. 16. Pro simulaci velmi zaru-ného prost edí doporu uji nastavení parametr uvedených v tab. 17, zde je mofné uvařovat i navý-ení hodnoty spektrální hustoty výkonu PSD bílého Gaussovského -umu na hodnotu  $PSD = -130$  dBm/Hz.

Tab. 18 uvádí mofnost generování typu ru-ení SHINE, které p edstavuje ru-ení generované jen v prvním podintervalu. Ru-ení SHINE zde uvádím jako mofný typ ru-ení, p i ov ování správnosti nastavení parametr op tovného p enosu.

Tab. 15 Vliv pravd podobnostního rozd lení na modelování náhodné fázové funkce

Pravd podobnostní rozd lení	Parametr	Ovlivn ní
Exponenciální	$\mu$	zvý-éním $\mu$ dochází ke zvý-ení amplitudy impulsu
Log-normální	$\mu; \sigma^2$	zvý-éním $\sigma^2$ dochází ke zvý-ení amplitudy impulsu, zm na $\mu$ se neprojevila
Normální rozd lení	$\mu; \sigma^2$	zvý-éním $\sigma^2$ dochází ke zvý-ení amplitudy impulsu na za átku impulsu, zvý-éním $\mu$ se zvyš-uje amplituda v ostatní ásti impulsu
Weibullovo rozd lení	a, b	Zvý-éním parametru $b$ dojde ke zvý-ení amplitudy impulsu na za átku a na konci pr $b$ hu. Zvý-éním parametru $a$ dojde k navý-ení amplitudy v ostatní ásti pr $b$ hu nového impulsu.

Tab. 16 Doporu ené modelování pro mén zaru-ené prost edí

Elekt. spot ebi	Charakter doby mezi p íchody	Parametr doby mezi p íchody	Zpr m rované PSD	Modelování fázové funkce	Bílý Gaussovský. -um mezi impulsy
Vzorek KM I	Poisson v tok s exponenciálním rozd lením	$\mu = 8$ ms Interval $T = 200$ ms (podinterval 10 ms) generování impuls na celém podintervalu celkem 20 podinterval	PSD z provozního stavu <i>roz b h</i> (obr. 49)	Weibullovo rozd lení $W(2,10)$	Bílý Gauss. -um PSD = $-140$ dBm/Hz
Vzorek KM II	Deterministické	$t_p = 1,02$ ms Interval $T = 200$ ms (podinterval 10 ms) generování impuls na 5 ms v podintervalu celkem 20 podinterval	PSD z provozního stavu <i>vypnutí</i> (obr. 51)	Log-normální rozd lení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. -um PSD = $-140$ dBm/Hz
Vzorek KM III	Deterministické	$t_p = 1,02$ ms Interval $T = 200$ ms (podinterval 10 ms) generování impuls na 5 ms v podintervalu celkem 20 podinterval	PSD z provozního stavu <i>vypnutí</i> (obr. 53)	Log-normální rozd lení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. -um PSD = $-140$ dBm/Hz



Tab. 17 Doporužené modelování pro velmi zaručené prostředí

Elekt. spotřebič	Charakter doby mezi pulsy	Parametr doby mezi pulsy	Zpracované PSD	Modelování fázové funkce	Bílý Gaussovský. –um mezi impulsy
Vzorek KM I	Poisson v tok s exponenciálním rozdělením	$\mu = 1 \text{ ms}$ Interval $T = 200 \text{ ms}$ (podinterval 10 ms) generování impulsů na celém podintervalu celkem 20 podinterval	PSD z provozního stavu <i>rozbitá</i> (obr. 49)	Weibullovo rozdělení $W(2,10)$	Bílý Gauss. –um PSD= ó140 dBm/Hz (ó130 dBm/Hz)
Vzorek KM II	Deterministické	$t_p = 640 \mu\text{s}$ Interval $T = 200 \text{ ms}$ (podinterval 10 ms) generování impulsů na 5 ms v podintervalu celkem 20 podinterval	PSD z provozního stavu <i>vypnutí</i> (obr. 51)	Log-normální rozdělení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. –um PSD= ó140 dBm/Hz (ó130 dBm/Hz)
Vzorek KM III	Deterministické	$t_p = 640 \mu\text{s}$ Interval $T = 200 \text{ ms}$ (podinterval 10 ms) generování impulsů na 5 ms v podintervalu celkem 20 podinterval	PSD z provozního stavu <i>vypnutí</i> (obr. 53)	Log-normální rozdělení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. –um PSD= ó140 dBm/Hz (ó130 dBm/Hz)

Tab. 18 Doporužené modelování pro typ rušení SHINE

Typ rušení	Charakter doby mezi pulsy	Parametr doby mezi pulsy	Zpracované PSD	Modelování fázové funkce	Bílý Gaussovský. –um mezi impulsy
SHINE	Deterministické	$t_p = 10 \mu\text{s}$ Interval $T = 200 \text{ ms}$ (podinterval 20 ms) generování impulsů na 10 ms v podintervalu celkem 1 podinterval	PSD z provozního stavu <i>vypnutí</i> (obr. 51)	Normální rozdělení $N(4,196)$	Bílý Gauss. –um PSD= ó140 dBm/Hz

Výsledky této práce otevírají poměrně široký prostor pro další výzkum, který může být zaměřen zejména na:

- Dopad impulsního rušení na nově vyvíjené DSL systémy
- Porovnání mechanismů proti chybové korekce založených na FEC a prokládání oproti technice optického pnosu.
- Modelování dalších typů rušení, zejména s ohledem na vyšší stupeň vyvolávání metalických párov v kabelech, i souběhu mnoha párov, které vyvolávají vysoké kmitočty.

