

Experimentální porovnání úzkopásmové PLC komunikace posta-vené na jedné nosné a více nosných frekvencích

Experimental comparison of single- and multi-carrier narrowband Power Line Communication

Petr Mlýnek, Ján Sláčik

mlynek@feec.vutbr.cz, jan.slacik@vutbr.cz

Department of Telecommunications, Brno University of Technology

DOI: -

Abstract: The article focuses on experimental comparison of single- and multi-carrier narrowband Power Line Communication in the industry environment. The aim of experimental measurements was comparison of single- and multi-carrier narrowband Power Line Communication from the viewpoint of possible communication distance, available data rate and impact of noise. Finally, the article identify and analyse the fundamental issues for further development of Smart Grids and Smart Metering.

Experimentální porovnání úzkopásmové PLC komunikace postavené na jedné nosné a více nosných frekvencích

Petr Mlýnek, Ján Sláčík

Ústav telekomunikací, Vysoké učení technické v Brně
Email: mlynek@feec.vutbr.cz, jan.slacik@vutbr.cz

Abstrakt – V rámci článku bude popsáno experimentální měření úzkopásmové PLC komunikace provedené v průmyslovém prostředí. 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 a vlivu rušení. Na závěr článek identifikuje stěžejní otázky z oblasti zavádění PLC komunikace v procesu budování chytrých sítí a zároveň na tyto otázky odpoví.

1 Úvod

Systémy komunikace po silnoproudých vedeních se označují jako PLC (Power Line Communication) **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Charakter silnoproudých vedení a organizace elektroenergetické sítě a její řízení je poněkud jiné než u klasických telekomunikačních či datových sítí. Elektroenergetická síť je určena především k dodávce elektrické energie, v síti se objevují prvky, které jsou specifické právě pro silovou energetiku a nikoli pro telekomunikace [2], **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

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

Širokopásmové PLC dosahuje charakteristik širokopásmové komunikace, umožňující např. rychlý přístup k Internetu nebo realizaci malých sítí Local Area Network (LAN) či Home Area Networking (HAN). Širokopásmové PLC se potýká s řadou problémů, především týkajících se rušení, standardizace, chaotických přístupů výrobců a nejasné legislativy provozovatelů energetických sítí. Vysokorychlostní Internet je v současné době doménou jiných technologií, ale pro budovy, kde jsou omezené možnosti stavebních úprav pro pokládání kabelových rozvodů (muzea, historické budovy atd.), představují ideální technologii pro přístup k Internetu.

Úzkopásmové PLC je v současnosti zdánlivě poněkud v pozadí. To je ovšem dáno pouze oblastí využitelnosti. Elektroenergetickou síť lze využít i pro další aplikace, které prostřednictvím jiné komunikace lze prakticky realizovat jen stěží. Mezi specifické služby patří centrální řízení spotřeby energie, tarifkace, dálkové odečty elektroměrů, povolování zařízení apod. Systémy PLC pro dálkový odečet elektroměrů již ve světě existují. Jedná se sice většinou o pilotní projekty, které mají prověřit životaschopnost tohoto způsobu komunika-

ce pro potřeby distribučních společností, ale i reálná nasazení pro Smart Metering účely (inteligentní měření), tzn., že elektroměry mají již jistou vnitřní inteligenci a stávají se součástí systémů pro automatizovaný odečet elektroměrů (AMR) a řízení spotřeby energie v reálném čase.

2 Úzkopásmová PLC komunikace

Úzkopásmová PLC komunikace (Narrowband Power Line Communication, NB-PLC) pracuje ve frekvenčním pásmu 3–500 kHz, které zahrnuje evropské pásmo CENELEC 3–148,5 kHz [3], [5], 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:

- s nízkou datovou rychlostí (Low Data Rate (LDR)): jedná se o technologie s jednou nosnou frekvencí a datovou rychlostí několik kbit/s,
- s vysokou datovou rychlostí (High Data Rate (HDR)): jedná se o technologie s více nosnými frekvencemi a datovou rychlostí od desítek kbit/s až do 500 kbit/s.

2.1 Úzkopásmové standardy

Jedním z prvních standardů pro úzkopásmové PLC s jednou nosnou byl v roce 1999 ANSI/EIA 709.1 známý jako LonWorks [6]. Dnes stále hojně rozšířené PLC technologie jsou na bázi frekvenční modulace (Frequency Shift Keying ,FSK), klíčování fázovým posuvem BPSK (například řešení firem Echelon a Meters and More).

