

- [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 %

#### e-éné granty

- [10] KREJÍ, J. Vliv ru-ení na IPTV p es xDSL, 08--08, CTU CTU0802613

## 9. OSTATNÍ PUBLIKACE

### Publikace v recenzovaných asopisech

- [11] KREJÍ, J., LAFATA, P. Sou asné a budoucí mofnosti e-ení p ístupové síť 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 %

### Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [12] KREJÍ, J. IPTV ve výuce. In *Pedagogický software 2008*. eské Bud jovice: Scientific Pedagogical Publishing, 2008, s. 301-303. ISBN 80-85645-59-9. Podíl autora 100 %
- [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 %
- [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 %
- [15] KREJÍ, J., RADOSTA, J., ZEMAN, T. Vhodné metody pro stanovení kvality obrazového signálu digitální televize ve výuce. In *International Workshop wRTT 2009*. Praha: eské vysoké u ení technické v Praze, 2009, s. 0127\_0040. ISBN 978-80-01-04411-7. Podíl autora 34 %
- [16] KREJÍ, J., ZEMAN, T. Modernizace výuky v oblasti digitálního vysílání. In *wRTT 2010 Proceedings*. Ostrava: V<sup>UB</sup> - TUO, FEI, Katedra elektroniky a telekomunika ní techniky, 2010, s. 22-24. ISBN 978-80-248-2262-4. Podíl autora 50 %
- [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 %

#### e-éné granty

- [18] KREJÍ, J. Zavedení IPTV do výuky, 08--08, FRV 1301 G1
- [19] KREJÍ, J. Kvalita obrazového signálu digitální televize v p ístupové síti, 09--09, CTU CTU0914013
- [20] KREJÍ, J. Vhodné metody pro stanovení kvality obrazového signálu digitální televize, 09--09, FRV 1378G1
- [21] KREJÍ, J. Modernizace výuky v oblasti digitálního vysílání, 10--10, FRV G1 1786

## 10. SUMMARY

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 analyzed in detail. The new 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.

ESKÉ VYSOKÉ U ENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTA NÍ PRÁCI

eské vysoké u ení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra telekomunika ní techniky

**Ing. Jaroslav Krej í**

## MODELOVÁNÍ IMPULSNÍHO RUŠENÍ V Ú ASTNICKÝCH P ÍPOJKÁCH

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

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, únor 2014

- [cit. 2014-02-21]. DOI: 10.1016/S0165-1684(01)00167-0. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168401001670>
- [5] TÝMÁK, 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.
- [6] KREJ Í, 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
- [7] KREJ Í, 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
- [8] ITU-T G.996.1. *Test procedures for digital subscriber line (DSL) transceivers*. ITU-T, 2001.
- [9] ZEMAN, T. *Impulsní rušení v systémech xDSL*. Praha, 2001. Diserta ní práce. VUT v Praze, FEL, Katedra telekomunika ní techniky.
- [10] ETSI WG TM6 TD 55 002t55a0. *Some Results of the Investigations of BT Impulse-Noise Data*. ETSI, 2000.
- [11] ETSI WG TM6 TD 55 002t55a0. *Some Results of the Investigations of BT Impulse-Noise Data*. ETSI, 2000.
- [12] ETSI TM6(98)10 TD 20 011t20, *Realistic Impulsive Noise Model*, ETSI 2001
- [13] JAREŤP., Modelování rušení a propustnosti p enosových systém xDSL. *Access server* [online], 2004. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004122201>
- [14] HLAVÁ , V., SEDLÁ EK, M., *Zpracování signál a obraz* . Vyd. 3. V Praze: eské vysoké u ení technické, 2009, 252 s. ISBN 978-80-01-04442-1.
- [15] KA MA ÍK, P., VUT V PRAZE, FEL. *P edná-ky: Signály a systémy*. Praha, 2008.

## 8. PUBLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K DISERTA NÍ PRÁCI

### Publikace v recenzovaných asopisech

- [1] KREJ Í, 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 %
- [2] KREJ Í, 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 %

### Publikace excerptované WOS

- [3] KREJ Í, 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 %
- [4] KREJ Í, J., ZEMAN, T. Diagnostics of Impulse Noise. In *TSP 2010 - 33rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing*. Budapest: Asszisztencia Szervez Kft., 2010, p. 411-416. ISBN 978-963-88981-0-4. WOS:000290635200086 Podíl autora 50 %
- [5] KREJ Í, 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 %

### Publikace ve sbornících mezinárodních konferencí

- [6] KREJ Í, 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 %
- [7] KREJ Í, 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 %
- [8] KREJ Í, J. ZEMAN, T. Analyze of Impulse Noise. In *Knowledge in Telecommunication Technologies and Optics - KTTO 2010*. Ostrava: VŤB - TUO, FEI, Katedra elektroniky a telekomunika ní techniky, 2010, p. 96-100. ISBN 978-80-248-2330-0. Podíl autora 50 %

do kterého, pak byly generovány modely impulsů na základě modelu dob mezi pulsy impulsů.

Z výše uvedeného výše uvedených úkolů vyplývá, že cíle disertační práce se podařilo bezchybně splnit.

### Shrnutí přínosů disertační práce a jejich praktické využití

Předložená disertační práce shrnuje výsledky dosažené v oblasti výzkumu a návrhu modelování impulsní rušení během autorova postgraduálního studia na Katedře telekomunikační techniky, FEL, VUT v Praze. Během této doby studia byla uskutečněna řada experimentů a měření v laboratorní kádri a v datové laboratorní společnosti Telefonica CZ a.s. Byly uskutečněny experimenty a měření úniku impulsní rušení v systému xDSL. Dalším experimentálním měřením bylo ověření chování ochranných mechanismů eliminující negativní dopad impulsní rušení. Popisovaný model impulsní rušení může sloužit při simulaci různých provozních stavů impulsní rušení vyskytujících se v systémech xDSL, a dále také může mít pozitivní dopad při hledání vhodného nastavení ochranných faktorů ústnické pájky. Prakticky navržený model umožní uje generování zvoleného typu rušení za účelem injekce do testovacích vedení pro testování reálných xDSL modemů proti rušení určitého typu. Doporučení zprůsob modelování a modely impulsů jsou podrobněji v kapitole 5.

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

### Další výzkum

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

- Dopad impulsní rušení na nově vyvíjené DSL systémy
- Porovnání mechanismů protichybové korekce založených na FEC a prokládní oproti opoťnému přenosu (retransmise)
- Modelování dalších typů rušení s ohledem na vyšší stupeň vyuffřívání metalických párů v kabelech a souběhu mnoha párů, které vyuffřívají vysoké kmitoťty.

## 7. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] NEDEV, N. H. *Analysis of the Impact of Impulse Noise in DSL Systems*. University of Edinburgh, 2003. PhD thesis. 168 s
- [2] 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.
- [3] 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>
- [4] 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

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Katedře telekomunikační techniky Fakulty elektrotechnické VUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Jaroslav Krejčí

Katedra telekomunikační techniky, FEL, VUT v Praze  
Technická 2, Praha 6, 166 27

Tržitel: Ing. Tomáš Zeman, Ph.D.