## 7 Závěr práce

Jádro disertační práce tvoří problematika impulsního rušení v ústnických spojkách. Jedná se o analýzu impulsního rušení a nový způsob modelování impulsního rušení. Navržený model umožní generování zvoleného typu rušení za účelem injekce do testovacích vedení pro testování reálných xDSL modemů proti rušení určitého typu. Na základě měření impulsního rušení byl matematicky popsán a navržen nový model pro generování impulsního rušení. Nový model zohledňuje spektrální hustotu výkonu PSD reálného impulsního rušení a přidává náhodně modelovanou fázovou funkci s příslušným pravděpodobnostním rozdělením. Při modelování celkového průběhu impulsního rušení zohledňuje bílý Gaussovský šum mezi impulsy a doby mezi příchody impulsů jsou modelovány Poissonovským tokem, deterministickým a Paretovým rozdělením. časový úsek, ve kterém se generují impulsy, je rozdělen na podintervaly, aby byla zachována souvislost zjištěná při analýze reálných rušení. časový úsek a podintervaly je možné v modelu impulsního rušení určit a nastavit. Na základě těchto vlastností se model přibližuje k reálnému impulsnímu rušení. Výhodou tohoto modelu oproti modelu Henkel/Kessler je zohlednění spektrální hustoty výkonu PSD reálných rušení způsobených elektrickými spotřebiči. Rušení způsobené těmito spotřebiči má právě negativní dopad na přenos signálu prostřednictvím systému xDSL. Další předností tohoto modelu je možnost použít vlastní průběh spektrální hustoty výkonu, který bude model respektovat.

### 7.1 Splnění cílů disertační práce

**Cíl 1:** Provést měření impulsního rušení od vybraného souboru elektrických spotřebičů a prověřit jeho vliv na ústnické spojky

Ovření negativního úinku impulsního rušení jsem nejprve experimentálně ověřil na přenosu multimediálního obsahu v systému xDSL (kapitola 4.1). Jak se potvrdilo, impulsní rušení má negativní dopad na přenos videesignálu a zvukového signálu v systému xDSL. Na základě tohoto zjištění bylo realizováno experimentální měření ochranných prvků snižujících negativní dopad impulsního rušení. Nevýhodou těchto ochranných prvků spoívá ve snižování přenosové rychlosti a zpovědnosti v systémech xDSL.

Vzhledem k tomu, že velký podíl impulsního rušení je od záření, která se typicky vyskytují v domácnostech, byla provedena sada měření různých vzorků v laboratorních podmínkách.

**Cíl . 2:** Analyzovat naměřené výsledky z pohledu spektrálního i časového rozložení.

Ze sady měření různých vzorků byly pro další analýzu vybrány jen ty vzorky, které obsahovaly impulsní rušení a byly vhodné k analýze. Věchna uvařovaná měření byla analyzována z pohledu hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsu, časové doby trvání impulsu a doby mezi příchody impulsu. Také jsem provedl analýzu šumu na pozadí, který se vyskytoval mezi jednotlivými impulsy.

Analýza hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení byla posuzovaná z pohledu možnosti aproximace pomocí hustoty pravděpodobnosti oboustranného exponenciálního rozložení nebo pomocí hustoty pravděpodobnosti popsané v modelu Henkel/Kessler. Jak bylo předpokládáno, potvrdila se jako nejvhodnější aproximace hustoty pravděpodobnosti amplitudy pomocí modelu Henkel/Kessler.

Na základě provedeného podrobného rozboru jednotlivých impulsů jsem stanovil dobu trvání impulsu 10,24  $\mu$ s. Tento předpoklad se potvrdil na základě provedené analýzy histogramem rozložení dob trvání impulsů.

Analýza dob mezi příchody impulsů byla realizována pomocí histogramu a hustoty pravděpodobnosti Poissonova toku a Paretova rozložení. Výsledkem analýzy vybraných vzorků bylo zjištění, že impulsní rušení se vyskytuje ve skupinách (intervalech) o době trvání 10 ms. V těchto intervalech bylo potvrzeno rozložení doby mezi příchody jako Poissonovský tok a dále bylo zjištěné deterministické rozložení dob mezi příchody impulsů. Paretovo rozložení se neprokázalo.

Pro šum na pozadí, který se nacházel mezi impulsy, byla předpokládána povaha bílého Gaussovského šumu. Provedená analýza šumu na pozadí pomocí histogramu, hustoty pravděpodobnosti amplitudy šumu, spektrální hustoty výkonu (PSD) a autokorelační funkcí prokázala, že se tento šum blíží bílému Gaussovskému šumu a je možné ho bílým Gaussovským šumem aproximovat.

**Cíl . 3:** Na základě získaných analýz vytvořit modely impulsního rušení, založené na impulsích s definovaným výkonovým spektrem a náhodně vygenerovanou fází.

