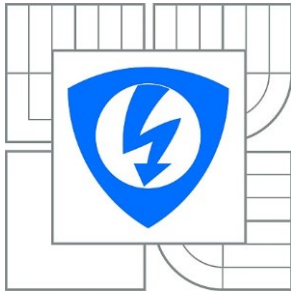


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MODEM PRO KOMUNIKACI PO NAPÁJECÍM VEDENÍ

MODEM FOR POWERLINE COMMUNICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

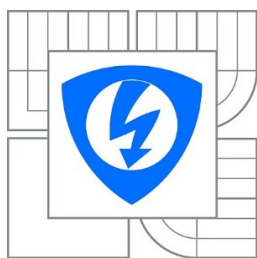
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JÁN SLÁČIK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. ZDENĚK KOLKA

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Ján Sláčik

ID: 147640

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Modem pro komunikaci po napájecím vedení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte standardy a dostupné obvody pro úzkopásmovou komunikaci přes napájecí vedení. Vyberte vhodný obvod pro dosažení rychlosti větší než 19200 b/s na fyzické vrstvě. Navrhněte koncepci a obvodové zapojení. Modem musí obsahovat zabezpečení přenášených dat proti chybám.

Navrhněte a hardwarově realizujte modem. V případě potřeby realizujte příslušné software a proveďte měření dosažených parametrů pro různé scénáře rušení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NASSAR, M.; LIN, J.; MORTAZAVI, Y.; DABAK, A.; KIM, I.H.; EVANS, B.L. Local Utility Powerline Communications in the 3-500 kHz Band: Channel Impairments, Noise, and Standards, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 29, no. 5, pp. 116 – 127.

[2] HOCH, M. Comparison of PLC G3 and PRIME, In Proc. of IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC 2011), Udine, Italy, April 2011, pp. 165 – 169.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Zdeněk Kolka

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studií dostupných standardů a obvodů pro komunikaci po napájecím vedení. Je popsán princip komunikace po elektrické síti 230 V/50 Hz. K tomu účelu je zde uvedeno několik dostupných modemů možných k realizaci a implementaci dostupných standardů. K dispozici jsou standardy PRIME a G3-PLC, které jsou popsány, porovnány a změřeny na úrovni jejich potenciálních vlastností. Byl navržen koncentrátor na bázi standardu G3-PLC a rozšířen o rádiové rozhraní. Toto zařízení bylo podrobeno testování v různých scénářích rušení a topologiích. Rozebrány jsou také grafická rozhraní, která byla použita k měření přenosu po elektrické síti uvedených standardů v několika režimech. Veškerá měření byla uskutečněna v reálných podmínkách pro oba testované modemy. Výsledky měření potvrzují účel jak daného standardu, tak jeho konfigurace.

KLÍČOVÁ SLOVA

PLC modem, XBee, PRIME, G3-PLC, G.hnem, CENELEC, FCC

ABSTRACT

This bachelor thesis is dealing with the standards and usable circuits applications for a powerline communication, which are currently available. Principle of this kind of communication is described for default supply network 230 V/50 Hz. This work is also describing several available modems which can be used for this type of communication. The properties of the standards PRIME and the G3-PLC, which are presently at disposal, are specified, measured and compared with each other in this project. The concentrator based on the G3-PLC standard extended about radio interface was designed. Afterwards this device was tested in various topologies and interference scenarios. The graphical interfaces, which allow the transfer measurements in multiple modes are described in this work as well. The entire measurements were realized in a real conditions for both tested modems. The results of these measurements are validating the purpose of each standard and its configuration.

KEYWORDS

PLC modem, XBee, PRIME, G3-PLC, G.hnem, Zero Configuration GUI, CENELEC, FCC

SLÁČEK, J. *Modem pro komunikaci po napájecím vedení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 103 stran bakalářské práce. Vedoucí práce: prof. Dr. ing. Zdeněk Kolka.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Modem pro komunikaci po napájecím vedení, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce, jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI., díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 2014.

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Dr. ing. Zdeňku Kolkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Dále Ing. Petru Procházkovi, Ph.D., za zapůjčení PC laboratoře výhradně na měření PLC modemů a firmě ModemTec s.r.o. za zpřístupnění PLC pracoviště pro klíčová měření.

V Brně dne 2014.

.....
(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	VIII
Seznam tabulek	X
ÚVOD	1
1 Přenos dat po napájecím vedení	2
1.1 Rušení.....	2
1.2 Impedance vedení.....	3
1.3 Technologie PLC.....	3
1.4 Rozdělení PLC podle frekvenčního pásma	4
1.4.1 Úzkopásmová PLC.....	4
1.4.2 Širokopásmová PLC.....	5
1.5 Přehled modemů	5
1.5.1 Starší technologie s jednou nosnou.....	5
1.5.2 Novější úzkopásmové modemy.....	8
2 Přehled standardů	12
2.1 Referenční model ISO/OSI	12
2.2 Standard PRIME	13
2.2.1 Základní vlastnosti	13
2.2.2 Architektura PRIME	14
2.2.3 Vrstva PHY	15
2.2.4 Vrstva MAC	17
2.2.5 Konvergenční vrstva	19
2.3 Standard G3-PLC	19
2.3.1 Vrstva PHY	19
2.3.2 Vrstva MAC	20
2.4 Standard ITU G.hnem.....	21
2.4.1 Vrstva PHY	21
2.4.2 Topologie sítě	23
2.5 Srovnání standardů PRIME/G3-PLC/IEE P1901.2/G.hnem	24
3 Porovnání G3 a PRIME pomocí SW definovaného modemu	26
3.1 ZERO Configuration GUI.....	26
3.1.1 Zero configuration mode.....	26
3.2 Zero Configuration GUI - Intermediate Mode	28