Katedra telekomunikační techniky, FEL, VUT v Praze  
Technická 2, Praha 6, 166 27

Oponenti: .....  
.....  
.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Telekomunikační technika v zasedací místnosti ..... Fakulty elektrotechnické VUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na dkanátu Fakulty elektrotechnické VUT v Praze, na oddělení pro vdu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....  
předseda komise pro obhajobu disertační práce  
ve studijním oboru Telekomunikační technika  
Fakulta elektrotechnická VUT, Technická 2, Praha 6

## 1. SOUASNÝ STAV ETNÉ PROBLEMATIKY

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

Přístup uživatelů k telekomunikačním službám je prostřednictvím přístupové sítě. Jednou z nejrozšířenějších technologií v přístupové síti je širokopásmový přenos dat po digitálních přístupových systémech označovaných xDSL. Výhodou xDSL systému je možnost využití stávající metalické infrastruktury. V současné době je nejrozšířenější variantou pro připojení běžných domácích a koncových uživatelů v České republice varianta ADSL2+ a VDSL2. Přenos dat v xDSL systémech je negativně ovlivněn různými rušivými vlivy. Mezi základní rušivé vlivy patří vzájemné ovlivňující pronikání signálu ze sousedních párů ve stejném kabelu či tzv. přeslechy na blízkém (FEXT) resp. vzdáleném konci (NEXT), mezi další rušivé vlivy patří vysokofrekvenční rušení (RFI) a impulsní rušení.

### Impulsní rušení

Impulsní rušení je velmi specifické rušení skládající se z náhodného výskytu energetických impulzů s náhodnou amplitudou a spektrálním obsahem. Bylo zjištěno, že impulsní rušení není stacionární náhodný proces. Proto nemá předem stanovenou výkonovou spektrální hustotu PSD. Nicméně je možné vytvořit pravděpodobnostní odhady spektrální hustoty tzv. pseudo PSD. Příčinou vzniku impulsního rušení v telefonních přípojkách jsou různé zdroje, které mohou být například: elektromagnetické vyzařování silnoproudých kabelů, vyzvednutí/zavěšení mikrotelefonu, rušení od domácích, kancelářských a průmyslových elektrických spotřebičů, apod. Pro impulsní rušení je také typická krátká doba trvání a napětíové 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 ovlivní výrazně zhoršení chybovosti xDSL systému. Je proto důležité znát statistickou povahu impulsního rušení, aby bylo možné zhodnotit jeho dopad na přenosové systémy.

### Rušení REIN, SHINE a PEIN

V oblasti standardizace byla velká pozornost věnována rušení REIN (Repetitive Electrical Impulse Noise), SHINE (Single High Impulse Noise Event) a PEIN (Prolonged Electrical Impulse Noise). Rušení REIN je definováno jako opakující se impulsní rušení skládající se z krátkých dávek rušení (bursts), kratších než 1 ms při konstantní frekvenci opakování (například: 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. Rušení SHINE bylo definováno jako individuální impulsní rušení s délkou většinou menší než 10 ms. Rušení PEIN je složeno z

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

Analýza hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení potvrdila jako nejvhodnější aproximaci hustoty pravděpodobnosti amplitudy pomocí modelu Henkel/Kessler. Na základě provedeného podrobného rozboru jednotlivých impulzů jsem stanovil dobu trvání impulzu 10,24  $\mu$ s. Tento předpoklad se potvrdil na základě provedené analýzy histogramem rozložení dob trvání impulzů.

Analýza dob mezi příchody impulzů byla realizována pomocí histogramu a hustoty pravděpodobnosti Poissonova toku a Paretova rozdělení. Výsledkem bylo zjištěno, že impulsní rušení se vyskytuje ve skupinách o době trvání 10 ms. V těchto intervalech bylo potvrzeno rozložení doby mezi příchody jako Poissonovský tok a deterministické rozdělení; Pareto rozdělení se nepotvrdilo.

Pro úmru na pozadí mezi impulsy se provedenou analýzou prokázalo, že se tento úmru blíží bílému Gaussovskému úmru a je možné ho bílým Gaussovským úmrem aproximovat.

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

Princip modelování nových impulzů 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, blíže v kapitole 6.

Princip modelování náhodné fázové funkce je založen na generování náhodné posloupnosti s příslušným pravděpodobnostním rozdělením. 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 impulzu, souhrnně v tab. 4.

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.

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

Náhodně modelování doby mezi příchody impulzů bylo modelováno pomocí Poissonova toku, deterministického a Paretova rozdělení. Pro modelování dob mezi příchody impulzů jsem použil transformaci rovnoměrného rozdělení na příslušné rozdělení pomocí metody inverzní transformace. Modelování celkového impulsního rušení bylo založeno na modelování úseku bílého Gaussovského úmru

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 protichybové korekce založených na FEC a prokládání oproti technice opakování přenosu.
- Modelování dalších typů rušení, zejména s ohledem na vyšší stupeň vyuffávání metalických párů v kabelech a souběhu mnoha párů, které vyuffávají vysoké kmitočty.

## 6. ZÁVĚR

Jádrem disertační práce tvoří problematika impulsního rušení v ústnických pásech. 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 příchydy 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 nastavit. Na základě těchto vlastností se model přiblíží 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 právně negativní dopad na přenos signálu prostřednictvím systému xDSL. Další předností tohoto modelu je možnost použít vlastní průběh spektrální hustoty výkonu, který bude model respektovat.

### Shrnutí cílů disertační práce

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

Ověření negativního účinku impulsního rušení jsem nejprve experimentálně ověřil na přenos multimediálního obsahu v systému xDSL. Potvrdilo se, že impulsní rušení má negativní dopad na přenos videosignálu a zvukového signálu v systému xDSL. Bylo realizováno experimentální měření ochranných prvků, které eliminují negativní dopad impulsního rušení. Nevýhodou těchto ochranných prvků spočívá ve snižování užitelného přenosové rychlosti a zpoždění v systémech xDSL. Vzhledem k tomu, že velký podíl impulsního rušení je od začátku, 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.

neopakujících se impulsního rušení ve skupině (burst). Trvání skupiny je mezi 1 ms a 10 ms. [7]

### Testování odolnosti proti impulsnímu rušení

Metodika testování je podrobně popsána v doporučení ITU-T G.996.1. Testování je provedeno v laboratorním prostředí na ústnickém vedení v systému xDSL za výskytu impulsního rušení a předepsanému přeslechovému rušení. Testování spočívá v injekci impulsního rušení a současném zjištění bitové chybovosti. V [8] jsou definovány dva testovací impulsy číslo 1 a číslo 2. Při testování může být odhadnuta pravděpodobnost během jakékoliv náhodně zvolené sekundy, že dojde k chybě. Výsledná pravděpodobnost výskytu chybových sekund ES by měla být menší než 0,14 %. [9]

### Cook v impulsu

Analytický model impulsního rušení navržený Johnem Cookem z British Telecom byl navržen na základě měření a analýz. ŠCook v impulsu je popsán v doporučení ITU-T G.991.1 pro testování systému HDSL. Během testování impulsního rušení v systému HDSL je zkušební Cook v impulsu injektován periodicky s opakovací kmitočtem 10 Hz.