Princip modelování nových impulsů je založen na zprůměrované spektrální hustotě výkonu (PSD) a náhodně vygenerované fázové funkci. Proces získání zprůměrované spektrální hustoty výkonu (PSD) je založen na několika krocích (kapitola 6.1.1). Nejprve jsou detekovány impulsy ze zaznamenaných rušení. Dalším krokem je analýza nalezených impulsů, která spočívá v klasifikaci impulsů do skupin na základě podobnosti spektrální hustoty výkonu PSD. Pro každou takto získanou skupinu dojde k výpočtu zprůměrované spektrální hustoty výkonu PSD. Ze všech získaných zprůměrovaných spekter se na základě střední hodnoty vybere to s nejvyšší hodnotou. Tato zprůměrovaná spektrální hustota výkonu PSD je dále použita při modelování nového impulsu.

Princip modelování náhodné fázové funkce je založen na generování náhodné posloupnosti s předepsaným pravděpodobnostním rozdělením (kapitola 6.1.2). Vybraná pravděpodobnostní rozdělení byla exponenciální, normální, log-normální a Weibullovo pravděpodobnostní rozdělení. Pro modelování posloupností s definovaným pravděpodobnostním rozdělením byly aplikovány implementované funkce v prostředí Matlab. Vybraná pravděpodobnostní rozdělení mají různý efekt na časový průběh nově modelovaného impulsu, podrobněji v kapitole 6.1.2 a souhrnně tab. 15.

Ze zprůměrované spektrální hustoty výkonu PSD a náhodně vygenerované fázové funkce je po nezbytných úpravách vytvořen nový impuls v časové oblasti prostřednictvím zpětné Fourierovy transformace implementované v prostředí Matlab.

**Cíl . 4:** Modelovat rozložení doby mezi generováním impulsů.

Impulsní rušení je tvořeno posloupností impulsů, které přicházejí v náhodných časových intervalech. Náhodné modelování doby mezi příchody impulsů bylo modelováno pomocí Poissonova toku, deterministického a Paretova rozdělení. Pro modelování dob mezi příchody impulsů jsem použil transformaci rovnoměrného rozdělení na předepsané rozdělení pomocí metody inverzní transformace, detailně v kapitole 6.3.

Modelování celkového průběhu impulsního rušení bylo založeno na modelování úseku bílého Gaussovského šumu s pořádkovanou spektrální hustotou výkonu PSD. Do

toho úseku pak byly generovány modely impulsů na základě modelu dohody mezi proudy impulsů.

**Z výše uvedeného výřadu splněných úkolů vyplývá, že cíle disertační práce se podařilo beze zbytku splnit.**

## **7.2 Shrnutí přínosů disertační práce a jejich praktické využití**

Popředložená disertační práce shrnuje výsledky dosažené v oblasti výzkumu a návrhu modelování impulsního rušení během autorova postgraduálního studia na Katedře telekomunikační techniky, Fakulta elektrotechnická, VUT v Praze. Během této doby studia byla uskutečněna řada experimentálních měření v laboratorních podmínkách na Katedře telekomunikační techniky a v datové laboratoři společnosti Telefónica CZ a.s. Byly uskutečněny experimenty a měření úniku impulsního rušení v systému xDSL. Dalším experimentálním měřením bylo ověření chování ochranných mechanismů, které měly eliminovat negativní dopad impulsního rušení. Z experimentů bylo patrné, že je nutné znát charakter impulsního rušení, aby byla nastavena ochrana proti tomuto typu rušení, a aby byl zaručen bezchybný přenos signálu. Popisovaný model impulsního rušení může sloužit při simulaci různých provozních stavů impulsního rušení vyskytujících se v systémech xDSL, a dále také může mít pozitivní dopad při hledání vhodného nastavení ochranných faktorů ochranné připojky.

Autor přibližně publikoval dílčí dosažené výsledky a celkový přehled výzkumu v několika recenzovaných periodikách a na vědeckých mezinárodních konferencích. Práce byla podpořena několika granty.

Prakticky navržený model umožní generování zvoleného typu rušení za účelem injekce do testovacích vedení pro testování reálných xDSL modemů proti rušení určitého typu. Doporučený způsob modelování a modely impulsů jsou podrobněji v kapitole 6.4.

### 7.3 Další výzkum

Výsledky této práce otevírají poměrně široký prostor pro další výzkum, který může být zaměřen zejména na:

- Dopad impulsního rušení na nově vyvíjené DSL systémy
- Porovnání mechanismů proti chybové korekce založených na FEC a prokládání oproti optovému přenosu (retransmise)
- Modelování dalších typů rušení, zejména s ohledem na vyšší stupeň využití metalických párů v kabelech při souběhu mnoha párů, které využívají vysoké kmitočty.