Rostoucí zájem v oblasti dosažení vyšších rychlostí pro HDR NB-PLC řešení přinesl nové standardy Powerline Related Intelligent Metering Evolution (PRIME) [7] a G3-PLC [8]. Tyto řešení jsou postavené na Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulaci. Více informací o těchto standardech lze nalézt v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a [10].

V roce 2010 začalo úsilí pro standardizaci HDR NB-PLC technologie od ITU-T G.hnem a IEEE P1901.2. Cílem G.hnem a P1901.2 bylo definovat HDR NB-PLC v rozsahu pro HAN až AMI řešení schopné provozu na AC i DC vedeních, a podporující komunikaci přes VN/NN transformátory, přes VN vedení a pro vnitřní i venkovní vedení.

3 Cíle měření a úzkopásmové PLC modemy

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 (chytrých sítí) aplikací je zde obava, že z dlouhodobého pohledu nebude datová rychlost NB-PLC technologií dostačující pro budoucí Smart Grid požadavky. Proto bylo mimo jiné experimentální měření zaměřeno na měření datových rychlostí na aplikační vrstvě.

K ověření úzkopásmové PLC technologie, která využívá systém více nosných frekvencí (konkrétně systém OFDM), byl vybrán vývojový kit od firmy Texas Instruments s označením TMDSPCKIT-V3 postavený na C2000 TMS320F28069 řídicí kartě s analogovým rozhraním AFE031 [11].

Jako zástupce úzkopásmové PLC technologie jedné nosné frekvence byl vybrán PLC modem STMICROELECTRONICS EVALKITST7580-1 postavený na čipu ST7580, který poskytuje úzkopásmovou FSK/PSK PLC komunikaci [12].

3.1 PLC modemy se systémem více nosných

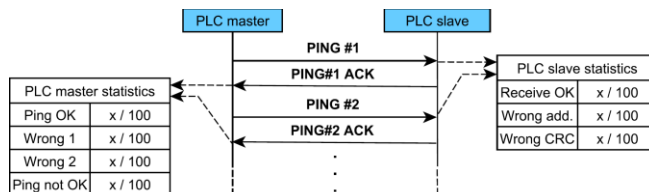
V rámci experimentálního měření PLC modemů TMDSPCKIT-V3 byl mezi dvěma modemy přenášén JPG snímek o velikosti 103 kB. Pro různé měřicí scénáře lišící se vzdáleností a mírou rušení bylo ověřeno, zda modemy navážou spojení. Pokud ano, tak byla měřena rychlost na aplikační vrstvě. Měření bylo provedeno pro frekvenční pásmo CENELEC-A a standardy G3-PLC a PRIME (G3-PLC: 35–91 kHz a PRIME: 42–89 kHz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**).

Pro měření byly uvažovány všechny dostupné modulace standardů a byl uvažován pouze potvrzovaný přenos (u nepotvrzovaného přenosu lze dosáhnout nepatrně vyšších přenosových rychlostí).

3.2 PLC modemy využívající jedné nosné

U zvolených PLC modemů využívající k přenosu pouze jedné nosné frekvence, nelze přenášet soubor jak u modemů TMDSPCKIT-V3, poněvadž touto funkcí použitý základní software nedisponuje.

K otestování komunikace bylo využito aplikačního protokolu PING, který definuje funkce pro zaznamenání stavů přenášených paketů. PING byl opakován 100x pro každou modulaci a velikost dat byla 8 B. Obrázek 1 zobrazuje způsob získávání statistik, které budou zmiňovány v následujícím textu. Vysílací modem (PLC master) vyslal žádost (příkaz PING) o vrácení odezvy adresovaného modemu. Přijímací modem (PLC slave) tento příkaz přijal, aktualizoval statistiku a vyslal odpověď (potvrzovací zprávu). V momentě, kdy vysílací modem přijme odpověď, porovná definovaný obsah potvrzovací zprávy s obsahem zprávy vyslané (PING #1) a zaznamenal údaj do statistiky.



Obrázek 1: Způsob získávání statistik o přenosu.

