

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 531

ISSN 1213-418X

Petr Mlýnek

KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE PRO CHYTRÉ SÍTĚ V ENERGETICE

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav telekomunikací

Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

**KOMUNIKAČNÍ TECHNOLOGIE
PRO CHYTRÉ SÍTĚ V ENERGETICE**

COMMUNICATION TECHNOLOGIES
FOR SMART GRIDS IN ENERGY INDUSTRY

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU TELEINFORMATIKA



BRNO 2016

KLÍČOVÁ SLOVA

Chytré sítě, inteligentní měření, energetika, datová komunikace po silnoproudém vedení, bezdrátové technologie, kybernetická bezpečnost.

KEYWORDS

Smart Grid, Smart Metering, energy industry, power line communication, wireless communication, cyber security.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Originál habilitační práce je uložen na vědeckém oddělení VUT FEKT v Brně.

OBSAH

ÚVOD	5
1 PODSTATA A PŘEHLED PRÁCE	6
1.1 CÍLE	6
1.2 PŘÍNOS PRÁCE.....	7
2 SMART GRIDS	8
2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY SMART GRIDS	8
2.2 MOTIVACE K BUDOVÁNÍ SMART GRID.....	8
2.3 DÍLČÍ POSTUPY ZAVÁDĚNÍ SMART GRIDS SÍTÍ	9
3 KOMUNIKAČNÍ SÍTĚ PRO SMART GRIDS	11
3.1 ZÁKLADNÍ NÁHLED NA ŘEŠENÍ KOMUNIKACE V PŘÍSTUPOVÝCH SG SÍTÍCH	11
3.1.1 <i>Komunikační prostředky pro budování přístupových sítí SG a SM</i>	12
3.1.2 <i>Heterogenní hybridní sítě</i>	14
4 DATOVÁ KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÉM VEDENÍ	15
4.1 PLC TECHNOLOGIE.....	15
4.1.1 <i>Systém hromadného dálkového ovládání (HDO)</i>	16
4.2 VÝHODY PLC.....	16
4.3 PROBLÉMOVÉ OBLASTI PLC	17
4.3.1 <i>Rušení</i>	17
4.3.2 <i>Přenosová rychlost a komunikační dosah PLC</i>	18
4.3.3 <i>Frekvenční a časová proměnnost</i>	18
4.3.4 <i>Chaotická standardizace</i>	19
4.3.5 <i>Další aspekty bránící rozšíření PLC</i>	19
5 MĚŘENÍ, MODELOVÁNÍ A SIMULACE PLC	20
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NB-PLC PRO SMART METERING VYUŽITÍ	20
5.1.1 <i>Měření datových rychlostí a ztrátovosti NB-PLC modemů</i>	20
5.2 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NB-PLC MODEMŮ – POROVNÁNÍ SYSTÉMU S VÍCE NOSNÝMI A SYSTÉMU S JEDNOU NOSNOU FREKVENCÍ.....	22
5.2.1 <i>Výsledky měření – porovnání systému s více nosnými a s jednou nosnou</i>	22
5.3 MODELOVÁNÍ A SIMULACE PLC.....	24
5.3.1 <i>PLC simulátory či generátory</i>	24
5.3.2 <i>Porovnání výstupů simulátorů v Matlabu –vliv primárních parametrů na přenosovou funkci</i>	25
6 METODIKA HODNOCENÍ PLC TECHNOLOGIÍ A PILOTNÍCH PLC REALIZACÍ	27
6.1.1 <i>Návrh metodiky hodnocení PLC technologií a pilotních PLC realizací</i>	27
6.1.2 <i>Aplikace a ověření metodiky</i>	29
7 DALŠÍ VÝSLEDKY HABILITAČNÍ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKŮ PRO DALŠÍ ROZVOJ VĚDY	30
7.1 BEZDRÁTOVÉ TECHNOLOGIE PRO SMART METERING	30
7.1.1 <i>Rádiová komunikace v licenčním pásmu</i>	30
7.1.2 <i>Rádiová komunikace v nelicenčním pásmu</i>	30
7.2 ZABEZPEČENÍ KOMUNIKACE V SMART GRID SÍTÍCH.....	31
7.2.1 <i>Výzkum a vývoj zabezpečení komunikace v Smart Grid sítích s omezenými zdroji</i>	31
8 ZÁVĚR	32
LITERATURA	33

ŽIVOTOPIS

Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

Datum narození	8.12.1983
Kontakt	mlynek@feec.vutbr.cz
Pracovní zkušenosti	
2008 - doděť	Akademický pracovník, Ústav Telekomunikací, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií (FEKT), Vysoké učení technické (VUT) v Brně.
Vzdělání	
2003-2008	Vysokoškolské studium, ukončeno státní závěrečnou zkouškou (červený diplom), titul Ing. na fakultě FEKT, VUT v Brně. Obor: Teleinformatika (Bc.) a Telekomunikační a informační technika (Ing.)
2008-2012	Doktorské studium, ukončeno obhajobou dizertační práce, titul Ph.D. na FEKT VUT v Brně. Obor: Teleinformatika.
Odborné zaměření	<ul style="list-style-type: none">- datové komunikace po silnoproudém vedení pro inteligentní sítě- zabezpečení datových přenosů a dat v sítích s omezenými zdroji- řešení možných datových kanálů pro Smart Grid, Smart Metering- problematika řídicích a monitorovacích systémů pro energetiku- počítačové modelování a simulace komunikačních technologií
Vědecká činnost	<p>Publikace v číslech:</p> <ul style="list-style-type: none">- Impaktované časopisy: 7- Konference TR a Scopus: 18- Celkový počet citací podle Web of Science: 52- H-index podle Web of Science: 5 <p>Autor nebo spoluautor 13 prototypů, softwarů či funkčních vzorků. Řešitel projektů FRVŠ, OP VK, GA ČR, TA ČR a spoluřešitel projektů AV ČR, MPO, 6 FP EU, TA ČR, MŠMT a OP VaVpI.</p>

Ing. Petr Mlýnek, Ph.D. vystudoval bakalářský (2006), magisterský (2008) a doktorský (2012) program na FEKT, VUT v Brně. Od roku 2008 působí na Ústavu telekomunikací jako akademický pracovník.

Z hlediska pedagogických aktivit řešil uchazeč v letech 2012 až 2015 jako koordinátor OPVK projekt zaměřený na rozsáhlou inovaci magisterského studijního oboru Telekomunikační a informační technika. Pedagogické aktivity uchazeče jsou také zaměřeny na přípravu materiálů-skript, výuku a vedení studentů v oblasti datových komunikací pro energetiku.

Vědeckovýzkumné aktivity uchazeče jsou zaměřeny na oblast datové komunikace po silnoproudém vedení, zejména na modelování fyzické vrstvy a simulace přenosových funkcí. Výsledky tohoto výzkumu uchazeč publikoval v řadě zahraničních časopisů a prezentoval na několika mezinárodních konferencích. Tyto aktivity jsou také v úzké souvislosti s řešením projektů základního (GAČR) a aplikovaného výzkumu (TA ČR, MPO a MV ČR).

ÚVOD

Největší nástup chytrých sítí (Smart Grids) je v současné době zaznamenán v energetice. Koncept Smart Grid sítě pro energetiku počítá s komunikací až na úroveň transformátorů VN/NN a pomocí inteligentního měření (Smart Metering) až na úroveň odběrných míst. Pro zajištění komunikace až na tyto úrovně je nutné mít vysoký stupeň podpory informačními a komunikačními technologiemi (ICT).

Proto je hlavní výzvou efektivního rozvoje Smart Grids pokrok v oblasti komunikačních technologií a volba vhodných datových kanálů či heterogenních sítí pro různé oblasti použití. Z dosavadních pilotních projektů jasně plyne, že výběr vhodných komunikačních technologií je zásadní pro další rozvoj efektivního konceptu Smart Grids.

Druhou velkou výzvou rozvoje Smart Grids je kybernetická bezpečnost, jelikož se jedná o ochranu neustále rostoucího počtu zařízení a jejich komunikačních kanálů vůči rostoucímu počtu hrozeb. Také je nutné si uvědomit, že dílčí řešení Smart Grid vyžadují speciální bezpečnostní řešení. Například zabezpečení pro rozvodny není stejné jako zabezpečení pro řízení energie v domácnosti.

Právě tyto dvě hlavní výzvy pokrývá tato habilitační práce. Práce se především zaměřuje na rozbor možných komunikačních technologií pro přístupovou část Smart Grid sítě, jejich experimentální měření a simulaci. Dalším zaměřením práce je rozbor možností zabezpečení přenášených dat v Smart Grids a implementace vybraných algoritmů pro Smart Grids sítě s omezenými zdroji.

Vedlejším cílem práce je také sloužit jako studijní materiál pro studenty, kteří si potřebují osvojit základy problematiky chytrých sítí a jejich dvou klíčových komponent - komunikace a zabezpečení komunikace.

1 PODSTATA A PŘEHLED PRÁCE

1.1 Cíle

Práce si klade za cíl poskytnout základní náhled na chytré sítě Smart Grids (SG) a inteligentní měření Smart Metering (SM) v energetice a podrobně analyzovat klíčové aspekty výzkumu a vývoje v těchto oblastech. Mezi tyto klíčové aspekty patří zejména komunikační infrastruktura a bezpečnost přenášených dat. Dílčím cílem je také poskytnout podklady pro další rozvoj, výzkum a budoucí práci v podobě podrobných analýz, metodik, výsledků z reálných měření či přípravy simulačních nástrojů a tím položit základ uceleného pohledu na problematiku.

Hlavní cíle práce vycházející z klíčového aspektu rozvoje Smart Grids, tj. **komunikační infrastruktury**, lze shrnout následovně:

- *Analyzovat komunikační technologie pro Smart Metering.* Z pilotních projektů jasně plyne, že výběr vhodných komunikačních technologií a protokolů je zásadní. Cílem je podrobně analyzovat všechny komunikační technologie pro přístupovou část Smart Grid sítě, jelikož budoucí řešení bude zcela jistě postavené na heterogenních sítích. Nejvíce používané technologie pro SM z pohledu přístupové sítě jsou datová komunikace po silnoproudém vedení (PLC) a bezdrátové rádiové technologie (RAN), proto je dílčím cílem analýzy se podrobně zaměřit na tyto technologie.
- *Představit výsledky z experimentálních měření PLC a bezdrátových modemů pro Smart Metering.* V případě plošného zavádění SM bude rozhodování o volbě komunikační technologie založeno na bilanci mezi náklady a požadovanou výkonností. Proto je cílem práce porovnání bezdrátových technologií rozdílných právě v ceně a výkonnosti kvůli placeným garantovaným a neplaceným sdíleným pásmům (licenční a nelicenční frekvenční pásma). Také pro PLC řešení je nutné provést rozsáhlé ověření v terénu pomocí měření, aby se ukázala požadovaná výkonnost.
- *Ukázat možnosti simulačních nástrojů pro PLC a RAN.* Návrh komunikační infrastruktury SG je tak složitý, že role modelů a simulací je pro návrh zásadní. Cílem je komplexní model zvažovaných variant, jehož chování lze ověřit v simulačním prostředí.
- *Představit návrh a reálné ověření metodiky hodnocení a porovnání PLC technologií a PLC pilotních realizací.* Kvůli celosvětově různorodým charakteristikám elektrické sítě jsou nezbytné rozdílné typy PLC standardů, čipsetů či řešení. Cílem je proto navrhnout metodiku umožňující především provozovatelům distribučních soustav porovnat uvažované PLC technologie a poskytnout podklady pro návrh komunikační infrastruktury.

Další cíle práce vycházející z dalšího klíčového aspektu rozvoje Smart Grids, tj. **kybernetické bezpečnosti**, lze shrnout následovně:

- *Představit základní náhled na zabezpečení komunikace v Smart Grids sítích.* Řešení SG zasahuje do kritických infrastruktur zajišťujících chod jednotlivých zemí. Možnost prolomení zabezpečení komunikace s sebou může přinést závažné negativní celospolečenské důsledky. Cílem je tedy analýza kryptografických prostředků nejenom pro pouhé šifrování, ale pro vybudování celého bezpečného systému s kompletním klíčovým hospodářstvím a digitálními podpisy.

- *Ukázat návrh, implementaci a ověření zabezpečení komunikace pro síť s omezenými zdroji v Smart Grids.* Nízká energetická spotřeba je jedním z klíčových faktorů plošného zavádění SG. I když například elektroměr a jeho komunikační modul budou mít relativně malou spotřebu, tak v případě plošného nasazení bude tato spotřeba vynásobena milióny. Cílem je tedy navrhnout koncept zabezpečení komunikace pro zařízení s omezeným výkonem.

1.2 Přínos práce

Práce je koncipována tak, aby sloučila pedagogický přínos pro pochopení fenoménu Smart Grids a vědecký přínos pro možnost dalšího rozvoje a výzkumu v problematice SG.

Pedagogická část uvádí přehled možných komunikačních technologiích pro další hlubší studium konkrétní technologie pro účely SG a SM a detailně představuje znalosti z oblasti PLC pro další specifický rozvoj v této oblasti. Pedagogická část práce byla detailně a do hloubky publikována pro studenty v rámci skript Vyšší techniky datových přenosů [A.11] a Moderní způsoby komunikace a Smart Grid [A.12], kde je autor spoluautorem těchto skript.

Vědecká část práce představuje autorovy přínosy v optimalizaci a progresu komunikačních řešení pro Smart Metering, především pro technologie PLC a RAN. Vědecká část práce je založena na nedávném výzkumu autora publikovaném v období 2013–2015 [A.1]–[A.10]. Z těchto publikací lze především vyzdvihnout impaktované články z posledních dvou let [A.1], [A.2], [A.5] a [A.9]. Výzkumné výsledky vznikly také v souvislosti s řešením projektů TAČR [A.13] a GAČR [A.14].

Přínosy práce lze shrnout následovně:

- *Pedagogický přínos:* Kapitola 2 popisuje pojem Smart Grids, jelikož vymezení tohoto pojmu je poměrně složité. Kapitola 3 představí základní náhled na řešení komunikace pro SG a kapitola 4 podrobně představí dominantní komunikační technologii - PLC. Za podstatný pedagogický přínos lze považovat i představení simulačních nástrojů pro simulaci šíření rádiových vln (kapitola 7.1.1) a simulaci přenosových funkcí PLC (kapitola 5.3), které mohou být využity ve výuce.
- *Vědecký přínos:* Kapitoly 5 a 6 přináší originální výsledky autora v oblasti výzkumu PLC, kdy výzkumná témata byla podrobně analyzována v kapitole 4. Jedná se především o experimentální měření v reálných podmínkách pro porovnání systému na bázi OFDM (modulace s přenosem v dělených subpásmech) se systémy s jednou nosnou, dále pak o simulace vlivu přenosových parametrů či topologie na přenosovou funkci PLC kanálu a návrh metodiky hodnocení a porovnání PLC technologií. Tyto specifické oblasti, identifikované v kapitole 4, jsou stále považovány za nedostatečně publikované. Kapitola 7 představuje autorův výzkum v oblasti rádiové komunikace pro SM, kdy jsou představeny výsledky jak z experimentálních měření, tak ze simulací. Dále tato kapitola prezentuje výzkum a výsledky z návrhu a implementace výpočetně náročné asymetrické kryptografie do nízkoenergetického výkonově omezeného zařízení.