## 8 Poufítá literatura

- [1] NEDEV, N. H. *Analysis of the Impact of Impulse Noise in DSL Systems*. University of Edinburgh, 2003. PhD thesis. 168 s
- [2] ITU-T G.991.1. *High speed digital subscriber line (HDSL) transceivers*. ITU-T, 1998.
- [3] HENKEL, W., KESSLER, T. A simplified Impulse-Noise Model for the xDSL Test Environment. In: HENKEL, Werner. *Proceedings: Cracow, Poland, October 11 - 13, 1999* [online]. Kraków: Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, 1999 [cit. 2013-10-09]. ISBN 8386476273.
- [4] MANN, I., MCLAUGHLIN, S., HENKEL, W., KIRKBY, R., KESSLER, T. Impulse generation with appropriate amplitude, length, inter-arrival, and spectral characteristics. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* [online]. 2002, vol. 20, issue 5, s. 901-912 [cit. 2014-02-21]. DOI: 10.1109/JSAC.2002.1007373. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1007373>
- [5] LEVEY, D., B., and MCLAUGHLIN, S. The statistical nature of impulse noise interarrival times in digital subscriber loop systems. *Signal Processing* [online]. 2002, vol. 82, issue 3, s. 329-351 [cit. 2014-02-21]. DOI: 10.1016/S0165-1684(01)00167-0. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168401001670>
- [6] TD29. *VDSL2 should also withstand  $\delta$ PEIN impulse noise*. 071t29\_Noise\_PEIN.pdf. France: ETSI STC TM6, 2007.
- [7] TĚMÁK, B., SVOBODA, J., a VODRÁŤKA, J. *Digitální ú astnické p ípojky xDSL: díl. I*. 1. vyd. Praha: Sd lovací technika, c2005, 141 s. Telekomunikace (Sd lovací technika). ISBN 80-866-4507-X.
- [8] TĚMÁK, B., VODRÁŤKA, J. *Digitální ú astnické p ípojky xDSL: díl. II.* 1. vyd. Praha: Sd lovací technika, c2005, 141 s. Telekomunikace (Sd lovací technika). ISBN 80-866-4507-X.
- [9] PROKOP, T. Rozbo ova e pro p ípojky ADSL. *Access server* [online], 2006. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006011201>
- [10] VODRÁŤKA, J. Nové varianty p ípojek ADSL. *Access server* [online], 2004. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=&cisloclanku=2004120301>
- [11] VODRÁŤKA, J. Nové varianty p ípojek ADSL. *Access server* [online]. 2005. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2005120103>

- [12] TE000011. *Typy a specifikace rozhraní používaných v síti elektronických komunikací společnosti Telefónica Czech Republic, a.s.: fixní síť*. Praha, 2012.
- [13] VODRÁŇKA, J. Druhá generace VDSL2. *Access server* [online], 2005. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=druha-generace-vdsl2&cisloclanku=2005093001>
- [14] WILLIAMS, J. How Enhanced DSL Technologies Optimize the Last Copper Mile. [online]. May 2013, s. 12 [cit. 2014-02-21]. Dostupné z: <http://www.jdsu.com/ProductLiterature/dsltech-wp-tfs-tm-ae.pdf>
- [15] JAREŠ. Vektorová modulace DMT. *Access server* [online], 2007. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2007010002>
- [16] VODRÁŇKA, J. Další stádium vývoje digitálních účastnických přípojek. *Access server* [online], 2013. ISSN 1214-9675. <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=dalsi-stadium-vyvoje-digitalnich-ucastnickych-pripojek&cisloclanku=2013030001>
- [17] RUSSEL, K. The Numbers are in: Vectoring 2.0 Makes G.fast Faster. *Alcatel-lucent* [online], 2013 [cit. 2014-02-21]. Dostupné z: <http://www2.alcatel-lucent.com/techzine/the-numbers-are-in-vectoring-2-0-makes-g-fast-faster/>
- [18] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Hodnocení kvality IPTV. *Access server* [online]. 2010, ročník 8., číslo 05, s. 0004. Internet: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010050004>. ISSN 1214-9675
- [19] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Impulse Noise Influencing xDSL Technologies. In *Proceedings of 15th Mechatronika 2012*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2012, p. 191-194. ISBN 978-80-01-04987-7. WOS:000324949300035
- [20] ITU-T G.996.1. *Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers*. ITU-T, 2001.
- [21] ZEMAN, T. *Impulsní rušení v systémech xDSL*. Praha, 2001. Disertační práce. VUT v Praze, FEL, Katedra telekomunikační techniky.
- [22] ETSI WG TM6 TD 55 002t55a0. *Some Results of the Investigations of BT Impulse-Noise Data*. ETSI, 2000.
- [23] ETSI WG TM6 TD 29 994t29a0. *Comments to the latest impulse-noise modeling approach by BT and the University of Edinburgh*. ETSI, 1999.
- [24] TOUGH, R., J., A., WARD, K., D., The correlation properties of gamma and other non-Gaussian processes generated by memoryless nonlinear transformation, *J. Physics D: Applied Physics*, vol. 32, pp. 3075-3084, Dec. 1999.
- [25] ETSI TM6(98)10 TD 20 011t20, *Realistic Impulsive Noise Model*, ETSI 2001