3.2.1	Monitorovací prvky.....	28
3.2.2	Konfigurace PRIME vybraného PLC modemu TMDSPCKIT-V3.....	32
3.2.2.1	Systémová nastavení.....	32
3.2.3	Konfigurace G3-PLC vybraného PLC modemu TMDSPCKIT-V3.....	36
3.3	Měření standardů PRIME a G3-PLC.....	38
3.3.1	PRIME.....	38
3.3.2	G3-PLC.....	43
3.3.3	Zhodnocení měření.....	45
4	Realizovaný PLC modem	47
4.1	Funkční prvky modemu.....	49
4.1.1	Paměť EEPROM.....	49
4.1.2	JTAG.....	50
4.1.3	Zavaděč pro mikrokontrolér.....	50
4.1.4	Rozhraní RS-232.....	50
4.1.5	Powerline, piny „SWD“, „JP1“ a „JP2“.....	51
4.1.6	Komunikační modul XBee PRO 868.....	51
4.1.7	Komunikační modul SGCM-P40.....	51
4.1.8	Napájecí zdroj.....	52
4.1.8.1	Měření napájecího zdroje koncentrátoru.....	55
4.2	Fotodokumentace realizovaného zařízení.....	58
4.3	Měření realizovaného modemu.....	60
4.3.1	Měření UREL.....	62
4.3.2	Měření v centru pro inteligentní energetiku – Modemtec.....	67
4.3.3	Shrnutí měření.....	72
5	Závěr	74
	Literatura	75
	Seznam použitých zkratk	78
	Seznam příloh	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1-1 Struktura modemu na bázi F28069 a AFE031 [33].....	10
obr. 1-2 Blokové zapojení PLC modemu obvodu M16C/6S1 [34].....	11
obr. 2-1 Referenční model ISO/OSI.....	12
obr. 2-2 Příklad topologie PRIME.....	14
obr. 2-3 Možné stavy uzlu.....	14
obr. 2-4 Blokové schéma vysílače.....	15
obr. 2-5 Konstelační diagram DBPSK.....	16
obr. 2-6 Konstelační diagram DQPSK.....	16
obr. 2-7 Konstelační diagram D8PSK.....	17
obr. 2-8 Struktura adresy v PRIME [5].....	18
obr. 2-9 Stavba rámce v PRIME.....	18
obr. 2-10 Struktura OFDM systému standardu G3-PLC [6].....	19
obr. 2-11 Možné topologie G3-PLC.....	20
obr. 2-12 Plán využívání frekvenčních pásem [35].....	22
obr. 2-13 Konstelační diagram 16QAM.....	22
obr. 3-1 Úvodní obrazovka Zero Configuration GUI.....	27
obr. 3-2 Ukázka průběhů RSSI a SNR.....	28
obr. 3-3 Ukázka průběhu BER.....	29
obr. 3-4 Ukázka průběhu PER.....	29
obr. 3-5 Karta Transfer info.....	30
obr. 3-6 Karta statistik.....	31
obr. 3-7 Systémová nastavení.....	32
obr. 3-8 Základní nastavení PHY vrstvy.....	33
obr. 3-9 Nastavení vysílače.....	34
obr. 3-10 Nastavení přijímače.....	35
obr. 3-11 Atributy MAC.....	35
obr. 3-12 Systémové nastavení.....	36
obr. 3-13 Nastavení PHY vrstvy, vysílače a přijímače.....	37
obr. 3-14 Atributy MAC.....	38
obr. 3-15 Měření PRIME – UREL, D8PSK, menší provoz.....	39
obr. 3-16 Měření PRIME – UREL, D8PSK, 60 m, vyšší provoz.....	40
obr. 3-17 Měření PRIME – UREL, D8PSK, 60 m, nižší provoz.....	40
obr. 3-18 Měření PRIME – laboratoř, D8PSK, nejbližší PC vypnut.....	41
obr. 3-19 Měření PRIME – laboratoř, D8PSK, nejbližší PC zapnut.....	42
obr. 3-20 Měření G3 – UREL, D8PSK, 30 m.....	43

obr. 3-21 Měření G3 – UREL, D8PSK, 60 m	44
obr. 3-22 Měření G3 – laboratoř, robustní režim	44
obr. 4-1 Závislost rámcové chybovosti na poměru signál šum podle [19].....	47
obr. 4-2 Logická polygonální síť RF/PLC a struktura software koncentrátoru	48
obr. 4-3 Blokové schéma koncentrátoru NB-HDR.....	49
obr. 4-4 Paměť EEPROM	49
obr. 4-5 JTAG konektor	50
obr. 4-6 MCU Bootloader	50
obr. 4-7 RS-232 Interface	50
obr. 4-8 SWD, SWITCH 1, 2, Power line	51
obr. 4-9 Blokové schéma SGCM-P40.....	52
obr. 4-10 Schéma zapojení DC/DC PWM konvertoru (12 V na 5 V).....	53
obr. 4-11 Stabilizátor na 3,3 V.....	55
obr. 4-12 Ilustrační schéma toku proudů NCP3170 [28].....	55
obr. 4-13 Průběh V_{OUT} s odběrem 1,2 A	56
obr. 4-14 Reakce na skokové připojení zátěže.....	57
obr. 4-15 Měření zatěžovací charakteristiky zdroje koncentrátoru	57
obr. 4-16 Zatěžovací charakteristika PWM konvertoru	58
obr. 4-17 Osazený modem.....	58
obr. 4-18 Základní deska modemu.....	59
obr. 4-19 Rádiový modul a PLC modul	59
obr. 4-20 Oba zhotovené modemy	60
obr. 4-21 Software MAX2992 Simple Connect	62
obr. 4-22 Měření č.1 – UREL, 50 m, CENELEC A.....	63
obr. 4-23 Měření č.1 – UREL, 50 m, FCC	64
obr. 4-24 Měření č.2 – UREL, 80 m, CENELEC A.....	65
obr. 4-25 Měření č.2 – UREL, 80 m, FCC	65
obr. 4-26 Měření č.3 – UREL, 50 m + open load 30 m, CENELEC A.....	66
obr. 4-27 Měřicí pracoviště – ModemTec.....	67
obr. 4-28 Vazební člen na výstupu generátoru.....	67
obr. 4-29 Měření č.1 – ModemTec, 500 m, CENELEC A.....	68
obr. 4-30 Topologie sítě měření s definovaným rušením	69
obr. 4-31 Měření č.2 – ModemTec, 1 km (měnič a motor), CENELEC A	69
obr. 4-32 Spektrum pásma CENELEC A	70
obr. 4-33 Spektrum pásma FCC s úzkopásmovým rušením.....	71
obr. 4-34 Měření č.3 – ModemTec, 1 km, rušení PLC modemy, CENELEC A	72

SEZNAM TABULEK

tab. 1-1 Rozdělení komunikačních pásem dle EN 50065 [3].....	4
tab. 1-2 Starší úzkopásmové modemy.....	7
tab. 1-3 Novější úzkopásmové modemy.....	11
tab. 2-1 Srovnání fyzické vrstvy standardů [8].....	24
tab. 3-1 Srovnání přenosů PRIME.....	42
tab. 3-2 Srovnání přenosů G3.....	45
tab. 4-1 Proudové odběry komponent modemu.....	53
tab. 4-2 Měření napětového zvlnění.....	56
tab. 4-3 Maximální velikosti odesílaných paketů.....	60
tab. 4-4 Topologie vedení sestavené pro měření na URELu.....	62
tab. 4-5 PER měření č.1 – UREL, 50 m, CENELEC A.....	63
tab. 4-6 PER měření č.1 – UREL, 50 m, FCC.....	64
tab. 4-7 PER měření č.2 – UREL, 80 m, CENELEC A.....	65
tab. 4-8 PER měření č.2 – UREL, 80 m, FCC.....	66
tab. 4-9 PER měření č.3 – UREL, 50 m + open load 30 m, CENELEC A.....	66
tab. 4-10 PER měření č.1 – ModemTec, 500 m, CENELC A.....	68
tab. 4-11 PER měření č.2 – ModemTec, 1 km (měnič a motor), CENELEC A.....	69
tab. 4-12 Shrnutí výsledků měření.....	73

ÚVOD

Úkolem této bakalářské práce je prostudovat dostupné standardy a modemy pro úzkopásmovou komunikaci po napájecím vedení. Dále navrhnout a hardwarově realizovat modem pro rychlost větší než 19 200 b/s.

Technologie „Power Line Communications“, neboli technologie PLC se používá od 50. let 20. století. Jedná se o přenos dat po silovém vedení. Proč se tato technologie používá a je žádaná, vyplývá z její hlavní výhody. Tou je přenos dat už po stávajícím vedení velmi vysokého, vysokého, středního nebo nízkého napětí. Nepokládá se tedy další kabeláž a využívá se stávající infrastruktury napájecího napětí. To otevírá nejrůznější možnosti využití automatizace jak v průmyslových závodech, v inteligentním vzdáleném měření, tak i v běžných budovách a domácnostech pro inteligentní ovládání spotřebičů, ventilace, vytápění atd. Tím, že při realizaci takové sítě není potřeba dalšího vedení, se výrazně snižují náklady na budování takové sítě, obzvláště na místech kde je problematické vést speciální vedení pro potřebný komunikační systém. Tímto se technologie PLC dostává do vedoucí pozice inteligentních systémů nové generace.