2 SMART GRIDS

2.1 Úvod do problematiky Smart Grids

Vymezení pojmu „Smart Grids (SG)“, tedy „Chytré či inteligentní sítě“, je poměrně složité. V současné době je to jakýsi fenomén, který zasahuje do všech oblastí, které se potýkají s řízením plošně rozsáhlých technologických systémů, 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. Podle dostupných literárních zdrojů [S.1]–[S.12] je však pojem „Smart Grids“ používán převážně v oblasti energetiky. Smart Grids jsou v tomto pojetí sítě, jejichž funkce spočívá v možnosti monitorovat odběr a dodávku elektrické energie, 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, včetně koncového zařízení. Základní potřebou Smart Grids je zejména oboustranný přenos dat se zařízeními, která se podílejí na řízení energetické sítě, poskytují další funkce pro ovládání průmyslových a domácích spotřebičů a také slouží i obchodníkovi s elektrickou energií pro cílenější práci se zákazníkem.

Nejrozšířenějším a nejlépe definovaným systémem v konceptu Smart Grids je systém inteligentního měření – Smart Metering. Aktuálnost problematiky Smart Metering ukazuje také publikační aktivita nejen vědeckého zaměření, ale také různé komerční studie, které prezentují množství nevyřešených otázek a možností dalšího výzkumu. Za zmínku například stojí rozsáhlé studie od Berg Insight [S.1]–[S.3].

2.2 Motivace k budování Smart Grid

Ideálním stavem v elektroenergetické síti je stav, kdy v daném okamžiku je množství generované elektrické energie rovno množství spotřebované elektrické energie. Proto v síti existují regulační mechanismy, které se snaží docílit tohoto ideálního stavu a udržet rovnováhu sítě. Tuto rovnováhu v poslední době narušují obnovitelné zdroje elektrické energie, kogenerační zdroje či tepelné zdroje využívající spalování biomasy. Začleňování těchto zdrojů do elektroenergetické sítě způsobuje narušení zmíněné rovnováhy a způsobuje nestabilitu sítě. Aby byla opět nastolena rovnováha sítě je nutno uvažovat řízení těchto zdrojů, to vede k budování inteligentních energetických sítí (Smart Grids).

Koncept SG je možným řešením, které při dodržení vnějších pravidel a podmínek zakomponovaných do legislativních rámců nabízí cestu rozvoje jednotlivých technických odvětví. Toto však neznamená revoluci v rozvoji jednotlivých technických řešení. V rámci konceptu a ve všech jeho oblastech i směrech rozvoje i mimo něj můžeme mluvit spíše o evoluci. O evoluci týkající se nejen konceptu Smart Grids, ale i odvětví nepřímo souvisejících, zejména komunikace [S.4].

Motivaci k budování Smart Grid lze rozdělit do těchto hlavních bodů:

- *Stabilita energetické sítě při rostoucím počtu obnovitelných zdrojů energie.* Požadavky na energetickou síť se mění v souvislosti se zvyšujícím se podílem a počtem obnovitelných zdrojů energie či se snahou zvyšovat efektivitu distribuce energie. V současné době se řeší problematika stability energetické sítě při významném podílu obnovitelných zdrojů, zajištění ostrovního a nouzového provozu při výpadcích hlavních napájecích tras či

automatickém inteligentním měření a ovládání odběrných míst. To vyžaduje především inovaci komunikační infrastruktury s možností obousměrných toků energie v distribuční soustavě a také vyšší podíl inteligence a automatizace.

- *Legislativa.* Směrnice Evropské komise zavazuje členské státy implementovat do roku 2020 systém Smart Metering na 80 % odběrných míst¹. To znamená, že v rámci ČR bude nutné vybavit cca 6 milionů odběrných míst komunikačními elektroměry. Tyto elektroměry jsou napájeny z cca 40 000 transformátorů, kde budou osazeny datové koncentrátoři. Od těchto datových koncentrátorů je třeba přenést data do centrály. Evropská unie podporuje Smart Grid také pro dosažení cílů 20-20-20 (zvýšení energetické efektivity o 20 %, podíl obnovitelných zdrojů 20 %, snížení emisí CO₂ o 20 % vzhledem k hodnotám stavu z roku 1990).
- *Rozvoj kogeneračních jednotek.* Kromě fotovoltaických elektráren a ostatních obnovitelných zdrojů lze ve velmi blízké budoucnosti očekávat nárůst počtu malých kogeneračních jednotek, které budou vyrábět jak teplo, tak elektrickou energii. Vedle konvenčních kogeneračních jednotek je již teď patrný nástup palivových článků, které jsou napájeny plynem a nabízejí vysokou účinnost výroby elektrické energie. To vše má za následek přesun výroby elektrické energie do mnoha lokálních zdrojů, které je nutno bilančně řídit.
- *Nemožnost bezpečně řídit energetickou soustavu tak, aby nenastal výpadek.* Jednou z hlavních výzev řešení Smart Grid je vyvažování či rovnováha mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Proto tuto rovnováhu bude třeba do Smart Grid sítě integrovat dodatečnou ochranu a kontrolní technologie, aby byla zaručena stabilita energetické sítě [S.1], [S.13]. Současná elektroenergetická síť je navržena tak, aby byla řízena přes centralizovanou infrastrukturu známou jako Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA). Zde koncept Smart Grid ukazuje, že je nutné vytvořit infrastrukturu zahrnující monitorování rozsáhlých oblastí, oboustrannou komunikaci a zvýšit funkcionalitu řízení.
- *V ČR funguje k vyrovnaní výroby a spotřeby systém HDO (hromadné dálkové ovládání).* Nízká frekvence, na které je HDO provozováno, dostačuje jen na jednoduché povely vždy pro skupinu ovládaných míst a jedná se pouze o jednosměrnou komunikaci bez zpětné vazby o provedení povelu.

2.3 Dílčí postupy zavádění Smart Grids sítí

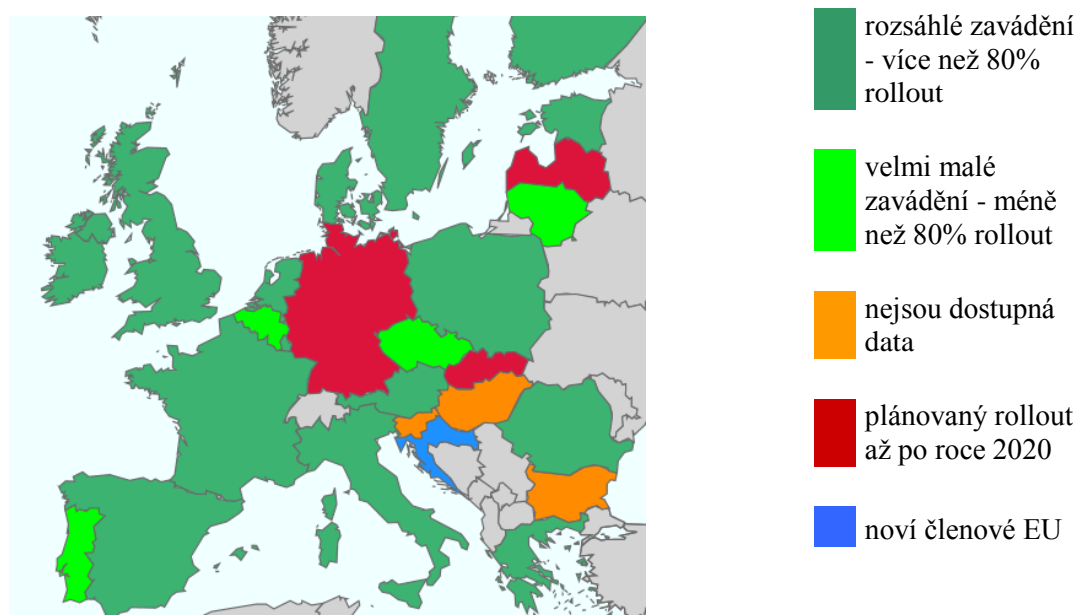
Prvním krokem k budování Smart Grid sítí bylo automatické dálkové měření označované zkratkou AMR (Automated Meter Reading). AMR představuje klasický dálkový odečet elektroměrů, ale elektroměr musí být pro tento účel hardwarově a softwarově připraven.

Základní funkce technologie AMR pak rozšiřovala technologie AMM (Automated Meter Management). AMM reprezentovala nové technologie umožňující obousměrnou komunikaci mezi dodavatelem a spotřebitelem elektrické energie. AMM umožnila odpojení neplatičů, regulaci a obchodování s elektřinou. Koncept AMR a AMM představoval zcela novou generaci, která vyžadovala nové typy přístrojů a dobudování přístupových sítí až k jednotlivým odběrným bodům.

¹ V České republice v kontextu Evropy je situace odlišná kvůli rozšířené a funkční technologii Hromadného dálkového ovládání (HDO). Studie přínosů a nákladů AMM v ČR přinesla negativní výsledky plošného zavádění SM. O plošné zavádění SM není aktuálně v ČR zájem, ale o dílčí prvky Smart Grid sítí či o realizaci pilotních projektů je zájem velký a v budoucnu bude ještě větší, jelikož nasazení SM se v ČR pouze oddálilo.

Dalším krokem k budování SG sítí a fungování AMR a AMM byla inteligentní infrastruktura označovaná jako AMI (Advanced Metering Infrastructure). Tato infrastruktura umožní obousměrný přenos mezi všemi elementy sítě a umožní tak monitorování, řízení, diagnostiku, odpojování, sledování výpadku a kvality atd.

V rámci SET Planu začala v roce 2010 činnost Evropské průmyslové iniciativy pro chytré sítě (EEGI). Tato iniciativa byla tvořena distributory a technologickými společnostmi, které dávají důraz na rozvoj konceptu Smart Grids. EEGI se zaměřuje na pilotní projekty po celé Evropě, jejichž cílem je vyzkoušet jednotlivé funkční celky Smart Grids [S.4]. Postup zavádění a nasazování inteligentních sítí a chytrého měření v EU zobrazuje Obr. 2.1 [S.14].



Obr. 2.1: Zavádění Smart Meteringu v EU (stav k roku 2015).

Cena kompletní přestavby současných funkčních systémů na systémy Smart Grids je velmi značná a prakticky to není možné provést během krátké doby. Proto budou postupně fungovat původní a nové (Smart) sítě vedle sebe. Mnoho technologií pro Smart Grids jsou ještě stále ve vývoji nebo nebyly otestované v potřebném nastavení či topologii. Zde je požadováno, aby kvůli spolehlivosti byly podmínky testů odpovídající reálnému provozu. Tyto podmínky se však dají splnit jen testovacím provozem v síti s reálnými uživateli. Pro dodavatele je ovšem hlavní prioritou nepřerušitelnost dodávky energie, a proto vznikají testovací mikrosítě v rámci pilotních projektů (např. Smart Region Vrchlabí, Mannheim Smart City v Německu) či na vybraných územích univerzit (např. BC-Hydro/BCIT Smart Power Microgrid na univerzitě British Columbia Institute of Technology v Kanadě nebo Smart Grid Energy Research Center na univerzitě University of California v USA).

3 KOMUNIKAČNÍ SÍŤ PRO SMART GRIDS

Jedním z nejzásadnějších prvků jakéhokoliv řešení je komunikační kanál. K vlastnímu přenosu je nezbytné použít vhodné a dostatečně dimenzované přenosové kanály a také přenášená data vhodným způsobem zabezpečit jak proti chybám, tak proti neoprávněnému přístupu a zneužití. Tato kapitola popíše základní náhled na řešení komunikace v SG. Budou představeny možné datové kanály či sítě pro SG účely s využitím zejména pro dálkové odečty či Smart Metering v energetice.

Celkovou konfiguraci SG sítí lze rozdělit na část transportní sítě a část přístupové sítě. Transportní sítě jsou v současné době postavené většinou na optickém spoji, širokopásmových rádiových spojích či satelitních spojích. Tyto sítě tedy umožňují přenášet obrovské objemy dat mezi různými geografickými body. Problém je, jakým způsobem se po těchto transportních sítích dostat až ke koncovým zařízením. Proto je nyní snahou vybudovat nové přístupové sítě pro pokrytí všech koncových SG zařízení. Tato kapitola poskytne základní přehled možných komunikačních prostředků pro budování přístupových SG sítí.

Datová komunikace v energetice pro účely Smart Meteringu má určité odlišnosti, které je třeba brát v úvahu. Je tedy nutné respektovat:

- *Systém priorit.* Volba vhodné přenosové technologie pro SG musí vycházet z klíčových požadavků, které jsou definovány systémem priorit. Nejvyšší prioritu mají data pro dispečink či pro systém SCADA, dále také pro řízení silových akčních členů.
- *Standardy.* Volba vhodné přenosové technologie musí být také v souladu se standardy (např. IEC 61 850, IEC 61 350, IEC 61 970 či IEC 870-5-104).
- *Definované zpoždění.* Data vyměňovaná mezi jednotlivými zařízeními chytrých sítí můžeme rozdělit do dvou skupin:
 - Data s definovaným maximální zpožděním. Jako příklad systému s definovaným zpožděním lze uvést systémy ochran, které musí v případě problému reagovat velmi rychle (maximální zpoždění musí být menší než 4 ms).
 - Ostatní data, u nichž je čas doručení definován v jednotkách hodin.
- *Bezpečnost.* Řešení SG zasahuje do kritických infrastruktur jednotlivých zemí, proto otázka bezpečnosti musí být vyřešena dříve, než dojde k plošnému nasazování SG. Slabým místem bezpečnosti v SG a SM jsou bezesporu elektroměry a komunikace mezi nimi a centrálou.

3.1 Základní náhled na řešení komunikace v přístupových SG sítích

V současnosti používané komunikační prostředky v energetice lze rozdělit podle typu přenosového média na metalická vedení, optická vedení a bezdrátové rádiové prostředky.

Využitím **metalických či optických vedení** by bylo dosaženo vysokých přenosových rychlostí, definovaného zpoždění a vysoké spolehlivosti. Odečet dat z měřících zařízení by tak mohl probíhat kontinuálně, resp. několikrát denně, odběratel či dodavatel, by pak mohli být průběžně informováni o odběru, dodávce či kvalitě elektrické energie. Širšímu rozšíření ale brání především ekonomické hledisko, jelikož vybudování infrastruktury těchto vedení je velmi nákladné.

Komunikace po metalickém či optickém vedení nemusí být vždy dostupná na všech místech, z nichž je nezbytné získávat potřebné údaje. Proto je v těchto lokalitách vhodné použít jinou

technologii. Jednou z těchto technologií je **rádiová síť**, kterou je možné realizovat pomocí rádiových modemů. Ty pracují v licencovaných či nelicencovaných pásmech a jejich hlavní předností, díky technologii vysílání, je velký komunikační dosah. Uzavřená rádiová síť je ale investičně a provozně velmi nákladné řešení a navíc často náchylné na vliv počasí.

Síť veřejného operátora (GSM síť) pokrývá dnes celoplošně značně rozsáhlá území. Lze tedy konstatovat, že ve vyspělých zemích jsou sítě GSM různých operátorů dostupné takřka všude. To je činí ideálními pro použití v různých směrech, zejména tam, kde není pevné metalické nebo optické spojení nebo v případech, že objem přenášených dat není příliš velký. Síť 4G navíc umožní přenos vyššího objemu dat při vhodném pokrytí.

Avšak stále zde existuje velký prostor nepokrytých míst, není garantována odezva a přenos malého objemu dat je nestabilní. Nevýhodou je také nespolehlivost této komunikace, jelikož hovorová data mají prioritu. Energetika nemá také vliv na provozuschopnost a tento kanál je v neposlední řadě navíc spjat i s nezanedbatelnými provozními náklady.

Vzhledem ke konfiguraci energetických sítí je zřejmé, že pro přístupovou část Smart Grid sítě bude z hlediska technických a ekonomických přínosů výhodné, kromě klasických telekomunikačních systémů, využít také úzkopásmovou nebo širokopásmovou **PLC komunikaci**.

PLC vychází především z toho, že síťová infrastruktura je velmi rozvinutá a je snaha ji využít i k datovým přenosům. Z pohledu přístupových sítí představuje PLC ve světě jednu z nejvíce používaných technologií pro Smart Metering.