### Model impulsního rušení Henkel/Kessler

V letech 1999 až 2000 byl zveřejněn model impulsního rušení Wernera Henkela a Thomase Kesslera [2], [10], [11]. Tento model zahrnuje hustoty pravděpodobností pro amplitudu, délku impulsu a dobu mezi příchydy impulsů (tzv. inter-arrival time) a modelování impulsů s příslušnými časovými a spektrálními charakteristikami.

Hustota pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení popsána modelem Henkel/Kessler má tvar [2]:

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

kde  $u_0$  je parametr udávající tvar funkce. Pro hustotu pravděpodobnosti doby trvání impulsu je dán následující vztah vycházející z log-normálního rozdělení [2]:

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

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 ústnickou stranu uživatele (xTU-R) nebo stranu ústnického multiplexoru DSLAM (xTU-C). Pro stranu uživatele je  $B=1$ .

### Modelování impulsů s příslušnými časovými a spektrálními charakteristikami

Statistické modelování spektra impulsu je navrženo v [3], kde návrh spočívá v generování spektra impulsního rušení prostřednictvím autokorelační funkce. Vychází se z vlastností výkonového spektra a autokorelační funkce použitím Fourierovy transformace podle vzorce [1]:

$$C_{xx}(f) = \mathfrak{F}[R_{xx}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3)$$

kde  $R_{xx}$  je autokorelační funkce a  $C_{xx}$  je výkonové spektrum. Normalizovaná autokorelační funkce vztah (4) je realizována exponenciálními funkcemi modulovanými kosinem, podle [1], [3]:

$$\ddot{R}_{xx}(\tau) = \sum_{i=1}^m \cos(2\pi\alpha_i\tau) e^{-\beta_i|\tau|} \quad (4)$$

kde  $\ddot{R}_{xx}(\tau)$  je aproximovaná autokorelační funkce impulsu,  $\tau$  je časové zpoždění, které by bylo v diskretním případě 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 prístupovou síť British Telecom nebo Deutsche Telekom.[1]

### Stanovení doby mezi příchody impulsů

Impulsní rušení se vyskytuje samostatně nebo ve skupinách. Výskyt těchto impulsů je považováno za události, které jsou navzájem nezávislé a mají stejné rozdělení doby výskytu. Hustotu pravděpodobnosti doby mezi příchody impulsů pro model HK vychází z Poissonova toku s exponenciální hustotou pravděpodobnosti [1], [2], [12]:

$$f_{\text{exp}}(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0 \quad (5)$$

kde  $\lambda$  je převrácená střední doba příchodu. Jako další možná varianta hustoty pravděpodobnosti byla navržena hustota pravděpodobnosti Paretova rozdělení. Po zjednodušení podle [6] dostáváme vztah:

$$f_{\text{par}}(t) = \alpha \left( \frac{t}{1 \text{ ms}} \right)^{-(\alpha+1)}, \quad \alpha = 1,5; \quad t \geq 1 \text{ ms} \quad (6)$$

kde  $\alpha$  je to parametr tvaru.

Doby mezi příchody impulsů byly analyzovány ze získaných dat z prístupových metalických sítí, výsledné hodnoty se pohybují v rozmezí od  $\sim 10^{-5}$  s až do  $\sim 10^5$  s. Modelování dob mezi příchody impulsů pomocí Markovova procesu obnovy bylo představeno v [4]. Pomocí Markovova procesu obnovy jsou doby mezi příchody rozděleny do intervalů  $T_i$ . Markovský model je uvažován jako Markovův řetězec, který je popsán pravděpodobnostní maticí přechodů mezi jednotlivými stavy. Byly navrženy dva modely a to Markovův -stavový model a dvou-stavový model pro modelování dob mezi příchody impulsů.

## 2. CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Existuje mnoho různých zdrojů rušení, které negativně ovlivňují prístupové vlastnosti metalické prístupové cesty. Jedním z těchto zdrojů je impulsní rušení, které je velmi specifické a má značný vliv na kvalitu služeb poskytovaných prístupovým xDSL systémem. Impulsní rušení nemusí zůstat dostupné prístupové

parametr uvedených v tab. 6, zde je možno uvažovat i navýšení hodnoty bílého Gauss. šumu na PSD = -130 dBm/Hz. Tab. 7 uvádí možnost generování typu rušení SHINE. jako možný typ rušení, při ověření správnosti nastavení parametrů prístupového proudu.

Tab. 5 Doporučené modelování pro méně zatížené prostředí

Elekt. spotřebič	Charakter doby mezi příchody	Parametry	Zpracované PSD	Modelování fázové číste	Bílý Gaussovský šum mezi impulsy
Vzorek KM I	Poisson v tok s exponenciálním rozdělením	$\mu = 8 \text{ ms}$ , Interval $T = 200 \text{ ms}$ (podinterval 10 ms), generování impulsů na celém podintervalu, celkem 20 podintervalů	PSD z provozního stavu rozložení	Weibullovo rozdělení $W(2,10)$	Bílý Gauss. šum PSD = -130 dBm/Hz
Vzorek KM II	Deterministické	$t_p = 1,02 \text{ ms}$ , Interval $T = 200 \text{ ms}$ (podinterval 10 ms), generování impulsů na 5 ms v podintervalu, celkem 20 podintervalů	PSD z provozního stavu vypnutí	Log-normální rozdělení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. šum PSD = -130 dBm/Hz
Vzorek KM III	Deterministické	$t_p = 1,02 \text{ ms}$ , Interval $T = 200 \text{ ms}$ (podinterval 10 ms), generování impulsů na 5 ms v podintervalu, celkem 20 podintervalů	PSD z provozního stavu vypnutí	Log-normální rozdělení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. šum PSD = -130 dBm/Hz

Tab. 6 Doporučené modelování pro velmi zatížené prostředí

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 podintervalů	PSD z provozního stavu rozložení	Weibullovo rozdělení $W(2,10)$	Bílý Gauss. šum PSD = -130 dBm/Hz (6130 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 podintervalů	PSD z provozního stavu vypnutí	Log-normální rozdělení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. šum PSD = -130 dBm/Hz (6130 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 podintervalů	PSD z provozního stavu vypnutí	Log-normální rozdělení $LN(4,196)$	Bílý Gauss. šum PSD = -130 dBm/Hz (6130 dBm/Hz)

Tab. 7 Doporučené modelování pro typ rušení SHINE

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 ze vzorku KM II provozního stavu vypnutí	Normální rozdělení $N(4,196)$	Bílý Gauss. šum PSD = -130 dBm/Hz
-------	-----------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------

asové okamžiky, kdy se impuls generuje, je záložen na způsobu modelování dob mezi příchody impulsů. Asový úsek, ve kterém se generují impulsy, je stanoven na přibližně asový interval 200 ms pro snadnější porovnání s naměřeným rušením. Tento asový interval je rozdělen po 10ms podintervalech. Generování impulsů v každém 10ms intervalu je možné nastavovat od 1 μs do 10 ms. Asový úsek 200 ms je možné v modelu mít na různých podintervalech i dodržení určitých podmínek. Přiklad modelovaného impulsního rušení s Poissonovým tokem a deterministickým rozdělením je na obr. 14. Na obr. 14 vlevo jsou impulsy modelovány s náhodnou fázovou funkcí s Weibullovým rozdělením  $W(2,10)$  a vpravo je použito modelování impulsů s normálním rozdělením  $N(4,196)$ .