Nejstarší patenty související s touto problematikou byly registrovány už začátkem 20. století. V roce 1950 byl navržen a realizován první PLC systém, zvaný HDO (hromadné dálkové ovládání), který se využíval například k ovládání veřejného osvětlení, nebo řízení odběru elektrické energie. V dnešní době se systém HDO používá jako časový spínač, který připojí spotřebiče do sítě (nebo upozorní) ve chvíli, kdy dodavatel změní spotřebiteli nižší sazbu za elektřinu (pouze v případě, že má spotřebitel tzv. dvoutarifní sazbu).

Dnes PLC systémy existují nejen v automatizaci, ale také za použití širokopásmové modulace je možné jejich využití například k propojení několika LAN sítí, připojení k Internetu a také dalším službám, které vyžadují QoS (Quality of Services), jako například čím dál více rozšířené VoIP.

Tato práce pojednává o dvou PLC modemech a jejich vlastnostech. První modem jako vývojový kit od Texas Instruments TMDSPCKIT-V3 a druhý jako PLC modul SGCM-P40.

Kit od TI, byl použit pouze k měření a ověření komunikace standardů PRIME a G3-PLC po napájecím vedení. Modul SGCM-P40 byl použit v realizovaném modemu společně s rádiovým modulem XBee PRO 868.

Obě zařízení byla testována ve stejných nebo podobných podmínkách. Je zde uvedené porovnání obou zařízení z hlediska rychlosti, stability, vhodnosti použití. Dále je popsána koncepce, návrh realizovaného zařízení s SGCM-P40, měření modemů a celkové zhodnocení dosažených výsledků.

1 PŘENOS DAT PO NAPÁJECÍM VEDENÍ

Komunikace po napájecím vedení se předně používá kvůli možnosti využití stávající rozvodné střídavé sítě. Jelikož je primárním využitím takových vedení přenos elektrické energie s frekvencí 50 Hz (v ČR), tak se vyskytuje řada problémů při přenosu dat. Například silné rušení, různé impedance vedení, útlum užitečného signálu, dodržení elektromagnetické kompatibility a dodržení norem pro takovou komunikaci (v ČR CENELEC).

Samotný princip komunikace modemů:

- Modemy mezi sebou komunikují v polo-duplexním režimu, což znamená režim střídavé obousměrné komunikace po jedné lince. Tedy komunikace probíhá v určitém čase jen jedním směrem, avšak směr komunikace se mění.
- Připojení PLC zařízení k elektrické síti je možné přes vazební členy (induktivní nebo kapacitní). Po galvanickém oddělení a odfiltrování napájecí složky zůstává pásmo, které se využívá pro modulovaný přenos dat. Použitím některé z úzkopásmových nebo širokopásmových modulací, kdy jsou přenášena data z PLC injektována skrz vazební člen do elektrické sítě na nosnou frekvenci která je výrazně větší než frekvence síťového napětí (50 Hz), a amplituda je výrazně nižší než elektrické sítě. Takto přenesený signál je na straně přijímače za pomoci vazebního obvodu (frekvenčního filtru) oddělen od nosné frekvence, což (v ideálním případě bez rušení) znamená získání původního datového signálu. S velikostí rušení přímo souvisí rychlost přenosu a jeho chybovost, což také ovlivňuje výběr použité modulace a data, která jsou přenášena. Rušení je největší problém u jakékoliv komunikace po napájecím vedení.

1.1 Rušení

Rušení je největší problém u technologií PLC, kdy je důležité dosáhnout flexibilního řešení. Proto je nutné použít kvalitní modulační techniky pro přenos dat s co nejvyšší rychlostí a co nejmenší chybovostí. Mimo rušení se na komunikaci projevují například přeslechy a interference, které se objevují i náhodně. Rušící elementy jsou například stejnosměrné komutátorové motory (klimatizace, starší vysavače, pračky, fény, atd.), dále zářivky, televize, počítačové monitory nebo i rušení sekundárního vinutí distribučního transformátoru. Rušení z těchto prvků je způsobováno zejména spínanými procesy. Tento typ rušení se nazývá úzkopásmové rušení, kterého průběh má tvar úzkých špiček s vysokou PSD.

Impulzní rušení, které je způsobováno spínanými zdroji, tyristorovými regulátory, a triaky (stmívače osvětlení) či kolektorovými motory. V energetických sítích se toto rušení vyskytuje často. Impulzní rušení ještě rozdělujeme na dvě skupiny:

- **Synchronní** – rušení generované triaky je synchronní s 50 Hz a má podobu vyšších harmonických k 50Hz – toto rušení je přítomno vždy
- **Asynchronní** – jsou to zejména nekvalitně vyrobené měniče napětí, které pracují s frekvencemi desítek kHz. Bývají to spínané zdroje malého napětí (do 50V), triaky jako stmívače osvětlení, nebo elektronické předřadníky elektronických zářivek [1]

Rušení přítomné v každém případě je šum pozadí, který vzniká skládáním velkého počtu zdrojů rušení o malé intenzitě, a jeho parametry jsou proměnné v čase.

Aby bylo možné přenášet data po střídaté síti s přijatelnou chybovostí, a dostatečnou rychlostí, je nutné použít systém, který minimalizuje nejčastější chyby a co nejrychleji se obnovuje po výpadcích. V konečném důsledku se jeví přenos jako bezchybný. Proto je nutné použít dobré techniky detekce a korekce chyb přenosu (redundance). Obecně můžeme chybovost snížit rozšířením komunikačního pásma, kde budou mít nosné dostatečný rozestup a při dostatečném počtu nosných se zvýší i rychlost přenosu. Za účelem použití, se v této práci pojednává o NB-HDR-PLC.

1.2 Impedance vedení

Elektrické vedení není primárně určeno na přenos signálu na vyšších frekvencích než 50 Hz. Tím se nám vyskytuje mimo jiné problém s impedancí sítě. Jedná se o skutečnost, že každá síť má jinou impedanci v závislosti na připojené zátěži (závisí na všech zátěžích připojených k jednomu transformátoru). Samotné vodiče mají zanedbatelný vliv na tento problém. Impedance je většinou induktivního charakteru. Při měření v IBM vědci zjistili, že impedance síťového rozvodu v obytných budovách se pohybuje v rozmezí od cca 1,5 do 80 ohmů (při 100 kHz). Při typické zátěži lze očekávat útlum signálu od 2 do 40 dB podle konkrétních podmínek.[1]

1.3 Technologie PLC

Existují tři hlavní typy technologií PLC [2]:

- **Ultra Narrow Band (UNB)** – technologie pro velmi nízké přenosové rychlosti řádu (cca 100 b/s) v pásmu (0,3 až 3 kHz) nebo (30-300 Hz). Zařízení UNB-PLC mají velmi velký dosah (150 km a více). 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.
- **Narrow Band (NB)** – technologie pracující v pásmu (3-500 kHz), které zahrnuje evropská pásma CENELEC, americké FCC, japonské ARIB a čínská pásma. Tuto oblast můžeme dále dělit:
 - **Low Data Rate (LDR)** – technologie využívající jednu nosnou, a dosahující přenosové rychlosti maximálně několika kb/s. Některé typické příklady LDR NB-PLC, jsou například standardy LonWorks, IEC 61334, X10, HomePlug C & C, SITRED, atd.
 - **High Data Rate (HDR)** – technologie s více nosnými, dosahující přenosové rychlosti v omezení desítek kb/s až do 500 kb/s. Typickým příkladem HDR NB-PLC jsou: ITU-T G.hnem, IEEE 1901,2, PRIME a G3-PLC
- **Broadband (BB)** – technologie pracující v pásmu (1,8-250 MHz), které dosahují na vrstvě PHY rychlosti v rozmezí od několika Mb/s do stovek Mb/s. Typickými příklady technologie BB-PLC jsou: HomePlug 1.0 (a novější verze), IEE 1901, ITU-T G.hnem, atd.