Další alternativou jsou technologie **WiMAX a LTE**. Obdobně jak u GSM, nedostatky LTE (Long Term Evolution) jsou pokrytí a provozní náklady. WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) je stále se vyvíjející bezdrátovou technologií, která má nahradit nyní všeobecně rozšířenou technologii dle specifikace IEEE 802.11, známou jako Wi-Fi. Většímu nasazení WiMAX pro SG účely většinou brání vstupní nákladovost technologie.

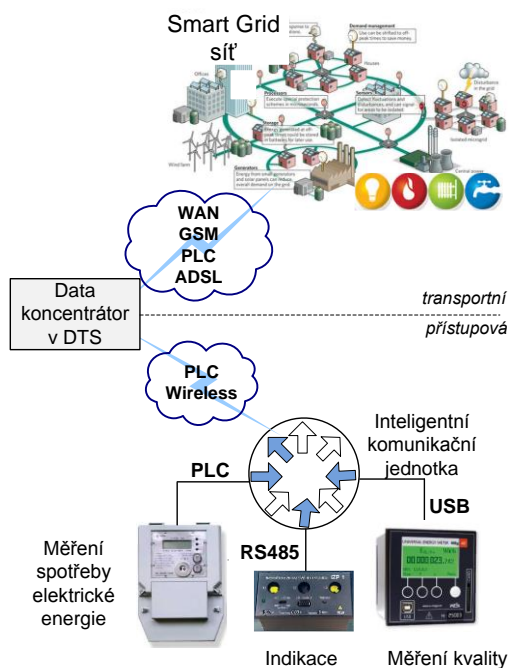
3.1.1 Komunikační prostředky pro budování přístupových sítí SG a SM

Celosvětově je přístupová vrstva pro Smart Metering (Obr. 3.1) řešena převážně PLC technologií, Long-Range Radio (RAN) technologií, mobilními sítěmi či MESH technologiemi.

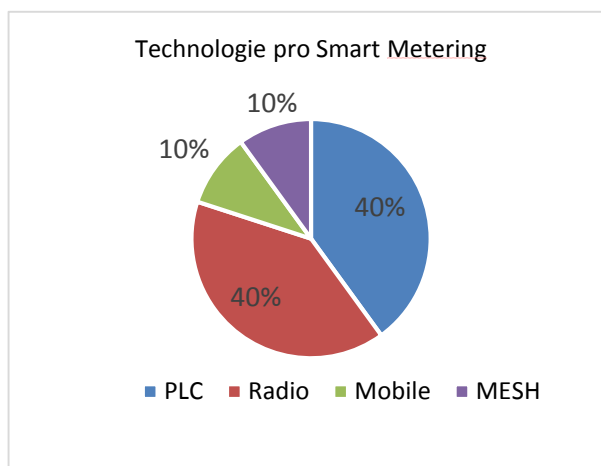
Obr. 3.2 zobrazuje využití těchto technologií pro Smart Metering účely, kdy PLC a RAN jsou nejvíce využívané technologie [S.1]–[S.3]. MESH technologie díky nevýhodám v podobě komplikovaného managementu či vysokým nákladům není tak rozšířena. Také síť mobilních operátorů není přímo projektována pro požadované služby SM a je to také komerční síť, která nebude nikdy pod kontrolou distribučních společností.

PLC je jednou z nejvíce používaných technologií pro Smart Metering ve světě z pohledu přístupové sítě. Například Itálie a severské státy provedly rollout na základě této technologie.

Obr. 3.3 ukazuje PLC standardy a technologie, které byly využity pro dosavadní zavádění či pilotní projekty SM v Evropě. První země, které přistoupily k rolloutu, zvolily PLC řešení od firmy Echelon, technologii Meter and More či G1-PLC technologii. Současné pilotní projekty nebo reálné instalace jsou převážně postaveny na HDR NB-PLC standardech PRIME a G3-PLC.

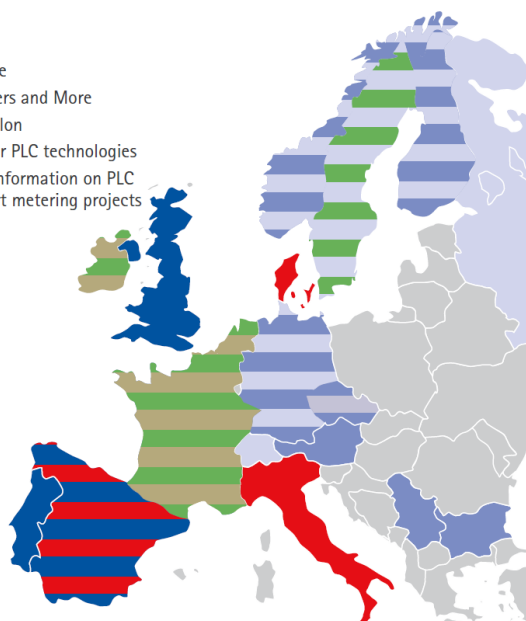


Obr. 3.1: Smart Grid síť - rozdělení na transportní a přístupovou část SG sítě.



Obr. 3.2: Technologie využívané pro Smart Metering [S.1]–[S.3].

- G1
- G3
- Prime
- Meters and More
- Echelon
- Other PLC technologies
- No information on PLC smart metering projects



Obr. 3.3: Zavádění různých PLC technologií pro SM účely v Evropě [S.14].

G1: otevřená specifikace postavená na IEC 61334, využívající modulaci S-FSK a dosahující maximální bitové rychlosti 2,4 kbit/s. Jedná se o systém jedné nosné frekvence.

Meters and More: otevřená specifikace založená firmami Enel a Endesa, využívající BPSK modulaci s bitovou rychlostí 4,8 kbit/s. Jedná se o systém jedné nosné frekvence.

Echelon: proprietární řešení firmy Echelon postavené na BPSK modulaci. Jedná se o systém jedné nosné frekvence.

G3 a PRIME: řešení postavené na Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulaci - modulace s přenosem v dělených subpásmech. PRIME dosahuje rychlosti cca 125 kbit/s a G3 50 kbit/s v evropském pásmu CENELEC A.

Vyjma Smart Meteringu a pro další komunikaci v energetice (např. pro měření kvality či pro indikátory poruchových stavů) se využívá především služeb CDMA či GPRS/3G, tedy sítě veřejného operátora. Komunikační jednotky CDMA či GPRS/3G v současnosti nepředstavují technicky náročný problém. V této oblasti komunikace však je problém v zajištění komunikace v kritických stavech. Funkčnost všech systémů hromadné obsluhy v ustáleném stavu není zárukou funkce v kritických stavech. S tím by měly masově instalované přístroje především v distribučních trafostanicích počítat.

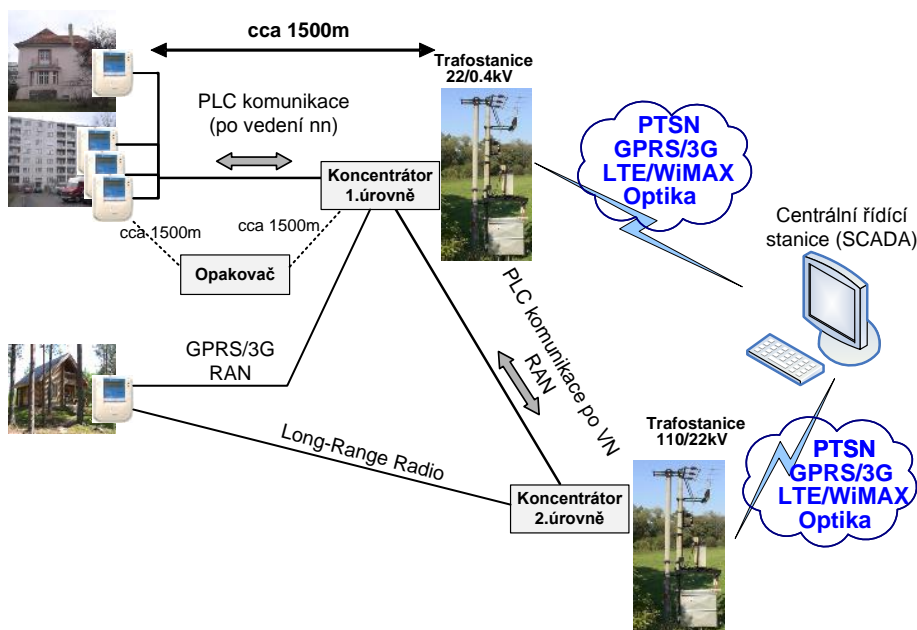
3.1.2 Heterogenní hybridní síť

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, existuje řada možných technologií pro SG a SM. Také se ukazuje a dále se předpokládá, že SG síť nebudou využívat jedno komunikační řešení (homogenní síť), ale bude využita kombinace komunikačních technologií, tzv. heterogenní síť.

Obr. 3.4 ukazuje příklad heterogenní infrastruktury, kdy je využito PLC technologie provozované po NN a VN vedeních. Systém je založen na tom, že každý účastník (bytový nebo rodinný dům, firma) je vybaven inteligentním elektroměrem s PLC modemem, který po síti NN komunikuje s koncentrátorem umístěným někde v síti NN v rámci jednoho napájecího uzlu (transformátoru). Koncentrátor předává odečtená data z jednotlivých elektroměrů (popř. jiných měřicích zařízení) přímo do centrály (např. SCADA) nejčastěji po metalických či optických vedeních případně přes síť veřejného operátora. V některých případech komunikuje koncentrátor díky PLC komunikaci po VN či RAN s dalším koncentrátorem.

Pro určité oblasti, kde není vhodné použít PLC technologii, například z ekonomických důvodů (nutnost velkého počtu opakovačů) či velké vzdálenosti nejbližší trafostanice (více jak 1 500 metrů), je vhodné použít rádiové technologie, případně síť veřejného operátora.

Vhodnou kombinací komunikačních prostředků tak lze dosáhnout efektivní a instalačně ekonomické SG sítě. Výhodnost nasazení jednotlivých komunikačních technologií je velmi rozdílná v závislosti na geografické poloze, infrastruktuře energetické sítě, telekomunikační vyspělosti dané země, hustotě osídlení či dalších aspektech.



Obr. 3.4: Příklad heterogenní infrastruktury Smart Grid pro komunikaci s elektroměry.

4 DATOVÁ KOMUNIKACE PO SILNOPROUDÉM VEDENÍ

Myšlenka využití silnoproudých vedení a elektroenergetické sítě k přenosu informací či k datovým přenosům není nová. V jistých podobách se silnoproudá vedení k přenosu dat využívají již takřka od samotného počátku budování energetické sítě. Byla to především úzkopásmová telefonie či povelování v rámci řízení energetických sítí. Historie této technologie, například podle publikace [P.1], je datována do počátku 20. století. V roce 1950 byla navržena jedna z prvních PLC technologií, známá jako hromadné dálkové ovládání (HDO), a poté nasazena na distribuční síť středního a nízkého napětí [P.2].

Systémy komunikace po silnoproudých vedeních se označují jako PLC² (Power Line Communication), někdy též PDSL (Power Digital Subscriber Line) nebo PLT (Power Line Transmission).

PLC systémy nevyžadují žádnou specifickou kabeláž, protože koncové zařízení je připojeno přímo do elektrické sítě, a to zpravidla na úrovni NN nebo na úrovni VN. Systémy PLC jsou rozděleny do dvou hlavních oblastí, a to **širokopásmové PLC** a **úzkopásmové PLC**.

4.1 PLC technologie

Existují tři hlavní typy PLC technologií [P.3]:

1) Úzkopásmová operující na velmi nízkých frekvencích (Ultra Narrow Band (UNB))

Tato technologie se vyznačuje velmi nízkou datovou rychlostí (cca 100 bit/s). UNB pracuje v pásmu 0,3 až 3 kHz nebo 30 až 300 Hz. Přestože rychlost přenosu dat je nízká, provozované systémy používají různé formy paralelizace a efektivního adresování, které podporují dobrou škálovatelnost. Jedná se většinou o lokální řešení, která jsou už v provozu desetiletí. Tyto technologie se vyznačují velmi nízkými rychlostmi, ale mají velký komunikační dosah (150 km a více). Pro tyto technologie chybí standardizace a jsou to většinou proprietární řešení.

Příkladem takové technologie je systém pro přenos signalizace nosnou vlnou (Ripple Carrier Signaling) pro řízení zátěže, která pracuje v pásmu 125–2000 Hz a umožňuje rychlost několik bit/s s využitím amplitudové modulace [P.4]. Jednocestná komunikace Ripple Carrier Signaling byla a stále je využívána v Evropě pro přepínání tarifů, řízení veřejného osvětlení či řízení zátěže v elektrických systémech. V ČR je tato technologie známá pod názvem HDO. Dalšími příklady jsou systém Turtle [P.5] s extrémně malou rychlostí 0,001 bit/s nebo systém Two-Way Automatic Communication (TWACS) [P.6] s maximální datovou rychlostí 100 bit/s v Evropě. Systém Turtle byl využíván především pro AMR a systém TWACS je rozšířen především v Americe pro AMI.

2) Úzkopásmová (Narrow Band (NB))

Tato technologie pracuje ve frekvenčním pásmu 3–500 kHz, které zahrnuje evropské pásmo CENELEC 3–148,5 kHz, americké FCC pásmo 10–490 kHz, čínské pásmo 3–500 kHz a japonské pásmo ARIB 10–450 kHz. Podle datové rychlosti lze dále rozdělit tuto technologii na:

² U celosvětově využívané zkratky PLC je nutno podotknout, že obdobnou zkratku využívá oblast průmyslové automatizace pro programovatelný logický automat (Programmable Logic Controller).

- *S nízkou datovou rychlostí (Low Data Rate (LDR))*: jedná se o technologie s jednou nosnou a datovou rychlostí několik kbit/s. Typické příklady LDR NB-PLC jsou standardy LonWorks, IEC 61334, X10, HomePlug C & C, SITRED, atd.
- *S vysokou datovou rychlostí (High Data Rate (HDR))*: jedná se o technologie s více nosnými a datovou rychlostí od desítek kbit/s až do 500 kbit/s. Typickým příkladem jsou technologie na bázi standardů ITU-T G.hnem [P.7], [P.8], IEEE P1901.2 [P.9], PRIME [P.10] a G3-PLC [P.11].

3) Širokopásmová (Broadband (BB)³)

Širokopásmová technologie pracuje ve frekvenčním pásmu 1,8–500 MHz a vyznačuje se datovou rychlostí na fyzické vrstvě od několika Mbit/s až do několika stovek Mbit/s. Někdy též označována jako Broadband over Power Lines (BPL). Příkladem jsou HomePlug AV/Extended [P.12], HomePlug Green PHY, HD-PLC, UPA Powermax, a Gige MediaXtreme na bázi standardů TIA-1113 (HomePlug 1.0 [P.13]), IEEE 1901, ITU-T G.hn (G.9960/G.9961) [P.14].

Širokopásmové PLC technologie se začaly prvně využívat především pro Home Area Network (HAN) a pro přístup k Internetu. Výzkumem širokopásmové PLC technologie pro přístup k Internetu se zabýval projekt Open PLC European Research Alliance, (OPERA), který přinesl spíše negativní výsledky pro využití BB-PLC pro Internetový přístup. Proto se nyní jeví hlavní využití BB-PLC pro domácí aplikace a HAN, jelikož nové standardy umožňují datovou rychlost na fyzické vrstvě až 200 Mbit/s (např. HomePlug AV2). V případě přenosů větších objemů dat a možnosti opakovačů se jeví BB-PLC využitelné i pro SG a SM účely (např. řešení firmy Corinex).

4.1.1 Systém hromadného dálkového ovládní (HDO)

HDO je systém hromadného jednosměrného vysílání signálu z centra po silnoproudém vedení ke skupině ovládaných míst vykonávajících stejnou funkci [P.2],[P.15]. HDO není určeno k ovládní jednoho místa či přijímače.