### **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 záložen na zprůměrované spektrální hustotě výkonu PSD a modelování náhodné fázové funkce. Impulsy jsou pak generované na základě modelu dob mezi příchody impulsů, čímž vzniká výsledný asový průběh impulsního rušení. Ze zprůměrované 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 záloženo na pravděpodobnostním rozdělení, kterými jsou exponenciální, normální, log-normální a Weibullovo rozdělení. Každé toto rozdělení ovlivňuje asový průběh impulsů různě (tab. 4). Celkové modelování impulsního rušení je záloženo na vygenerování průběhu bílého Gaussovského šumu, do kterého jsou pak na základě modelování dob mezi příchody generovány impulsy.

Výhodou tohoto modelu oproti modelu Henkel/Kessler je zohlednění spektrální hustoty výkonu PSD reálných rušení způsobených elektrickými spotřebiči a náhodné modelování fázové funkce s přibližně 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. Asový úsek, ve kterém se generují impulsy, je rozdělen na podintervaly, aby byla zachována souvislost zjištěná při analýze reálných rušení. 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 určitého typu. Tab. 4 uvádí souhrnný vliv pravděpodobnostního rozdělení na tvar impulsu při modelování náhodné fázové funkce. Pro simulaci měření zaručeného prostředí doporučuji generování impulsního rušení podle parametrů uvedených v tab. 5. Pro simulaci velmi zaručeného prostředí doporučuji nastavení

pásmo, ale především vede k narušení přenášených rámců a tím i k výskytu bitových chyb a ztrát paketů. Důsledkem toho je negativní ovlivnění kvality poskytovaných multimediálních služeb prostřednictvím xDSL systému. Při jiném impulsním rušení na ústnicích připojkách jsou různé: od vzniku rušení při vyzvánění telefonního přístroje, přes rušení elektrickými spotřebiči, atmosférické rušení z elektrických výbojů, vysokonapíňových vedení až po regulaci a spínání vyříděný výkon. Proto je nezbytné analyzovat charakter impulsního rušení tak, aby mohly být vytvořeny modely pro ověření dopadu impulsního rušení na přenosové systémy. Dominantní vliv na vysokorychlostní datové přenosy má impulsní rušení injektované do vedení v blízkosti uživatelského modemu. Proto jsou velmi častým zdrojem impulsního rušení zařízení, systémy a přístroje, které se běžně vyskytují v domácnostech. Proto je užitečné tato impulsní rušení analyzovat a na základě získaných analýz pak navrhnout optimalizovaný model impulsního rušení, který bude vycházet z reálných podmínek.

Pro řešení disertační práce jsem zvolil tyto cíle:

1. Provést měření impulsního rušení od vybraného souboru elektrických spotřebičů a prověřit jeho vliv na ústnicí připojky.
2. Analyzovat naměřené výsledky z pohledu spektrálního i asového rozložení.
3. Na základě získaných analýz vytvořit modely impulsního rušení, záložené na impulsích s definovaným výkonovým spektrem a náhodně vygenerovanou fází.
4. Modelovat rozložení doby mezi generováním impulsů.
5. Shrnout a vyhodnotit dosažené výsledky a nastínit směry dalšího výzkumu v dané oblasti.

### **3. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ A POUŽITÉ PROSTŘEDKY**

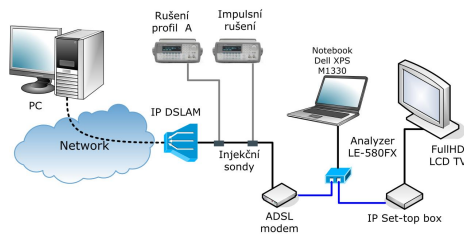
Jak bylo uvedeno v předchozích částech, velmi častým zdrojem impulsního rušení jsou přístroje, které se běžně vyskytují v domácnostech. Nejprve jsem se okrajově vnoval dopadu impulsního rušení na IPTV (IP televize).

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.

#### **Účinek impulsního rušení na IPTV**

Měřící pracoviště bylo navrženo pro pozorování vlivu impulsního rušení na televizní vysílání (IPTV) poskytované na ústnicí připojky ADSL2+. Schéma pracoviště je na obr. 1. Měřící pracoviště vychází z doporučení ITU-T G.996.1 a je modifikováno pro testování provozu IPTV televize. Délka ústnicího vedení byla 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 injektuje sondy k navázání rušení do ústnicí připojky, ADSL2+ modem a ústnicí 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 1 a rušící profil podle modelu A popsány v [13].



Obr. 1 Modelovací prostředí pro pozorování vlivu impulsního rušení na IPTV [6]

Závrhem k experimentu, pokud není nastavena ochrana proti impulsnímu rušení INP a prokládání (delay) a na přepojku přibíhá impulsní rušení, dochází k narušení rámců. Narušené rámce jsou identifikovány a poštávány tzv. ita i, které se nachází na uživatelském modemu i na ústřednickém multiplexoru DSLAM. Jestliže je nastavena ochrana proti impulsnímu rušení INP a prokládání (delay) a na přepojku přibíhá impulsní rušení, dochází také k narušení rámců, ale v těchto narušených rámcích jsou chyby detekovány a opravovány. Oprava a detekce chyb závisí na nastavených parametrech INP a prokládání (delay), na úhradové rezervě (tzv. noise margin), pořadovaných rychlostech a především na charakteristice impulsního rušení.

### Impulsní rušení testovaných vzorků

Z experimentu je patrné, že je nutné znát charakter impulsního rušení, aby byla na ústřednickém přepojce správně nastavena ochrana proti tomuto typu rušení, a aby byl zaručen bezchybný proud signálu na ústřednickém přepojce. Vzhledem k tomu, že velký podíl impulsního rušení je od záření, která se typicky vyskytují v domácnostech, (vyplývá z [9]), jsem se rozhodl pro měření a analyzování tohoto impulsního rušení a následně modelování impulsního rušení pro vybrané vzorky elektrických spotřebičů.

Celkový počet testovaných vzorků elektrických spotřebičů bylo 6. Testování bylo prováděno v několika krocích v závislosti na konkrétním záření. Prvním krokem bylo vždy měření rušení bez připojení záření zapojeného tak, aby se minimalizovalo zkreslení naměřených hodnot.

V tomto klidovém stavu nebylo pozorováno impulsní rušení na vstupu osciloskopu. Impulsní rušení bylo naopak zaznamenáno v různých provozních stavech elektrického spotřebiče. Použití vzorky elektrických spotřebičů a podmínky pro měření impulsního rušení jsou uvedeny v tab. 1. V textu budu dále používat označení vzorků z pohledu použité elektroniky.

wg implementovanou v prostředí Matlab s parametry  $PSD = 0.140 \text{ dBm/Hz}$ ,  $f_{sa} = 50 \text{ MHz}$ ,  $Z_c = 50 \text{ } \Omega$ .

