

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 543

ISSN 1213-418X

Jiří Mišurec

**TECHNOLOGIE
POWER LINE COMMUNICATION
PRO SMART GRIDS**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.

TECHNOLOGIE POWER LINE COMMUNICATION PRO SMART GRIDS

**TECHNOLOGY POWER LINE COMMUNICATION
FOR SMART GRIDS**

**TEZE PŘEDNÁŠKY
K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
TELEINFORMATIKA**



BRNO 2016

KLÍČOVÁ SLOVA

Power Line Communication, PLC, modely vedení pro PLC, kaskádní modely silnoprůdých vedení, Smart metering, datová komunikace po silnoprůdých vedeních

KEYWORDS

Power Line Communication, PLC, models of lines for PLC, cascade models of power lines, Smart metering, data communication for power lines

DOSTUPNOST ORIGINÁLU SPISU:

Ústav telekomunikací FEKT VUT v Brně
Technická 12
616 00 Brno

© Jiří Mišurec, 2016

ISBN 978-80-214-5402-6

ISSN 1213-418X

OBSAH

ÚVOD.....	6
1 KOMUNIKACE VE SMART GRIDS.....	6
1.1 Smart metering jako součást Smart Grids.....	8
1.2 Technology PLC (Power Line Communication)	8
1.3 PLC ve vysokonapěťových sítích	9
1.4 PLC v nízkonapěťových sítích.....	10
1.5 Výhody a nevýhody PLC	10
2 PODSTATA A MOTIVACE MODELOVÁNÍ PLC.....	11
2.1 Podstata modelování	11
2.2 Motivace modelování.....	12
3 MODEL Y SILNOPROUDÝCH VEDENÍ	12
3.1 Modely pro vnitřní vedení.....	13
3.2 Model vícecestného šíření.....	15
3.3 Model kaskádně zapojených dvojbranů	17
3.4 Přístupy k modelování - porovnání	19
4 NÁVRH ALGORITMU PRO URČENÍ TOPOLOGIE VEDENÍ.....	22
ZÁVĚR	24
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	25
ABSTRAKT	28

ŽIVOTOPIS

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc. (1961)

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací, Technická 12, 616 00 Brno

Tel. +420 541146984

E-mail: misurec@feec.vutbr.cz

VZDĚLÁNÍ

- 1980 gymnázium Brno, Tř. kpt. Jaroše 14, speciální zaměření matematika.
- 1985 **vysokoškolské vzdělání v „inženýrském“ studijním oboru „Radioelektronika“** specializace přístrojová technika na Fakultě elektrotechnické, VUT v Brně.
- 1991 **vědecká aspirantura** ve vědním oboru 26-07-9 „Radioelektronika“, VUT v Brně.
- 2007 **habilitační řízení** - docent pro obor teleinformatika, FEKT VUT v Brně

PROFESNÍ PRAXE

- 1986 – 1991 **pedagogický pracovník**, Ústav telekomunikací, FEKT VUT v Brně.
- 1991 – 1997 **akademický pracovník - asistent**, Ústav telekomunikací, FEKT VUT v Brně.
- 1997 – 2004 **technik-specialista**, Jihomoravská energetika Brno.
- 2004 – 2007 **akademický pracovník - asistent**, Ústav telekomunikací, FEKT VUT v Brně.
- 2007 – 2014 **akademický pracovník - docent**, zástupce vedoucího ústavu, Ústav telekomunikací, člen Akademického senátu FEKT, člen ekonomické komise AS, FEKT VUT v Brně.
- 2014 – dosud **akademický pracovník - docent, vedoucí ústavu**, Ústav telekomunikací, FEKT VUT v Brně

ODBORNÉ ZAMĚŘENÍ

- problematika datových přenosů, především pro dálkový sběr dat,
- analogová technika,
- číslicové zpracování signálů,
- počítačové modelování a simulace obvodů pro analogové a číslicové zpracování signálů.

Vědeckovýzkumná činnost v období 1987 - 1994 byla orientována na oblast analogových obvodů, zejména převodníků a stavebních bloků převodníků s moderními prvky. Obhájená dizertační práce byla na téma „Přesné převodníky napětí na kmitočty“. Od roku 1993 se zabývám počítačovou simulací. Nejprve jsem se zaměřoval především na počítačové modely transimpedančních operačních zesilovačů a na počítačové simulace různých typů obvodů s těmito prvky. Později pak modelování a simulace byla zaměřena i na nové moderní obvodové prvky – proudové a napěťové konvejeory a obvody s nimi. Od roku 1997 jsem aktivně pracoval pro firmu

Jihomoravská energetika a.s. Brno, kde jsem působil v oblasti zpracování dat a aplikacích telemetrických systémů v energetice. V tomto období jsem realizoval některé vyžádané přednášky týkající se dálkového sběru dat v energetice. Dále jsem spolupracoval na řešení specifických technických požadavků dané národním prostředím při vývoji sběrového telemetrického systému s firmou Landis&Gyr Zug (Švýcarsko). V té době jsem v praxi realizoval řadu projektů týkajících se nasazovaných systémů v JME Brno (např. Telemetrický systém DGC2000, systém krátkodobé prognózy XPRO- Landis&Gyr, systém dlouhodobé prognózy JLP- Landis&Gyr, systém datové komunikace energetických dat pro Operátora trhu s el. en. ČR, internetový systém prezentace energetických dat WWW100 aj.). Získané zkušenosti jsem po návratu na VUT zúročil zejména ve spolupráci s průmyslovými firmami, zabývající se vývojem zařízení pro energetiku, z nich nejvýznamnější jsou MEG A, měřicí aparáty Brno, AIS Brno, EON ČR. Hlavní oblastí zájmu je především datová komunikace pro dálkový sběr dat, řízení energetických sítí a nově problematika komunikací pro Smart Grids a Smart metering.

V pedagogické činnosti jsem zaměřen na oblast počítačového modelování a simulace analalogových a číslicových obvodů a dále na číslicové zpracování signálů. V současné době vyučuji předměty „Číslicové zpracování signálů“, „Počítačem podporované řešení inženýrských problémů“, „Analogová technika“, „Datová komunikace“.

ÚVOD

V současné době se do povědomí dostal nový fenomén – „smart“ („chytrý“, „inteligentní“), který zasahuje zejména do oblastí, které se potýkají s řízením plošně rozsáhlých technologických systémů či celků, ať se již jedná o systémy řízení výroby a dodávek energií a jejich spotřeby nebo telekomunikační systémy, či systémy, kde je zapotřebí mít k dispozici dostatečné množství informací o chodu provozované sítě a jejich koncových zařízeních. Pokud tento pojem vymežíme dalším pojmem „grids“, můžeme konstatovat, že pojem „Smart Grids“ je používán převážně v oblasti energetiky. Smart Grids či Inteligentní Sítě, jsou v tomto pojetí sítě, jejichž funkce spočívá v možnosti monitorovat odběr a dodávku elektrické energie a jejich toky, čímž umožňují regulaci výroby a optimální přenos energií k zákazníkům, řízení energetických sítí a v neposlední řadě i efektivně pracovat se zařízeními, umístěnými po celé trase sítě. Základním předpokladem funkčnosti „Smart Grids“ je zejména funkční oboustranný přenos dat se zařízeními, která se podílejí na řízení energetické sítě a poskytují i další uživatelské funkce.

„Smart Grids“ se tedy jeví jako spojení informačních a komunikačních technologií spolu s energetickými systémy na získání informací potřebných na vyvážení energetické nabídky a poptávky v reálném čase a hlavně na zajištění dodávek energie v požadované kvalitě.

1 KOMUNIKACE VE SMART GRIDS

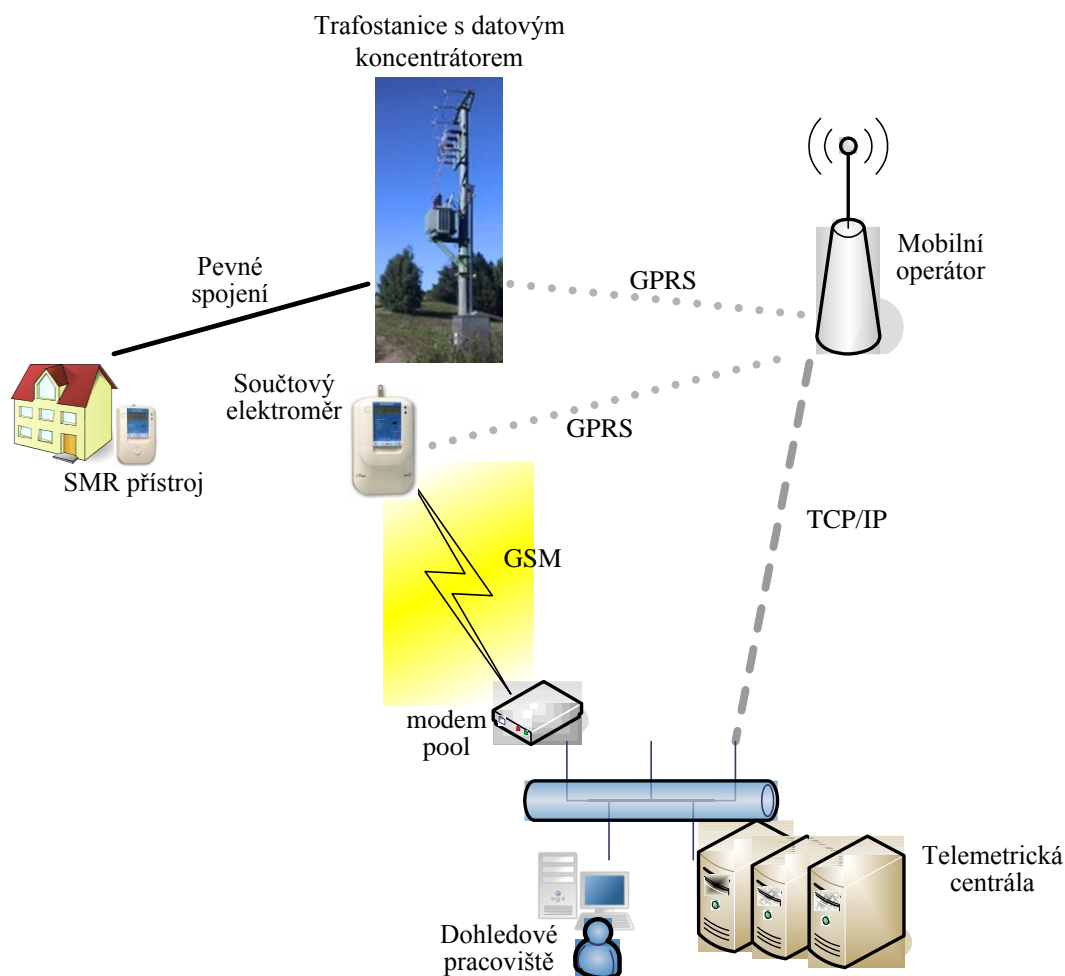
Z pohledu datových komunikací je povětšinou používána jedno až třístupňová architektura dálkového ovládání a měření [1]. Jednostupňová architektura se nejvíce hodí pro případ samostatného domu. Smart meter je ovládán přímo, bez využití koncentrátorů, například prostřednictvím technologií GSM (Global System for Mobile Communications), GPRS (General Packet Radio System), DSL (Digital Subscriber Line) apod. Tyto technologie jsou vhodné pro dálkový přenos dat do řídicí centrály.