- [26] VASEGHI, S., V., *Advanced digital signal processing and noise reduction*. 4th ed. Chichester: John Wiley, 2008, 514 s. ISBN 978-0-470-75406-1.
- [27] DYMARSKI, P., *Hidden Markov Models, Theory and Applications* [online]. Rijeka: InTech, 2011. ISBN 978-953-307-208-1. Dostupné z: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
- [28] ITU-T G.998.4. *Improved impulse noise protection for DSL transceivers*. ITU-T 2010
- [29] ITU-T G.993.2. *Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)*. ITU-T 2011
- [30] KREJČÍ, J., ZEMAN, T., Influence of Noise on IPTV over xDSL. *IWSSIP 2009 - 16th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing* [CD-ROM]. Chalkida: TEI of Chalkida, 2009, p. 246151. ISBN 978-1-4244-4530-1.
- [31] JAREŠ, P., Modelování rušení a propustnosti plynových systémů xDSL. *Access server* [online], 2004. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004122201>
- [32] HLAVÁČEK, V., SEDLÁČEK, M., *Zpracování signálů a obrazů*. Vyd. 3. V Praze: Česká vysoká škola technická, 2009, 252 s. ISBN 978-80-01-04442-1.
- [33] TOMÁŠ, J., *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů pomocí FFT*. Praha: Sdružení techniků, 1997, 174 s. ISBN 80-901-9361-7.
- [34] TRANTER, W., H., *Principles of communication systems simulation with wireless applications*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003, xxii, 778 s. ISBN 01-349-4790-8.
- [35] STASIAK, M., HANCZEWSKI, S., GLABOWSKI, M., ZWIERZYKOWSKI, P., Sada e-learningových kurzů z oblasti elektronických komunikací: *Základy teorie provozního zatížení, Internationalisation of Electronic Communications Training*, VUT v Praze, ISBN 978-80-01-04949-5
- [36] ZÍTEK, F., *Ztracený čas: Elementy teorie hromadné obsluhy*. Praha: Academia, 1969. Cesta k vymoření.
- [37] KAMÁŘEK, P., VUT V PRAZE, FEL. *Podněty: Signály a systémy*. Praha, 2008.

## 9 Publikace autora

### 9.1 Publikace autora týkající se náplně a tématu disertační práce

#### 9.1.1 Publikace v recenzovaných časopisech

- [A 1] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Úvod do IPTV. *Access server* [online]. 2008, ro. 6., . 2008100002, s. 1-8. Internet:  
<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2008100002>. ISSN 1214-9675.  
Podíl autora 50 %
- [A 2] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Hodnocení kvality IPTV. *Access server* [online]. 2010, ro. 8., . 05, s. 0004. Internet:  
<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2010050004>. ISSN 1214-9675.  
Podíl autora 50 %

#### 9.1.2 Publikace excerptované WOS

- [A 3] KREJČÍ, J. MDI Measurement in the IPTV. In *Proceedings of IWSSIP 2008*. Bratislava: Slovak University of Technology, 2008, p. 49-51. ISBN 978-80-227-2856-0. WOS:000259363700013 Podíl autora 100 %
- [A 4] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Diagnostics of Impulse Noise. In *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervező Kft., 2010, p. 411-416. ISBN 978-963-88981-0-4. WOS:000290635200086 Podíl autora 50 %
- [A 5] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Impulse Noise Influencing xDSL Technologies. In *Proceedings of 15th Mechatronika 2012*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2012, p. 191-194. ISBN 978-80-01-04987-7. WOS:000324949300035 Podíl autora 50 %

#### 9.1.3 Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [A 6] KREJČÍ, J. Influence of Noise on IPTV over xDSL. In *Workshop 09 CTU REPORTS*. Prague: CTU, 2009, vol. A, p. 90-91. ISBN 978-80-01-04286-1. Podíl autora 100 %
- [A 7] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Influence of Noise on IPTV over xDSL. In *IWSSIP 2009 - 16th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing*. Chalkida: TEI of Chalkida, 2009, p. 246151. ISBN 978-1-4244-4530-1. Podíl autora 50 %
- [A 8] KREJČÍ, J., ZEMAN, T. Analyze of Impulse Noise. In *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics - KTTO 2010*. Ostrava: VUT - TUO, FEI, Katedra elektroniky a telekomunikační techniky, 2010, p. 96-100. ISBN 978-80-248-2330-0. Podíl autora 50 %

- [A 9] KREJÍ, J., ZEMAN, T., HRAD, J., KOCUR, Z. Experimental Diagnostics of Impulse Noise. In *IWSSIP 2010 Proceedings*. Rio de Janeiro: EdUFF - Editora da Universidade Federal Fluminense, 2010, p. 268-271. ISBN 978-85-228-0565-5. Podíl autora 25 %

### 9.1.4 e-ené granty

- [A 10] KREJÍ, J. Vliv rušení na IPTV přes xDSL, 08--08, CTU CTU0802613

## 9.2 Ostatní publikace

### 9.2.1 Publikace v recenzovaných časopisech

- [A 11] KREJÍ, J., LAFATA, P. Současné a budoucí možnosti e-ení přístupové sítě pro IPTV. *Elektrorevue* [online]. 2010, ro. 13, . 64, s. 64-1-64-8. Internet: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/soucasne-a-budouci-moznosti-reseni-pristupove-site-pro-iptv/>. ISSN 1213-1539. Podíl autora 50 %