Jak pro NB-PLC, tak pro BB-PLC jsou dnes k dispozici čipové sady, které efektivně integrují spodní vrstvy síťového modelu (PHY, MAC, konvergenční).

1.4 Rozdělení PLC podle frekvenčního pásma

Data, která přenášíme po silovém vedení, jsou v tomto případě za účelem automatizace, tedy data jsou relativně malá a není potřeba klást nárok na vysoké rychlosti. PLC modemy se z hlediska frekvenčního pásma dělí na dvě skupiny a to úzkopásmová a širokopásmová. Každá z těchto skupin se vyznačuje jinými možnostmi využití díky jejich odlišným vlastnostem. Z tohoto důvodu je vhodnější se zaměřit na úzkopásmová PLC, která pro naše potřeby dosahují potřebných vlastností. Zde jsou upřesněny pojmy širokopásmová PLC a úzkopásmová PLC.

1.4.1 Úzkopásmová PLC

Úzkopásmový systém používá k vysílání frekvenční rozsah definovaný Evropskou normou CELENEC EN 50065-1. Ta definuje frekvenční rozsah od 3 do 148,5 kHz.

Úzkopásmová PLC se využívají například v průmyslové automatizaci, domácí automatizaci (ovládání vrat, rolet, regulace teploty a ostatních zařízení které je možné elektricky ovládat a regulovat), dále automatizovaný odečet z měřících přístrojů (AMR) a také v průmyslové automatizaci k továrnímu monitorování a kontrole.

Při dodržení norem CELENEC je možné dosáhnout přenosové rychlosti několika kilobitů na vzdálenost 1 km bez použití opakovačů. Menší rychlosti v pásmech obsažené touto normou, jsou způsobeny menším počtem nosných a jejich malým odstupem. Evropská norma CENELEC EN 50065 [3] která definuje evropský standard, je rozdělena na tři základní dokumenty:

- **EN50065-1** – definuje obecné požadavky o frekvenčních pásmech a elektromagnetického rušení v *tab. 1-1*
- **EN50065-4-2** – popisuje nízkonapěťové oddělovací filtry a bezpečnostní požadavky
- **EN60065-7** – zabývá se impedancí připojených zařízení

Pásmo	Šířka pásma [kHz]	Max. amplituda signálu [V]	Poznámka
-	3-9	-	Určeno výhradně pro dodavatele energií
A	9-95	1-5	Po souhlasu dodavatele i pro odběratele
B	95-145	1,2	Pro odběratele; nevyžaduje protokol přístupu dle normy
C	125-140	1,2	Pro odběratele; vyžaduje protokol přístupu dle normy
D	140-148,5	1,2	Pro odběratele; vyžaduje protokol přístupu dle normy

tab. 1-1 Rozdělení komunikačních pásem dle EN 50065 [3]

Definice přístupu v ČR dle normy ČSN EN 60065-1 [3]

Pokud je dodržen protokol o přístupu dle platné normy ČSN EN 50065-1, je možné využít libovolný komunikační protokol. Tato norma popisuje způsob signalizace v pásmu 125 – 140 kHz.

- vysílač nesmí bez přerušení vysílat déle než 1 vteřinu a před dalším vysíláním musí být mezera dlouhá alespoň 125 ms (za vysílání se považuje sled signálů, ve kterých není mezera větší než 80 ms)
- všechny systémy musí použít frekvenci 132,5 kHz k upozornění, že vysílání pokračuje
- aby bylo možné detekovat použité pásmo, přístroj musí vysílat se spektrálním rozložením dle příslušného pásma
- přístroj může vysílat, pokud pásmo není využito po dobu náhodně zvolenou (rovnoměrně rozloženou mezi 85 ms a 125 ms, s alespoň sedmi možnými hodnotami v tomto pásmu)
- vysílač musí být vybaven detektorem signálu, který detekuje, že je pásmo využíváno

Úzkopásmové modemy využívající pásma B a C se používají především pro:

- ovládání zařízení napojených na elektrickou instalaci
- centralizovaná kontrola a řízení různých domovních systémů
- zabezpečovací úkony, propojení bezpečnostních senzorů a pravidla přístupu

Pásmo A CENELEC normy je pro tzv. energetický dohled a s tím související služby, které zahrnují vzdálené kontrolní funkce, odečty z elektroměrů a používají se také pro komunikaci mezi systémy malých elektráren dodávajících do určité oblasti elektrickou energii.

1.4.2 Širokopásmová PLC

Hlavní rozdíl od úzkopásmových PLC je mnohem širší frekvenční pásmo (cca 30 MHz za použití širokopásmové modulace). Takto máme umožněný přenos dat o rychlosti více než 200 Mb/s. Tato technologie se především používá k vysokorychlostnímu přenosu dat (LAN sítě, přenosy videí, přenos objemných datových souborů, umožňují přístup k internetu, atd.), ale vzhledem k vysokým frekvencím je mnohem náročnější udržet elektromagnetickou kompatibilitu s okolními zařízeními. V této práci využíváme výhradně úzkopásmové technologie, proto se nebude širokopásmová komunikace dále popisovat.

1.5 Přehled modemů

1.5.1 Starší technologie s jednou nosnou

Jedná se o modemy využívající klíčování FSK, BPSK, atd. pouze s jednou nosnou. Dosažitelná přenosová rychlost je v řádu kb/s. Typickým znakem modemů je jednoduchost, kdy se často předpokládá implementace přístupové metody (MAC) a řízení linky (LLC) v nadřazeném mikropočítači.

Jedním z prvních standardů v této oblasti je ANSI/EIA 709.1, známý také jako LonWorks. Byl vydán ANSI v roce 1999, tehdy známý jako LonTalk, a stal se mezinárodním standardem v roce 2008 (ISO/IEC 14908-1). Tento protokol zahrnuje všech 7 vrstev OSI a poskytuje sadu služeb, které umožňují aplikačnímu programu v zařízení odesílat a přijímat zprávy od ostatních zařízení v síti, aniž by bylo nutné znát topologii sítě nebo funkci jiných zařízení. Vysílače LonWorks jsou určeny pro provoz v jednom ze dvou frekvenčních rozsahů v závislosti na koncové aplikaci. Pokud je nastaven pro použití v rozvodných, je nastaveno pásmo CENELEC A. Pro koncové uživatele pak CENELEC C. Dosažitelné přenosové rychlosti jsou v řádu několika kb/s [11].