Dvoustupňová architektura je vhodná pro nasazení do středně velkých oblastí. Struktura se vyznačuje použitím koncentrátorů, které shromažďují změřená data a ovládací stavy. Koncentrátory mohou komunikovat s měřidly umístěnými u spotřebitelů. Komunikace na krátké vzdálenosti využívá dostupné známé technologie.

Poslední možností komunikace je třístupňová architektura. Ta je vhodná pro nasazení do oblastí s mnoha měřidly. Vyznačuje se použitím několika koncentrátorů. Ve směru od uživatele k datové centrále jsou data v první fázi změřena pomocí chytrého měřidla. Dále, např. pomocí technologie RF, jsou data odeslána do druhého stupně, tedy do koncentrátoru. Následuje transport dat některou z technologií RF nebo PLC do dalšího stupně, tedy k následujícímu koncentrátoru, který je již vybaven rozhraním pro připojení některé z technologií GPRS, GSM, DSL a následně jsou data odesílána do datové centrály.

Je evidentní, že bude využité velmi široké spektrum dostupných komunikačních kanálů, jak je naznačeno na

Obr. 1.1. Systém datové komunikace musí být dostatečně robustní, musí mít dostatečnou šířku pásma na přenos dat, musí poskytovat dostatečnou kapacitu na ukládání dat, jejich správu a především musí poskytovat vysoký stupeň zabezpečení dat.



Obr. 1.1 Prostředky technologie datových komunikací ve „Smart Grids“.

Je evidentní, že jednotlivé měřidlo (např. systém AMR - Automated Meter Reading, viz dále), odesílající data například jednou za týden, nezpůsobí velké požadavky na přenosové kapacity transportních tras. To se také potvrdilo rozborem datové náročnosti u realizovaných pilotních projektů. Pokud se ovšem podíváme na budoucí využití technologií „Smart Grids“ v plném rozsahu, bude nárůst datové komunikace již velmi významný. Pro analýzu datové potřeby vyjdeme ze specifikace dat přenášená v systému AMM (Automatic Meter Management), která lze rozdělit na tři základní typy:

Typ 1. - data nesoucí informace o spotřebě daného přípojného místa. Směr toku těchto dat je od zákazníka k centrále. Periodu odesílání těchto dat můžeme uvažovat jednou za měsíc. Perioda odečtu se může měnit dle potřeb a zvyklostí.

Typ 2. - nečekané události, tzv. alarmy. Tento typ zpráv je odeslán nejčastěji ve směru od měřidla k datové centrále. Přenášené informace slouží pro oznámení nestandardního chování měřicích zařízení. Příkladem může být odeslání informací o neoprávněné manipulaci s ochranným krytem měřicího zařízení, systémová nebo jiná chyba. Dle zkušeností je zpráva generována v průměru jednou za týden.

Typ 3. – data pro ovládání. Systém chytrého měření předpokládá celkové nahrazení např. doposud hojně využívaného systému HDO. V budoucnu by mělo být možné ovládat spotřebiče přímo u spotřebitele. Směr toku dat je v tomto případě oboustranný.

Pokud bychom uvažovali například 40 tisíc připojených měřidel, k čemuž se některé pilotní projekty blížily, pak by očekávaný objem potřebných datových přenosů byl v rozsahu uvedeném v tab. 1.1.

Tab. 1.1 Odhad množství přenášených dat.

Typ zprávy:	informace o spotřebě	alarmy a upozornění	dálkové ovládání
Perioda odesílání:	12x za rok	52x za rok	min. 2x za den
Objem dat:	10 kB	1 kB	1 kB
Data za rok:	4,8 GB	2,1 GB	orientačně 14,6 GB

Údaje v tabulce jsou velmi orientační a nezahrnují další požadavky, které se při přenosu mohou objevit, jako je např. přenos dalších informací o stavu sítě, zařízení, zabezpečení přenosu, navázání spojení, opakované přenosy apod. I tak je patrné, že přenášené objemy dat se pohybují v řádech GB na úrovni 40 tis. měřicích jednotek, tedy ne z jednoho měřicího místa.

1.1 SMART METERING JAKO SOUČÁST SMART GRIDS

V souvislosti s rozvojem dálkové komunikace s měřidlem a jeho inteligencí je možné se setkat zejména s následujícími pojmy.

- **AMR** (Automated Meter Reading) – automatické odečty (jednosměrná komunikace, efektivní zajištění odečtů). Tento systém je především určen k odečtu dat o odebrané energii u zákazníka. Data jsou stahována do datové centrály, kde se dále zpracovávají. V podstatě jde pouze o dálkové automatizované odečty.
- **AMM** (Automatic Meter Management) – takto označované systémy jsou charakteristické obousměrnou komunikací, čímž se rozšiřují možnosti AMR systému o další funkce, jako například řízení tarifu, dálkové odpojení odběrného místa, nebo také dálkové nastavení maximálního příkonu (tzv. Demand-Side Management) či identifikace měřidla při jeho výměně.
- **AMI** (Advanced Metering Infrastructure) – automatické systémy pro řízení dodávek elektrické energie a automatický odečet (AMM). Systémy se navíc neomezují jen na odečet spotřeby – dodávky elektrické energie. Do celého systému lze zapojit také měření dodávek plynu, vody a tepla. U těchto systémů jsou přenášeny relativně velké objemy dat.

1.2 TECHNOLOGY PLC (POWER LINE COMMUNICATION)

Technologie PLC označuje způsob přenosu dat pomocí rozvodů energetické sítě. Nejedná se o technologii, která by byla výhradně předurčena pro systémy „Smart Grids“. Použití technologie PLC je v tuto chvíli zřejmě v oblasti tzv. „poslední míle“.

Hlavním problémem technologie PLC je, že elektrická silnoproudá vedení nejsou pro přenos informací - dat uzpůsobena. Na silnoproudém vedení se vyskytuje značné rušení způsobené především zařízeními zapojenými do sítě. Další značnou nevýhodou je malý dosah, způsobený velkým útlumem na vedení.

Pro systémy „Smart metering“ a „Smart Grids“ se relativně dobře jeví využití zejména úzkopásmového PLC. Přenosové rychlosti jsou v řádu jednotek a stovek kbit/s [3]. Úzkopásmové PLC je standardizované normou CENELEC EN 50065 a je rozdělené na následující pásma tab. 1.2:

Tab. 1.2 Kmitočtové rozdělení úzkopásmového PLC.

Pásmo	Kmitočtový rozsah	Popis
	3 a 95 kHz	Vyhrazeno pro dodavatele elektrické energie
A	9 a 95 kHz	Vyhrazeno pro dodavatele, se souhlasem i pro odběratele
B	95 a 125 kHz	Vyhrazeno pro odběratele
C	125 a 140 kHz	Vyhrazeno pro odběratele protokol ČSN EN 50065
D	140 a 148,5 kHz	

S rozvojem „Smart Grids“ narůstá význam alternativních komunikačních kanálů, a proto je v poslední době vidět intenzivní snahu prosadit standardizaci v oblasti PLC, kdy z nedostatku standardů vzniká velké množství vzájemně nekompatibilních zařízení, jsou problémy s elektromagnetickou kompatibilitou, technické problémy a celá řada dalších problémů, které brání většímu rozvoji. Specifikujme po stránce technické blíže tuto technologii:

- Ultra úzkopásmové (UNB) PLC - přenosová rychlost do 100 bps, pásmo 0.3-3 kHz, ASK modulace;
- Úzkopásmové PLC (NB) - VLF/LF/MF pásma (3-500 kHz)
 - Nízkorychlostní - jedna nosná, rychlost řádově jednotky kbps, FSK modulace;
 - Vysokorychlostní - více nosných, rychlosti od 10 kbps do 500 kbps;
- Širokopásmové PLC (BB) - HF/VHF pásma (1.8-250 MHz), rychlost jednotky až stovky Mbps.

Ultra úzkopásmové PLC je využito v systémech jako je Turtle System (extrémě pomalý, cca 0.001 bps) nebo TWACS (Two Way Automatic Communication System), maximálně 2 bity za jednu periodu základní harmonické složky síťového napětí, tedy 100 bps v Evropě a 120 bps v severní Americe).

Širokopásmové PLC bylo zpočátku uvažované jako možné všeobecné připojení pro poskytovatele Internetu. Od roku 2000 se průmysl začal více zajímat o využití BB-PLC v domácích aplikacích v oblasti Home Office.