### 9.2.2 Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [A 12] KREJÍ, J. IPTV ve výuce. In *Pedagogický software 2008*. České Budějovice: Scientific Pedagogical Publishing, 2008, s. 301-303. ISBN 80-85645-59-9. Podíl autora 100 %
- [A 13] KREJÍ, J., ZEMAN, T. The Quality of Transmitted Digital Video Stream in the IPTV. In *RTT 2008*. Bratislava: STU v Bratislave, 2008, . ISBN 978-80-227-2939-0. Podíl autora 50 %
- [A 14] KREJÍ, J., ZEMAN, T. The Measurement of Quality Video Stream in IPTV. In *New Information and Multimedia Technologies (NIMT - 2008)*. Brno: University of Technology, 2008, p. 71-74. ISBN 978-80-214-3708-1. Podíl autora 50 %
- [A 15] KREJÍ, J., RADOSTA, J., ZEMAN, T. Vhodné metody pro stanovení kvality obrazového signálu digitální televize ve výuce. In *International Workshop wRTT 2009*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, s. 0127\_0040. ISBN 978-80-01-04411-7. Podíl autora 34 %
- [A 16] KREJÍ, J., ZEMAN, T. Modernizace výuky v oblasti digitálního vysílání. In *wRTT 2010 Proceedings*. Ostrava: V<sup>TB</sup> - TUO, FEI, Katedra elektroniky a telekomunikační techniky, 2010, s. 22-24. ISBN 978-80-248-2262-4. Podíl autora 50 %
- [A 17] KREJÍ, J., ZEMAN, T., HRAD, J. Modernization of Education in the Area of IPTV. In *21st EAEEIE Annual Conference*. Kaunas: Kauno technologijos universitetas, 2010, . ISBN 978-9955-25-826-1. Podíl autora 50 %

### 9.2.3 e-ené granty

- [A 18] KREJÍ, J. Zavedení IPTV do výuky, 08--08, FRV 1301 G1

- 
- [A 19] KREJČÍ, J. Kvalita obrazového signálu digitální televize v přístupové síti, 09--09, CTU CTU0914013
- [A 20] KREJČÍ, J. Vhodné metody pro stanovení kvality obrazového signálu digitální televize, 09--09, FRV 1378G1
- [A 21] KREJČÍ, J. Modernizace výuky v oblasti digitálního vysílání, 10--10, FRV G1 1786

## Seznam obrázk

Obr. 1 Typické uspořádání symetrického vedení [7] .....	14
Obr. 2 Páry po symetrickém páru [7] .....	14
Obr. 3 Charakteristické uspořádání ADSL páry [7] .....	15
Obr. 4 Výběr frekvencí v kterých profil frekvence pásma VDSL2 .....	16
Obr. 5 Páry rychlosti na profilech 17a a 8b páry - úroveň bílého šumu 0140 dBm/Hz .....	17
Obr. 6 Vývoj technologií na ústředních pájkách [14] .....	18
Obr. 7 Vysunutý ústřední multiplexor bez využití mechanismu PBO .....	18
Obr. 8 Vysunutý ústřední multiplexor s využití mechanismu DPBO .....	19
Obr. 9 Technologie vícepárového DSL na systému VDSL2 .....	19
Obr. 10 Odhalení impulsního rušení .....	20
Obr. 11 Fantomový okruh vytvořený pomocí dvou párů, typicky v rámci jedné páry [16] .....	21
Obr. 12 Koncepce nasazení technologie G.fast. ....	22
Obr. 13 Páry NEXE a FEXT mezi páry v kabelu .....	23
Obr. 14 Dopad impulsního rušení na páry televizního vysílání v systémech xDSL [18] .....	24
Obr. 15 Opakující se rušení REIN .....	24
Obr. 16 Testovací impuls číslo 1 [20] .....	25
Obr. 17 Testovací impuls číslo 2 [20] .....	26
Obr. 18 Tvar testovacího Cookova impulsu pro $K_C = 1775 \cdot 10^{-6}$ .....	27
Obr. 19 Aproximace změřených dat pomocí hustoty pravděpodobnosti podle modelu Henkel/Kessler, Weibullovým rozdělením a posunutým Weibullovým rozdělením [4] .....	29
Obr. 20 Výsledek proložení naměřených dat logaritmicke-normálním rozdělením pro druhý řádek z tab. 4, převzato z [3] .....	30
Obr. 21 Markovský model obnovy pro doby mezi páry impulsů [1] .....	34
Obr. 22 Princip opožděného páry .....	38
Obr. 23 Měřicí pracoviště pro pozorování vlivu impulsního rušení na IPTV [30] .....	41
Obr. 24 Rušící profil podle modelu A .....	42
Obr. 25 Nastavení impulsního rušení .....	42
Obr. 26 Parametry impulsního rušení ( $T = 1$ s, $U_{pp} = 50$ mV, $N=15$ ) .....	43
Obr. 27 Měřicí pracoviště pro diagnostiku impulsního rušení .....	46
Obr. 28 Zaznamenaný průběh Vzorku KM I ve stavech rozložení a b fí .....	47
Obr. 29 Zaznamenaný průběh Vzorku KM I ve stavech změna otáček a vypínání .....	48
Obr. 30 Zaznamenaný průběh Vzorku KM II ve stavech rozložení, v b hu a vypínání .....	48
Obr. 31 Průběh Vzorku KM II ve stavech změna otáček, otáčky min. a otáčky max. ....	48
Obr. 32 Zaznamenaný průběh Vzorku KM III ve stavech rozložení a vypnutí .....	49
Obr. 33 Blokové schéma analýzy zaznamenaného rušení .....	52
Obr. 34 Hustota pravděpodobnosti amplitudy podle Vzorek KM I .....	53
Obr. 35 Hustota pravděpodobnosti amplitudy podle Vzorek KM II .....	54
Obr. 36 Hustota pravděpodobnosti amplitudy podle Vzorek KM III .....	54
Obr. 37 Histogramy rozložení dob trvání impulsů podle Vzorek KM I .....	56
Obr. 38 Histogramy rozložení dob trvání impulsů podle Vzorek KM II .....	57
Obr. 39 Histogramy rozložení dob trvání impulsů podle Vzorek KM III .....	57
Obr. 40 Příklad analýzy doby mezi páry impulsů pro Vzorek KM I (provozní stav rozložení a fí) pro jeden 10ms interval .....	58
Obr. 41 Příklad analýzy doby mezi páry impulsů pro Vzorek KM II provozní stav rozložení a fí a maximální výkon otáček; pro jeden 10ms interval .....	59
Obr. 42 Příklad analýzy doby mezi páry impulsů pro Vzorek KM III (provozní stav rozložení a fí a vypínání) pro jeden 10ms interval .....	60
Obr. 43 Analýza šumu mezi impulsy .....	62
Obr. 44 Spektrální hustota výkonu (PSD) a autokorelační funkce šumu mezi impulsy .....	62
Obr. 45 Blokové schéma modelování impulsního rušení .....	63
Obr. 46 Modelování impulsního rušení: Gaussovský bílý šum; modelované impulsy s deterministickými duby páry mezi impulsy; výsledné modelované impulsní rušení .....	63
Obr. 47 Blokové schéma modelování impulsu .....	65
Obr. 48 Získané zprůměrované jednostranné spektrální hustoty výkonu podle Vzorek KM I .....	68
Obr. 49 Porovnání zprůměrovaných PSD pro Vzorek KM I .....	69
Obr. 50 Získané zprůměrované jednostranné spektrální hustoty výkonu podle Vzorek KM II .....	70