Nejrozšířenější PLC technologie nasazené v současnosti jsou založeny na FSK nebo rozprostřené-FSK jak je specifikováno v IEC 61334-5-2 a IEC 61334-5-1. Dostupné normy definují pro tyto technologie balík komunikačních protokolů pro všechny síťové vrstvy referenčního modelu ISO/OSI *Referenční model ISO/OSI* (IEC 62056-53 pro COSEM) a tím umožňují rozvoj systémů, které mezi sebou dokážou navzájem spolupracovat.

Starší úzkopásmové modemy využívající FSK a ASK

ST7537HS1 a ST7538(40)

ST7537HS1 je produkt firmy SGS-THOMSON Microelectronics, určený pro polo-duplexní, asynchronní přenos dat po domovní elektrické síti (230 V/50 Hz). Vzhledem k nízké přenosové rychlosti, maximálně 2 400 b/s je vhodný např. pro domácí automatizaci. Pro přenos používá modulaci FSK, při frekvenci nosné 132,45 kHz. Je v souladu s evropskou normou EN 50065-1 CENELEC i s americkou normou FCC.

ST7538(40) je nástupce obvodu ST7537HS1 a přináší tedy jistá vylepšení, nicméně i tento modem je již technologicky překonán. Jeho základní vlastnosti jsou:

- volba synchronní/asynchronní komunikace
- přenosová rychlost až 4 800 b/s
- volba z osmi nosných frekvencí
- nižší spotřeba, z 30 mA na 5 mA
- u síťového napětí detekuje průchod nulou a umožňuje synchronizaci

AS5501/AS5502

AS5501/02 je určený pro polo-duplexní, asynchronní přenos dat po domovní elektrické síti (230 V/50 Hz). Využívá také úzkopásmovou modulaci FSK. Při použití tohoto obvodu se počítá s externím výstupním zesilovačem a vazebním transformátorem, kterým se obvod připojí k externí síti. Samotný modem je napájen ze zdroje 5 V, ale externí zesilovač vyžaduje napájecí napětí 12 V (AS5501), nebo 24 V (AS5502). Na výstupu zesilovače je FSK signál o napětí 7 V_{pp}, resp. 14 V_{pp}. Přenosovou rychlost je možné nastavit na 600, 1200 nebo 2400 b/s.

TDA5051

Velmi oblíbený obvod pro nízkonákladové aplikace. Tento obvod umožňuje polo-duplexní, asynchronní přenos pomocí modulace ASK. Maximální přenosová rychlost 1200 b/s. Plně číslicové generování nosné frekvence (vyčítáním paměti ROM). Také především pro přenos řídicích signálů po silovém vedení (230 V /50 Hz). Vyráběn v pouzdře SO16. Vyhovuje normě ČSN EN 55065-1.

Obvod disponuje 8-bitovým D/A převodníkem a úzkopásmovým číslicovým filtrem. Frekvenci nosné je možné nastavovat pomocí hodinového signálu z integrovaného oscilátoru nebo mikrokontroléru v rozmezí 95 až 148,5 kHz. Obvod je vybaven integrovaným výstupním zesilovačem a automatickým nastavením zesílení na vstupu přijímače. I přes jeho stáří je stále dostupný v řadě aplikací.

AMIS-30585

AMIS-30585 je polo-duplexní FSK modem a je navržen pro přenos dat po nízkých napětích (50 V-1 kV). Modem nabízí kompletní zpracování protokolu od fyzické vrstvy k MAC vrstvě.

AMIS-30585 je v souladu s CENELEC EN 50065, IEC 1334-4-32 a IEC 1334-5-1. Napájecí napětí je 3,3 V. Interní PLL je uzamčen na frekvenci sítě 50 Hz nebo 60 Hz a používá se k synchronizaci přenosu dat při přenosové rychlosti 300, 600 a 1200 baudů pro frekvenci 50 Hz, což odpovídá 3,6 nebo 12 datových bitů na polovinu cyklu frekvence sítě 50 Hz nebo 60 Hz.

AMIS-49587

Tento obvod od ON Semiconductor vychází z osvědčené řady AMIS-30585. Zahrnuje jak řadu funkcí pro zajištění fyzické komunikace i 32-bitový procesor ARM.

Základní vlastnosti:

- programovatelná nosná frekvence od 9 do 95 kHz s krokem 10 Hz
- volitelná přenosová rychlost: 300, 600, 1200 a 2400 b/s (pro 50 Hz)
- kódování/dekódování signálů prostřednictvím integrovaného 32b jádra ARM
- implementuje MAC kompatibilní s CENELEC EN 50065-1 a IEC 61334-5-1
- komunikační rozhraní SCI pro spojení s nadřazeným systémem, volitelná komunikační rychlost systémem: 4,8; 9,6; 19,2; 34,4 kb/s
- max. spotřeba v režimu přijímač/vysílač 80 mA
- jediné napájecí napětí 3,3 V
- použitá modulace – spread-FSK (S-FSK)

IO	ST7570	ST7580	IT700
Modulace	S-FSK	BFSK, BPSK, QPSK, 8PSK	DCSK
Rychlost	až 2 400 b/s	až 28 000 b/s	625 - 7500 b/s
Nosná	až 148,5kHz	až 250 kHz	9 – 400 kHz
Rozhraní	UART	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C
Pouzdro	VFQFPN48	QFN48	QFN56

tab. 1-2 Starší úzkopásmové modemy

1.5.2 Novější úzkopásmové modemy

Další generace PLC modemů, která se využívá v současnosti, je založena na použití pokročilejších modulací včetně rozprostření spektra a využití kódování, které je mnohem pokrokovější a zajišťuje lepší flexibilitu. Ale i tady je stále hlavní nevýhoda nedostatečná přenosová rychlost a také nejednotnost standardů, která znemožňuje plnou integraci do velkých a odlišných systémů. Zde jsou uvedeny dnes dostupné modemy a jejich klíčové vlastnosti pro použití v praxi.

IT700

Plně integrovaný PLC modem. Umožňuje použití tzv. extrémně robustního módu (přenosová rychlost je v tomto případě pouze 625 b/s). Tímto se zvyšuje odolnost proti rušení. Používá modulaci DCSK a šifrování AES-128. Obsahuje integrovaný mikroprocesor 8051 s rozšířeným jádrem, paměť FLASH-256 KB a 16 kB RAM.

Základní vlastnosti:

- programovatelná nosná frekvence od 9 do 95 kHz (CENELEC pásmo A), od 95 do 125 kHz (CENELEC pásmo B), od 100 do 400 kHz (FCC/ARIB)
- volitelná přenosová rychlost: 625, 2500 b/s (pro CENELEC pásmo A, B)
- komunikační rozhraní UART pro spojení s nadřazeným systémem
- max. spotřeba 500 mA, jediné napájecí napětí 3,3 V
- modulace DCSK, šifrování AES 128

ST7570

Oproti předchozímu modelu ST7538 již obsahuje plně integrovanou vrstvu a částečně i MAC. Nevýhodou může být potřeba dvou rozdílných napájecích napětí.

Základní vlastnosti:

- programovatelná nosná frekvence od 9 do 148,5 kHz
- volitelná přenosová rychlost: 1200 a 2400 b/s (pro 50 Hz)
- komunikační rozhraní UART pro spojení s nadřazeným systémem (9,6; 19,2; 38,4; 57,6 kb/s)
- max. spotřeba v režimu přijímač/vysílač 0,5/30 mA
- napájecí napětí 3,3 až 5 V a 8 až 18 V
- použitá modulace – spread-FSK (8-FSK)

ST7580

Obvod kombinuje procesor PHY, řadič přístupu (MAC), analogový frontend (AFE) a výkonový zesilovač.