1.3 PLC VE VYSOKONAPĚŤOVÝCH SÍTÍCH

S rozvojem „Smart Grids“ se očekává, že by mohly být využívány pro přenos dat i VN vedení. Existují PLC technologie, které fungují na AC i DC vysokonapěťových linkách až do 1100 kV v pásmu 40-500 kHz s rychlostí okolo stovek kbps, které vykazují poměrně velký dosah. V porovnání s nízkonapěťovými vedeními jsou vysokonapěťová vedení podstatně lepším komunikačním prostředkem díky nižšímu útlumu a lepšímu režimu, ve kterém jsou tato vedení provozována. Literatura uvádí, že dnešní modemy poskytují rychlost 320 kbps v 32 kHz pásmu s uváděným dosahem až 100 km. V USA se úspěšně podařilo otestovat BB-PLC na 69 kV lince dlouhé 8 km bez opakovačů s rychlostí 10 Mbps a odezvou přibližně 5 ms, což splňuje požadavky na „Smart Grids“. Dalším krokem v tomto projektu je zvýšení napětí na vedení na 138 kV a

zvýšení dosažitelné vzdálenosti bez opakovaců. Technologie PLC na VN vedeních je vhodná i pro vzdálenou detekci závad na vedení.

1.4 PLC V NÍZKONAPĚŤOVÝCH SÍTÍCH

V nízkonapěťové části rozvodné sítě se zpravidla nacházejí AMR/AMI/AMM systémy na měření spotřeby a systémy smartmetering. V případě AMR/AMI byly zpočátku používané UNB-PLC zařízení. Přestože UNB-PLC systémy mají velmi nízkou přenosovou rychlost UNB-PLC signál je možné přenášet i přes distribuční transformátory, což u technologie PLC pracujících na vyšších kmitočtech není zcela snadné. PLC signály v nízkonapěťovém vedení však mají poměrně značný útlum, a proto je použití BB-PLC v těchto sítích velmi omezené. Porovnání útlumů pro jednotlivé kmitočty a typy vedení jsou uvedené v tab. 1.3. Údaje uvedené v tabulce se mohou měnit v závislosti na použité kabeláži, počasí, zátěži atd. Nízkonapěťové sítě (do 1kV) patří spolu se sítěmi středního napětí (do 50kV) do distribuční části elektrické sítě. Tato část elektrické sítě má všeobecně pár typických druhů topologie. Radiální síť má tvar stromu, kde energie ze zdroje „vyzařuje“ postupně do vedení s nižším napětím až se dostane na místo spotřeby. Je běžná pro velké, mimoměstské oblasti s izolovanými odběrnými místy. Je nejlacinější, nejjednodušší, ale z hlediska zpoždění komunikace je nejhorší, protože na trase je mnoho přechodů mezi jednotlivými uzly, které jsou závislé na velikosti sítě. Kruhová topologie se většinou nachází v obydlených oblastech a charakterizuje ji vícenásobné propojení s jinými zdroji energie.

Tab. 1.3 Útlumy na vedení pro PLC technologii **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

útlum [dB/km]	$f=100\text{kHz}$	$f=10\text{ MHz}$
Nízké napětí	1.5-3	160-200
Střední napětí (vzdušné vedení)	0.5-1	30-50
Střední napětí (zemní kabelové vedení)	1-2	50-80
Vysoké napětí (vzdušné vedení)	0.01-0.09	2-4

1.5 VÝHODY A NEVÝHODY PLC

Výhody PLC technologie z pohledu využití ve „Smart Grids“ se dají shrnout do následujících bodů :

- PLC využívá existující infrastrukturu silnoproudých vedení a tedy náklady na umístění redundantních komunikačních kanálů (sloužící na ochranu a ovládání) jsou nižší.
- Rozvody často představují nejpřímější cestu mezi regulátory a inteligentními elektrickými zařízeními, v porovnání s veřejnými sítěmi s přepojováním paketů.
- Rozvody poskytují komunikační datovou linku, která je pod přímou a úplnou kontrolou rozvodné společnosti (výhoda zejména v zemích s neregulovaným telekomunikačním trhem).
- Množství PLC technologií, které mohou nalézt uplatnění ve „Smart Grids“. Tato výhoda je zároveň i nevýhodou, protože velké množství těchto technologií je vzájemně nekompatibilních a prozatím chybí standardizace jednotlivých technologií.

2 PODSTATA A MOTIVACE MODELOVÁNÍ PLC

Silnoproudé vedení je nutné považovat za alternativní přenosový kanál především z ekonomického hlediska. Hlavní využití PLC technologie v současné době lze rozdělit do těchto kategorií:

- Širokopásmové PLC je vhodný komunikační kanál uvnitř budov (vnitřní vedení) pro Smart Grid sítě, Smart Home a pro vybudování malých domácích počítačových sítí.
- Úzkopásmové PLC je vhodný alternativní komunikační kanál pro dálkové sběry dat, automatické odečty či řízení domácích spotřebičů.

PLC technologie je zatížena zejména těmito negativními vlastnostmi:

- časově a kmitočtově proměnný útlum vedení,
- závislost PLC modelů na lokaci a topologii,
- barevný šum pozadí,
- různé druhy impulzního rušení,
- elektromagnetická komptabilita, která limituje vysílací výkon,
- vícecestné šíření signálu a odrazy způsobené heterogenní strukturou s odbočkami a nepřizpůsobenými impedancemi,
- charakteristiky vedení se mění nepředvídatelně a náhodně.

2.1 PODSTATA MODELOVÁNÍ

Silnoproudé vedení ve své podstatě není uzpůsobeno pro datovou komunikaci vzhledem ke své kmitočtové a časové proměnnosti. Dále silnoproudé vedení představuje z hlediska technologie PLC velmi zarušené přenosové medium, především díky šumu na pozadí a impulznímu rušení [4]. Z těchto důvodů se velmi obtížně modeluje [5], [6].

Díky složitosti modelování silnoproudých vedení byly první pokusy o modelování založeny na statistické analýze odvozené z rozsáhlých měření [7], [8], [9] a [10]. V nedávné době se v mnohé literatuře [11], [12], [13], [14], [42] a [42] objevují deterministické přístupy, které se zaměřují na problematiku pochopení fyzické propagace signálu přes silnoproudé vedení.

Další podstatnou vlastností silnoproudých vedení je časově proměnné chování. Přenosová funkce silnoproudého vedení se může nečekaně změnit se změnou topologie, když se odpojují/připojují nebo zapínají/vypínají zařízení a spotřebiče připojené k síti či se mění topologie sítě při poruchách či údržbě sítě.

Statistický model nevyžaduje znalost topologie vedení, ale vyžaduje rozsáhlé měření. Zatímco deterministické modely vyžadují detailní znalost topologie vedení, ale nevyžadují žádné měření.

V poslední době se v publikacích [17], [42] a [16] začíná uvažovat s hybridním přístupem, který kombinuje dohromady různé způsoby modelování tak, aby výsledný model byl co nejvhodnější pro specifickou oblast využití.

2.2 MOTIVACE MODELOVÁNÍ

Různé studie [18], [19], [20], [21], [17] a [22] týkající se modelování silnoproudých vedení, popisují proměnnost kmitočtové charakteristiky způsobenou impedancí zátěže. Výzkum v uvedených zdrojích ukázal proměnnost kmitočtové charakteristiky, ale neukázal, které parametry ovlivňují odezvu kanálu, jaký je vliv impedance zátěže, délky vedení, délky odbočky a počtu odboček na odezvu kanálu. Z toho důvodu je jedním z cílů modelování určit vliv těchto parametrů na kmitočtovou charakteristiku kanálu.

Vhodný model PLC komunikace umožňuje testování a volbu vhodné modulace a kódovacího schématu. První teoreticky možný přístup k modelování je založený na parametrech získaných ze statistické analýzy a rozsáhlého měření. Druhý přístup vychází z fyzického modelu, který je založen na přesné znalosti parametrů kanálu.

První přístup je poměrně komplikovaný, jelikož výsledky měření se liší místem realizace. Tento přístup popisuje například publikace [10], která se zaměřuje na odhad parametrů modelu vícecestného šíření venkovních vedení na základě statistického výpočtu z naměřených hodnot. Výsledky nemohou být použity pro velký počet cest a model není založen na náhodném generování parametrů vedení, jak je tomu ve skutečné síti. Pro získání generátoru kanálu je v článku [23] realizováno statistické rozložení pro model v článku [10].

Druhý přístup definuje model založený na fyzických parametrech vedení a distribuční sítě, avšak jeho realizace je obtížná. Deterministické modely založené na teorii přenosového vedení jsou například popsány v publikaci [17]. V článku [16] byla provedena diskuze a návrh ke generování náhodné PLC topologie, z které lze deterministickým modelem určit odezvu kanálu.

Dosavadní měření a modely [7], [18], [24], [36], [10] a [25] uvažovaly silnoproudé vedení jako časově lineární kanál, kde změny odezvy kanálu se dějí jako důsledek připojování a odpojování elektrických spotřebičů. Tyto modely ovšem neuvažovaly periodickou časovou proměnnost některých elektrických spotřebičů, kvůli níž vykazuje silnoproudé vedení periodické časové kolísání, představující krátkodobé změny.

3 MODELÝ SILNOPROUDÝCH VEDENÍ

Pro vytvoření celého komunikačního systému PLC komunikace je nutné, kromě modelů vedení, modelovat zdroje rušení a uvažovat s modelem komunikačního systému zahrnující vysílač a přijímač komunikačního řetězce. Pro účely modelování lze PLC komunikační systém rozdělit na dílčí části:

- PLC komunikační model,
- Model silnoproudých vedení -
 - prostředí s vícecestným šířením signálu,
 - dvojbrany popsané kaskádními parametry,
- Model zdrojů rušení.

Složením těchto jednotlivých modelů vznikne model PLC komunikačního systému. Na základě simulací tohoto celého modelu s různými modely vedení, bude možné provést analýzu konkrétní silnoproudé sítě z hlediska možností nasazení různých kombinací PLC technologií,

modulací, kódování atd. tak, aby bylo dosaženo co nejlepších parametrů datového přenosu v uvedených systémech.

Existují dva hlavní přístupy pro modelování silnoproudých vedení [26]. První modeluje silnoproudé vedení jako prostředí s vícecestným šířením signálu. Parametry takového vedení jsou získány z topologie distribuční sítě nebo na základě měření. Druhá možnost modelování silnoproudých vedení je pomocí dílčích bloků – dvojbranů, popsanych kaskádními parametry, které charakterizují závislost vstupních a výstupních napětí a proudů pomocí dvojbranů.