Aplikační využití HDO je především pro řízení odběru elektrické energie a zrovnoměnění či optimalizaci celkové spotřeby elektrické energie a také pro spínací funkce a funkce pro mimořádné události.

U systému HDO se nedá hovořit jako o komunikaci, jedná se pouze o vykonávání příkazů, tedy o jednosměrný děj. Systém je po mnoha letech přiveden téměř k dokonalosti a jeho technické možnosti jsou tak již vyčerpány, nicméně nám alespoň indikuje určitou minimální úroveň, která musí být splněna, aby mohl být tento systém nahrazen obousměrně komunikujícími zařízeními.

4.2 Výhody PLC

Každá technologie, UNB-PLC, NB-PLC a BB-PLC, má jinou oblast použití. Výběr vhodné technologie závisí jednak na technickém měřítku, ale také na legislativě a omezeních (dostupné frekvenční pásma či povolený vysílací výkon). S výběrem vhodné technologie pro danou oblast použití by měla nápomoc navržená metodika v kapitole 6.

Hlavní výhody PLC, zejména pro Smart Metering, lze shrnout do těchto bodů:

³ Pro širokopásmové přenosy se užívá též zkratky BPL (Broadband over Powerline).

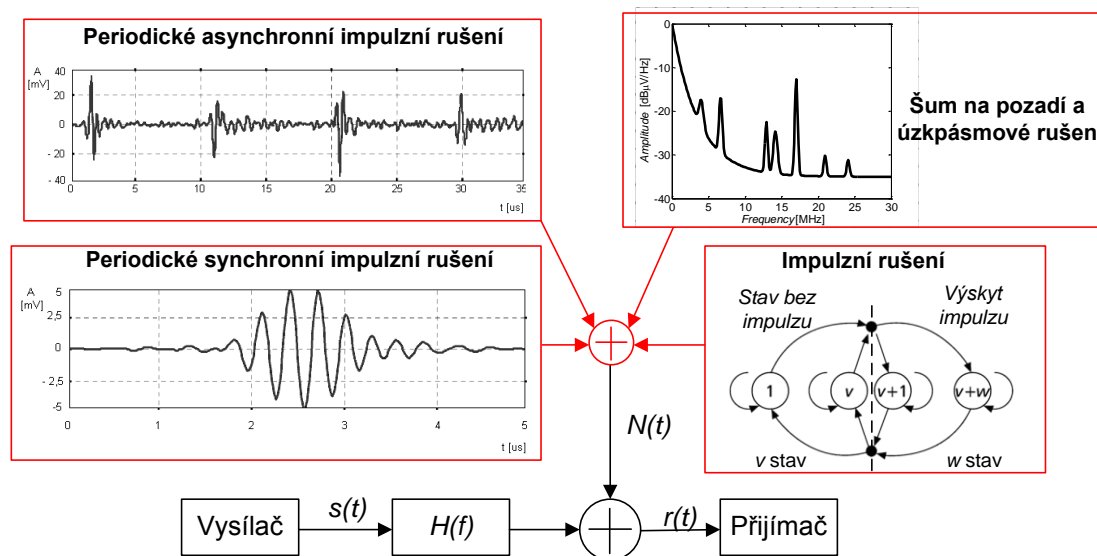
- PLC je jedinou technologií, která se může porovnávat s bezdrátovými řešeními z hlediska nákladů na vybudování komunikační infrastruktury, jelikož silnoproudé vedení je již vybudováno a je všude dostupné. Takže hlavní výhodou je úspora finančních prostředků pro budování komunikační infrastruktury. V určitých oblastech může tuto výhodu převážit nutnost velkého počtu opakovačů.
- Tradičně oddělené zařízení pro měření a komunikaci mohou být v PLC modemu sloučeny dohromady. Tato výhoda má využití zejména v aplikacích pro měření kvality elektrické energie.
- Díky vybudované infrastruktuře může PLC sloužit jako vhodný redundantní kanál.
- Silnoproudé vedení je pod přímou kontrolou distributorů.
- Pro určité oblasti (např. distribuční trafostanice (DTS) pod úrovní země), kde není možno uvažovat síť veřejného operátora či rádiovou komunikaci kvůli nemožnosti umístění antén, je PLC jediným cenově dostupným řešením.

4.3 Problémové oblasti PLC

Při datových přenosech po silnoproudých vedeních je několik problémových oblastí. Každé silnoproudé vedení se nevyhnutelně vyznačuje značným útlumem signálu a různorodým rušením a šumem, takže přenos dat vykazuje bez mechanismu kontroly chyb velmi vysokou chybovost. Značný vliv mají i různorodé typy silnoproudých vedení (kabelové/vzdušné) a přechody mezi nimi, stáří vedení a materiál vedení (hliník/měď). Vlastnosti a parametry vedení jsou navíc časově, frekvenčně a místně proměnné.

4.3.1 Rušení

Obr. 4.1 znázorňuje zjednodušený blokový model PLC komunikačního kanálu, ve kterém jsou zahrnuty všechny typy rušení. Specifikace jednotlivých typů rušení na silnoproudých vedeních se v současnosti ustálila následovně [P.16], [P.17]: šum na pozadí, úzkopásmové rušení a impulsní rušení. Impulsní rušení se dále dělí na periodické synchronní, periodické asynchronní a asynchronní.



Obr. 4.1: Rušení na silnoproudém vedení.

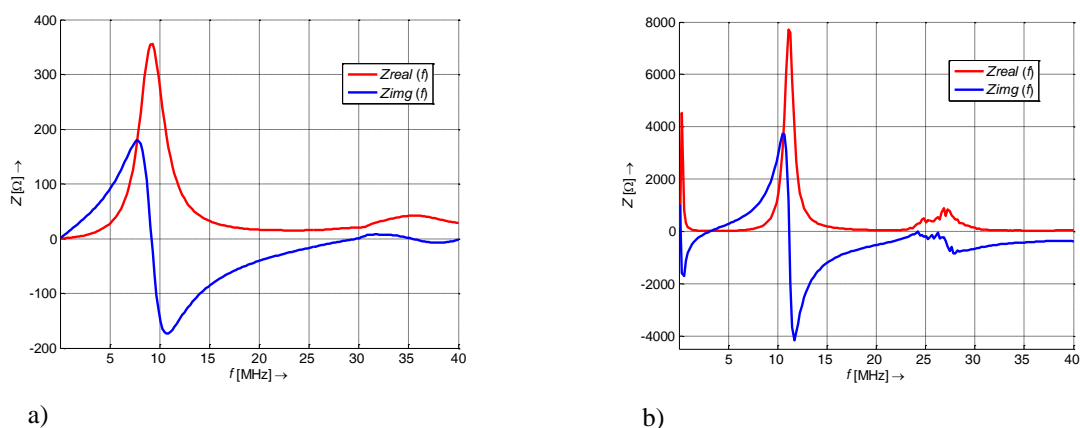
4.3.2 Přenosová rychlost a komunikační dosah PLC

Praktická měření BB-PLC [A.3] ukazují, že tato technologie má stále problémy s dosažením komunikačních vzdáleností (dosahů) dle teoretických předpokladů (bez uvažování dodatečných opakovaců).

Také výsledky s měření NB-PLC (kapitola 5.1.1) ukazují, že především HDR NB-PLC má stále problémy s dosažením přenosových rychlostí dle teoretických předpokladů. Přenosová rychlost díky rušení a provedení silnoproudé sítě se vzdáleností výrazně klesá. Robustní modulační techniky se snaží rušení minimalizovat, ale na úkor spolehlivosti snižují přenosovou rychlost.

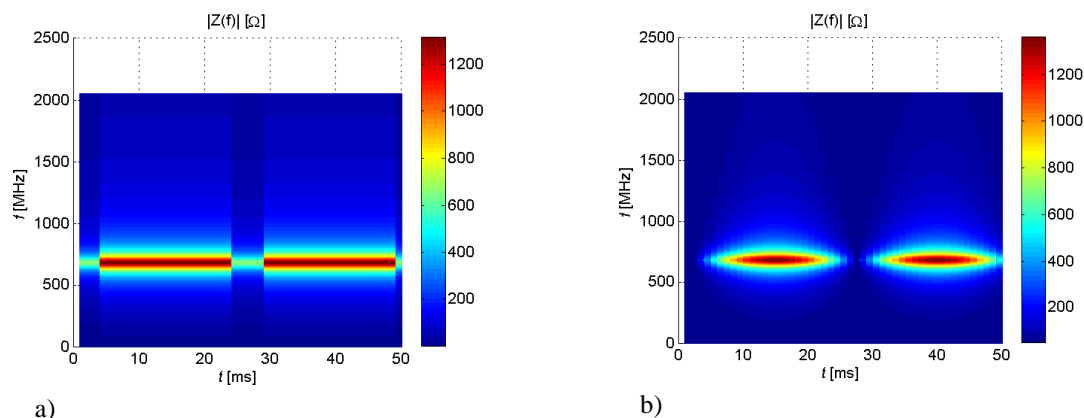
4.3.3 Frekvenční a časová proměnnost

PLC charakteristiky a parametry se mění s frekvencí, lokací a časem. Například měření uvedená v [P.18] ukázala základní vlastnosti zátěže spotřebičů, především impedance je ve většině případů frekvenčně selektivní a vykazuje tvar rezonančního obvodu. Obr. 4.2 zobrazuje příklad frekvenčně selektivní impedance zátěže pro koncový prvek SG sítě - PLC modemem.



Obr. 4.2: Měřená impedance zátěže: a) kapacitní člen PLC modemu, b) indukční člen PLC modemu.

Vnitřní PLC vedení je také proměnné v čase, jak dlouhodobě (způsobené lidskou aktivitou), tak krátkodobě (v závislosti na síťovém napětí). Tato časová proměnnost je způsobena funkcí připojených spotřebičů. Impedance těchto spotřebičů vykazují v síti kolísání synchronizované s periodou síťového napětí. Toto kolísání vychází z podstaty nelinearity těchto zařízení, jelikož tyto zařízení obsahují usměrňovače (např. fluorescenční lampy). Závislost impedance na síťovém napětí lze rozdělit do dvou kategorií: se skokovou změnou a s plynulou změnou (viz Obr. 4.3).



Obr. 4.3: Časová a frekvenční proměnnost impedance zátěže: a) se skokovou změnou, b) s plynulou změnou.

4.3.4 Chaotická standardizace

Standardizace v oblasti PLC je stále jednou z překážek pro plošné nasazení PLC v Smart Grid sítích. V posledních letech se oblast standardizace BB-PLC posunula z nedostatku BB-PLC standardů k opačnému extrému a to několika navzájem nespolečných a nekompatibilních standardů. Tyto standardy vydaly například instituce TIA-1113, ITU-T G.hn, IEEE 1901 FFT-OFDM [P.20] a IEEE 1901 Wavelet-OFDM [P.19], [P.21]. Proto je velmi obtížné vybrat vhodný standard pro SG účely, případně skupinu standardů. Tento výběr by měla ulehčit metodika porovnání jednotlivých řešení představena v kapitole 6.

Podobná situace několika navzájem nespolečných standardů je v oblasti HDR NB-PLC, například dva nejnovější standardy IEEE P1901.2 a ITU-T G.hnem a již existující standardy G3-PLC a PRIME.

4.3.5 Další aspekty bránící rozšíření PLC

Mezi další aspekty bránící rozšíření PLC technologií lze zařadit:

- *Volbu nesprávné technologie pro dané využití v SG.* V současné době vytváří někteří výrobci PLC technologie v USA tlak na využití BB-PLC pro Smart Grid aplikace. BB-PLC zařízení byla však navržena především pro domácí síť HAN a pro přístup k Internetu a ne pro Smart Grid použití. Obecně lze říci, že volba správné PLC technologie pro SG aplikace je zásadní. Na tento zásadní aspekt reaguje tato práce návrhem metodiky porovnání PLC technologií (kapitola 6).
- *Nová řešení a jejich chybějící reálná ověření.* Z hlediska nových standardů, například ITU G.hnem nebo IEEE 1901.2, je nutné před jejich nasazením v rámci SG sítě provést rozsáhlé experimentální měření a pilotní projekty pro ověření těchto nových řešení. Také je nutné rozsáhlé ověření v terénu pomocí měření, aby se ukázaly efektivní dosahy, rychlosti či vliv rušení.
- *Protichůdné požadavky: vysoká přenosová rychlost a velký komunikační dosah.* Z hlediska vizí budoucích Smart Grid aplikací je zde obava, že z dlouhodobého pohledu nebude přenosová rychlost HDR NB-PLC dostačující pro budoucí Smart Grid požadavky [P.3]. Tyto obavy nejsou ale v současné době nijak podloženy, jelikož pokud bude stanoveno, jaké objemy dat s jakou prioritou a jak často se budou přenášet, budou rychlosti HDR NB-PLC dostačující.
- *Chybovost versus přenosová rychlost.* Především u širokopásmových systémů, kdy je rychlost v řádek desítek až stovek Mbit/s, je náchylnost na chyby výrazná a tím je nutné část přenosové kapacity vyhradit na detekci a korekci chyb. U těchto systémů je poměr mezi užitečnými a redundantními daty až 1:3 (tedy pouze 30 % přenosové kapacity je pro užitečná data). U systémů s nižšími rychlostmi, tedy především u NB-PLC, je tento poměr většinou 1:1.

5 MĚŘENÍ, MODELOVÁNÍ A SIMULACE PLC

Tato kapitola se zaměří na dvě významné oblasti výzkumu PLC pro Smart Metering účely, a to experimentální měření (pilotní projekty) a modelování či simulaci.

5.1 Experimentální měření NB-PLC pro Smart Metering využití

Z hlediska AMR/AMI aplikací, Smart Meteringu či Demand Response má NB-PLC několik výhod oproti BB-PLC technologii. Tyto výhody jsou následující:

- CENELEC EN 50065 standard definuje frekvenční pásmo pro úzkopásmové PLC technologie. Toto pásmo je jako jediné legislativně povoleno na všech kontinentech. V některých zemích jsou jiné frekvence zakázané.
- NB-PLC síť může existovat ve spojení s BB-PLC sítí přes frekvenční multiplex (FDM), tzn. možnost realizace heterogenních hybridních sítí.
- BB-PLC standardy IEEE 1901 a ITU-T G.hn nejsou přímo určeny pro Smart Grid a Smart Metering, ale pro domácí automatizaci, Internetový přístup či HAN síť. HDR NB-PLC je přímo cíleno pro Smart Grid či Smart Metering aplikace a jejich požadavky.
- Úzkopásmová komunikace s OFDM (např. G3-PLC či PRIME) má díky DLMS/COSEM vynikající standardizaci a proto je možné použít elektroměry různých výrobců v jedné síti.

NB-PLC řešení potřebují stále rozsáhlé ověření v terénu pomocí měření, aby ukázaly efektivní dosahy a propustnosti. Také HDR NB-PLC řešení, například současné rozšířené standardy PRIME a G3-PLC, musí být ověřeno z hlediska dosahů, datových rychlostí, vlivu rušení a vlivu velikosti topologie na ztrátovost/chybovost.

Z hlediska vizí budoucích Smart Grid aplikací je zde obava, že z dlouhodobého pohledu nebude přenosová rychlost NB-PLC dostačující pro budoucí Smart Grid požadavky [P.3]. Proto část experimentálního měření byla zaměřena na měření datových rychlostí na aplikační vrstvě pro HDR NB-PLC. S rostoucími požadavky na bezpečnost bude nutné také uvažovat vyšší režii, tedy vyhradit část přenosové kapacity pro zabezpečení komunikace. Tento aspekt nahrává využití BB-PLC.

Problematika experimentálního měření se standardy PRIME a G3-PLC byla v článku [A.6] prezentována na konferenci „IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)“. Problematika experimentálního měření vlivu rušení na PLC byla prezentována na české konferenci ČK CIRED [A.7].