### Modelování doby mezi impulsy

Na základě výsledků analýzy záznamů rušení jsem zvolil modelování doby mezi příchody impulsů pomocí Poissonova toku, deterministického a Paretova rozdělení, i když se Paretovo rozdělení neprokázalo. Pro modelování doby mezi příchody impulsů jsem využil možnost transformovat rovnoměrné rozdělení na pořadované pravděpodobnostní rozdělení pomocí metody inverzní transformace. Doby mezi příchody impulsního rušení mající Poissonovský tok s exponenciálním rozdělením jsou získány podle následujícího vztahu:

$$t = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-U) \quad (17)$$

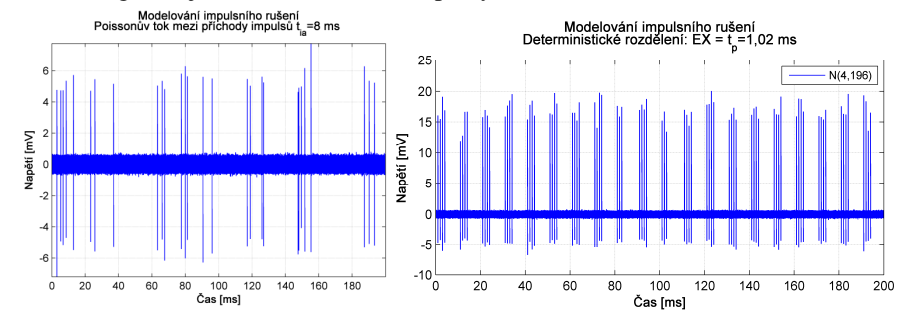
kde  $1/\lambda$  je střední doba mezi impulsy,  $U$  je náhodná proměnná s rovnoměrným rozdělením. Modelování doby mezi příchody pro Paretovo rozdělení je dáno vztahem:

$$t = \frac{t_0}{\alpha(1-U)} \quad (18)$$

kde  $\alpha$ ,  $t_0$  jsou parametry Paretova rozdělení,  $U$  je náhodná proměnná s rovnoměrným rozdělením. Doby mezi příchody impulsů mohou mít pravidelné příchody s deterministickým rozdělením. Pak 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. Doby mezi příchody impulsů jsou pak dány střední dobou příchodů  $t_p$ , což je střední hodnota  $EX[t]=1/\lambda$ .

### Výsledné modelování impulsního rušení

Modelování celkového průběhu impulsního rušení je založené na vytvoření bílého Gaussovského šumu s pořadovanou hodnotou PSD a do tohoto šumu se náhodně generují nové modelované impulsy.



Obr. 14 Modelované celkové průběhy impulsního rušení



6. Pomocí inverzní Fourierovy transformace ifft získám signál v časové oblasti.

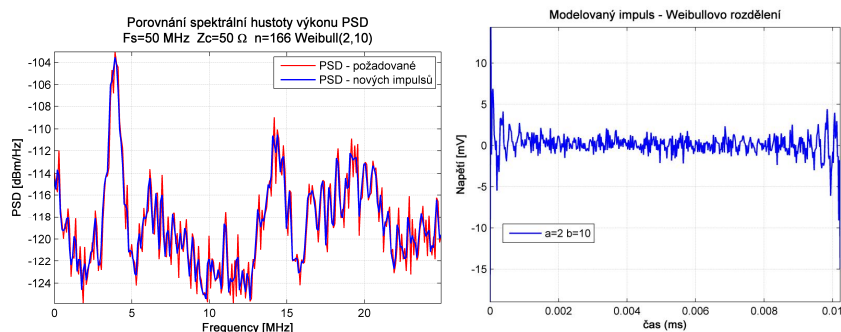
Dopad pravděpodobnostního rozdělení na tvar impulsu v časové oblasti je uveden v tab. 4.

Tab. 4 Vliv pravděpodobnostního rozdělení na modelování náhodné fázové funkce

Pravděpodobnostní rozdělení	Parametr	Ovlivnění
Exponenciální	$\mu$	zvýšením $\mu$ dochází ke zvýšení amplitudy impulsu
Log-normální	$\mu; \sigma^2$	zvýšením $\sigma^2$ dochází ke zvýšení amplitudy impulsu, změna $\mu$ se neprojeví
Normální rozdělení	$\mu; \sigma^2$	zvýšením $\sigma^2$ dochází ke zvýšení amplitudy impulsu na začátku impulsu, zvýšením $\mu$ se zvyšuje amplituda v ostatní části impulsu
Weibullovo rozdělení	a, b	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.

### Modelované impulsy

Generovaný impuls je modelován na základě získané zprůměrované spektrální hustoty výkonu PSD a modelováním náhodné fázové funkce s periodickým pravděpodobnostním rozdělením. V procesu modelování impulsního rušení nejprve ověřuji, zda je zachována zprůměrovaná spektrální hustota výkonu PSD u nově vznikajících impulsů. Ověření zprůměrované PSD je provedeno pro stejný počet impulsů, ze kterého původní zprůměrovaná PSD vznikla. Přiklad ověření zprůměrovaného PSD pro Vzorek KM I je na obr. 13 (graf vlevo). Nově modelované impulsy pro Vzorek KM I byly generovány náhodnou fázovou funkcí s Weibullovým rozdělením s parametry  $W(2,10)$  obr. 13 (graf vpravo).



Obr. 13 Graf vlevo: Ověření dodržení zprůměrovaného PSD u nově vygenerovaných impulsů Vzorek KM I pro  $n = 166$ . Graf vpravo: Modelované impulsy pro Vzorek KM I

### Modelování rušení na pozadí

Modelování rušení na pozadí tzv. bílého Gaussovského rušení představuje generování náhodného průběhu, který musí správně zastupovat chování signálu za přítomnosti aditivního bílého rušení s požadovanou oboustrannou spektrální výkonovou hustotou. Pro modelování bílého Gaussovského rušení využívám funkci

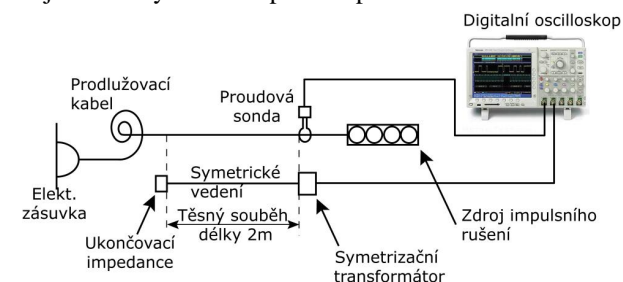
Tab. 1 Vzorky elektrických spotřebičů a stav záznamu impulsního rušení

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

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

### Metodika pracoviště

Metodika pracoviště je uvedena na obr. 2. Skládá se ze standardního prodlužovacího napájecího kabelu, který je v těsném souhledu se symetrickým telefonním vedením. Délka souhledu byla 2 metry (hodnota souhledu byla ověřena po etných experimentech a praktickými zkušenostmi, které dokazují, že pro délky přes 2 m a dále je další zvyšování dopadu impulsního rušení minimální).