Základní vlastnosti:

- programovatelná nosná frekvence až do 250 kHz
- přenosová rychlost: 1200 až 28800 b/s podle druhu kódování
- volitelná kódování BFSK, BPSK, QPSK, 8PSK
- komunikační rozhraní UART pro spojení s nadřazeným systémem (do 57,6 kb/s)
- max. spotřeba v režimu přijímač/vysílač 0,5/30 mA
- napájecí napětí 3,3 nebo 5 V a 8 až 18 V

ST7590

Plně integrovaný systém NB-PLC podle standardu PRIME. Vestavěná jádra DSP a 8051 realizují softwarové funkce PRIME-compliant PHY, PRIME MAC, PRIME CS432 Convergence Layer a IEC 61334-4-32 LLC. Výrobce umožňuje modifikaci softwaru.

Základní vlastnosti:

- splňuje EN50065 a FCC
- modulace OFDM v pásmu CENELEC A, 96 subnosných s klíčováním BDPSK, DQPSK, D8PSK; konvoluční kódování s Viterbiho dekodérem
- programovatelná rychlost do 128 kb/s (PHY vrstva)
- měření kvality signálu
- plná implementace standardu PRIME
- šifrování AES 128
- komunikační rozhraní UART nebo SPI pro spojení s nadřazeným systémem
- plně integrovaný budič do $1 A_{RMS}$ a $14 V_{PP}$
- napájecí napětí 3,3 V nebo 5 V a 8 až 18 V
- pouzdro TQFP100

MAX2992

Obvod kombinuje procesor PHY, řadič přístupu (MAC). Analogový front end (AFE) je integrovaný v externím obvodu MAX2991. Využívá modulační techniky OFDM, funkce zabezpečení je AES128, detekce chyb pomocí ARQ. Obvod podporuje standard G3-PLC.

Základní vlastnosti:

- frekvenční pásma splňující CENELEC, ARIB, FCC
- provozní frekvence 10 kHz až 490 kHz
- rozhraní: 2xUART, 2xSPIK
- obsahuje FEC a CRC16
- maximální rychlost 300 kb/s
- shoda standardů: IEEE[®] P1901.2, ITU G.9903
- napájecí napětí 3 V

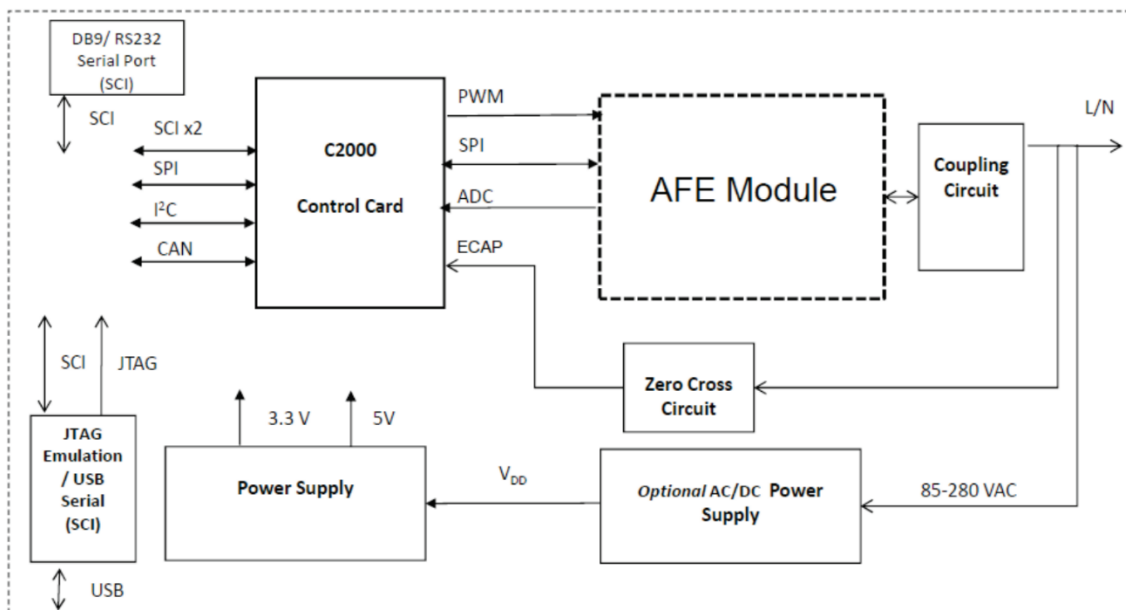
F28069

Tento PLC řadič tvoří univerzální mikrokontrolér s podporou DSP (digital signal processors) Texas Instruments a s analogovým frontend rozhraním AFE031. Hlavní výhodou tohoto mikrokontroléru je plná SW výbava standardu PRIME, G3 a Texas Instruments také poskytuje vývojový software zdarma.

Mikrokontrolér je obsažen také ve vývojovém kitu PLC modemu TMDSPLCKIT-V3, který byl použit pro měření klíčových hodnot pro tuto práci. Na stejném principu je založen také vyšší čipset 28M35/AFE032.

Základní vlastnosti:

- softwarové realizace implementovaných standardů PRIME a G3-PLC
- PRIME: PHY, MAC a IEC61334-4-32
- G3-PLC: PHY, MAC a adaptační vrstva 6LoWPAN
- pásma CENELEC A, B, C, D a jejich kombinace + FCC norma
- veškerý potřebný software poskytovaný TI zdarma
- rozhraní pro komunikaci s nadřazeným systémem je UART nebo SPI



obr. 1-1 Struktura modemu na bázi F28069 a AFE031 [33]

M16C/6S1

Tento obvod od firmy Renesas tvoří MCU M16C/60, modem Yitran IT900/IT700 a analogový frontend (AFE). Frekvenční pásmo pro komunikaci je od 100 Hz po 400 Hz. Normy CENELEC, FCC, ARIB.

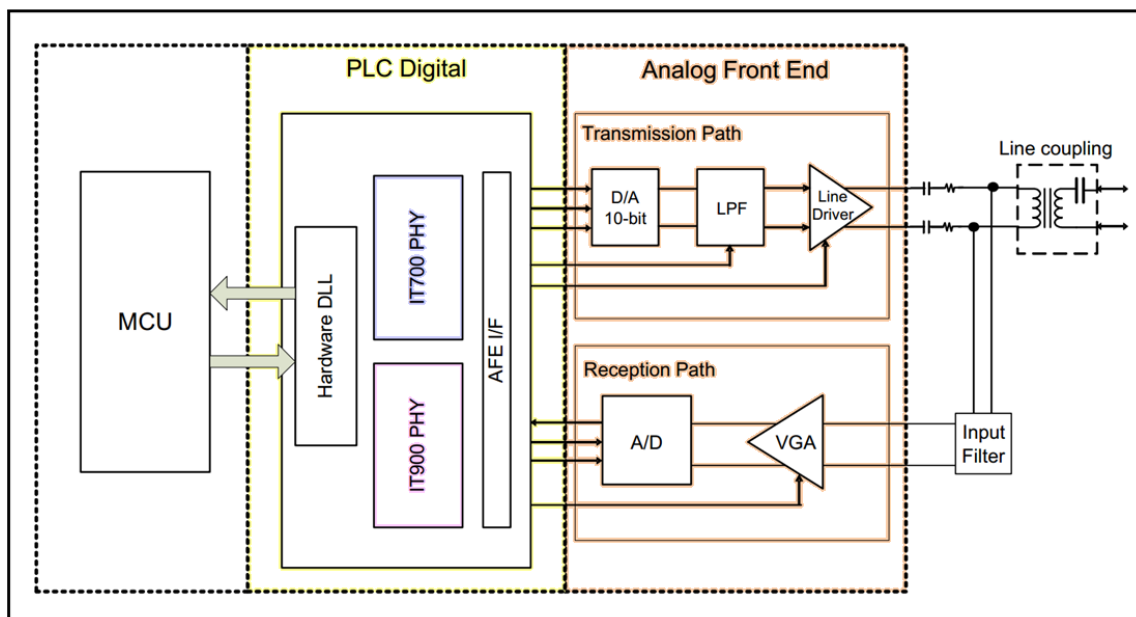
Základní vlastnosti:

MCU:

- takt procesoru až 30,72 MHz (při použití frekvenčního syntetizátoru)
- paměť flash: 128 KB až 256 KB
- satová flash: 8 KB

PLC:

- takt procesoru až 46,08 MHz
- FCC & ARIB: do 500 kbps@PHY/do 300 kbps@MAC užitečná rychlost
- napájecí napětí: 3,3 V



obr. 1-2 Blokové zapojení PLC modemu obvodu M16C/6S1 [34]

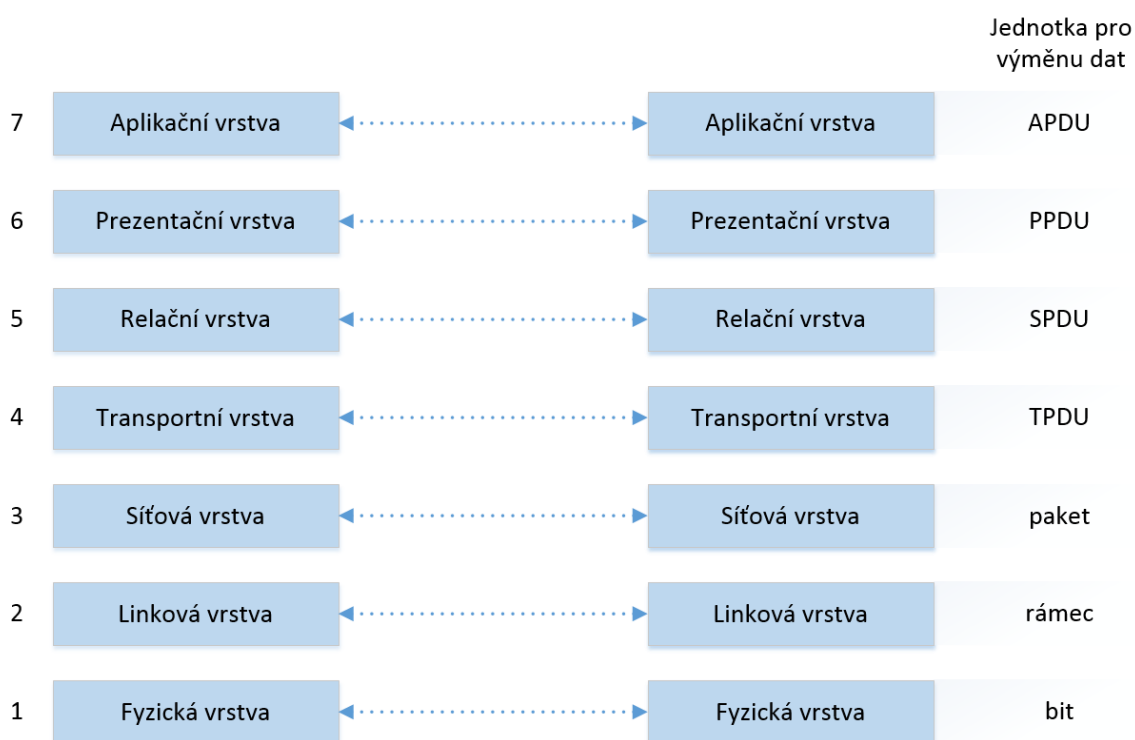
IO	ST7570	ST7580	IT700	MAX2992
Modulace	S-FSK	BFSK, BPSK, QPSK, 8PSK	DCSK	DB/Q/8PSK
Rychlost	až 2 400 b/s	až 28 000 b/s	625 - 7500 b/s	až 300 000 b/s
Nosná	až 148,5kHz	až 250 kHz	9 – 400 kHz	10 – 490 kHz
Rozhraní	UART	UART, SPI, I2C	UART, SPI, I2C	UART SPIK
Pouzdro	VFQFPN48	QFN-48	QFN56	64 LQPF

tab. 1-3 Novější úzkopásmové modemy

2 PŘEHLED STANDARDŮ

2.1 Referenční model ISO/OSI

Tento model sítě byl vypracován organizací ISO (International Organization for Standardization) za účelem standardizace počítačových sítí nazvané OSI (Open System Interconnection) a v roce 1984 byl přijat jako mezinárodní norma ISO 7498. Kompletní znění normy přijala také CCITT (Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique). Referenční model ISO/OSI je dnes názorným příkladem řešení jakékoliv komunikace v sítích, a to díky přehlednému seskupení jednotlivých funkčních vrstev, které na sobě nejsou závislé a jsou nahraditelné [9].



obr. 2-1 Referenční model ISO/OSI

Každá ze sedmi vrstev vykonává skupinu definovaných funkcí potřebných pro komunikaci. Pro svou činnost využívá služeb své sousední nižší vrstvy a své služby pak dále poskytuje sousední vrstvě vyšší.

Podle referenčního modelu sice není dovoleno vynechávat vrstvy, ale je možné některé vrstvy deaktivovat. Taková vrstva se nazývá transparentní nebo nulová. Každý z moderních standardů pro PLC spadá do referenčního modelu ISO/OSI a každý definuje parametry těchto vrstev.

Vrstva DLL zajišťuje v podvrstvě MAC fyzické adresování, řízení přístupu k médiu. Tato podvrstva je závislá na daném HW a k adresaci používá tzv. MAC adresy. Fyzická vrstva specifikuje bitový přenos z jednoho zařízení na druhé, prostřednictvím fyzického média. Síťová vrstva řeší směrování přenášených rámců přes více mezilehlých uzlů. Transportní vrstva poskytuje vyšší vrstvě služby, zajišťující přenos paketů mezi libovolnými dvěma uzly, podobně

jako vrstva síťová. Relační vrstva navazuje, udržuje a ruší relace mezi koncovými účastníky. Tato vrstva zabezpečuje řízení komunikace, která je vytvořena na výzvu transportní vrstvy (např. určení kdo kdy vysílá, pokud to nemůžou dělat účastníci současně). V prezentační vrstvě se přenáší data, které mohou mít povahu obecnějších datových struktur – čísla, text. Vzhledem k tomu, že vnitřní počítače mohou používat odlišnou strukturu, je nutné tento kód konvertovat, což zajišťuje právě tato vrstva (v prezentační vrstvě je možné také realizovat kompresy přenášených dat, a také jejich šifrování). Poslední, aplikační vrstva obsahuje části síťových aplikací, které realizují obecně použitelné mechanismy (kvůli velkému počtu různých aplikací). Mezi tyto síťové aplikace patří například e-mailový systém, přenos souborů nebo vzdálené přihlašování k účastníkovi.