Každá odpověď PING ACK na příkaz PING je vysílacím modemem detekována následujícími stavy:

- ping OK – odesílací modem detekoval stejnou nosnou a modulaci, stejnou délku Payload dat, identická data a CRC součet,
- wrong line 1 – odesílací modem detekoval odlišnou nosnou, modulaci nebo délku Payload dat,
- wrong line 2 – odesílací modem detekoval odlišný CRC součet,
- ping not OK – odesílací modem nepřijal žádnou odpověď za dobu „Inter-Packet Time“.

Přijímací modem identifikuje následující tři stavy příkazu PING:

- receive OK – přijímací modem detekoval svou adresu uzlu a odeslal zpět paket na stejné nosné s identickou modulací. Odpověděl také stejnou délkou Payload dat a identickými daty,
- wrong address – přijímací modem detekoval odlišnou adresu uzlu a neodpovídal,
- wrong CRC – přijímací modem detekoval svou adresu uzlu, avšak špatný CRC součet. Modem odpoví na stejné nosné identickou modulací, stejnou délkou Payload dat a stejnými daty.

4 Scénáře a výsledky měření v prostředí s mírným rušením

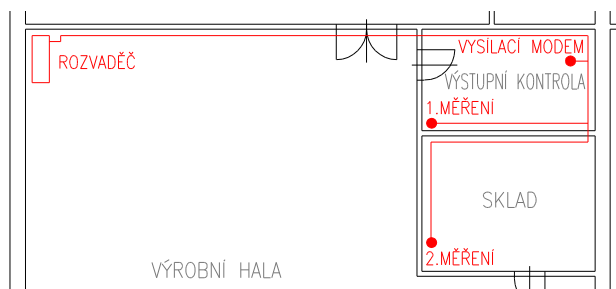
Měření bylo uskutečněno v průmyslové firmě, která se věnuje zakázkové strojní výrobě. Měření bylo rozděleno do šesti scénářů, které se liší vzdáleností a připojenými spotřebiči představujícími rušení. Měření bylo provedeno na vedení nízkého napětí s kabely typu CYKY 3x2,5.

Tyto scénáře simulují testování PLC komunikace pro účely podružného měření elektrické energie ve velkých výrobních závodech.

4.1 Scénář měření č. 1. a 2.

V prvním scénáři bylo měření uskutečněno v místnosti výstupní kontroly kvality výrobků. V této místnosti byl zapojen jeden stolní počítač, digitální výškoměr, dálkové ovládání hodin a dvojice přenosných počítačů, mezi nimiž byla komunikace ověřována. Obrázek 2 znázorňuje zapojení modemů. Délka přenosové trasy byla odhadnuta na 10 metrů. Během komunikace se hodnota odstupu signálu od šumu (Signal-to-Noise ratio, SNR) pohybovala v rozmezí 12 až 18 dB.

V druhém scénáři byl jeden z modemů zapojen ve vedlejší místnosti, která slouží jako sklad náradí a různých přípravků (viz Obrázek 2). Délka přenosového vedení byla 25 metrů. Hodnota SNR se pohybovala v rozmezí 0 až 4 dB.



Obrázek 2: Zapojení modemů v prvních dvou scénářích.

4.2 Výsledky pro 1. a 2. scénář – PLC modemy se systémem více nosných

Tabulka 1 zobrazuje výsledky pro měření obou standardů pro 1. a 2. scénář. U druhého scénáře nebyl standard PRIME schopný vůbec navázat spojení (v tabulkách značeno symbolem „-“). U standardu G3-PLC bylo možné navázat komunikaci pouze při použití ROBO režimu a rychlost pro druhý scénář byla o cca 200 bit/s menší než v případě prvního scénáře.

Tabulka 1: Výsledky pro 1. a 2. scénář – PLC modemy se systémem více nosných (symbol „-“ znamená, že modemy vůbec nenavážou spojení).

PRIME	Rychlost [bit/s]	
Modulace	1. scénář	2. scénář
DBPSK+FEC	4851	-
DQPSK+FEC	5781	-
D8PSK+FEC	6180	-
G3-PLC	Rychlost [bit/s]	
Modulace	1. scénář	2. scénář
ROBO	2208	2027
DBPSK	4732	-
DQPSK	5767	-
D8PSK	6209	-

4.3 Výsledky pro 1. a 2. scénář – PLC modemy využívající jedné nosné

Tabulka 2 uvádí výsledky pro modem, který přijímal data protokolu PING a odpovídal vysílacímu modemu. Tabulka uvádí počet správně přijatých paketů ze 100 vyslaných.