Obr. 2 Metodika pracoviště pro diagnostiku impulsního rušení

Blízký konec symetrického telefonního kabelu je zakončen symetrickým transformátorem (balun - balanced, unbalanced), který je připojen na 50 Ω vstup



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.  $\alpha = 0,1 = 10\% / 100$ )

$$\mathbf{B}_{*j} = \text{find}(\mathbf{W}_{*j} < \max(\mathbf{D}_{*j}) \cdot \alpha) \quad (15)$$

Matrice  $\mathbf{Q}$  (16) je typu  $b \times b$  a obsahuje indexy impulsů, které mají podobné odhady spektrální hustoty výkonu (PSD).

$$\mathbf{Q} = (\mathbf{B}_{*1} \dots \mathbf{B}_{*b}) \quad (16)$$

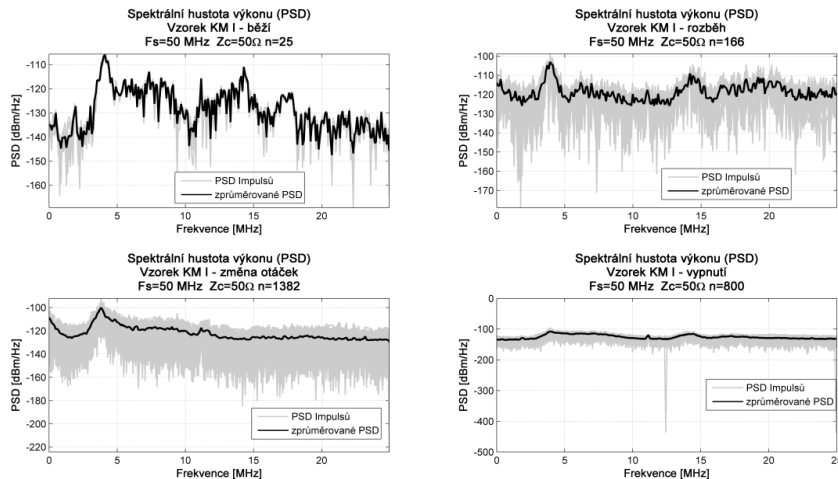
Zprůměrovaná spektrální hustota výkonu je pak vypočtena z impulsů s podobnými odhady spektrální hustoty výkonu pomocí následujícího vzorce:

$$C_{avg,N}(\omega) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k C_{N,i}(\omega) \quad (17)$$

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

### Výsledky nalezených zprůměrovaných spekter

Jako příklad uvádím na obr. 11 získané zprůměrované jednostranné spektrální hustoty výkonu (erný průběh) pro jednotlivé provozní stavy Vzorku KM I. Parametru  $n$  určuje počet impulsů s podobným průběhem PSD (šedý průběh).



Obr. 11 Získané zprůměrované jednostranné spektrální hustoty výkonu u Vzorku KM I

Je patrné, že impulsní rušení 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.

- Pomocí IFFT (inverzní rychlá Fourierova transformace) jsem získal zpřeměrované impulsy v časové oblasti.
- Nakonec jsem vygeneroval stejný počet impulsů, které doprovázely původní impuls v požadované 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.
- Modelování celkového průběhu impulsního rušení bylo rozděleno do částí:
  - Modelování doby mezi příchody impulsů (inter-arrival time)
  - Modelování bílého Gaussovského rušení mezi impulsy
  - Modelování impulsu na základě získání parametrů z bodu 3 v místech, kde má impuls vzniknout; na základě bodu 6a

### 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) nespojuje obecně s popisem v časové a frekvenční oblasti, protože náhodné signály mající stejnou hustotu pravděpodobnosti amplitud mohou mít rozdílné tvary v časové a různé 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. [14]

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 pořízen pomocí prostředí Matlab. Výpočet odhadu spektrální hustoty výkonu pomocí DFT ze signálu  $s(t)$  a jeho spektra  $S_s(\omega)$  a  $S_d(\hat{a})$  jeho vzorků  $s(kT_s) = s[k]$  pomocí vzorce: [37]

$$C_s(n\omega_0) \approx T_{Sa} C_d(n\omega_0 T_{Sa}) = T_{Sa} C_d(n\Omega_0) \approx T_{Sa} \frac{1}{N} |DFT\{s_N[k]\}|^2 = \frac{T_{Sa}}{N} |DFT\{s_{NT_{Sa}}[kT_{Sa}]\}|^2 \quad (7)$$

$$\Omega_0 = \frac{2\pi}{N} = \omega_0 T_{Sa} \Rightarrow \omega_0 = \frac{2\pi}{T_{Sa}} \frac{1}{N} = \frac{\omega_{Sa}}{N} \quad (8)$$

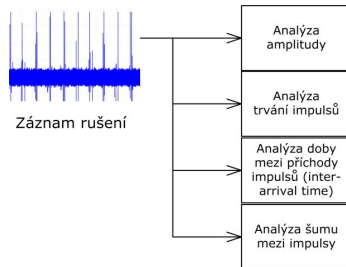
kde  $T_{Sa}$  je perioda vzorkování,  $C_d(\hat{a}) \approx 1/N |S_{(d),N}(\hat{a})|^2$  je spektrální hustota výkonu vzorků signálu,  $N$  je počet vzorků signálu v časové doméně,  $k$  je jeden ze vzorků,  $\omega_0$  je vzdálenost mezi vzorky ve spektru a DFT je diskretní Fourierova transformace.

### Použitá pravděpodobnostní rozdělení

Pro modelování impulsního rušení jsem použil následující pravděpodobnostní rozdělení. Rovnoměrné, deterministické, Paretovo rozdělení a Pissonovský tok jsem použil při modelování dob mezi příchody impulsů. Normální (Gaussovo) rozdělení jsem použil při modelování bílého Gaussovského rušení. Weibullovo, exponenciální, logaritmicke-normální a normální (Gaussovské) rozdělení jsem použil při modelování náhodné fázové funkce.

## 4. ANALÝZA IMPULSNÍHO RUŠENÍ

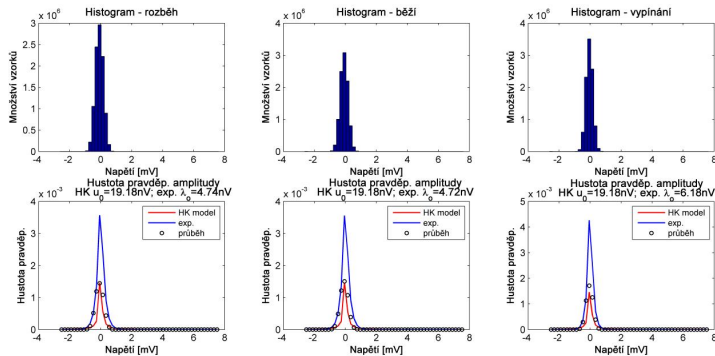
Při analýze impulsního rušení (obr. 4) z vybraných záznamů rušení jsem se zaměřil na analýzu hustoty pravděpodobnosti amplitudy, časové doby trvání impulsů a doby mezi příchody impulsů (tzv. intr-arrival time). Analyzoval jsem, zda impulsy zachycené v zaznamenaném rušení, mají hustotu pravděpodobnosti amplitudy a doby mezi příchody impulsů jako model Henkel-Kessler. Dále jsem provedl analýzu šumu na pozadí, který je mezi impulsy v jednotlivých záznamech rušení. Zjistil jsem, zda se jedná o bílý Gaussovský šum.



Obr. 4 Blokové schéma o Analýza zaznamenaného rušení

### Analýza amplitudy impulsního rušení

Analýzu amplitudy impulsního rušení jsem realizoval pomocí histogramu a hustoty pravděpodobnosti.