Obr. 51 Porovnání zprůměrovaných PSD pro Vzorek KM II.....	70
Obr. 52 Získané zprůměrované jednostranné spektrální hustoty výkonu ó Vzorek KM III .....	71
Obr. 53 Porovnání zprůměrovaných PSD pro Vzorek KM III .....	71
Obr. 54 Modelovaný impuls ó fázová funkce má exponenciální rozdělení.....	73
Obr. 55 Modelovaný impuls ó fázová funkce má normální rozdělení.....	74
Obr. 56 Modelovaný impuls ó fázová funkce má Log-normální rozdělení .....	74
Obr. 57 Modelovaný impuls ó fázová funkce má Weibullovo rozdělení .....	75
Obr. 58 Ověření dodržení zprůměrovaného PSD u nově vygenerovaných impulsů : První graf ó Vzorek KM I realizováno pro počet impulsů $n = 166$ , druhý graf ó Vzorek KM II realizováno pro počet impulsů $n = 181$ , třetí graf ó Vzorek KM III realizováno pro počet impulsů $n = 57$ .....	76
Obr. 59 Modelované impulsy: první ó Vzorek KM I, druhý ó Vzorek KM II, třetí ó Vzorek KM III. ....	77
Obr. 60 Modelování bílého Gaussovského šumu .....	80
Obr. 61 Modelování celkového průběhu impulsního rušení ó Poisson vln a Pareto rozdělení.....	85
Obr. 62 Modelování celkového průběhu impulsního rušení ó deterministické rozdělení $t_p = 1,02$ ms.....	86
Obr. 63 Modelování celkového průběhu impulsního rušení ó deterministické rozdělení $t_p = 0,64$ ms.....	86

## Seznam tabulek

Tab. 1 Vzájemné porovnání uvedených impulsních rušení [19].....	25
Tab. 2 Pohled parametrů pro testovací Cook v impulsu pro systémy HDSL [2].....	27
Tab. 3 Model parametrů pro Weibullovo rozdělení a Henkel/Kessler model [4] .....	29
Tab. 4 Model parametrů pro hustotu pravděpodobnosti logaritmicko-normálního rozdělení [4]. .....	30
Tab. 5 Stanovené parametry pro Poissonovo a Paretovo rozdělení [25].....	33
Tab. 6 Parametry pro čtyřstavový model [5] .....	34
Tab. 7 Parametry pro dvoustavový model [25] .....	35
Tab. 8 Výhody a nevýhody optického přenosu.....	39
Tab. 9 Nastavení impulsního rušení.....	42
Tab. 10 Ovlivnění přenosové rychlosti při nastavení INP a zpoždění na VDSL2 .....	44
Tab. 11 Vzorčky elektrických spotřebičů a stav záznamu impulsního rušení .....	45
Tab. 12 Aproximace hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení.....	55
Tab. 13 Pohled analýzy dob mezi příchody impulsů .....	61
Tab. 14 Vliv pravděpodobnostního rozdělení na modelování náhodné fázové funkce.....	75
Tab. 15 Vliv pravděpodobnostního rozdělení na modelování náhodné fázové funkce.....	88
Tab. 16 Doporučené modelování pro méně zaručené prostředí .....	88
Tab. 17 Doporučené modelování pro velmi zaručené prostředí.....	89
Tab. 18 Doporučené modelování pro typ rušení SHINE .....	89

## P íloha

### Použitá pravd podobnostní rozdělení

Pro modelování impulsního rušení jsem použil pravd podobnostní rozdělení uvedená dále v této příloze. Jsou zde shrnuty základní pojmy definované pro náhodné veličiny. Rovnoměrné, deterministické a Poissonovo rozdělení jsem použil při modelování dob mezi příchozími impulsy. Normální (Gaussovo) rozdělení jsem použil při modelování bílého Gaussovského šumu. Weibullovo, exponenciální, logaritmicke-normální a normální (Gaussovské) rozdělení jsem použil při modelování náhodné fáze.