Pro scénář 1. se hodnota SNR pohybovala v rozmezí od 16 do 22 dB. Z naměřených hodnot vyplývá, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití kódové BPSK modulace s algoritmem PNA, který slouží k eliminaci špiček v šumu. Dále je patrné, že u všech modulací, kromě modulace 8PSK, dorazilo v pořádku přijímacímu modemu 80 až 100 % paketů.

Pro scénář 2. byla hodnota SNR v rozmezí 5 až 9 dB, z čehož plyne, že STM modemy lépe oddělují užitečný signál od šumu v silně rušeném prostředí než modemy Texas Instruments využívající OFDM přístup. Při srovnání hodnot s prvním měřením je zcela patrné, že komunikace probíhala na větší vzdálenost a byla i více rušena ostatními zařízeními zapojenými v síti. Přijímací modem přijal 74 až 100 % paketů

správně s výjimkou 8PSK modulace, u které nebyl přijat ani jeden paket správně. Nejlepších výsledků bylo opět dosaženo při použití kódové BPSK modulace s algoritmem PNA.

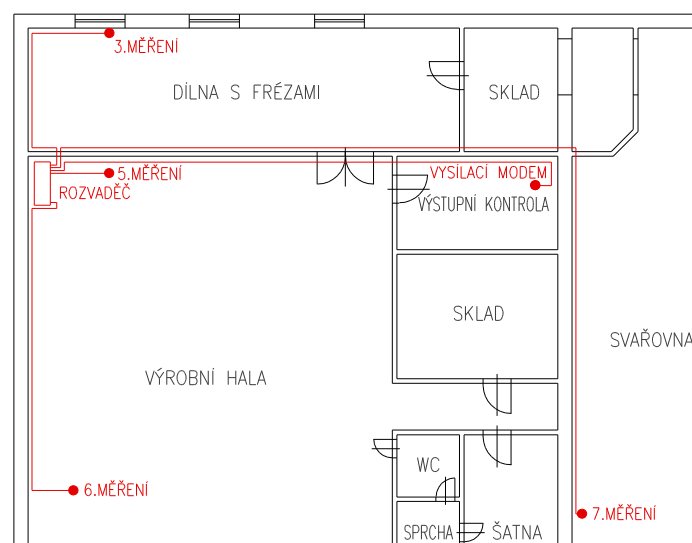
Tabulka 2: Výsledky pro 1. a 2. scénář – PLC modemy využívající jedné nosné.

Modulace	1. scénář			2. scénář		
	Receive OK	Wrong address	Wrong CRC	Receive OK	Wrong address	Wrong CRC
BPSK	82/100	13/100	3/100	74/100	0/100	18/100
QPSK	80/100	18/100	5/100	75/100	0/100	20/100
8PSK	4/100	1/100	87/100	0/100	0/100	100/100
BFSK	99/100	0/100	0/100	92/100	0/100	8/100
BPSK-CODED	98/100	0/100	0/100	90/100	0/100	2/100
QPSK-CODED	94/100	0/100	5/100	90/100	0/100	2/100
BPSK-CODED-PNA	100/100	0/100	0/100	100/100	0/100	0/100

5 Scénáře a výsledky měření pro zaručené prostředí

5.1 Scénář měření č. 3. až 6.

Obrázek 3 znázorňuje měřicí body pro scénáře 3. až 6. Vysílací modem byl ponechán zapojen ve stejném místě jako u prvních dvou měření.



Obrázek 3: Zapojení modemů v scénářích č. 3 až 6.

5.2 PLC modemy se systémem více nosných – výsledky pro 3. až 6. scénář

V scénáři 3. byl modem zapojen v dílně, kde se pracuje na čtyřech frézách, dvou soustružích 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 bruský na vrtáky. Délka přenosového vedení činila 110 metrů. Hodnota SNR byla pouze 0 až 2 dB. Bohužel tato hodnota odstupů signálu od šumu nebyla dostačující 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.

Tabulka 3 souhrnně uvádí přehled hodnot SNR a výsledky měření s uvedením rychlosti a modulace, která umožňovala komunikaci.

Tabulka 3: Výsledky pro 3. až 6. scénář – PLC modemy se systémem více nosných.