3.1 MODELY PRO VNITŘNÍ VELENÍ

Modelování vnitřních vedení je poměrně složité, ale důležité právě z hlediska tzv. “poslední míle”. Problém modelování vnitřního vedení je možné spatřovat ve dvou oblastech. Topologie vnitřního vedení je méně homogenní v porovnání s ostatními částmi sítě, vnitřní vedení má více odboček a jeho chování je víceméně nepředvídatelné. Počet sekcí a jejich délka jsou neznámé a dále na vnitřních vedeních jsou spotřebiče s odlišnými charakteristikami, které ovlivňují odezvu kanálu. Z důvodů těchto proměnných vlastností je pro popis časového chování kanálu nutno uvažovat různé aspekty [37]:

Náhodné vlivy: Tyto vlivy jsou spojené s připojováním a odpojováním elektrických zařízení (změna pracovního stavu), tato změna je zcela náhodná v čase, nemá pravidelnou rozeznatelnost v čase a je spojena s lidskou aktivitou. Reprezentuje dlouhodobé změny či kolísání, v řádu minut nebo dokonce hodin. Každá změna pracovního stavu vyvolá nové fyzické parametry vedení a tímto musí být uvažován nový lineární periodický časově-proměnný systém (LPTV).

Periodické vlivy: V rámci těchto vlivů vykazuje vedení periodické změny synchronizované se síťovým napětím. Toto měřítko je modelováno jako LPTV systém. Časovou jednotkou je perioda síťového napětí 20 ms (odpovídá síťovému kmitočtu 50 Hz). Tato perioda může být rozdělena na sérii invariantních intervalů.

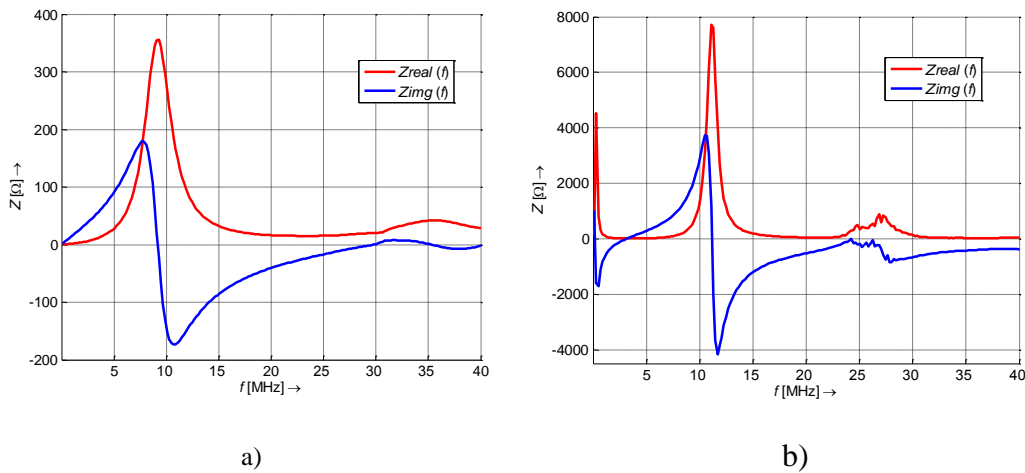
Invariantní (neměnné) vlivy: Na této úrovni jsou parametry vedení považovány invariantní. Pro modelování je uvažován lineární časově invariantní systém (LTI). Časový invariantní interval je volen podle koherentního času vedení, typicky v řádu stovek mikrosekund.

Lineární časově invariantní model vedení

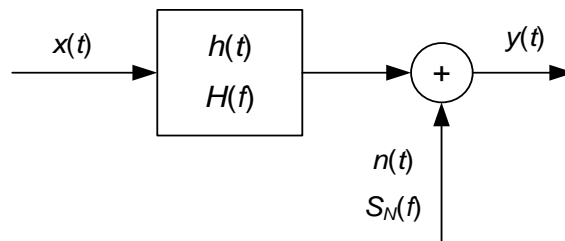
Pokud je možné zanedbat nelinearitu zátěže či se impedance zátěže nemění a šum je považován za stacionární, tak je možné pro modelování vnitřního vedení uvažovat LTI (Linear Time Invariant) systém. Tento přístup byl použit například v literatuře [28], [38] a [32]. LTI model je jednoduchý a řada měření prokázala jeho použitelnost. LTI model je použitelný především tam, kde kolísání a změny parametrů kanálů nejsou tak významné.

Měření uvedená v [28] a [379] ukázala základní vlastnosti zátěže spotřebičů, především impedance, která je převážně kmitočtově závislá a má charakter rezonančního obvodu. Tento předpoklad potvrdilo i měření a výsledky měření impedance zátěže jsou zobrazeny na Obr. 3.1.

LTI model vedení, zobrazený na Obr. 3.2, tvořený LTI systémem je modelován pomocí impulsní nebo frekvenční odezvy a přídavného náhodného šumu popsaneho spektrální výkonovou hustotou (PSD). Blokované vyjádření na Obr. 3.2 představuje dva LTI filtry, filtr kanálu a rušení.



Obr. 3.1 Měřená impedance zátěže: a) kapacitní člen (MCB10.2) PLC modemu, b) induktivní člen (ICU-438) PLC modemu.



Obr. 3.2 LTI model vedení popsáný dvěma filtry.

Lineární periodický časově-proměnný model vedení (LPTV)

Vlastnosti vnitřního vedení je proměnné v čase. Tato časová proměnnost je způsobena zejména funkcí připojených spotřebičů. Impedance těchto spotřebičů vykazují v síti kolísání synchronizované s periodou síťového napětí.

Změna impedance je povětšinou dvojí [37], [39]:

Skoková změna. Změna je vymezena změnami mezi dvěma stavy, jeden stav s velkou impedancí a druhý s malou impedancí.

Plynulá změna. V tomto případě je plynulejší přechod mezi stavy a obvykle je přechod mezi stavy realizován podle funkce sinus s periodou síťového napětí.

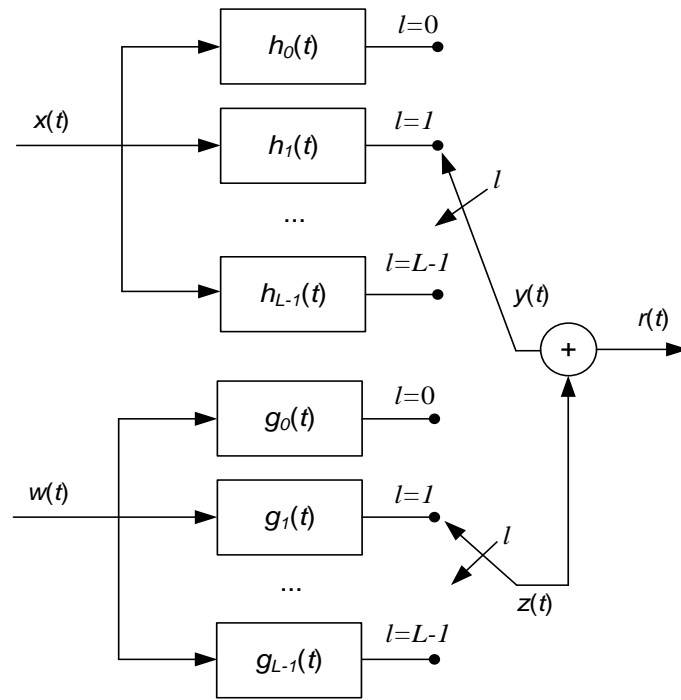
Z pohledu modelování lze LPTV systém popsat frekvenční odezvou:

$$H(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, t - \tau) \cdot e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (3.1)$$

kde $h(t, t - \tau)$ je impulzní odezva systému, která je periodická s časem t .

LPTV systém pro PLC lze zjednodušit, protože periodické změny charakteristik kanálu jsou velmi pozvolné [40], [32], a systém lze reprezentovat sérií invariantních intervalů popsáných LTI systémem. Na

Obr. 3.3 je zobrazen model LPTV systému. Struktura obsahuje dvě banky filtrů, jedna pro kanál a druhá pro rušení, které jsou cyklicky přepínány a každá banka představuje invariantní interval.



Obr. 3.3 LPVT systém.

Většina literatury [28], [41], [15], [43], [31], [32], [16]], [44] a [32] uvažuje pouze LTI odezvu pro PLC kanál a ignoruje časovou proměnnost vedení. Přesnější model pro PLC vedení je pak založen na LPTV systému.

3.2 MODEL VÍCECESTNÉHO ŠÍŘENÍ

Silnoproudé vedení je také možné považovat za vícecestný kanál. Vícecestné šíření způsobují impedančně nepřizpůsobené odbočky vedení. Model využívá „klasický“ náhradní model silnoproudého vedení **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je popsán známými vztahy a není nutné je zde uvádět.

Odrazy

Pokud se impedance zátěže Z_i liší od charakteristické impedance vedení Z_C , $Z_i \neq Z_C$, na vedení se vyskytnou odrazy a způsobí vícecestné šíření signálu. Nepřizpůsobení zátěže způsobí, že část signálu se odrazí zpět a vypočtený činitel odrazu je pak uvažován při výpočtu velikosti odraženého signálu [37].

Přenosová funkce prostředí s vícecestným šířením

Silnoproudé vedení vykazuje značné nehomogenity, které se projevují odrazy, vícecestným šířením a tedy vícenásobným příjmem signálu. Na Obr. 3.4 je zobrazen model reprezentující vícecestné silnoproudé vedení. Přenášený signál ze zdroje $s(t)$ prochází k příjemci $r(t)$ přes N různých cest. Každá cesta i je definována určitým zpožděním τ_i a faktorem útlumu C_i . Poté lze silnoproudé vedení popsat impulzní odezvou $h(t)$:

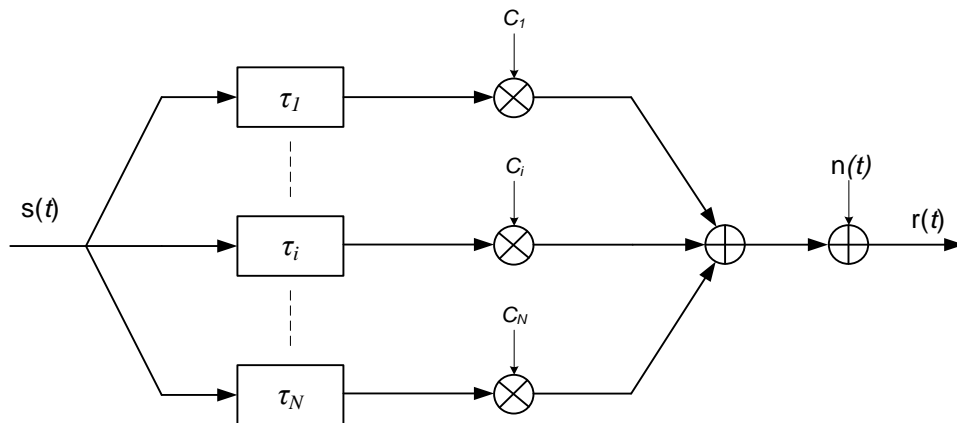
$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \delta(t - \tau_i) \Leftrightarrow H(f) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}. \quad (3.2)$$

Výslednou přenosovou funkci lze modelovat jako prostředí s vícecestným šířením signálu:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, l_i) \cdot e^{-j2\pi f \tau_i}, \quad (3.3)$$

kde g_i je váha cesty reprezentující odrazy a faktory přenosu podél cesty.