5.1.1 Měření datových rychlostí a ztrátovosti NB-PLC modemů

Pro experimentální měření byly vybrány následující komerčně dostupné úzkopásmové PLC modemy vhodné pro Smart Metering využití:

- PLC modul IC Yitran IT700 [M.1] – systém jedné nosné frekvence (LDR NB-PLC);
- C2000 Power Line Modem Developer's Kits [M.2] – standardy PRIME a G3-PLC (HDR NB-PLC), řešení firmy Texas Instruments;
- SGCM-P40 module [M.3] – standard G3-PLC (HDR NB-PLC), řešení na bázi čipu Maxim2992.

Měření bylo provedeno v pásmu CENELEC A [M.4] s kabeláží CYKY 3x2.5. Byly uvažovány následující scénáře lišící se velikostí topologie a délkou přímé cesty mezi modemy vysílacím a přijímacím:

- *Malá topologie:* Měření probíhalo na jednom zásuvkovém obvodě v rámci dvou laboratorních místností, které byly kabelovým rozvodem navzájem propojeny. Předpokládaná délka kabeláže mezi modemy (přímá cesta) byla 16 m.
- *Střední topologie:* Měření probíhalo na jednom zásuvkovém obvodě v rámci laboratoře a chodby. Předpokládaná délka kabeláže mezi modemy (přímá cesta) byla 27 m.
- *Velká topologie:* Měření probíhalo na jednom zásuvkovém obvodě, jehož kabeláž vedla přes rozvodnou skříň. Předpokládaná délka kabeláže mezi modemy (přímá cesta) byla 45,5 m.
- *Experimentální topologie s volnou kabeláží:* Měření proběhlo na volné kabeláži bez odboček o délce 1 km (realizováno pouze pro modul SGCM-P40).

Tab. 5-1 ukazuje výsledky měření ztrátovosti a přenosové rychlosti na aplikační vrstvě pro jednotlivé modemy a měřící scénáře.

Tab. 5-1: Datové rychlosti a ztrátovost úzkopásmových PLC modemů.

Modem, standard a modulace	Ztrátovost [%] Rychlost [kbit/s]	Velikost topologie			
		Malá topologie	Střední topologie	Velká topologie	Volná kabeláž
Yitran, DCSK s ROBO	Ztrátovost	0	0	71,3	-
	Rychlost	3,27	2,71	2,24	-
C2000, PRIME, D8PSK	Ztrátovost	0	100	100	-
	Rychlost	9,14	0	0	-
C2000, G3, ROBO	Ztrátovost	0	0	0	-
	Rychlost	2,36	2,18	1,76	-
SGCM-P40, G3, ROBO	Ztrátovost	0	0	0	0
	Rychlost	5,3	5,3	5,3	6,3
SGCM-P40, G3, D8PSK	Ztrátovost	0	2,1	100	5,8
	Rychlost	43,39	43,39	0	47,01

Výsledky měření ukázaly porovnání standardů PRIME a G3-PLC. Z výsledků měření těchto dvou standardů je patrné, že pro dosažení maximálního dosahu komunikace bez opakovacích a bezchybného přenosu by měla být zvolena robustní modulace (ROBO). Na druhou stranu pro dosažení maximální datové rychlosti by měla být zvolena modulace D8PSK. V reálném prostředí by bylo vhodné použít tzv. adaptivní modulace (ATM), kdy podle kvality kanálu je zvolen vhodný typ modulace pro bezchybný přenos.

Pro porovnání byly do měření zahrnuty moduly Yitran využívající pro komunikaci proprietární modulaci DCSK, která nevyužívá OFDM systém, ale je založena na systému jedné nosné frekvence. Výsledky měření s Yitran dosahovaly nízkých rychlostí, ale vyšší spolehlivosti a vyšších komunikačních dosahů.

Výsledky těchto měření byly také porovnány s řešeními od firmy Maxim, konkrétně s SGCM-P40 modemem na bázi čipu Maxim 2992 a standardu G3-PLC. Výsledky měření ukázaly vyšší přenosovou rychlost v porovnání s modemem od Texas Instruments. Podařilo se také ověřit, že jsou modemy schopny komunikovat na vzdálenost jednoho kilometru bez použití opakovacích.

5.1.1.1 Měření vlivu rušení na PLC komunikaci

Problematikou rušení v PLC a modelováním zdrojů rušení se v nedávné době zabývalo mnoho publikací [M.5]–[M.20]. Ve většině těchto publikací se zaměřuje výzkum zejména na modelování rušení. Měření vlivu rušení na PLC komunikaci je uvedeno jen v několika málo publikacích. Pokud se publikace zaměřují na experimentální měření, tak jsou provedena většinou pro pásmo 0,2 až 30 MHz, takže výsledky těchto měření jsou aplikovatelné pouze pro BB-PLC systémy. Scénáře rušení pro NB-PLC a experimentální měření jednotlivých rušení pro NB-PLC komunikaci nejsou ve výše uvedených zdrojích doposud dostatečně realizovány.

Proto pro určení vlivu rušení na úzkopásmovou PLC komunikaci byla provedena měření v Centru pro inteligentní energetiku firmy ModemTec [M.21]. Bylo provedeno měření při definovaném rušení v síti, přičemž byly zjištěny parametry šumu, které určují hranice pro úspěšnou komunikaci.

Měření bylo provedeno s modemy SGCM-P40, které pracují na standardu G3-PLC. Tyto modemy využívají PLC čip firmy Maxim MAX2992 [M.22] a AFE MAX 2991 [M.23]. Měření bylo realizováno pro všechny dostupné režimy modulací ROBO, DBPSK, DQPSK, D8PSK a ATM v pásmu CENELEC A (36–90 kHz).

Výsledky byly detailně prezentovány na konferenci ČK CIRED 2014 [A.7].

5.2 Experimentální měření NB-PLC modemů – porovnání systému s více nosnými a systému s jednou nosnou frekvencí

Cílem měření bylo porovnat PLC modemy využívající systém s více nosnými (konkrétně systém OFDM) a systém jedné nosné frekvence z hlediska možných komunikačních vzdáleností, rychlostí, chybovosti a vlivu rušení.

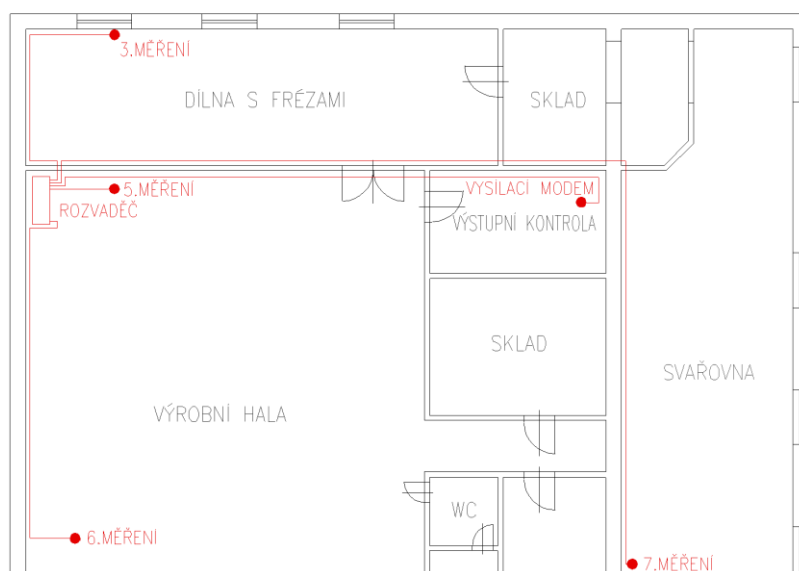
K ověření NB-PLC technologie, která využívá OFDM byl vybrán vývojový kit od firmy Texas Instruments s označením TMDSPCKIT-V3 postavený na C2000 TMS320F28069 řídicí kartě s analogovým rozhraním AFE031 (stejný kit jak v kapitole 5.1). Měření bylo provedeno pro frekvenční pásmo CENELEC-A a standardy G3-PLC (35–91 kHz) a PRIME (42–89 kHz) [M.24].

Jako zástupci NB-PLC technologie jedné nosné frekvence byly vybrány PLC modemy STMICROELECTRONICS (STM) EVALKITST7580-1 s čipem ST7580, který je postaven na modulace s klíčováním frekvence/fáze (FSK/PSK) [M.25].

5.2.1 Výsledky měření – porovnání systému s více nosnými a s jednou nosnou

Měření bylo uskutečněno v průmyslové firmě, která se věnuje zakázkové strojní výrobě. Měření bylo rozděleno do šesti scénářů, které se liší vzdáleností a připojenými spotřebiči představujícími rušení. Měření bylo provedeno na NN vedení s kabely typu CYKY 3x2.5.

První dva scénáře byly testovací pro ověření funkčnosti na krátkou vzdálenost s minimálním rušením. Další měřicí body jsou znázorněny na Obr. 5.1.



Obr. 5.1: Zapojení modemů v dalších fázích měření.

PLC modemy se systémem více nosných

V scénáři 3. byl modem zapojen v dílně, kde se pracuje na čtyřech klasických frézách, dvou klasických soustruzích a jednom CNC soustruhu. V dílně se dále nachází čtyři vrtací soustavy. Při zapojení modemu v této dílně bohužel nebylo možné uskutečnit komunikaci ani u jednoho ze standardů PRIME či G3. Délka přenosového vedení byla odhadnuta na 80 metrů. Hodnota SNR se pohybovala mezi 0 až 2 dB.

U 4. scénáře byl modem zapojen v místě, kde dochází k expedici vyrobeného zboží. V těsné blízkosti se nachází razicí stroj a stolní počítač. Při zapojení modemu v místě měření 4 byla vzdálenost od vysílacího modemu 40 metrů a hodnota SNR se pohybovala v rozmezí od 0 do 3 dB. Tato hodnota SNR již byla dostatečná pro standard G3 a jeho modulaci ROBO. Ostatní modulace standardu G3 či standardu PRIME komunikaci neumožňovaly.

Při 5. scénáři byl modem zapojen u vertikální frézy, dvou pásových pil na železo, kotoučové brusky a brusky na vrtáky. Délka přenosového vedení činila 110 metrů. Hodnota SNR byla pouze 0 až 2 dB. Bohužel tato hodnota odstupů signálu od šumu nebyla dostatečná pro úspěšnou komunikaci.

Poslední 6. měřicí scénář byl uskutečněn v dílně, ve které se svařuje. Vzdálenost mezi modemy byla 130 metrů. Hodnota SNR byla v tomto případě 0 dB a nebylo možné jakkoliv navázat komunikaci.

Tab. 5-2 souhrnně uvádí přehled hodnot SNR a výsledky měření s uvedením rychlosti a modulace, která umožňovala komunikaci.

Tab. 5-2: Výsledky měření pro scénáře 3. až 6.

	3. scénář	4. scénář	5. scénář	6. scénář
Funkční modulace, rychlost na aplikační vrstvě	-	G3-PLC, ROBO: 2027 bit/s	-	-
SNR [dB]	0–2	0–3	0–2	0

PLC modemy využívající jedné nosné

Výsledky měření s modemy STM ze scénářů 3. až 6 jsou uvedeny v Tab. 5-3, kde jsou prezentovány hodnoty SNR jednotlivých scénářů a počet správně přenesených příkazů PING na vysílači TX a přijímači RX. Tabulka uvádí počet správně přijatých pingů ze 100 vyslaných.

Z naměřených výsledků plyne, že nejlepších výsledků dosahuje kódovaná modulace BPSK s algoritmem PNA (algoritmus PNA slouží k eliminaci špiček v šumu). Jako velice spolehlivá se ukázala i modulace BFSK. Dále bylo zjištěno, že modulace BPSK, QPSK a 8PSK jsou naprosto nevhodné pro použití v prostředí, kde je vyšší výskyt rušení.

Při porovnání hodnot SNR s modemy Texas Instruments se potvrdilo, že STM modemy lépe oddělují signál od šumu, nebo mají vyšší vysílací výkon, který si poradí i s větším rušením v silnoproudé síti.

Tab. 5-3: Výsledky měření pro 3. až 6. scénář.

Modulace	3. scénář		4. scénář		5. scénář		6. scénář	
	<i>TX-Ping</i> <i>OK</i>	<i>RX-Rec.</i> <i>OK</i>	<i>TX-Ping</i> <i>OK</i>	<i>RX-Rec.</i> <i>OK</i>	<i>TX-Ping</i> <i>OK</i>	<i>RX-Rec.</i> <i>OK</i>	<i>TX-Ping</i> <i>OK</i>	<i>RX-Rec.</i> <i>OK</i>
BPSK	0/100	23/100	0/100	76/100	0/100	2/100	0/100	0/100
QPSK	0/100	0/100	0/100	4/100	0/100	0/100	0/100	0/100
8PSK	0/100	0/100	0/100	0/100	0/100	0/100	0/100	0/100
BFSK	73/100	80/100	95/100	98/100	0/100	66/100	0/100	78/100
BPSK-CODED	0/100	88/100	88/100	88/100	0/100	53/100	0/100	47/100
QPSK-CODED	0/100	48/100	91/100	95/100	0/100	36/100	0/100	0/100
BPSK-CODED-PNA	54/100	55/100	96/100	99/100	0/100	75/100	0/100	77/100
SNR	1–6		4–8		1–4		0–1	

5.3 Modelování a simulace PLC

Problematika modelování přenosového kanálu PLC komunikace je stále klíčový aspekt pro návrh PLC komunikačního systému a PLC modemů.

Tato kapitola se zaměří na představení a analýzu dostupných PLC simulátorů a jejich porovnání.

5.3.1 PLC simulátory či generátory

PLC simulátory či generátory slouží pro výzkum parametrů, které významně ovlivňují přenosovou funkci PLC kanálu. Díky znalosti tvaru přenosové funkce můžeme při přenosu dat vynechat frekvence, na kterých dochází k velkému útlumu nebo zvolit robustnější typ modulace.

Na rozdíl od jiných technologií je pro PLC k dispozici pouze několik volně dostupných simulačních nástrojů. Většina z nich je realizována v prostředí programu Matlab. K dispozici jsou například simulátory Cañete [M.26], FTW [M.27] nebo autorův LTI PLC generátor [M.28]. Z důvodu nedostatku simulačních nástrojů byl na univerzitě ve Vancouveru vyvinut framework pro simulace PLC komunikace v prostředí NS-3 [M.29].

LTI PLC generátor byl představen v impaktovaném článku [A.9] a porovnání s jinými simulátory, rozšíření a optimalizace byly popsány v impaktovaném článku [A.2].

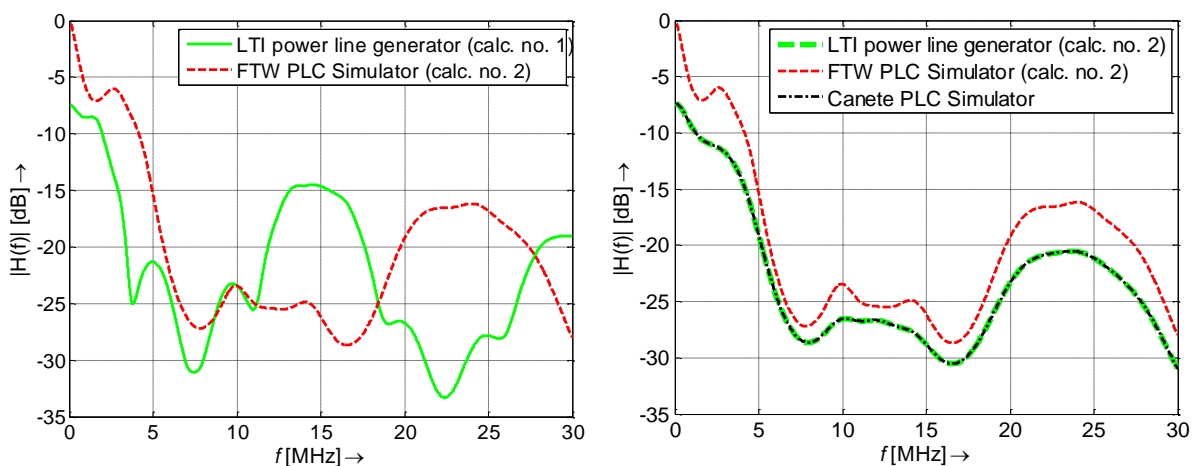
5.3.2 Porovnání výstupů simulátorů v Matlabu –vliv primárních parametrů na přenosovou funkci

Obr. 5.2 a) zobrazuje porovnání výstupů LTI generátoru a FTW simulátoru. Z obrázku je vidět velmi rozdílný průběh přenosové funkce pro stejnou referenční topologii na Obr. 5.3. Na základě analýzy byla odhalena odlišnost ve způsobu výpočtu primárních parametrů.