Obr. 5 Hustota pravděpodobnosti amplitudy o Vzorek KM II (provozní stavy: rozběh, běží, vypnutí)

Ze zaznamenaného rušení vytvářím hustotu pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení (průměrná hodnota) a z těchto hodnot odhaduji nejlepší aproximaci pomocí oboustranné hustoty pravděpodobnosti exponenciálního rozdělení  $f(x) = 1/2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda|x|}$  (exp. o modrá čára) a aproximaci pomocí nejlepšího odhadu modelu Henkel/Kessler (HK model o červená barva). Jako příklad uvádím analýzu hustoty pravděpodobnosti amplitudy pro Vzorek KM

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \dots & c_{1,b} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \dots & c_{2,b} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{N,1} & c_{N,2} & \dots & c_{N,b} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

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 podobným (ve smyslu, co nejvíce se sobě blíží) odhadem spektrální hustoty výkonu jsem použil obecný vzorec pro výpočet průměrné kvadratické odchylky. Upravený vzorec má následující tvar:

$$d_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (C_i(n) - C_j(n))^2}, \quad (10)$$

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

Vznikne matice  $\mathbf{D}$  (11) 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  $i=j$ .

$$\mathbf{D}(b,b) = \begin{pmatrix} d_{1,1} & d_{1,2} & \dots & d_{1,j} \\ d_{2,1} & d_{2,2} & \dots & d_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{i,1} & d_{i,2} & \dots & d_{i,j} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

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  $\mathbf{D}$  (vynechává se  $d_{i,i} = 0$  pro  $i=j$ ). Řádkový vektor  $\mathbf{M}_{\min}$  (12) obsahuje minimální hodnoty pro každý vektor matice  $\mathbf{D}$ . Matice  $\mathbf{M}$  (13) je typu  $b \times b$  a obsahuje řádkový vektor  $\mathbf{M}_{\min}$  ve všech řádcích. Matice  $\mathbf{M}$  je pomocná matice při hledání impulsů podobným odhadem spektrální hustoty výkonu.

$$\mathbf{M}_{\min} = (\min\{d_{*1}\}, \dots, \min\{d_{*b}\}) \quad (12)$$

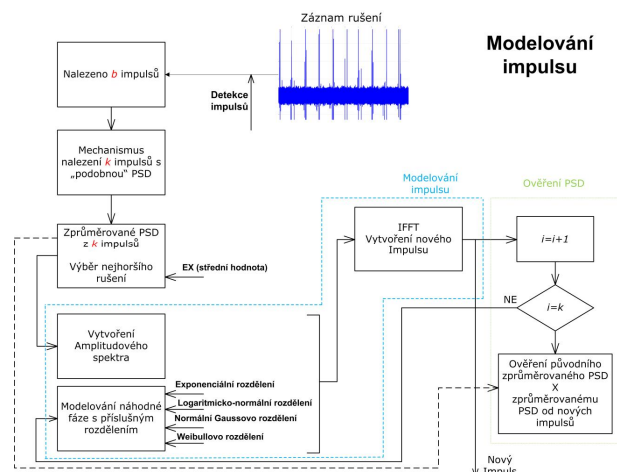
$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_{\min,1} \\ \vdots \\ \mathbf{M}_{\min,b} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Matice  $\mathbf{W}$  (14) je typu  $b \times b$ , vznikne odečtením matice  $\mathbf{M}$  od matice  $\mathbf{D}$ .

$$\mathbf{W} = \mathbf{D} - \mathbf{M} \quad (14)$$

Sloupcový vektor  $\mathbf{B}_{*j}$  (15) 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 (15) tak, že jsou

Pomocí inverzní Fourierovy transformace (IFFT) pak vzniká nový impuls v časové oblasti.



Obr. 10 Blokové schéma o modelování impulsu

Pro dodržení zprůměrované PSD u nových impulsů je provedeno ověření PSD na stejném počtu vytvořených nových  $k$  impulsů. Pro modelování výsledného impulsního rušení je pak část šovnění PSD vynechána a uplatňuje se jen blok šModelování impulsů.

### 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 použita 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 nad úroveň na pozadí a nastavení délky impulsu 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) normovaný na impedanci  $Z_c = 50 \Omega$ . Zprůměrovaná spektrální hustota výkonu je popsána v následujících odstavcích.

Matice  $C$  (9) tvoří matici odhadů spektrálních hustot výkonu (na impedanci  $Z_c = 50 \Omega$ ) typu  $N \times b$ , kde  $N$  reprezentuje délku impulsů tj.  $N = 512$  vzorků a  $b$  je počet nalezených impulsů, které v matici představují sloupcové vektory délky  $N$ .

II na obr. 5. Tab. 2 obsahuje ucelený pohled vhodných aproximací pro jednotlivé záznamy v tabulce hodnoty parametrů tvaru.

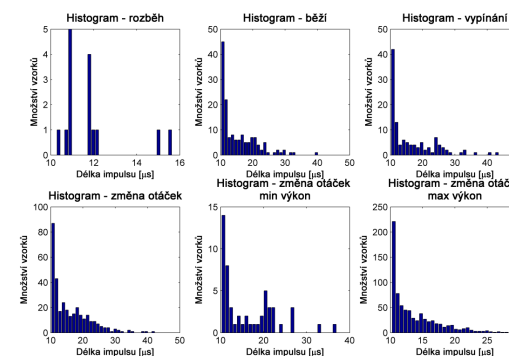
Tab. 2 Aproximace hustoty pravděpodobnosti amplitudy impulsního rušení

Elektrické spotřebiče	Situace záznamu impulsního rušení	Aproximace hustoty pravděpodobnosti amplitudy	Parametry
Vzorek KM I	Rozebíhání V provozu (mixování) Změna rychlosti otáček Vypínání	Henkel/Kessler model Henkel/Kessler model Expon. rozdělení Expon. rozdělení	$u_0 = 19,18 \text{ nV}$ $u_0 = 40,83 \text{ nV}$ $\lambda = 1,51 \text{ nV}$ $\lambda = 4,81 \text{ nV}$
Vzorek KM II	Rozebíhání V provozu bez zatížení Regulace otáček za běžného provozu Regulace otáček za běžného provozu na maximum Regulace otáček za běžného provozu na minimum Vypínání	Henkel/Kessler model Henkel/Kessler model Henkel/Kessler model Henkel/Kessler model Henkel/Kessler model Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18 \text{ nV}$ $u_0 = 19,18 \text{ nV}$ $u_0 = 19,18 \text{ nV}$ $u_0 = 19,18 \text{ nV}$ $u_0 = 19,18 \text{ nV}$ $u_0 = 19,18 \text{ nV}$
Vzorek KM III	V provozu (fénování) Vypínání	Henkel/Kessler model Henkel/Kessler model	$u_0 = 19,18 \text{ nV}$ $u_0 = 19,18 \text{ nV}$

Lze tedy prohlásit, že rušení způsobené komutátorovými motory je možné dobře aproximovat pomocí hustoty pravděpodobnosti amplitudy modelu Henkel/Kessler s parametrem  $u_0 = 19,18 \text{ nV}$ .

### Analýza doby trvání impulsů

Na základě provedeného podrobného rozboru jednotlivých impulsů jsem stanovil délku impulsu na  $N = 512$  vzorků (tj.  $10,24 \mu\text{s}$  doba trvání impulsu). Pro každý provozní stav Vzorku KM I, Vzorku KM II, Vzorku KM III jsem vytvořil histogramy znázorňující rozložení dob trvání impulsů. Obr. 6 zobrazuje příklad histogramu rozložení dob trvání impulsů pro Vzorek KM II.