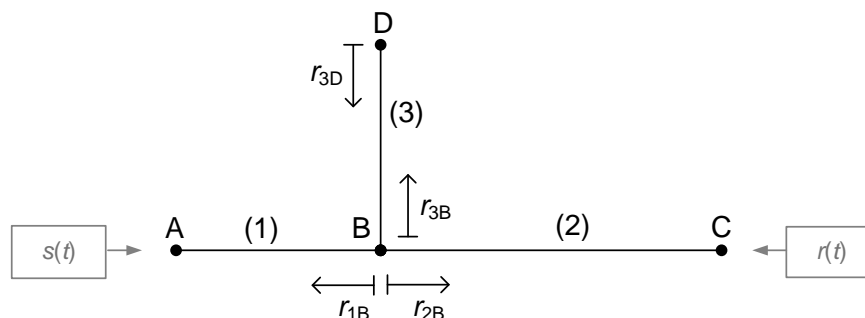
Dosažením útlumu vedení $A(f, l_i)$ dostáváme výslednou přenosovou funkci modelu silnoproudého vedení. Přenosová funkce vedení zahrnuje charakteristické parametry vedení, útlum, proměnné impedance a vícecestné šíření signálu **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Dále jsou superponovány různé druhy rušení $n(t)$, viz Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Modelování silnoproudého vedení vícecestným šířením.

Model vícecestného šíření při známé topologii

Impedanční nepřizpůsobení a nespojitosti vedení způsobují odrazy signálů a tím i vícecestné šíření. Na Obr. 3.5 je silnoproudé vedení s jednou odbočkou. Všechny nespojitosti jsou popsány koeficientem odrazu a pro zjednodušení předpokládáme, že vysílač a přijímač jsou impedančně přizpůsobené.



Obr. 3.5 Topologie distribuční sítě s jednou odbočkou.

Pro tuto topologii můžeme uvažovat signál jdoucí z vysílače $s(t)$ k přijímači $r(t)$ přímou cestou ($A \rightarrow B \rightarrow C$) a teoreticky nekonečně dalších cest, které vzniknou mezi A a C i -krát, viz Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Šíření signálu od vysílače k přijímači pro ukázkovou topologii.

Číslo cesty	Směr cesty	Váha cesty g_i	Délka cesty l_i
1	A→B→C	t_{1B}	l_1+l_2
2	A→B→D→B→C	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot t_{3D}$	$l_1+2l_3+l_2$
...			
N	A→B (→D→B) ^{N-1} →C	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot (r_{3B} \cdot r_{3D})^{(N-2)} \cdot t_{3D}$	$l_1+2(N-1)l_3+l_2$

Váhu cesty g_i a délku cesty l_i můžeme vyjádřit následujícími rovnicemi:

$$\begin{aligned}
 \text{Přímá cesta} \quad l_0 &= l_1 + l_2 \\
 (i = 0) \quad g_0 &= 1 + r_{1B} = t_{1B}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Další cesty} \quad l_i &= l_1 + 2il_3 + l_2 \\
 (i > 0) \quad g_i &= (1 + r_{1B})(1 + r_{3B})(r_{3D}r_{1B})^{i-1} r_{3D}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Přidáním další odbočky nebo jen nespojitosti by počet dalších cest exponenciálně vzrostl.

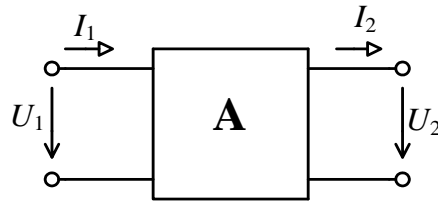
Model vícecestného šíření při neznámé topologii

Model vícecestného šíření je také možné použít na popis propagace signálu přes silnoprůdné vedení, pokud není známa topologie, ale jsou k dispozici parametry kanálu (přenosová funkce) získané na základě měření [32] či jiných algoritmů. Parametry modelu mohou být také náhodně vygenerovány bez znalosti topologie vedení na základě náhodných hodnot veličin v rovnici (3.3).

3.3 MODEL KASKÁDNĚ ZAPOJENÝCH DVOJBRANŮ

Silnoprůdné vedení je často složeno z několika různorodých úseků, proto je vhodné jej modelovat pomocí dvojbranů a specifikovat pomocí kaskádních parametrů. Kaskádní tvar rovnic (3.6) pro popis dvojbranů vychází z obecného dvojbranu na Obr. 3.6 [16], [37].

Primární parametry jsou rovnoměrně rozloženy podél celého vedení a s dostatečnou přesností lze použít pro výpočet soustředěné parametry, tzn., že parametry vedení jsou soustředěny pouze do jednoho bodu a napětí a proud jsou v jednom čase stejné ve všech místech vedení. Pomocí uvedených dvojbranů lze nahradit jak celé vedení, tak i jenom určitý úsek vedení. Pro modelování dalších vlastností či připojených zařízení je možné články zapojovat kaskádně za sebou a získat tak celý úsek silnoprůdného řetězce.



Obr. 3.6 Dvojbran pro určení kaskádních parametrů vedení.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

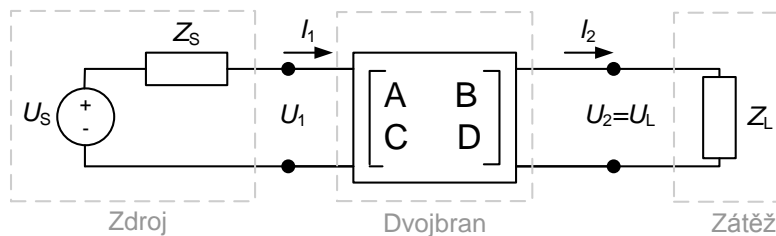
Kaskádní parametry $ABCD$, v energetice nazývané Blondelovy přenosové konstanty, v rovnici (3.6) získáme porovnáním s vlnovými rovnicemi v dle (3.7).

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ I_2 \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Přenosová funkce dvojbranu

Přenosovou funkci silnoprůdého vedení odvodíme z kaskádní matice dvojbranu (3.6) v zapojení se zdrojem a zátěží na Obr. 3.7. Přenosová funkce je určena jako poměr $\frac{U_L}{U_s}$:

$$H = \frac{U_L}{U_s} = \frac{Z_L}{AZ_L + B + CZ_L Z_s + DZ_s}. \quad (3.8)$$



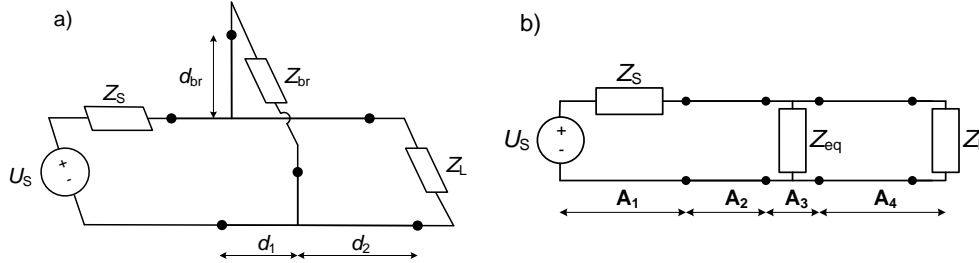
Obr. 3.7 Dvojbran v zapojení se zdrojem a zátěží.

Model vedení jako dvojbran

Přenosová funkce dvojbranu na Obr. 3.6 je daná rovnicí (3.8) a je určena pro vedení bez odboček. Budeme-li uvažovat ukázkový model na Obr. 3.8a s jednou odbočkou obdobně jak na Obr. 3.5 a tu nahradíme odpovídající impedancí Z_{eq} (Obr. 3.8b). V ukázkovém příkladu s jednou odbočkou na Obr. 3.8 jsou vysílač a přijímač impedančně nepřizpůsobené kabelu, na který jsou připojeny, tudíž zde bude docházet k odrazům a spotřebič na odbočce má impedanci Z_{br} . Impedanci odbočky vypočteme podle rovnice [16]:

$$Z_{\text{eq}} = Z_C \frac{Z_{\text{br}} + Z_C \tanh(\gamma_{\text{br}} d_{\text{br}})}{Z_C + Z_{\text{br}} \tanh(\gamma_{\text{br}} d_{\text{br}})}, \quad (3.9)$$

kde Z_{br} a γ_{br} jsou charakteristická impedance a měrný číselník přenosu pro odbočku. Obr. 3.8a zobrazuje vedení s jednou odbočkou a na Obr. 3.8b je vedení zjednodušeno.



Obr. 3.8 a) Vedení s jednou odbočkou, b) Zjednodušené vedení s jednou odbočkou.

Na Obr. 3.8b je vedení s jednou odbočkou zobrazeno jako vícenásobné zapojení elementárních dvojbranů, které jsou popsány maticemi \mathbf{A}_1 až \mathbf{A}_4 :

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 & Z_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1 d_1) & Z_1 \sinh(\gamma_1 d_1) \\ \frac{1}{Z_1} \sinh(\gamma_1 d_1) & \cosh(\gamma_1 d_1) \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{\text{eq}}} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_2 d_2) & Z_2 \sinh(\gamma_2 d_2) \\ \frac{1}{Z_2} \sinh(\gamma_2 d_2) & \cosh(\gamma_2 d_2) \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Výslednou kaskádní matici modelovaného vedení s jednou odbočkou získáme jako součin dílčích kaskádních matic:

$$\mathbf{A} = \prod_{i=1}^n \mathbf{A}_i, \quad (3.14)$$

kde n je počet dílčích částí popsaných kaskádní maticí.