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

5.3 PLC modemy využívající jedné nosné – výsledky pro 3. až 6. scénář

Tabulka 4 uvádí výsledky měření s modemy STM ze scénářů 3. až 6, kde jsou prezentovány hodnoty SNR jednotlivých scénářů a počet správně přenesených příkazů PING na vysílači TX a přijímači RX.

Z naměřených výsledků plyne, že nejlepších výsledků dosahuje kódovaná modulace BPSK s algoritmem PNA. 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.

Modemy vůbec nenavázaly spojení v případech, kdy TX-Ping OK a RX-Rec. OK jsou oba 0/100, tedy žádný vyslaný příkaz PING nebyl přijat přijímacím modem (PLC slave).

Tabulka 4: Výsledky pro 3. až 6. scénář – PLC modemy využívající jedné nosné.

Modulace	3. scénář		4. scénář		5. scénář		6. scénář	
	<i>TX-Ping OK</i>	<i>RX-Rec. OK</i>	<i>TX-Ping OK</i>	<i>RX-Rec. OK</i>	<i>TX-Ping OK</i>	<i>RX-Rec. OK</i>	<i>TX-Ping OK</i>	<i>RX-Rec. 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	

6 Otázky a odpovědi k problematice PLC

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. Výhoda 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.

Z pohledu nasazování chytrých sítí a budoucích vizí a výzkumu v oblasti chytrých sítí s využitím PLC je nutné si klást následující otázky, na které se článek pokusí odpovědět:

- *Jak vypadá standardizace a interoperabilita standardů v oblasti PLC?* V posledních letech se oblast standardizace širokopásmové PLC posunula z nedostatku širokopásmové PLC standardů k opačnému extrému, a to několika navzájem nespolehlivých standardů. Podobná situace několi-

ka navzájem nespolehlivých standardů je v oblasti HDR NB-PLC. Proto je velmi obtížné vybrat vhodný standard pro plošné nasazení v rámci zavádění Smart Metering. Článek ukazuje výsledky experimentálních měření s úzkopásmovými standardy, které naznačují použitelnost jednotlivých standardů.

- *Která frekvenční pásma budou uvažována v Evropě?* Frekvenční pásmo FCC není povoleno využívat v Evropě, PLC komunikace musí být ve shodě s normou CENELEC EN 50065-1. Na základě publikace [14] a aktivit firmy Devolo je možné, že EMC normy a standardizace pro pásmo 150–500 kHz budou změněny. Například pro PLC modem uvažovaný v článku od firmy Texas Instrument je změna frekvenčního pásma pouze změna tónové masky.
- *Bude uvažována pouze úzkopásmová nebo pouze širokopásmová PLC technologie?* Volba vhodné technologie bude záviset na oblasti použití a specifikaci vstupních parametrů (rychlost, dosahy, spolehlivost, protokoly atd.). Nápomoci volbě vhodné PLC technologie a porovnat různá

řešení má napomoci navržená metodika představená v článku [15]. Obecně lze říci, že jednotlivé PLC technologie mají tyto specifika:

- o Úzkopásmová komunikace s jednou nosnou frekvencí dosáhne velkých vzdáleností (dobrého pokrytí) a rychlost přenosu dat postačuje na 10 minutové profilování s cca 1000 elektroměry. Nejsou dostupné zdroje či informace, že by tato technologie kvůli rychlosti nezvládla dosavadní požadavky Smart Metering.
- o Úzkopásmová komunikace s OFDM (např. PRIME, G3) – oproti úzkopásmové komunikaci s jednou nosnou frekvencí má menší dosah (horší pokrytí), ale díky DLMS/COSEM vynikající standardizaci. Na základě výsledků měření představených v této práci je spolehlivá HDR NB-PLC komunikace možná pouze s nepříliš vysokými rychlostmi.
- o Širokopásmová komunikace dosahuje vysoké rychlosti, ale nižší komunikační vzdálenosti (pokrytí) než úzkopásmová i OFDM. Rychlosti jsou tak vysoké, že je nutné si klást otázku, co se bude přenášet.
- *Jaké komunikační protokoly budou uvažovány v PLC systémech?* Výrobci, jejichž PLC systémy jsou postaveny na úzkopásmové komunikaci s jednou nosnou frekvencí, používají většinou vlastní maximálně optimalizované a tedy proprietární protokoly. Z hlediska chybějící standardizace se firma Echelon snaží zavést svůj Open Smart Grid Protocol (OSGP) protokol jako standard. Výrobci, jejichž PLC systémy jsou postaveny na úzkopásmové komunikaci s OFDM využívají DLMS/COSEM specifikaci. Díky této specifikaci se dají použít elektroměry různých výrobců v jedné síti. Výrobci, jejichž PLC systémy jsou postaveny na širokopásmové komunikaci, používají standardních TCP/IP protokolů, ale i tak se jedná v energetice o proprietární řešení a není možné nasadit zařízení různých výrobců vedle sebe v jedné síti.
- *Budou uvažovány systémy s modulací OFDM, nebo systémy s jednou, případně více nosnými frekvencemi?* Výsledky měření představené v tomto článku dokazují perspektivnější možnosti využití standardu G3-PLC oproti PRIME z hlediska adaptivity, celkové stability a možnosti přímé komunikace mezi uzly díky polygonální konfiguraci. Výrobce proklamovaná vysoká přenosová rychlost pro HDR NB-PLC (PRIME a G3-PLC) je garantovaná pouze ve frekvenčním pásmu FCC. V pásmu CENELEC je přenosová rychlost mnohem nižší. Pro aplikace nevyžadující vysokou datovou rychlost jsou vhodnější systémy s jednou nosnou frekvencí. Systémy s jednou, případně více nosnými frekvencemi dosahují ale rychlosti pouze v jednotkách kilobitů za sekundu, a to pro budoucí SG aplikace a vize je nedostačující.
- *Jaké jsou výhody a nevýhody současně aktuálních standardů využívajících OFDM?* Alokované frekvenční pásmo pro OFDM techniku je rozděleno do subkanálů a díky vzájemné ortogonalitě jednotlivých subnosných frekvencí daného subpásmu, je možné skládat tyto subnosné těsně za sebe. b) Využití OFDM v přiděleném frekvenčním rozsahu CENELEC je diskutabilní, jelikož jednotlivé subnosné jsou v takto úzkém pásmu namačkány vedle sebe a jediné díky ortogonalitě systému se vzájemně neruší. Takové pásmo je jednoduše ovlivněno rušením, především úzkopásmovým.

Především rušení je možné větším odstupem subnosných a redundancí datových zpráv, ale toto řešení povede k významnému snížení přenosové rychlosti (potlačení interferencí mezi symboly ISI (Inter Symbol Interference) např. pomocní ochranného intervalu, nebo potlačení interferencí mezi nosnými (Inter Carrier Interference, ICI) pomocí cyklického prodloužení, celkově sníží počet subnosných v daném subpásmu, tedy celkový přenos). Výsledky měření představené v této práci ukázaly, že systémy s takto navrženou OFDM technikou jsou horší (z hlediska vlivu rušení a dosahů komunikace) než úzkopásmová komunikace s jednou nosnou frekvencí. Velkou výhodou OFDM je možnost vyloučit části silně rušeného spektra z přenosu.

- *Bude využito fixního nastavení parametrů komunikace nebo se využijí adaptivní real-time mechanismy?* Fixní nastavení komunikačních parametrů může způsobit výpadky, jelikož přenosový kanál je časově proměnný. Proto adaptivní real-time mechanismy jsou vyžadovány. Například standard G3-PLC umožňuje využít režim ATM (Adaptive Tone Mapping), který na základě přijatých subnosných, tzv. tónů, ze kterých je odhadována hodnota SNR, volí optimální druh modulace. Také rozpozná frekvence, které nejsou použity pro komunikaci. Režimu ATM je možné aplikovat v systému, kde je rušení v nějakém časovém intervalu menší (den/noc). V době menšího rušení automaticky aplikuje více stavovou modulaci pro rychlejší přenos s podmínkou, že pokud rušení na vedení naroste, je automaticky použita robustnější modulace a přenos je i nadále aktivní. Dalším příkladem dynamického real-time řízení je vyloučení silně rušených subpásem z přenosu u systému s OFDM modulací (využívá například standard ITU G.hnem).

7 Závěr

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. Jednu z těchto problémových oblastí se snažil tento článek řešit. Jednalo se o oblasti experimentálního měření pro ověření vlastností v reálné silnoproudé instalaci, kde může být PLC komunikace využita pro účely podružného měření spotřeby elektrické energie.

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.