### Shrnutí základních pojmů

Pro popis náhodných veličin je nejdůležitějším pojmem distribuční funkce. Distribuční funkce  $F(x)$  náhodné veličiny  $X$  je definována vztahem [32]

$$F(x) = P[X \leq x] \quad (69)$$

kde  $P[X \leq x]$  je pravd podobnost toho, že veličina  $X$  nabude hodnot  $\leq x$ . Je-li  $X$  diskrétní náhodná veličina (např. signál diskrétní v amplitudě), pak může nabývat jen určitých hodnot  $x_1, x_2, \dots, x_N$  a to s pravd podobnostmi  $P_1, P_2, \dots, P_N$ . Platí následující vztah [32]

$$F(x_i) = \sum_{X \leq x_i} P_i \quad (70)$$

Spojité náhodné veličiny mají spojitou distribuční funkci. Distribuční funkce je neklesající a platí pro ní  $F(-\infty) = 0$ ,  $F(\infty) = 1$ . Spojitou náhodnou veličinu lze popsat hustotou pravd podobnosti  $f(x)$ , pro kterou platí [32]

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (71)$$

potom

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (72)$$

kde  $f(t)$  je hustota pravd podobnosti a  $F(x)$  je distribuční funkce.

### Rovnoměrné rozdělení

Náhodná veli ina  $X$  je rovnom rn rozlofena v intervalu  $\langle a, b \rangle$ , platí-li pro její hustotu pravd podobnosti vztah [32]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{pro } x \in \langle a, b \rangle \\ 0, & \text{jinde} \end{cases} \quad (73)$$

Distribu ní funkce

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{pro } x \in (a; b) \\ 1 & \text{pro } x \geq b \end{cases} \quad (74)$$

D lefitým p ípadem rovnom rného rozd lení jsou ísla rovnom rn rozd lená na intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Toto rozd lení je poufíto v prost edí Matlab a je generováno p íkazem *rand*.

### Normální (Gaussovo) rozd lení

Náhodná veli ina  $X$  má normální rozd lení  $N(\mu, \sigma^2)$  s parametry ( $-\infty < \mu < \infty$ ) a ( $\sigma > 0$ ), platí-li pro její hustotu pravd podobnosti vztah [32]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < \infty \quad (75)$$

Funkce hustoty je symetrická kolem bodu  $\mu$ , cofl je zároveň střední hodnota. Tvar je závislý na  $\sigma$ . D lefitým p ípadem je normované normální rozd lení  $N(0, 1)$ . Toto rozd lení je v prost edí Matlab pod p íkazem *randn*.

### Logaritmicko-normální rozd lení

Náhodná veli ina  $X$  má log-normální rozd lení  $LN(\mu, \sigma^2)$ , platí-li pro její hustotu pravd podobnosti vztah

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} & \text{pro } x > 0 \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (76)$$

kde pro parametry  $\mu$  a  $\sigma$  platí ( $-\infty < \mu < \infty$ ) a ( $\sigma^2 > 0$ ).

### Weibullovo rozd lení

Náhodná veli ina  $X$  má Weibullovo rozd lení  $W(a; b)$ , platí-li pro její hustotu pravd podobnosti vztah



$$f(x) = \begin{cases} \frac{bx^{b-1}}{a^b} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} & \text{pro } x > 0 \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (77)$$

kde pro parametry  $a$  a  $b$  platí ( $a > 0$ ) a ( $b > 0$ ).

### Exponenciální rozdělení

Náhodná veličina  $X$  má exponenciální rozdělení  $\text{Exp}(\lambda)$ , platí-li pro její hustotu pravděpodobnosti vztah

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{pro } x > 0 \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (78)$$

kde pro parametr  $\lambda$  platí ( $\lambda > 0$ ).

### Poissonovo rozdělení

Náhodná veličina  $X$  má Poissonovo rozdělení, platí-li pro její hustotu pravděpodobnosti vztah

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} & \text{pro } x = 0, 1, 2, \dots \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (79)$$

kde pro parametr  $\lambda$  platí ( $\lambda > 0$ ).

### Paretovo rozdělení

Náhodná veličina  $X$  má Paretovo rozdělení, platí-li pro její hustotu pravděpodobnosti vztah

$$f_{par}(x) = \begin{cases} \frac{\alpha x_0^\alpha}{x^{\alpha+1}}, & x \geq x_0 \\ 0 & x < x_0 \end{cases} \quad (80)$$

kde pro parametr  $\alpha$  a  $x_0$  platí ( $\alpha > 0$ ) a ( $x_0 > 0$ )

### Deterministické rozdělení

Náhodná veličina  $X$  má deterministické rozdělení dané distribuční funkcí

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x < x_p = 1/\lambda \\ 1 & x \geq x_p = 1/\lambda \end{cases} \quad (81)$$

kde pro parametr  $\lambda$  platí ( $\lambda > 0$ ). Deterministické rozdělení předpokládá pravidelné příchody nebo pravidelnou obsluhu.