3.4 PŘÍSTUPY K MODELOVÁNÍ - POROVNÁNÍ

Výhody a nevýhody obou přístupů modelování jsou uvedeny v Tab. 3.2 a Tab. 3.3

Tab. 3.2 Model vícecestného šíření – charakteristika.

Model vícecestného šíření	
Výhody	Nevýhody
Detailní znalost topologie vedení je v praktických situacích málo kdy známa, proto je výhodou tohoto modelu možnost modelovat bez detailní znalosti topologie vedení.	Tento přístup je založen na parametrech, které mohou být odhadnuty pouze na základě prvotního měření přenosové funkce vedení. Výpočetní náročnost pro odhad zpoždění, amplitudy a fáze roste s počtem cest. Pouhá nespojitost vedení způsobí výrazný nárůst počtu cest.

Tab. 3.3 Model kaskádních dvojbranů – charakteristika.

Model kaskádních dvojbranů	
Výhody	Nevýhody
Výpočetní náročnost je nezávislá na topologii. Model obsahuje všechny odrazy, vícecestné šíření i nespojitosti, zatímco u vícecestného šíření by bylo nutné každou cestu generovat samostatně.	Vlastnosti a charakter vedení musí být známe předem: topologie, typ kabelu a jeho charakteristiky, koncové impedance atd.

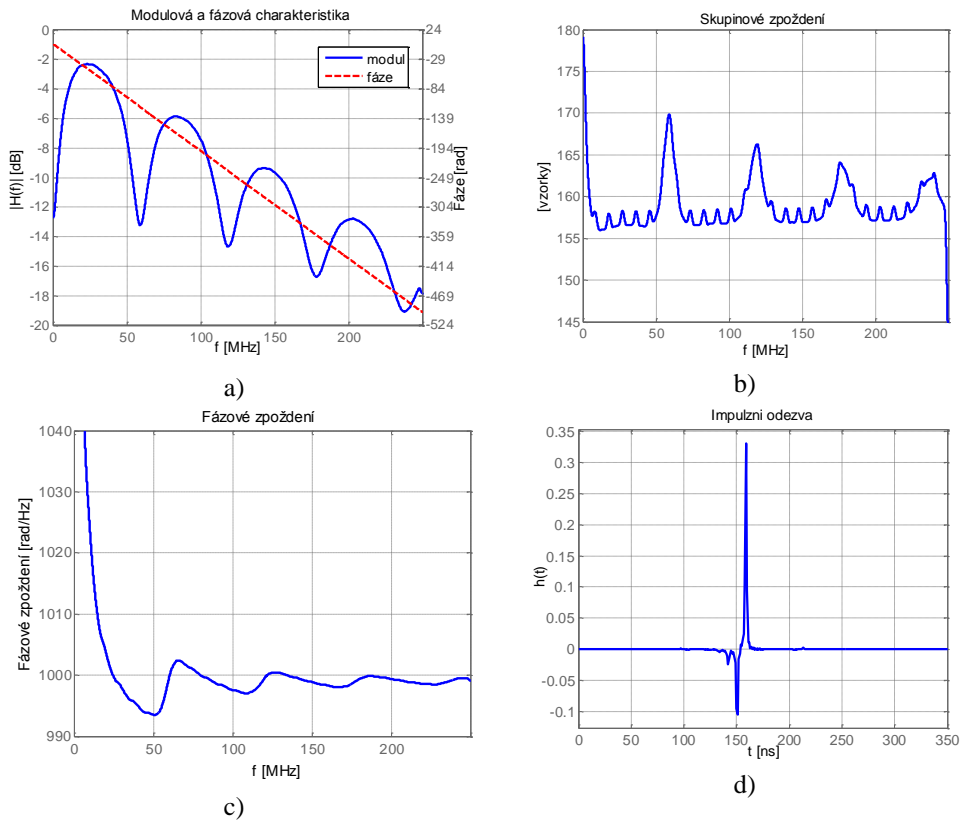
Přístup využívající modelu vícecestného šíření je vhodný pro modely s přesně definovanou topologií. Model realizovaný pro danou topologii je použitelný pouze pro tuto topologii nebo velmi podobnou, což je nevýhoda tohoto přístupu. Na druhou stranu model vedení s vícecestným šířením signálu se vyznačuje značnou přesností.

Přístup založený na kaskádních dvojbranech pro modelování přenosové funkce vyžaduje znát parametry topologie, kabelu a hodnoty impedance zátěže. Při znalosti těchto veličin jsou modely velmi přesné, vyznačují se svojí jednoduchostí a nevyžadují tak velké výpočetní nároky. Dílčí výsledky přístupů modelování byly publikovány v [50], [51], [46] a [47].

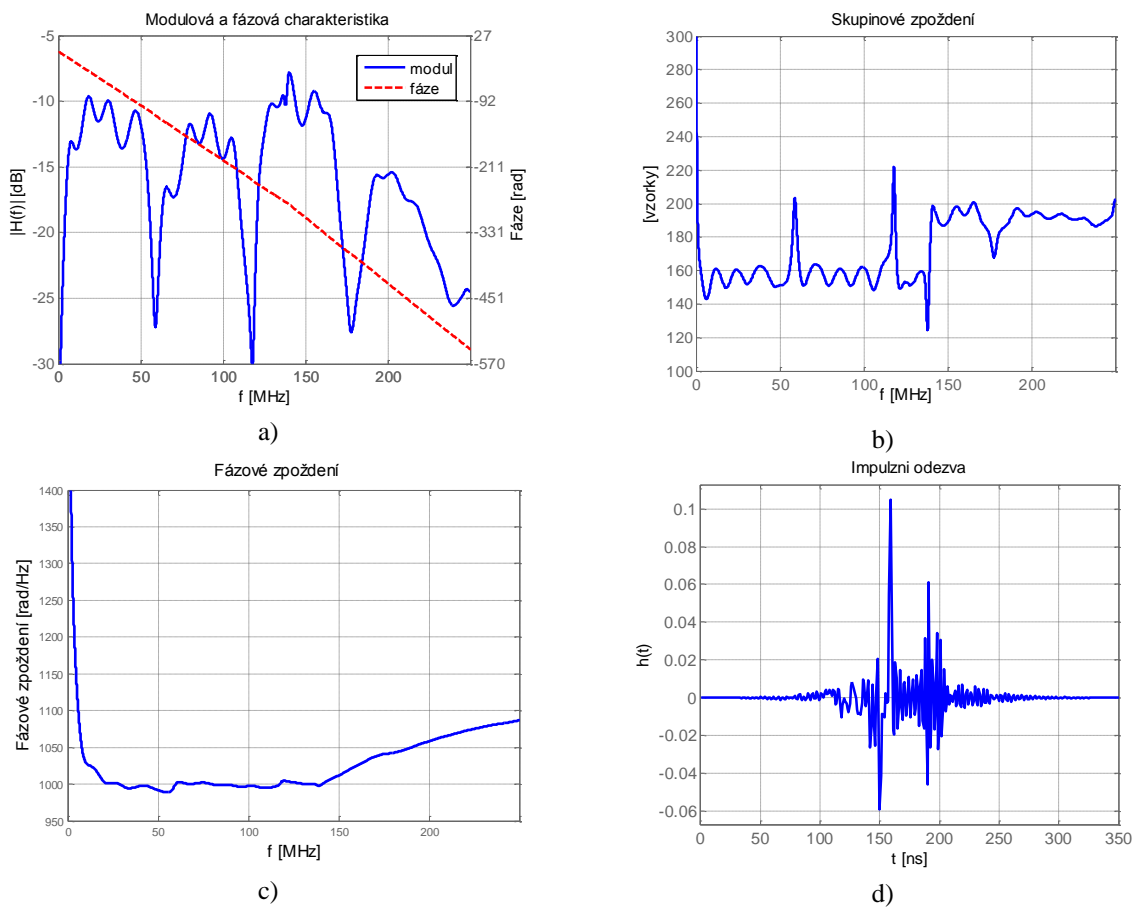
Na topologii zjednodušeného modelu byly provedeny simulace pro oba přístupy. Obr. 3.9 zobrazuje modulovou a fázovou kmitočtovou charakteristiku, skupinové zpoždění, fázové zpoždění a impulzní odezvu pro model vícecestného šíření. Obr. 3.10 zobrazuje stejné charakteristiky pro model kaskádních dvojbranů.

V obou průbězích modulové kmitočtové charakteristiky (Obr. 3.9a a Obr. 3.10a) jsou patrné lokální extrémy funkcí, které způsobily nepřizpůsobené odbočky na vedení. Fázová kmitočtová charakteristika byla u obou přístupů velmi podobná a dosahovala stejných hodnot.

Skupinové a fázové zpoždění bylo pro oba přístupy velmi obdobné s patrnými lokálními extrémy na stejných frekvencích. Pro ideální přenosový kanál je fázové zpoždění lineární. Linearitu fázového zpoždění lze popsat skupinovým zpožděním nebo obálkou tohoto zpoždění viz [52].



Obr. 3.9 Výsledky simulace vedení s jednou odbočkou pro model vícecestného šíření.



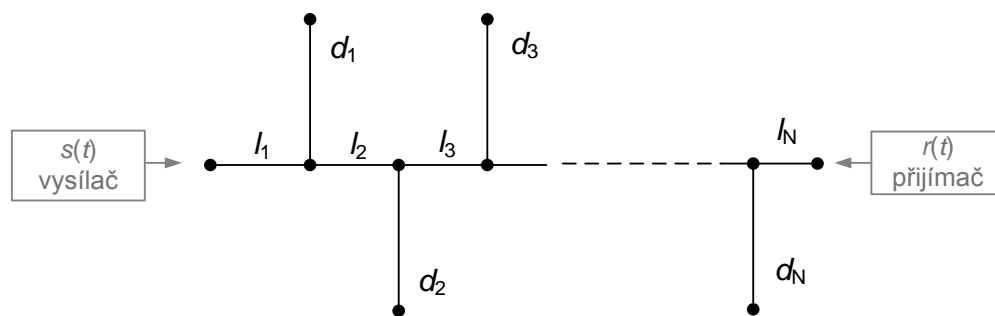
Obr. 3.10 Výsledky simulace vedení s jednou odbočkou pro model kaskádních dvojbranů.