LTI PLC generátor uvažoval pro výpočet primárních parametrů rozměry kabelů a fyzikální vlastnosti materiálů kabelů [M.30] a FTW a Cañete simulátory uvažují pro výpočet primárních parametrů data od výrobců silnoproudých kabelů [M.31], [M.32]. Podrobně jsou tyto výpočty analyzovány v již zmíněném článku [A.2]. Pro zachování návaznosti s tímto článkem jsou v obrázcích níže použity legendy calc. no. 1 pro výpočet dle rozměrů a fyzikálních vlastností a calc. no. 2 pro výpočet dle dat od výrobců.

Obr. 5.2 b) ukazuje porovnání všech simulátorů v případě stejného způsobu výpočtu primárních parametrů z dat od výrobců silnoproudých kabelů. Tento typ výpočtu je označen jako calc. no. 2 (anglické označení pro návaznost s výše uvedeným článkem).

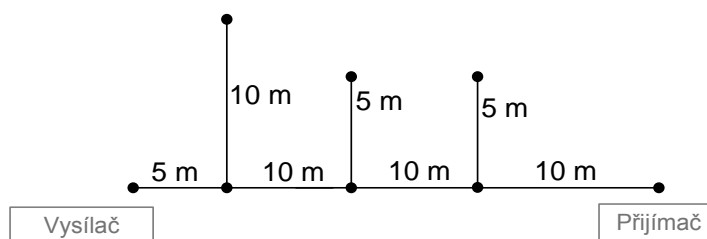
Obr. 5.4 zobrazuje porovnání sekundárního parametru charakteristické impedance Z_C pro oba způsoby výpočtu. Charakteristická impedance je třikrát větší pro druhý způsob výpočtu použitý v FTW simulátoru. Výsledky reálných měření publikovaných v [A.9] a [M.33] představují hodnotu charakteristické impedance 80–90 Ω , což koresponduje s našim LTI generátorem. Zatímco výsledky publikované v článku [M.34] představují hodnotu charakteristické impedance 200 Ω , což odpovídá FTW simulátoru.



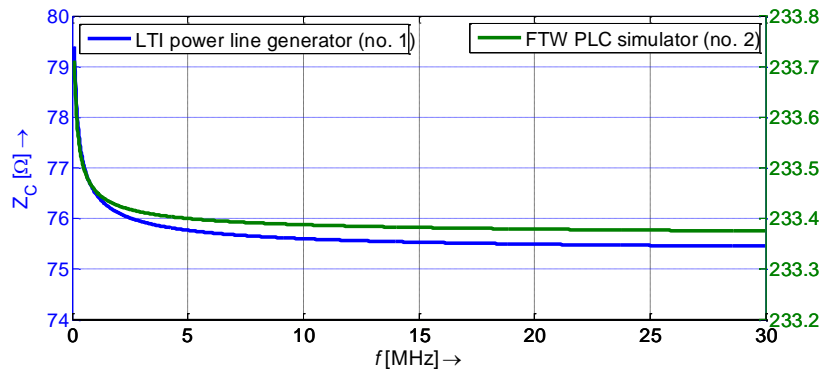
a) rozdílný způsob výpočtu primárních parametrů

b) stejný způsob výpočtu primárních parametrů

Obr. 5.2: Porovnání přenosových funkcí.

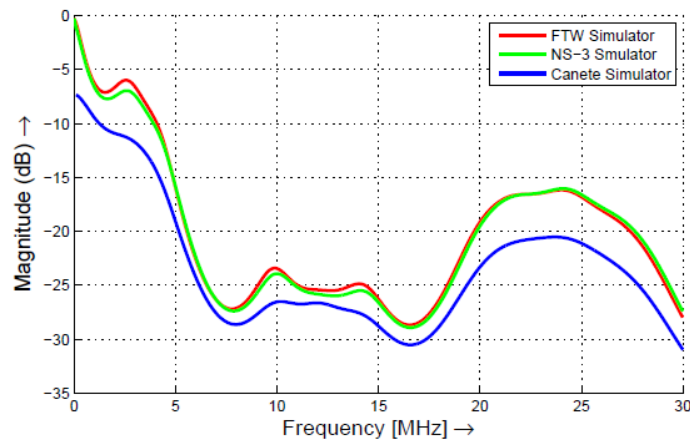


Obr. 5.3: Referenční topologie – pro porovnání převzata z [M.30].



Obr. 5.4: Porovnání sekundárního parametru charakteristické impedance pro oba způsoby výpočtu.

Obdobně jako u simulátoru v Matlabu v předchozí kapitole byl PLC simulátor v NS-3 rozšířen o oba výpočty primárních parametrů. Také byl simulátor rozšířen o kabely CYKY používané v Evropě a ČR. Díky těmto rozšířením bylo možné porovnat PLC simulátor v NS-3 se simulátory v Matlabu. Obr. 5.5 zobrazuje porovnání pro referenční topologii (viz Obr. 5.3) a kabel CYKY 3x2.5 a použití stejného způsobu výpočtu primárních parametrů z dat od výrobců silnoproudých kabelů.



Obr. 5.5: Porovnání PLC simulátoru v NS-3 se simulátory v Matlabu.

Z výše uvedených výsledků je patrné, že primární parametry přenosového vedení jsou velmi důležitá vstupní data pro modelování. Proto je pro efektivní modelování nutné získat co nejpřesnější hodnoty. Primární parametry jsou také závislé na reálných podmínkách a počasí, proto konstantní primární parametry mohou pro určité případy být velmi nepřesné. Real-time výpočet přenosových parametrů bude pro některé případy rozvoje naprosto nezbytný.

6 METODIKA HODNOCENÍ PLC TECHNOLOGIÍ A PILOTNÍCH PLC REALIZACÍ

Jak již bylo zmíněno, z pohledu energetiky a v návaznosti na legislativu a směrnice bude základním kamenem SM spolehlivá a bezpečná dodávka elektrické energie na všech napěťových hladinách, proto bude klíčovým aspektem rozvoje SG komunikační infrastruktura.

Pro provozovatele distribučních soustav je při budování komunikační infrastruktury nejtěžší volba a výběr vhodné technologie. Proto byly pro možnost volby a porovnání představeny a publikovány metodiky hodnocení. Můžeme například uvést „Metodiku pro hodnocení komunikačních částí pilotních projektů“ představená v rámci příspěvků [ME.1] a [ME.2] na konferencích ČK CIRED 2014 a 2013, která se zaměřuje na všechny možné komunikační technologie pro SM. Oblast PLC je tak specifická, že jsme realizovali metodiku hodnocení pouze na PLC technologie.

Metodika hodnocení PLC technologií umožní především provozovatelům distribučních soustav porovnat jednotlivé PLC technologie a zvolit vhodnou PLC technologii pro vybudování pilotní realizace, ale také umožní porovnat již instalované PLC technologie v jednotlivých pilotních projektech. Dále metodika poskytne podklady pro návrh komunikační infrastruktury či umožní prezentaci výsledků přehlednou formou.

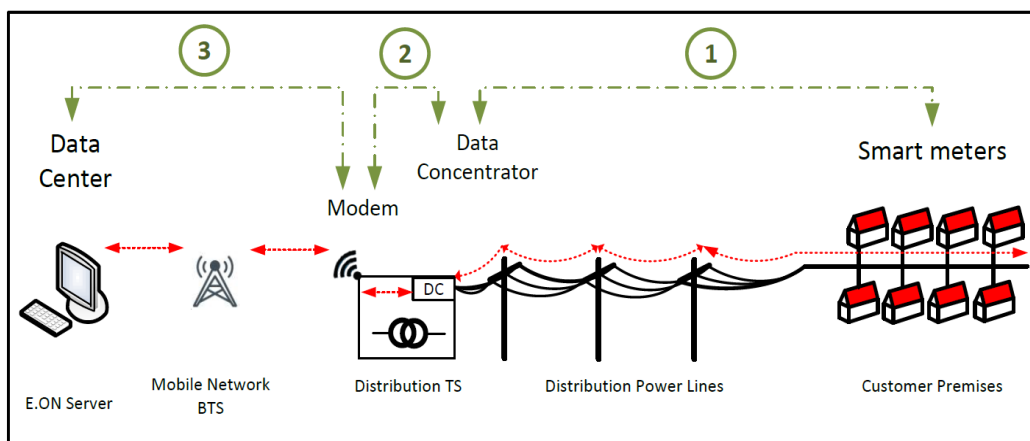
Návrh metodiky hodnocení pilotních PLC realizací popisuje autorův článek [A.3] na konferenci ČK CIRED 2015.

6.1.1 Návrh metodiky hodnocení PLC technologií a pilotních PLC realizací

Realizovaná metodika byla rozdělena do tří částí:

1. *Testování „Modem to Modem“ (point-to-point)*. Testování point-to-point bylo zvoleno především pro laboratorní testování, kde probíhalo měření se dvěma modemy. Zároveň lze všechny body metodiky z této skupiny aplikovat na trasu s opakovači či v reálné síti.
2. *Testování „Data Center to Smart Meter“* (viz Obr. 6.1). Testování „Data Center to Smart Meter“ bylo provedeno především pro testy, které je nutné provést z datové centrály (například sběr 15-minutových profilů či Ad-hoc dotazy). Zde je nutné upozornit, že do komunikační trasy vstupuje komunikace přes mobilního operátora (viz Obr. 6.1).
3. *Další testy: obecná kritéria, mechanická odolnost či bezpečnost*. V poslední části metodiky byly uvažovány netechnické parametry, ale také velmi důležité parametry týkající se mechanické odolnosti a bezpečnosti (např. splnění BSI profilu).

Tab. 6-1 ukazuje některá kritéria z metodiky pro část 1. Testování „Modem to Modem“ (point-to-point).



Obr. 6.1: Komunikační řetězec pro Smart Metering.

Tab. 6-1: Ukázka metodiky pro část 1. Testování „Modem to Modem“ (point-to-point).

Test code	Test name	Popis	Způsob měření
111	Testování parametrů 2. – 3. vrstvy		
a	<i>Test propustnosti</i>	Výsledky měření propustnosti by měly být znázorněny ve formě grafu, kde jsou na osu x vyneseny délky rámců a na osu y rychlost v bitech za sekundu.	Měření dle doporučení RFC 2544 (např. NetBlazer, EtherSAM, Packet Blazer EXFO).
b	<i>Test zpoždění</i>	Výsledky měření by měly být ve formě grafu, kdy jsou na ose x vyneseny délky rámců a na osu y naměřené hodnoty zpoždění.	Měření dle doporučení RFC 2544 (např. NetBlazer, EtherSAM, Packet Blazer EXFO).
112	Vliv rušení na předchozí parametry		
a	<i>širokopásmový šum</i>	Cílem je změřit parametry z Test code 111 v závislosti na rostoucí intenzitě širokopásmového šumu.	Testování dle doporučení RFC 2544 s generátor šumu PROPOWER - 1.
b	<i>úzkopásmový šum</i>	Cílem je změřit parametry z Test code 111 v závislosti na rostoucí intenzitě úzkopásmového šumu pro různé frekvence.	Testování dle doporučení RFC 2544 s generátorem Agilent 33120A nebo 33521A + injektor v podobě vazebního členu.
c	<i>impulzní rušení</i>	Cílem je změřit parametry z Test code 111 v závislosti na impulzním rušení.	Testování dle doporučení RFC 2544 s generátor signálu Agilent 33220 s vazebním členem.
113	BER v závislosti na rušení	Bitová chybovost v závislosti na širokopásmovém a úzkopásmovém rušení. Místo BER (bit error rate) lze uvažovat FER (frame error rate) či PER (packet error rate).	BER měření v NetBlazeru, Trend Unipro GbE či jiném podobném testeru.
116	Dosahy modemů bez opakovací	Možný dosah modemů v point-to-point v laboratorních a experimentálních podmínkách - ověření definovaných teoretických dosahů od výrobce.	Testování pomocí nástrojů od výrobce modemů.
119	Vliv jiných BPL modemů	Ověření vzájemného působení dvou BPL technologií pro jiný účel (Smart Metering a Home Area Network (HAN)).	Testování dle doporučení RFC 2544.
120	Elektromagnetická odolnost	Elektromagnetická odolnost modemů proti krátkodobým poklesům síťového napětí a krátkodobým výpadkům síťového napětí.	Měření s generátorem Seaward Mace v souladu s ČSN EN 61000-4-11.

6.1.2 Aplikace a ověření metodiky

Aplikace a ověření metodiky byla rozdělena do několika částí. První část byla provedena v laboratorních podmínkách (umělá síť) na oddělené části rozvodné sítě. Hlavním cílem této umělé sítě bylo to, aby mohla být kdykoliv opakovatelně nastavena za přesně stejných podmínek i v jiném místě pro možnost porovnání a opakování měření s modemy jiných výrobců. Druhou částí měření v laboratorních podmínkách na umělé síti bylo měření celé komunikační trasy, tedy Data Center – elektroměr (viz Obr. 6.1). Zde již vstupuje také vliv přenosu přes mobilní síť.

Další dvě měření pro aplikaci metodiky byly realizovány v pilotní síti. Tato měření přinesla reálné výsledky, ale mnohem problematičtější již je možnost opakovatelného měření s modemy jiných výrobců za stejných podmínek. Přesto jsme se ale pokusili v reálné síti provést porovnání s úzkopásmovými modemy.

Aplikace a ověření metodiky byla rozdělena do následujících bodů měření:

- na **umělé NN síti** v laboratorním prostředí – měření s **širokopásmovými** modemy.
 - Gateway to Gateway (point-to-point).
 - Data Concentrator (Data Center) to Modem (Smart Meter).
- na **NN vedení** – měření s **úzkopásmovými** modemy.
- na **VN vedení** – měření s **širokopásmovými** modemy.

Výsledky měření jsou podrobně představeny v článku [A.3] prezentovaném na konferenci ČK CIRED 2015.

7 DALŠÍ VÝSLEDKY HABILITAČNÍ PRÁCE S UVEDENÍM NOVÝCH POZNATKŮ PRO DALŠÍ ROZVOJ VĚDY

7.1 Bezdrátové technologie pro Smart Metering

Jak bylo uvedeno v kapitole 3, pro určité oblasti použití je vhodné uvažovat pro účely SG a SM rádiovou síť, kterou je možné realizovat pomocí rádiových modemů pracujících v licenčním nebo nelicenčním pásmu.

7.1.1 Rádiová komunikace v licenčním pásmu

V rámci projektu TAČR „Applikovaný výzkum inteligentních systémů pro sledování energetických sítí“ [A.13] byly navrženy dvě experimentální rádiové sítě vycházející z reálného umístění indikátorů poruchových stavů nebo monitorů kvality firmy MEgA - Měřicí Energetické Aparáty, a.s..