Obr. 6 Histogramy rozložení dob trvání impulsů o Vzorek KM II

Z analýzy doby trvání impulsů odvozených rušení je možné považovat dobu trvání impulsu  $t = 10,24 \mu\text{s}$  (na základě výsledků z histogramů) jako výchozí hodnotu pro další použití v modelování impulsního rušení.

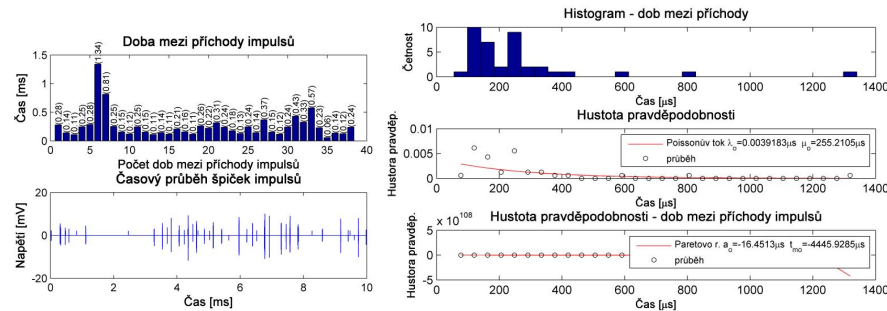
### Analýza dob mezi příchody impulsů (inter-arrival time)

Analýzu dob mezi příchody impulsního rušení jsem realizoval pomocí histogramu a hustotou pravděpodobnosti Poissonova toku a Paretova rozdělení.



Abych mohl ud lat tuto analýzu, provedl jsem rozd lení jednotlivých záznam ru-ení od Vzork KM I, KM II a KM III do 10ms interval . Rozd lení do intervalu 10 ms jsem uskute nil na základ podrobn j-ého zkoumání.

Obr. 7 zobrazuje p íklad analýzy doby mezi p íchody impuls ů pro Vzorek KM I na jednom 10 ms intervalu.

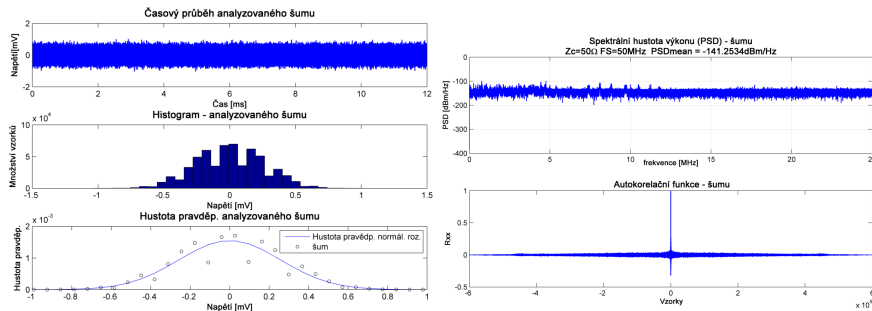


Obr. 7 P íklad analýzy doby mezi p íchody impuls ů pro Vzorek KM I (provozní stav ó b íř) pro jeden 10ms interval.

Výsledkem analýz dob mezi p íchody impuls ů je, že všechny záznamy impulsního ru-ení se vyskytují ve skupinách a mají exponenciální rozd lení Poissonova toku nebo deterministické 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. 3 je uveden p ehled získaných parametr ů analýzou pro dal-í modelování impulsního ru-ení.

Tab. 3 P ehled analýzy dob mezi p íchody impuls ů

Elektrické spot ebi	Charakter doby mezi p íchody	Parametr
Vzorek KM I	Poisson v tok s exponenciálním rozd lením	$\mu_0 \in \langle 193; 1235 \rangle \mu s$
Vzorek KM II	deterministické	$t_p \in \langle 0,24; 0,63 \rangle ms$
Vzorek KM III	deterministické	$t_p \in \langle 0,68; 1,02 \rangle ms$



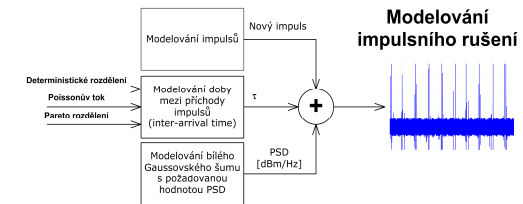
Obr. 8 Analýza -umu mezi impulsy

## Analýza -umu na pozadí

V zaznamenaných ru-eních od elektrických spot ebi (tab. 1) se mezi impulsy nachází -um na pozadí. Tento -um na pozadí jsem analyzoval z pohledu bílého Gaussovského -umu. Obr. 8 zobrazuje analýzu -umu vyskytující se mezi impulsy. Cílem analýzy -umu mezi impulsy bylo ov it, zda se ru-ení blíží bílému -umu. Výsledkem provedené analýzy hustoty pravd podobnosti amplitudy a spektrální hustoty výkonu -umu mezi impulsy se prokázalo, že je možné -um mezi impulsy aproximovat pomocí bílého Gaussovského -umu. St ední hodnota PSD -umu se pohybovala mezi 0138 dBm/Hz a 0142 dBm/Hz p i  $Z_c = 50 \Omega$ .

## 5. MODELOVÁNÍ IMPULSNÍHO RU ENÍ

P í modelování impulsního ru-ení jsem vycházel z postupu, který jsem stanovil v kapitole 3. Obr. 9 zobrazuje blokové schéma modelování impulsního ru-ení. Cílem je emulovat ru-ení blízké reálným podmínkám zejména pro úč ely testování odolnosti xDSL p ípojek za r ůzných situací.



Obr. 9 Blokové schéma ó modelování impulsního ru-ení

Proces modelování impulsního ru-ení je zahájen modelováním bílého Gaussovského -umu s pofladovanou hodnotou PSD [dBm/Hz] normovanou pro  $Z_c = 50 \Omega$  na asovém intervalu délky  $T = 200 ms$  (byl ponechán stejný asový interval jako doba zaznamenaného ru-ení). Dále jsou modelovány doby mezi p íchody impuls ů pomocí Poissonova toku, deterministického nebo Paretovo rozd lením. Po stanovení doby mezi p íchody je v p íslu-ných okamžicích generován impuls.

## Modelování impuls ů

P í modelování impuls ů vycházím ze získané zpr m rované spektrální hustoty výkonu a následně náhodn modelované fáze. Na základ toho pak pomocí inverzní Fourierovy transformace získám signál (impuls) v asové oblasti. Na obr. 10 je znázorn no blokové schéma modelování impuls ů. Ze zaznamenaného ru-ení se detekuje pomocí prahové úrovn ě impuls . Mechanismem, který bude dále podrobn vysv tlen, je nalezeno  $k$  impuls ů s podobným (ve smyslu, co nejvíce se sob blíffící) odhadem spektrální hustoty výkonu PSD. Z t chto  $k$  impuls ů se vytvo í zpr m rovaná spektrální hustota výkonu PSD, která je dále pouffita a upravena na amplitudové spektrum pro modelování nových impuls ů. Pro vytvo ení nového impulsu je modelována náhodná fáze s p íslu-ným rozd lením.