4 NÁVRH ALGORITMU PRO URČENÍ TOPOLOGIE VEDENÍ

V reálné síti nikdy neznáme topologii distribuční sítě, jelikož spotřebiče se mohou připojovat a odpojovat zcela náhodně. Proto byly navrženy generátory přenosových funkcí pro venkovní a vnitřní vedení. Tento generátor pro venkovní vedení využívá statistického odvození vlastností vedení a následného modelování na základě pravděpodobnostních rozložení, kdy vstupními daty jsou délka a odhad velikosti rušení. Generátor pro vnitřní vedení je založen na náhodných parametrech pro určitý typ scénáře (velikost topologie).

Obdobný nástroj nazvaný „Power Line Analyzing Tool“ (iPLATO) prezentovaný v lit. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a představený poprvé na ISPLC'99 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** umožňuje odhad přenosové funkce kanálu a šumových poměrů a je možné ho implementovat jako real-time systém. iPLATO provádí odhad přenosové funkce nebo impulsní odezvy na základě vyslaného známého signálu z vysílače a analyzovaného na přijímací straně. Šumová analýza je založena na databázi změřených hodnot typických zdrojů rušení a následném porovnání.

U Digital Subscriber Line (DSL) systému je navrhnout podobný algoritmus pro odhad přenosové funkce a počtu odboček založený na druhé derivaci přenosové funkce **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Na základě kombinace těchto dvou přístupů byl navržen algoritmus pro odhad topologie vedení, aktuální přenosové funkce a šumových poměrů. Algoritmus integruje systém pro odhad kanálu, šumovou analýzu a následné vyhodnocení komunikační trasy.



Obr. 4.1 Komunikační model.

I. Zjištění aktuální přenosové funkce

Na straně vysílače i přijímače, viz

Obr. 4.1, je testovací aparatura pro zjištění přenosové funkce distribuční sítě. Je vytvořen testovací signál o známé spektrální hustotě výkonu (PSD) a známém frekvenčním rozsahu a obě komunikující strany tento signál znají. Testovací signál je vyslán a testovací aparatura na straně přijímače změřit tento signál a vypočítat aktuální přenosovou funkci vedení na základě známých parametrů testovacího signálu a změřených parametrů útlumu, rušení a zkreslení přijatého signálu.

Z měření přenosové funkce lze zjistit i odstup signálu od šumu a provést analýzu rušení na vedení. Analýza rušení je možná na základě databáze všech typů rušení získaných měřeními a

následným porovnáváním s výsledky algoritmu. Vylepšení přesnosti měření aktuální přenosové funkce a odstranění vlivu rušení je možné provést kombinací těchto metod:

- Provedení testování vícekrát a zprůměrování aktuální přenosové funkce pro redukci rušení.
- Provedení filtrace (medián, mean) aktuální přenosové funkce [55]. Filtrace mediánem je efektivní pro odstranění impulsního rušení. Mean filtr je efektivní pro odstranění Gaussovského bílého šumu.

II. Zjištění odbočky vedení

Přenosová funkce může být také získána na základě modelů vícecestného šíření nebo modelů kaskádních dvojbranů. Pokud je na vedení odbočka, tak impedanční nepřizpůsobení ovlivní přenosovou funkci. Na základě simulací bylo také zjištěno, že délka přímého vedení nemá vliv na tvar přenosové funkce a pozice odbočky neovlivní přenosovou funkci. Reálně je aktuální přenosová funkce porovnána s určenou hladinou a podle toho je rozhodnuto, zda je na vedení odbočka či ne. Jednou z metod pro určení odbočky vedení je metoda druhé derivace **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

III. Určení délky vedení

Pokud je zjištěno, že na vedení není odbočka, tak se určí délka vedení. Délka vedení se určí na základě testovací aparatury v daném bodě. Tímto je algoritmus ukončen s tím, že topologie je bez odboček.

IV. Odhad počtu odboček

Odhad počtu odboček a jejich délek je proveden na základě empirických hodnot nebo rozmístění sítě. V dané pozici je vypočtena přenosová funkce modelu pomocí kaskádně zapojených dvojbranů.

Dále existují dvě možnosti porovnání přenosové funkce modelu a aktuální změřené přenosové funkce. První možností je vypočítat chybu (mean-square error) mezi přenosovou funkcí modelu a aktuální změřenou přenosovou funkcí a druhou možností je vypočítat druhou derivaci přenosové funkce s určenými odbočkami a porovnat ji s přenosovou funkcí modelu kaskádních dvojbranů.

V. Odhad pozice odboček

Obdobně pomocí výše popsaných metod lze určit pozice odboček na vedení.

Zhodnocení návrhu algoritmu

Tento algoritmus umožní rychlou a efektivní analýzu a diagnostiku komunikační cesty distribučního vedení. Algoritmus odhadne topologie vedení a umožní určit šumové poměry na vedení. Představuje tak alternativu k vytvořeným generátorům pro venkovní a vnitřní vedení. Na základě znalosti topologie, přenosové funkce a rušení, které se neustále mění, lze měnit parametry komunikace.

ZÁVĚR

Myšlenka využití silnoprůdého vedení pro přenos dat není nová a v různých podobách existuje od samého počátku energetiky. Nově tato technologie nabývá na opětovném významu právě nyní, kdy se plně hovoří o „Smart Grids“, tedy chytrých sítích, nebo také sítích s určitou „inteligencí“. Jak se ukazuje, „Smart Grids“ nutně potřebují ke své funkci možnost komunikace nejen mezi měřicím zařízením či senzorem, ale v mnoha případech i mezi sebou. Nároky na komunikační cesty tak velmi výrazně stoupají a bude nutné hledat cesty, jak tyto požadavky uspokojit. Jednou z možných alternativ může být využití technologie PLC. V tomto případě je jistou výhodou, že rozvodné sítě vlastní distributoři elektrické energie, kteří budou „Smart Grids“ realizovat a využívat. Bohužel nedostatkem technologie PLC je v současné době příliš mnoho technických problémů, které brání širšímu nasazení a jsou proto upřednostňovány jiné technologie. Byly ukázány dva přístupy k modelování vedení – model s vícecestným šířením signálu a model s dvojbrany popsané kaskádními parametry. Dalším příspěvkem k této problematice je návrh vhodného algoritmu pro určení přesné topologie vedení, přenosové funkce a šumových poměrů na vedení. To je vhodné zvláště pro simulace, kdy nestačí pouze odhad přenosové funkce ze znalosti délky vedení nebo odhad přenosové funkce na základě velikosti topologie a náhodného generování parametrů.

Uvedený příspěvek je pouze výtah z celé řady publikací, které se touto problematikou zabývají a je teoretickým příspěvkem k řešení celé řady problémů, které prozatím brání širšímu využití této technologie.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOZUBÍK, Libor Centrální systém AMM v prostředí utilitní společnosti. In IBM Utility Seminar [online]. IBM: IBM Cororation, 2008 [cit. 2010-11-23]. Dostupné z WWW:<http://www-05.ibm.com/sk/events/presentations/resources/Centralni_system_A_MM_v_prostredi_utilitni_spolecnosti_Kozubik.ppt>.
- [2] SOOD, J.K., D. FISCHER, J.M. EKLUND a T. BROWN. Developing a communication infrastructure for the smart grid. IEEE Electrical power & energy conference, 2009. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5420809>>.
- [3] ZEMAN, Václav. Power Line Communication. Brno, VUT, 2010, 7, s. 3-34.
- [4] BABIC, M.; HAGENAU, M.; DOSTERT, K.; BAUSCH, J. Theoretical postulation of PLC channel model. *Deliverable 'D4' within Open PLC European Research Alliance (OPERA)*. 2005
- [5] MLÝNEK P., MIŠUREC J., KOUTNÝ M., SLAVÍČEK K. Modelling of part medium access methods in the HomePlug. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2012, vol. 1, pp. 91-94. ISSN 0033-2097. IF:0,242.
- [6] BIGLIERI, E., Coding and modulation for a horrible channel. *IEEE Communication Magazine*, 41(5), 92-8, May 2003.
- [7] PHILIPPS, H. Modeling of power line communication channels. *In Proc. Int. Symp. Power Line Commun. And its Appl.*, UK, 1999, pp. 14–21.
- [8] DOSTERT, K. Propagation channel characterization and modeling: Outdoor power supply grids as communication channels. *Proc. Int. Symp. Power Line Communication and its Application*, Canada, 2005, Keynote Talk.
- [9] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Power-Line Communications*, Lancaster, UK, 1999, pp. 45 – 51.
- [10] ZIMMERMANN, M; DOSTERT, K. A Multipath Model for the Powerline Channel. *IEEE Transactions on Communications*. 2002, VOL. 50, NO. 4. pp. 553-559.
- [11] BROWN, P. Power Line Communications – Past Present and Future. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications*, Lancaster UK, 1999, pp. 1-7.
- [12] BANWELL, T.C., GALLI, S. A new approach to the modeling of the transfer function of the Power line Channel. *In Proc. Int. Symp. Power Line Communication and its Applic.* Sweden, 2001, pp. 319-24.
- [13] ESMAILIAN, T; KSCHISCHANG, F; GULAK, G. An in-building power line channel simulator. *In Proc. Int. Symp. Power Line Communication and its Applic.* Greece, 2002.
- [14] GALLI, S., BANWELL, A. A novel approach to accurate modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function and channel properties. *IEEE Trans. On Power Delivery*, 20(3), 1869-78, 2005.
- [15] GALLI, S., BANWELL, T. A Deterministic Frequency-Domain Model for the Indoor Power Line Transfer Function," *IEEE JSAC*, vol. 24, no. 7, 2006, pp. 1304–16.
- [16] ESMAILIAN, T; KSCHISCHANG, F; GULAK, G. In-building power lines as high-speed communication channels: channel characterization and a test channel ensemble. *International Journal of Communication Systems*. 16(5), 381-400, 2003.
- [17] CANETE, F. J., DIEZ, L. ENTRAMBASAGUAS, T. Broadband Modelling of Indoor Power-Line Channels. *IEEE Trans. Consumer Electronics*. Vol. 48, no. 1, pp. 175-183, 2002.
- [18] CANETE, F. J., DIEZ, L., CORTES, J. A., ENTRAMBASAGUAS, J. T. Modelling and evaluation of the indoor power line transmission medium. *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, pp. 41–47, 2003.
- [19] PAVLIDOU, N. VINCK, A., YAZDANI, J., HONARY, B. Power line communications: State of the art and future trends," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 4, pp. 34–40, 2003.
- [20] GÖTZ, M., RAPP, M., DOSTERT, K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design. *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 4, pp. 78–86, 2004.
- [21] YONGE, L. HomePlug AV technical overview. *Proc. Intl. Symp. On Power Line Comm. and its Applications* Keynote, Orlando, FL, 2006.
- [22] ANASTASIADOU, D., ANTONAKOPOULOS, T. Multipath characterization of indoor power-line network. *IEEE Transactions on power delivery*, 2005, Vol. 20, No. 1, pp. 90-99.