Pomocí aplikace Radio Mobile [W.1], která umožňuje simulovat šíření rádiových vln a jejich útlum ve frekvenčním rozsahu 20 MHz–20 GHz, byla provedena simulace pokrytí signálem a bylo provedeno měření útlumu a ztrát trasy navržených experimentálních sítí s uvažováním modemů RipEX od firmy RACOM [W.2].

Simulace a měření pomocí Radio Mobile umožnily návrh rádiové sítě pro sběr dat z reálných měřících bodů, návrh pozice a výšky opakovače či vyhodnocení problémových míst komunikace.

Návod a popis Radio Mobile a také ukázky simulací byly popsány v autorově části skript Vyšší techniky datových přenosů [A.11]. Výzkumnou část práce popisuje článek [A.1] vydaný v impaktovaném časopise.

7.1.2 Rádiová komunikace v nelicenčním pásmu

Cílem bylo navrhnout vhodný rádiový modul pro bezdrátový přenos na delší vzdálenost a ověřit jeho vhodnost pro účely dálkového sběru dat například z indikátorů poruchových stavů.

Modem byl koncipován na základě zkušeností z měření a simulací modemů RipEX od firmy RACOM. Navržený modem by měl být oproti modemu RipEX cenově dostupný, pracovat v nelicenčním pásmu a spotřeba by měla být optimalizována pro síť s omezenými zdroji (například pro napájení z baterie či solárních panelů).

Po důkladném porovnání byl zvolen pro další evaluaci modul LE70-868 od firmy Telit, který disponuje maximálním povoleným vysílacím výkonem v pásmu 868 MHz, dále má vysokou citlivost přijímače a nízkou spotřebu. Výrobce definovaný dosah je až 10 km.

Ověření vlastností navržených a realizovaných rádiových modemů Telit proběhlo v reálném prostředí a to s přímou viditelností a v městské zástavbě.

S přímou viditelností byla ověřena bezproblémová komunikace na vzdálenost cca 2 km. V městské zástavbě bez přímé viditelnosti bylo měření realizováno pro reálné umístění komunikačních modulů na místa DTS. Z výsledků měření lze konstatovat, že komunikace v městské zástavbě je možná maximálně do 250 metrů a bez vysoko postavené antény nemají rádio modemy Telit uplatnění s uvažováním umístění jednoho modemu uvnitř DTS.

7.2 Zabezpečení komunikace v Smart Grid sítích

Řešení SG zasahuje do kritických infrastruktur jednotlivých zemí, proto otázka bezpečnosti musí být vyřešena dříve, než dojde k plošnému nasazování SG. Zabezpečení a ochrana komunikace od jednotlivých měřicích bodů (elektroměrů, vodoměrů, plynoměrů) u koncových zákazníků až po centrální systém je nezbytnou nutností pro toto plošné nasazování.

Slabým místem bezpečnosti v SG a SM jsou bezesporu elektroměry a komunikace mezi nimi a centrálou. Pouhé šifrování této komunikace je nedostatečné, velmi důležité je vybudování celého bezpečného systému s kompletním klíčovým hospodářstvím. Nedílnou součástí dálkových odečtů v SM je implementace digitálního podpisu.

7.2.1 Výzkum a vývoj zabezpečení komunikace v Smart Grid sítích s omezenými zdroji

V rámci projektu TAČR [A.13] byl realizován výzkum a vývoj zabezpečení komunikace pro Smart Grid sítě s omezenými zdroji. Konkrétně se jednalo o implementaci algoritmu Advanced Encryption Standard (AES) [B.1] a algoritmu Diffie-Hellman založený na kryptografii nad eliptickými křivkami (ECDH) [B.2] do nízkoenergetického mikroprocesoru a následnou optimalizaci z hlediska výpočetní a paměťové náročnosti.

Publikace [A.4] a [B.3] popisují implementaci vlastní knihovny AES, porovnání s řešením od Texas Instruments a optimalizaci z hlediska výpočetní a paměťové náročnosti.

Publikace [A.5] a [A.8] popisují implementaci dvou základních typů eliptických křivek:

- eliptické křivky nad binárním polem (GF_{2^m}),
- eliptické křivky nad polem prvočísel (GF_p).

Omezenými zdroji či zařízeními zde rozumíme omezení ve smyslu nejen výkonu a spotřeby, ale i například velikosti či omezení z ekonomického hlediska. Tyto zařízení mohou být používány například pro detekci poruchových stavů na VN vedeních, kde je nutné využít zařízení s nízkým odběrem, jelikož trvalé napájení je v těchto místech obtížné a drahé. Proto se volí nízkovýkonová zařízení napájená např. ze solárních panelů či z vlastní baterie.

Nízká energetická spotřeba je jedním z klíčových faktorů plošného zavádění SG. I když například elektroměr a jeho komunikační modul budou mít relativně malou spotřebu, tak v případě plošného nasazení bude tato spotřeba vynásobena milióny.

Návrh implementace AES a ECDH byl realizován pro mikroprocesory řady MSP430 od Texas Instruments, které jsou optimalizovány k dosažení prodloužené životnosti baterie. Konkrétní implementace proběhla na mikroprocesoru MSP430F5419 (MSP430f5438A) [B.4]. Tento mikroprocesor je například využit v komunikačních jednotkách firmy MEGa - Měřicí Energetické Aparáty, a.s. [B.5].

Celý koncept zabezpečení komunikace SG systému s omezenými zdroji byl experimentálně ověřen v systému dálkového měření a sběru dat firmy MEGa. Podrobně toto experimentální měření popisuje publikace [A.10].

8 ZÁVĚR

Největší nástup sítí Smart Grids je dnes právě v energetice. Nejrozšířenějším a nejlépe definovaným systémem v konceptu Smart Grids je systém inteligentního měření – Smart Metering. Právě proto se práce zaměřovala na dva klíčové aspekty rozvoje Smart Grids a Smart Metering, a to komunikační infrastrukturu a bezpečnost přenášených dat.

Pro rozvoj budoucích energetických Smart Grids sítí budou nezbytné efektivní, moderní a ekonomicky výhodné přenosové technologie. Práce se zaměřovala na dvě nejrozšířenější a nejperspektivnější přenosové technologie pro účely Smart Metering – PLC a RAN.

Využití již vybudovaného metalického vedení pro silnoproudé účely je hlavní výhodou PLC komunikace pro budování inteligentních energetických sítí Smart Grids. Rozsáhlému nasazení PLC, ale stále brání problémové oblasti. Tyto problémové oblasti, identifikované v kapitole 4, se snažila tato práce řešit. Jednalo se o oblasti experimentálního měření pro ověření vlastností v reálné instalaci, simulaci vlivu přenosových parametrů a rušení na PLC komunikaci a návrhu metodiky porovnání PLC technologií.

RAN díky výhodám v podobě dedikované sítě, komplexnímu řešení jak pro LAN (přístupová síť), tak pro WAN (transportní síť) a nezávislosti na energetické síti je druhou nejrozšířenější a nejperspektivnější přenosovou technologií pro Smart Metering v energetice. Výzkum a výsledky z problémové oblasti dosahů a pokrytí rádiových modemů pracujících jak v licenčním, tak nelicenčním pásmu, představovala kapitola 7.

Kapitolou 5.3 představené simulační nástroje pro PLC realizované v Matlabu a NS-3 či kapitolou 7.1.1 představený simulační nástroj Radio Mobile pro RAN umožní provádět teoretickou analýzu pro různé topologie či scénáře. Tímto je umožněno jednoduše a rychle hodnotit a zkoumat přenosové parametry. Stále však platí, že výsledky simulací je nutné ověřit praktickými měřeními, proto kapitoly 5.1, 5.2 a 7.1.2 prezentovaly výsledky z reálných měření.

Řešení SG zasahuje do kritických infrastruktur jednotlivých zemí, proto by kybernetická bezpečnost měla být řešena s velkou prioritou. Na základě požadavků na nízkou cenu nových inteligentních elektroměrů neposkytují tyto přístroje komplexní úroveň bezpečnosti. Velká řada výrobců poskytuje pouze dílčí řešení bezpečnosti, vesměs pouze AES-128. Výzkum představený v kapitole 7.2 se právě proto zaměřoval na klíčové hospodářství s využitím kryptografie eliptických křivek. Implementace komplexního systému zabezpečení přináší negativa v podobě vyšších nároků na výpočetní výkon a tím i dražší realizace, proto byl návrh klíčového hospodářství s využitím kryptografie eliptických křivek optimalizován pro zařízení s omezenými zdroji (kapitola 7.2.1).

Přínosy této práce jsou jak pedagogické (náhled na problematiku, studie, analýzy a simulační nástroje), tak vědecké (experimentální měření, metodika, návrhy či implementace).

Jak bylo u jednotlivých kapitol uvedeno, dílčí části výzkumu byly autorem a týmem publikovány jak na mezinárodních konferencích, tak ve vědeckých časopisech. Pedagogická část práce byla pro studenty představena v rámci skript. Některé výzkumné výsledky představené v této práci byly v rámci uvedených projektů GA ČR a TA ČR či hospodářských smluv také aplikovány v praxi.

LITERATURA

Autorovy publikace

- [A.1] MLÝNEK, P.; MIŠUREC, J.; FUJDIK, R.; KOLKA, Z.; POSPÍCHAL, L. Heterogeneous Networks for Smart Metering – Power Line and Radio Communication. *Elektronika Ir Elektrotechnika*, 2015, roč. 21, č. 2, s. 85-92. ISSN: 1392- 1215.
- [A.2] MLÝNEK, P.; MIŠUREC, J.; KOUTNÝ, M.; FUJDIK, R.; JEDLIČKA, T. Analysis and Experimental Evaluation of Power Line Transmission Parameters for Power Line Communication. *Measurement Science Review*, 2015, roč. 15, č. 2, s. 64-71. ISSN: 1335- 8871.
- [A.3] MLÝNEK, P.; FUJDIK, R.; ŠILHAVÝ, P.; MIŠUREC, J.; FRANEK, L.; ZAMPHIROPOLOS, J.J.; PAŘÍZEK, J. Role PLC v Smart Metering rollouts – porovnání a metodika hodnocení pilotních PLC realizací. *Konference ČK CIRED 2015*. Tábor 10. a 11. 11. 2015. s. 1-19. ISBN: 978-80-905014-4-7.
- [A.4] FUJDIK, R.; MLÝNEK, P.; MIŠUREC, J. Advanced Encryption Standard v Nízko-výkonových Zařízeních. *Elektrorevue - Internetový časopis*, 2015, roč. 17, č. 2, s. 37-44. ISSN: 1213- 1539.
- [A.5] FUJDIK, R., MLYNEK, P., MISUREC, J. Key Distribution with Elliptic Curve Diffie-Hellman Algorithm in Low-Power Devices for Power Grids. *REVUE ROUMAINE DES SCIENCES TECHNIQUES*, 2016, roč. 61, č. 1. ISSN: 0035- 4066 (v tisku).
- [A.6] MLÝNEK, P.; KOUTNÝ, M.; MIŠUREC, J.; KOLKA, Z. Measurements and Evaluation of PLC Modem with G3 and PRIME Standards for Street Lighting Control. In *Proceeding of 2014 18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. 2014. s. 238-243. ISBN: 978-1-4799-4961- 8.
- [A.7] MLÝNEK, P.; MIŠUREC, J. Power Line Communication pro Smart Metering a Smart Grid – současné možnosti. In *Sborník 18. konference ČK CIRED 2014*. s. 1-12. ISBN: 978-80-905014-3- 0.
- [A.8] MLÝNEK, P.; RÁŠO, O.; FUJDIK, R.; POSPÍCHAL, L.; KUBÍČEK, P. Implementation of Elliptic Curve Diffie Hellman in Ultra- Low Power Microcontroller. In *Proceedings of the 2014 37th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. Berlin, Germany: 2014. s. 267-271. ISBN: 978-80-214-4983- 1.
- [A.9] MLÝNEK, P.; MIŠUREC, J.; KOUTNÝ, M. Random Channel Generator for Indoor Power Line Communication. *Measurement Science Review*, 2013, roč. 13, č. 4, s. 206-213. ISSN: 1335- 8871.
- [A.10] MLÝNEK, P.; MIŠUREC, J.; KOUTNÝ, M.; RÁŠO, O. Design of Secure Communication in Network with Limited Resources. In *Proceedings of the 4th European Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. 2013. s. 1-5. ISBN: 978-1-4799-2984- 9.
- [A.11] ZEMAN, V., MLÝNEK, P. *Vyšší techniky datových přenosů*. 1. vyd. VUT v Brně, skriptum, 2014. 255 s. ISBN: 978-80-214-5159-9.
- [A.12] MIŠUREC, J., MLÝNEK, P. *Moderní způsoby komunikace a Smart Grid*. 1. vyd. VUT v Brně, skriptum, 2015. 195 s. ISBN: 978-80-214-5182-7.
- [A.13] TA02020856, TAČR, Aplikovaný výzkum inteligentních systémů pro sledování energetických sítí, (2012 - 2015).
- [A.14] GA ČR 14-29084P, Nové metody pro využití úzkopásmové datové komunikace po silnoproudých vedeních v chytrých sítích (2014 - 2016).

Smart Grid a Smart Metering

- [S.1] Smart Metering in Europe - 9th Edition. November 2012. Berg Insight AB.
- [S.2] Smart Metering in Europe – 10th Edition. December 2013, Berg Insight AB, 257 stran.
- [S.3] Smart Metering in Europe – 11th Edition. December 2014, Berg Insight AB, 279 stran.
- [S.4] ČESKÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA SMART GRID. Česká technologická platforma Smart Grid [online]. [2009] [cit. 2015-6-4]. Dostupné z: <http://smartgridcz.eu/index.html>
- [S.5] ABB s.r.o. Inteligentní sítě Nepublikovaný dokument ABB. Inteligentní Sítě: Úvod do problematiky Inteligentních sítí. Praha, 2011.

- [S.6] VÁPENIK, R. Vliv fotovoltaických elektráren na provoz distribuční soustavy, Praha, *Sdělovací technika*, roč. 2012, č. 1.
- [S.7] GAO, C., M.A. REDFERN. A Review of Voltage Control in Smart Grid and Smart Metering Technologies on Distribution Networks UPEC 2011, Germany. Proceedings of *46th International Universities' Power Engineering Conference*, 5 - 8th September 2011, Soest, Germany. Berlin: VDE-Verl. ISBN 978-380-0734-023.
- [S.8] 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>>.
- [S.9] ZABALLOS, Agustin, Alex VALLEJO a Josep SELGA. Heterogeneous communication architecture for the smart grid. *IEEE Network*. 2011, roč. 25, č. 5, s. 30-37. ISSN 0890-8044. DOI: 10.1109/MNET.2011.6033033.
- [S.10] SINHA, Arup, S. NEOGI, R. N. LAHIRI, S. CHOWDHURY, S. P. CHOWDHURY a N. CHAKRABORTY. Smart grid initiative for power distribution utility in India. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*. IEEE, 2011, s. 1-8. DOI: 10.1109/PES.2011.6038943.
- [S.11] LI, Fangxing, Wei QIAO, Hongbin SUN, Hui WAN, Jianhui WANG, Yan XIA, Zhao XU a Pei ZHANG. Smart Transmission Grid: Vision and Framework. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2010, roč. 1, č. 2, s. 168-177. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2010.2053726.
- [S.12] GARRITY, T.F. Getting Smart. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2008 roč. 6, č. 2, s. 38-45.
- [S.13] IPAKCHI, A; ALBUYEH, F. Grid of the future. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2009 roč. 7, č. 2, s. 52-62.
- [S.14] The role of Communication technology in Europes advanced metering infrastructure. Technical Paper. 2014. Accenture.