Nové standardy ITU G.hnem a IEEE P1901.2 nebyly pro měření uvažovány, jelikož doposud neexistují komerčně dostupné vývojové kity pro jejich ověření. Jeden z prvních komerčně dostupných kitů ze standardem IEEE P1901.2 byl představen v roce 2014 firmou Texas Instruments v podobě vývojové sady TMDSPCKITV4, kde verze ARIB obsahuje modul SOMPLC-F28M35, umožňující komunikaci právě podle zmíněného standardu. Jak vyplývá z názvu, jedná se pouze o komunikaci v pásmu ARIB.

Pro porovnání s modemy využívajícími OFDM, byly uvažovány STM modemy založené na systému jedné nosné frekvence. Na základě výsledků měření tyto modemy lépe oddělují signál od šumu, nebo mají vyšší vysílací výkon, který si poradí i s větším rušením v elektrické síti. Výsledky měření s STM modemy s jednou nosnou frekvencí dosahovaly nízkých rychlostí, ale vyšší spolehlivosti a vyšších komunikačních dosahů.

Poděkování

Článek byl podpořen projektem Grantové agentury České republiky č. GP14-29084P.

Literatura

- [1] GALLI, Stefano, SCAGLIONE, Anna a WANG, Zhi-fang, 2011, For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. Proceedings of the IEEE [online]. 2011. Vol. 99, no. 6p. 998-1027. DOI 10.1109/JPROC.2011.2109670.
- [2] MLÝNEK, Petr, MIŠUREC, Jiří a KOUTNÝ, Martin, 2012, Noise modeling for power line communication model. In 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). s. 282-286. ISBN: 978-1-4673-1118-2.
- [3] GOTZ, M., RAPP, M. a DOSTERT, K., 2004, Power line channel characteristics and their effect on communication system design. IEEE Communications Magazine [online]. 2004. Vol. 42, no. 4p. 78-86. DOI 10.1109/MCOM.2004.1284933
- [4] European Committee for Electrotechnical Standardization CENELEC, 2010. Dostupné z: <http://www.cenelec.eu/>.
- [5] 50065-1:2001: Specification for signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz.
- [6] Open Data Communication in Building Automation, Controls and Building Management V Control Network Protocol, ISO/IEC Std. DIS 14908, 2008.
- [7] Powerline Related Intelligent Metering Evolution (PRIME), [Online], [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: <http://www.prime-alliance.org/>
- [8] G3-PLC: Open Standard for SmartGrid Implementation. [Online], [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: <http://www.maxim-ic.com/products/powerline/g3-plc/>
- [9] ARUZUAGA, Aitor, BERGANZA, Inigo, SENDIN, Alberto, SHARMA, Manu a VARADARAJAN, Badri, 2010, PRIME Interoperability Tests and Results from Field. In : 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications [online]. IEEE. 2010. p. 126-130. ISBN 978-1-4244-6510-1.
- [10] RAZAZIAN, Kaveh, UMARI, Maher, KAMALIZAD, Amir, LOGINOV, Victor a NAVID, Michael, 2010, G3-PLC specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results. In : ISPLC2010 [online]. IEEE. 2010. p. 313-318. ISBN 978-1-4244-5009-1.
- [11] C2000 Power Line Modem Developer's Kit. Texas Instruments. [Online]. [cit. 2016-10-02]. Dostupné z: www.ti.com/tool/tmdsplckit-v3
- [12] STMicroelectronics. EVALKITST7580-1: ST7580 power line networking system-on-chip demonstration kit. 2012, 4 s. [online]. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00048571.pdf
- [13] HOCH, Martin, 2011, Comparison of PLC G3 and PRIME. In : 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications [online]. IEEE. 2011. p. 165-169. ISBN 978-1-4244-7751-7.
- [14] KOCH, Martin, EU Regulation of high-speed Powerline Communication in the spectrum 150-500 kHz, devolo, 01.10.2013.
- [15] MLÝNEK, Petr, FUJDIÁK, Radek; ŠILHAVÝ, Pavel, MIŠUREC, Jiří, FRANEK, Lešek, ZAMPHIROPOLOS, Juan a PAŘÍZEK, Jiří, 2015, Role PLC v Smart Metering rollouts – porovnání a metodika hodnocení pilotních PLC realizací. In Sborník konference ČK CIRED 2015. s. 1-19. ISBN: 978-80-905014-4-7.