- [23] TONELLO, A. Wideband impulse modulation and receiver algorithms for multiuser power line communications. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2007, pp.1-14.
- [24] PAPALEONIDOPOULOS, I., CAPSALIS, C., KARAGIANNPOULOS, C., THEODOROU, N. Statistical analysis and simulation of indoor singlephase low voltage power-line communication channels on the basis of multipath propagation. *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 49, pp. 89–99, 2003.
- [25] DOSTERT, Klaus. *Powerline communications*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001, 338 s. ISBN 01-302-9342-3.
- [26] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. Power line cable transfer function for modelling of power line communication systems. *Journal of Electrical Engineering*. 2011, vol. 2, pp. 1-4. ISSN 1335-3632. IF: 0,278.
- [27] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. Modeling and evaluation of power line for smart grid communication. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2011, vol. 8, pp. 228–232. ISSN 0033-2097. IF:0,242.
- [28] BROWN, P. Power Line Communications – Past Present and Future. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Power-Line Communications and It's Applications*, Lancaster UK, 1999, pp. 1-7.
- [29] PAPALEONIDOPOULOS, I., CAPSALIS, C., KARAGIANNPOULOS, C., THEODOROU, N. Statistical analysis and simulation of indoor singlephase low voltage power-line communication channels on the basis of multipath propagation. *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 49, pp. 89–99, 2003.
- [30] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Power-Line Communications*, Lancaster, UK, 1999, pp. 45 – 51.
- [31] ZIMMERMANN, M; DOSTERT, K. A Multipath Model for the Powerline Channel. *IEEE Transactions on Communications*. 2002, VOL. 50, NO. 4. pp. 553-559.
- [32] ANASTASIADOU, D., ANTONAKOPOULOS, T. Multipath characterization of indoor power-line network. *IEEE Transactions on power delivery*, 2005, Vol. 20, No. 1, pp. 90-99.
- [33] MLÝNEK P., MIŠUREC J., KOUTNÝ M., ŠILHAVÝ, P. Two-port network transfer function for power line topology modeling. *RADIOENGINEERING*. 2012, vol. 21, no. 1, pp. 356-363. ISSN 1210-2512. IF:0,503.
- [34] GALLI, S., BANWELL, A. A novel approach to accurate modeling of the indoor power line channel-Part II: transfer function and channel properties. *IEEE Trans. On Power Delivery*, **20**(3), 1869-78, 2005.
- [35] ESMAILIAN, T; KSCHISCHANG, F; GULAK, G. In-building power lines as highspeed communication channels: channel characterization and a test channel ensemble. *International Journal of Communication Systems*. 16(5), 381-400, 2003.
- [37] *Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines*. 1st ed. Editor Hendrik Ferreira. Chichester: John Wiley, 2010, 507 s. ISBN 978-047-0740-309.
- [36] LIU, D., FLINT, E., GAUCHER, B., KWARK, Y. Wide band AC power line characterization. *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 45, no. 4, pp. 1087–1097, 1999.
- [379] CANETE, F. J. et al. Analysis of the Cyclic Short-Term Variation of Indoor Power-Line Channels. *IEEE JSAC*, vol. 24, July 2006, pp. 1327–38.
- [38] *Vector Network Analyzer Bode 100*. [online]. Technical Data. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.omicron-lab.com/bode-100/technical-data.html>>.
- [39] SANCHA, S., CANETE, J. F., DIEZ, L., ENTRAMBASAGUAS, T. A channel simulator for indoor power-line communications. *Proc. of International Symposium on Power Line Communications and its Applications, 26 - 28 March 2007, Pisa, Italy* [online]. Piscataway, NJ: IEEE, 2007[cit. 2012-01-24]. ISBN 14-244-1090-8.
- [40] CORTES, J.A., CANETE F.J., DIEZ, L.,ENTRAMBASAGUAS. Characterization of the Cyclic Short-Time Variation of Indoor Power-line Channels Response. *Proc. Int. Symp. Power Line Commun. and its Applic.* Canada, 2005, pp. 326-330.
- [41] CANETE, F. J., DIEZ, L. ENTRAMBASAGUAS, T. Broadband Modelling of Indoor Power-Line Channels. *IEEE Trans. Consumer Electronics*. Vol. 48, no. 1, pp. 175-183, 2002.
- [42] GALLI, S., BANWELL, T. A Deterministic Frequency-Domain Model for the Indoor Power Line Transfer Function,” *IEEE JSAC*, vol. 24, no. 7, 2006, pp. 1304–16.
- [43] CANETE, F. J. Modeling and Evaluation of the Indoor Power Line Transmission Medium. *IEEE Communications Magazine*, April 2003, pp. 41 – 47

- [44] TONELLO, A. Wideband impulse modulation and receiver algorithms for multiuser power line communications. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2007, pp.1-14.
- [457] GALLI, S. A Simple Two-Tap Statistical Model for the Power Line Channel. *Int'l. Symp. Power-Line Communications and its Applications, ISPLC 2010*, Brazil, 2010, pp. 242-248.
- [46] MLÝNEK, P.; KOUTNÝ, M.; MIŠUREC, J. Modelování silnoproudých vedení I - metody. *Access Server*, 2010, roč. 2010, č. 7, s. 1-6. ISSN: 1214- 9675.
- [47] MLÝNEK, P.; KOUTNÝ, M.; MIŠUREC, J. Modelování silnoproudých vedení II - simulace ukázkové sítě. *Access Server*, 2010, roč. 2010, č. 7, s. 1-6. ISSN: 1214- 9675.
- [48] HRASNICA, H., HAIDINE, A., LEHNERT, R.: *Broadband powerline communications networks: network design*. Chichester: John Wiley, 2004, 275 s. ISBN 04-708-5741-2.
- [49] ZIMMERMANN, M. DOSTERT, K. The low voltage distribution network as last mile access network–signal propagation and noise scenario in the HF- range, *AEU International Journal of Electronics and Communications*, (1), 13–22, 2000.
- [50] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. Modeling and evaluation of power line for smart grid communication. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2011, vol. 8, pp. 228–232. ISSN 0033-2097. IF:0,242.
- [51] MLÝNEK, P., KOUTNÝ, M., MIŠUREC, J. Power line cable transfer function for modelling of power line communication systems. *Journal of Electrical Engineering*. 2011, vol. 2, pp. 1-4. ISSN 1335-3632. IF: 0,278.
- [52] KONATE, C., MACHMOUM, M., DIOURIS, J. Multi path Model for Power Line Communication Channel in the Frequency Range of 1 MHz - 30 MHz. *Proceedings of the The International Conference on "Computer as a Tool" (EUROCON 2007)*. Warsaw, September 9-12, 2007.
- [53] JAN, Jiří. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. Vyd. 2. Brno: VUTIUM, 2002, 427 s. ISBN 80-214-1558-4.
- [56] FENG, Ruzhou. Method and system for managing line topology [patent]. US 2011/0058502.

ABSTRAKT

Nasazování systémů „Smart Grids“ klade zvýšené nároky na komunikace. V první řadě jsou ukázány očekávané požadavky na datovou komunikaci pro „chytré sítě“. Očekává se, že budou využity všechny dostupné technologie pro přenos dat v „chytrých sítích“ a dále mohou být použity i technologie, které v současnosti neposkytují dostatečné možnosti, ale mají potenciál pro „chytré sítě“. Touto technologií může být technologie PLC (Power Line Communication). Tato technologie má v současnosti řadu problémových míst. Je proto vhodné se věnovat především teoretické analýze a na základě vhodných matematických modelů vedení zkoumat možná zlepšení. Prezentovány jsou dva přístupy k modelování, první model s vícecestným šířením signálu a druhý je model s dvojbrany popsané kaskádními parametry. Oba tyto přístupy mají své přednosti a nedostatky. Závěrem je prezentován návrh vhodného algoritmu pro určení přesné topologie vedení, přenosové funkce a šumových poměrů na vedení, který vhodně doplňuje modely vedení, kdy nestačí pouze odhad přenosové funkce ze znalosti délky vedení nebo odhad přenosové funkce na základě velikosti topologie a náhodného generování parametrů.

ABSTRACT

Employing „Smart Grids“ systems increased demands on communications. First, the expected requirements to the data communication for „Smart Grids“ are shown. It is expected that all available technology for data transmission in „Smart Grids“ will be used. It is also expected that technology which currently does not provide sufficient possibilities but has potential for „Smart Grids“ will be also employed. This technology can include PLC (Power Line Communication). Nowadays, this technology has some problematic parts. It is therefore appropriate to focus on theoretical analysis and to research on improvements on the basis of suitable mathematical models. Two approaches to modelling are presented, the first model with multi-path signal transmission and the second model with two-port described by cascade parameters. Both approaches have their advantages and disadvantages. Finally, a proposal of the suitable algorithm is presented to determine the exact topology of the line, transfer function and noise ratio on the line which suitably complements the models of the lines when it is not enough to estimate transfer function from the length of the line or to estimate transfer function on the basis of the topology size and random generating of the parameters.