Power Line Communication

- [P.1] 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.
- [P.2] PODHORSKÝ, J. HDO - hromadné dálkové ovládání. BEN, 2002. 120 s. roč. 1. ISBN 80-7300-054-7.
- [P.3] GALLI, S., SCAGLIONE, A. a WANG, Z. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. *Proceedings of the IEEE*. 2011, roč. 99, č. 6, s. 998-1027. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2109670. ISSN 0018-9219.
- [P.4] DOSTERT, K. Power Line Communications. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- [P.5] NORDELL, D. Communication systems for distribution automation, in *Proc. IEEE Transm. Distrib. Conf. Expo.*, Bogota, Colombia, Apr. 13–15, 2008.
- [P.6] MAK, S. a REED, D. TWACS a new viable two-way automatic communication system for distribution networks. Part I: Outbound communication, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2941–2949, Aug. 1982.
- [P.7] SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line Communication transceivers for ITU-T G.hnem networks. *IET Communications* [online]. 2012, č. 2 [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9902-201210-I!!PDF-E&type=items
- [P.8] OKSMAN, Vladimir a Jin ZHANG. 2011. G.HNEM: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology. *IEEE Communications Magazine*. 2011, roč. 49, č. 12, s. 36-44. DOI: 10.1109/MCOM.2011.6094004. ISSN 0163-6804.

- [P.9] An Overview, History, and Formation of IEEE P1901.2 for Narrowband OFDM PLC. Jul 02, 2013, Maxim Integrated Products, Inc. [online]. [cit. 2015-10-25]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5676>.
- [P.10] Powerline Related Intelligent Metering Evolution (PRIME). [Online]. [cit. 2015-10-13]. Dostupné z: <http://www.prime-alliance.org/>.
- [P.11] G3-PLC: Open Standard for SmartGrid Implementation. [Online]. [cit. 2015-10-13]. Dostupné z: <http://www.g3-plc.com>.
- [P.12] HomePlug AV baseline specification, HomePlug PowerLine Alliance, Version 1.0.00, Dec. 2005.
- [P.13] LEE, M., NEWMAN, R., LATCHMAN, H., KATAR, S., YONGE, L. HomePlug 1.0 Powerline communication LANs—Protocol description and performance results, *Int. J. Commun. Syst.*, roč. 46, č. 5, s. 447–473, Jun. 2003.
- [P.14] OKSMAN, V. a S. GALLI. G.hn: The new ITU-T home networking standard. *IEEE Communications Magazine*. 2009, roč. 47, č. 10, s. 138-145. DOI: 10.1109/MCOM.2009.5273821. ISSN 0163-6804.
- [P.15] SVOBODA, J. Hromadné dálkové ovládání, 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, skriptum, 107 s, 1974.
- [P.16] BABIC, M.; HAGENAU, M.; DOSTERT, K.; BAUSCH, J. Theoretical postulation of PLC channel model. Deliverable 'D4' within Open PLC European Research Alliance (OPERA). 2005.
- [P.17] MLÝNEK, P.; MIŠUREC, J.; KOUTNÝ, M. Noise modeling for power line communication model. In *35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*. 2012. s. 282-286. ISBN: 978-1-4673-1118- 2.
- [P.18] CANETE, F. J. et al. Analysis of the Cyclic Short-Term Variation of Indoor Power-Line Channels. *IEEE JSAC*, roč. 24, July 2006, s. 1327–38.
- [P.19] GALLI, S., KOCH, M., LATCHMAN, H., LEE, S., OKSMAN, V. Industrial and international standards on PLC base networking technologies, in *Power Line Commun., H. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, and T. Swart, Eds., 1st ed. New York: Wiley, 2010*.
- [P.20] AFKHAMIE, K.H., S. KATAR, L. YONGE a R. NEWMAN. An overview of the upcoming HomePlug AV standard. In: *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2005. IEEE, s. 400-404. DOI: 10.1109/ISPLC.2005.1430539. ISBN 0-7803-8844-5.
- [P.21] GALLI, S., H. KOGA a N. KODAMA. Advanced signal processing for PLCs: Wavelet-OFDM. In: *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. 2008, s. 187-192. DOI: 10.1109/ISPLC.2008.4510421. ISBN 978-1-4244-1975-3..

Měření, modelování a simulace PLC

- [M.1] Y-Net Evaluation Package. Yitran Communications Ltd. [Online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: www.yitran.com/index.aspx?id=3357
- [M.2] C2000 Power Line Modem Developer's Kit. Texas Instruments. [Online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: www.ti.com/tool/tmdsplckit-v3
- [M.3] Evaluation kits For G3-PLC Communication Test and Evaluation. Wack/Great Tech Corp. [Online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: www.gtc-tw.com/g3plc_evkit.htm.
- [M.4] 50065-1:2001: Specification for signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz – Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances CENELEC, 2010.
- [M.5] GOTZ, M.; RAPP, M.; DOSTERT, K.. Power line channel characteristics and their effect on communication system design. *IEEE Communications Magazine*. 2004, roč. 42, č. 4, p. 78-86. DOI: 10.1109/MCOM.2004.1284933. ISSN 0163-6804.
- [M.6] ZIMMERMANN, M.; DOSTERT, K. Analysis and modeling of impulsive noise in broad-band powerline communications. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Roč. 44, č.1, s. 249-258. DOI: 10.1109/15.990732. ISSN 00189375.
- [M.7] RIEKEN, D. W. 2011. Periodic noise in very low frequency power-line communications. In: *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. IEEE, s. 295-300. DOI: 10.1109/ISPLC.2011.5764410. ISBN 978-1-4244-7751-7.

- [M.8] NASSAR, M.; DABAK, A.; Il Han KIM; PANDE, T.; EVANS, B.L. Cyclostationary noise modeling in narrowband powerline communication for Smart Grid applications. In: *2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2012, s. 3089-3092. DOI: 10.1109/ICASSP.2012.6288568. ISBN 978-1-4673-0046-9.
- [M.9] KATAYAMA, M.; YAMAZATO, T.; OKADA, H. A mathematical model of noise in narrowband power line communication systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2006, roč. 24, č. 7, s. 1267-1276. DOI: 10.1109/JSAC.2006.874408. ISSN 0733-8716.
- [M.10] YIN, Jun, Xu ZHU a Yi HUANG. Modeling of amplitude-correlated and occurrence-dependent impulsive noise for power line communication. In: *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2014, s. 4565-4570. DOI: 10.1109/ICC.2014.6884041. ISBN 978-1-4799-2003-7.
- [M.11] GIANAROLI, F.; PANCALDI, F.; VITETTA, G.M. The Impact of Statistical Noise Modeling on the Error-Rate Performance of OFDM Power-Line Communications. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014, roč. 29, č. 6, s.2622-2630. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2311167. ISSN 0885-8977..
- [M.12] NIEMAN, K. F., JING LIN, M. NASSAR, K. WAHEED a B. L. EVANS. 2013. Cyclic spectral analysis of power line noise in the 3–200 kHz band. In: *2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. IEEE, s. 315-320. DOI: 10.1109/ISPLC.2013.6525870. ISBN 978-1-4673-6016-6.
- [M.13] DEGARDIN, V., M. LIENARD, A. ZEDDAM, F. GAUTHIER, R. DEGAUQUE. 2003. Classification and characterization of impulsive noise on indoor power line used for data communications. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2003, roč. 48, č. 4, s. 913-918. DOI: 10.1109/TCE.2003.1196420. ISSN 0098-3063.
- [M.14] 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*, 2003, roč. 16, s. 381-400.
- [M.15] SHONGWE, T.; VINCK, A. J. H.; FERREIRA, H.C. The effects of periodic impulsive noise on OFDM. In: *2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*. IEEE, 2015 s. 189-194. DOI: 10.1109/ISPLC.2015.7147612. ISBN 978-1-4799-8413-8.
- [M.16] D'ALESSANDRO, S.; DE PIANTE, M.; TONELLO, A.M. On modeling the sporadic impulsive noise rate within in-home power line networks. In: *2015 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*. IEEE, 2015, s. 154-159. DOI: 10.1109/ISPLC.2015.7147606. ISBN 978-1-4799-8413-8.
- [M.17] BENYOUCEF, D. A new statistical model of the noise power density spectrum for powerline communications. In *7th International Symposium on Power-Line Communications and its Applications (ISPLC)*, 2003. Kyoto, Japan, 136–141.
- [M.18] BAUSCH, J., KISTNER, T., BABIC, M., DOSTERT, K. Characteristics of Indoor Power Line Channels in the Frequency Range 50 - 500 kHz. In *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, March 2006. Orlando, FL, USA, 86-91.
- [M.19] CORTÉS, J.A., DíEZ, L., CAÑETE, F., SÁNCHEZ- MARTÍNEZ, J.J. Analysis of the Indoor Broadband Power-Line Noise Scenario. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, roč. 52, s. 849-858.
- [M.20] DOSTERT, K., SIGLE, M., LIU, W. Narrowband Characterisation in an Office Environment. in Berger, Lars T., Schwager, Andreas, Pagani, Pascal, Schneider, Daniel M. *MIMO Power Line Communications: Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing. Devices, Circuits, and Systems*. CRC Press, pp. 39–68, February 2014.
- [M.21] Centrum pro inteligentní energetiku. [Online]. [cit. 2015-11-02]. Dostupné z: <http://www.cie-trinec.cz/>
- [M.22] MAX2992: G3-PLC MAC/PHY Powerline Transceiver [online]. 2011 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.intertek.com.br/pdf/MAX2992.pdf>

- [M.23] MAX2991: Power-Line Communications (PLC) Integrated Analog Front-End Transceiver [online]. 2010 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.intertek.com.br/pdf/MAX2991.pdf>
- [M.24] HOCH, M. 2011. Comparison of PLC G3 and PRIME. In: *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. IEEE, s. 165-169. DOI: 10.1109/ISPLC.2011.5764384. ISBN 978-1-4244-7751-7.
- [M.25] STMicroelectronics. EVALKITST7580-1: ST7580 power line networking system-on-chip demonstration kit. 2012, 4 s. [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00048571.pdf
- [M.26] CANETE F.; CORTES J.; DIEZ L.; ENTRAMBASAGUAS J. A channel model proposal for indoor power line communications, *IEEE Commun. Mag.*, roč. 49, č. 12, s. 166–174, 2011. Dostupné z URL: <http://www.plc.uma.es/channels.htm>.
- [M.27] MAROCCO G.; STATOVCI D. *FTW Forschungszentrum Telekommunikation*, Wien: Download FTW PLC Simulator. [online]. Wien, 2012 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: <https://portal.ftw.at/public/plc-simulator/download>.
- [M.28] MLÝNEK, P.; KOUTNÝ, M.; MIŠUREC, J.: GEN_IN; Generátor přenosových funkcí distribučního vedení. <http://www.utko.feec.vutbr.cz/~mlynek/generator.html>, VUT v Brně, Ústav telekomunikací, Purkyňova 118, Brno. URL: <http://www.utko.feec.vutbr.cz/~mlynek/generator.html>. (software).
- [M.29] AALAMIFAR, F.; SCHLOGL, A.; HARRIS, D.; LAMPE, L.. Modelling power line communication using network simulator-3. In: *2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2013, s. 2969-2974. DOI: 10.1109/GLOCOM.2013.6831526. ISBN 978-1-4799-1353-4.
- [M.30] PAPALEONIDOPOULOS, I.C., KARAGIANNPOULOS, C.G., THEODOROU, N.J., ANAGNOSTOPOULOS, C.E., ANAGNOSTOPOULOS, I.E. Modelling of indoor low voltage power-line cables in the high frequency range. In *International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, March 27–29, 2002. Athens, Greece, 267-271.
- [M.31] CANETE, F.; CORTES, J.; DIEZ, L.; ENTRAMBASAGUAS, J. A channel model proposal for indoor power line communications. *IEEE Communications Magazine*, 2011 roč. 49, č. 12, s. 166-174. DOI: 10.1109/MCOM.2011.6094022. ISSN 0163-6804.
- [M.32] MARROCCO, G.; STATOVCI, D.; TRAUTMANN, S. A PLC broadband channel simulator for indoor communications. In: *2013 IEEE 17th International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. IEEE, 2013, s. 321-326. DOI: 10.1109/ISPLC.2013.6525871. ISBN 978-1-4673-6016-6.
- [M.33] YAZDANI J., NADERI M., HONARY B. Power Lines Analysing Tool (PLAT) For Channel Modelling. In *5th International Symposium on Power-Line Communications and Its Applications*, 2001. Malmö, Sweden, s. 27 – 28.
- [M.34] CANETE, F.J.; CORTES, J.A.; DIEZ, L.; ENTRAMBASAGUAS, J.T.. Modeling and evaluation of the indoor power line transmission medium. *IEEE Communications Magazine*. 2003, roč. 41, č. 4, s. 41-47. DOI: 10.1109/MCOM.2003.1193973. ISSN 0163-6804.

Metodika pro PLC

- [ME.1] VODRÁŽKA, J., VOTRUBA, S. Metodika pro hodnocení komunikační části pilotních projektů. In: *Konference ČK CIRED 2013*. s. 1-7.
- [ME.2] VODRÁŽKA, J., VYCPÁLEK, M., VOTRUBA, S. Metodika pro hodnocení komunikační části pilotních projektů. In: *Konference ČK CIRED 2014*. s. 1-7.

Bezdrátové (wireless) technologie

- [W.1] BROWN, I.D. Radio Mobile – What can it do for you? [online]. 2009, 11 s., [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: http://www.antennex.com/preview/archive10/Jul509/radio_mobile.pdf.
- [W.2] Rádiový modem RipEX. RACOM s.r.o.. [online]. [cit. 2015-05-17]. Dostupné: <http://www.racom.eu/cz/products/radio-modem-ripex.html> >

Bezpečnost

- [B.1] NIST. "Announcing the ADVANCED ENCRYPTION STANDARD (AES)". Federal Information Processing Standards Publication 197, 2001. [online], [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://csrc.nist.gov/publications/fips/fips197/fips-197.pdf>
- [B.2] HELLMAN, Martin E., Bailey W. DIFFIE a Ralph C. MERKLE. STANFORD UNIVERSITY. Cryptographic apparatus and method [patent]. Spojené státy americké. Patent, 4200770. Uděleno 29.04.1980. Zapsáno 06.09.1977.
- [B.3] FUJDIAK, R. Measurement of symmetric cipher on low power devices for power grids. In *Proceedings of the 21st Conference STUDENT EEICT 2015*. Brno: 2015. s. 556-560. ISBN: 978-80-214-5148-3. Vedoucí práce: Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.
- [B.4] Texas Instruments. "Datasheet: MSP430F543xA, MSP430F541xA Mixed-Signal Microcontrollers". Texas Instruments. 2015. 108 s.
- [B.5] Komunikační jednotky a zdroje. MEgA - Měřicí Energetické Aparáty, a.s. [online], [cit. 2015-05-17]. Dostupné z: <http://e-mega.cz/komunikacni-jednotky-zdroje>.

ABSTRACT

The habilitation thesis focuses on suitable communication technologies and secure data communication for Smart Grid networks in the energy industry. The first part of the text contains a description and analysis of Smart Grid networks and the best defined subsystem of these networks – Smart Metering. In the next chapters, the two most widespread and progressive communication technologies for Smart Metering, power line communication and wireless radio communication, are introduced. The results of our measurements and simulations of power line communication and wireless radio communication are demonstrated in the following part of text. The methodology for the evaluation of power line communication technologies and pilot projects is also introduced. The issue of cryptography for networks with limited resources is described in the final chapter.

This text is designed and written to have both pedagogical and scientific contribution. The pedagogical contribution addresses the issue of the introduction to Smart Grids and their two key components - communication and cryptographic protection. The scientific contribution contains author's original results in the domains of optimization and progress of power line communication and wireless radio communication for Smart Metering. A partial contribution can also be seen in the issue of implementing complex secure data communication for systems with limited resources. These issues were identified and analyzed in the first part of the text as fundamental for further development of Smart Grids and Smart Metering.