Data zpracované nižšími vrstvami obsahují specifika použité komunikační sítě, přenosovou technologii a všechny nedostatky podsítě, které snižují kvalitu přenášených dat a tím zvyšují chybovost přenosu dat. Při odesílání dat transportní vrstva zajišťuje sestavování jednotlivých paketů, do kterých rozděluje přenášená data, a při přijetí data zase vyjímá z paketů a skládá do původního sestavení. Mimo jiné může transportní vrstva jako poslední, měnit nespojovaný charakter (connectionless) poskytované přenosové služby na spojovaný (connection-oriented) a naopak [10]. Tuto možnost má také síťová vrstva, ze které vychází vrstva transportní, tedy obě mají do určité míry stejnou podstatu a charakter. Transportní vrstva, která poskytuje vyšší kvalitu přenosových služeb vyšším vrstvám, dostává data od vrstvy síťové, síťová od linkové atd. Jelikož transportní vrstva nedokáže dostatečně zvýšit kvalitu přenosových služeb a předat je relační, a vyšším vrstvám v dostatečné kvalitě, není možné dosáhnout nízko-chybový přenos při vyšších rychlostech v dané síti. Algoritmy, které opravují chybné pakety, se pak vykonávají poměrně často.

2.2 Standard PRIME

Standard PRIME (PowerLine Intelligent metering Evolution) byl vytvořen společností Iberdola. Jedná se o otevřený standard, který je nyní vyvíjen PRIME ALIANCE.

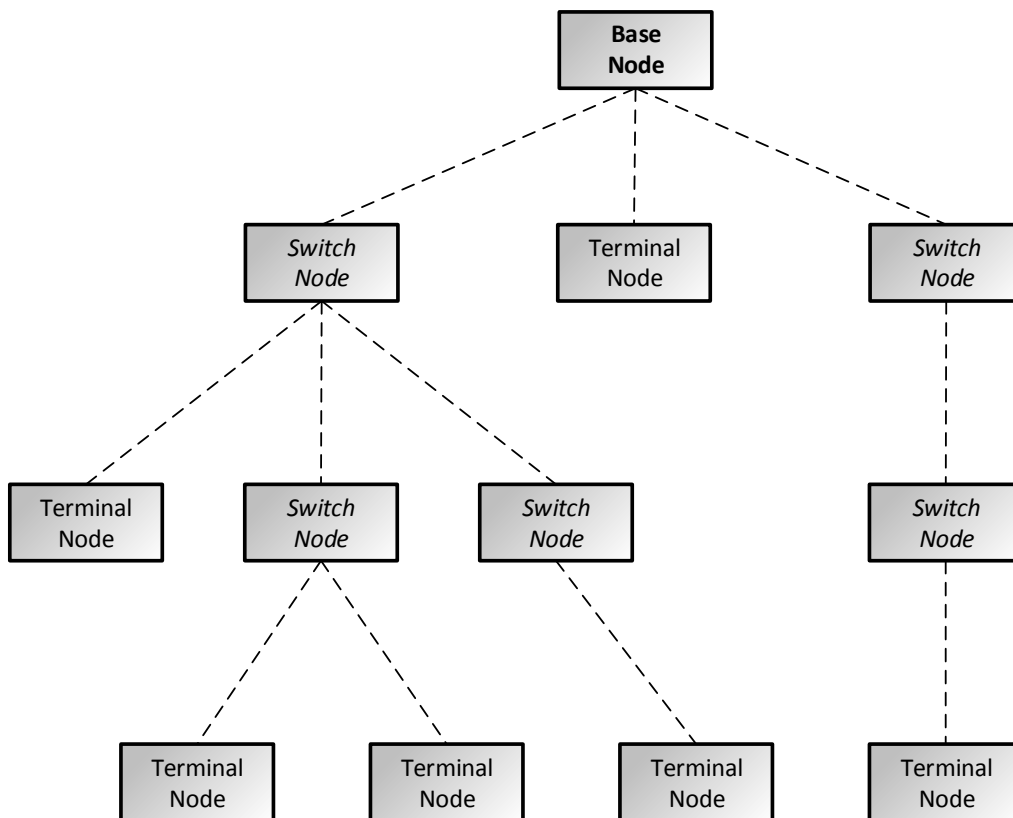
2.2.1 Základní vlastnosti

Standard PRIME [5] definuje spodní vrstvu úzkopásmové datové přenosové soustavy. Referenční model je založen na IEEE Std. 802.16.

Vrstva CS (Convergence Sublayer) klasifikuje přenášená data a přiřazuje je příslušnému spojení na vrstvě MAC. Tato vrstva provádí mapování přenášených dat do SDU vrstvy MAC. To může také zahrnovat kompresi hlaviček přenášených dat. Existuje několik vrstev CS pro používané protokoly.

Vrstva MAC poskytuje základní funkčnost systému přístupu ke sdílenému médiu, přidělování šířky pásma, řízení spojení a zjišťování topologie. Architektura systému byla definována pro spojení typu Master-Slave a optimalizována pro síť nízkého napětí. Obecně tato vrstva zajišťuje přístup k médiu.

Fyzická vrstva (PHY) přenáší MPDU mezi sousedními uzly pomocí OFDM v pásmu CENELEC A a dosahuje hrubé rychlosti až 130 kb/s (bez kódování).



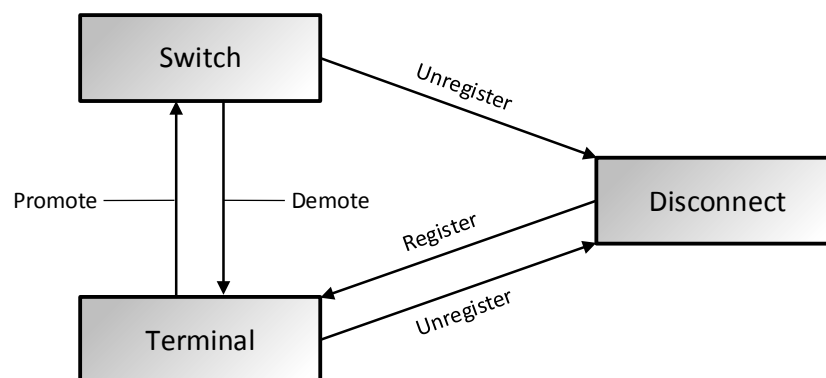
obr. 2-2 Příklad topologie PRIME

2.2.2 Architektura PRIME

PRIME se skládá z podsítí, kde každá je definovaná v rámci jedné trafostanice. Podsít je strom s dvěma typy uzlů, báze uzlu a služeb uzlu – základním (Base Node) a servisním (Service Node). Příklad sítě je na obr. 2-2 a je popsána níže.

Základní uzel

Základní uzel je na nejvyšší úrovni stromu a působí jako hlavní uzel, který poskytuje připojení k podsíti. Spravuje zdroje podsítě a spojení. Vždy existuje pouze jeden základní uzel v podsíti. Tento uzel je zpočátku podsítí sama a ostatní (servisní) uzly se musí do této podsítě registrovat.



obr. 2-3 Možné stavy uzlu

Servisní uzly

Jakýkoliv další uzel podsítě je servisní uzel. Servisní uzly mohou být okrajové nebo vnitřní ve stromu. Tyto uzly se inicializují v odpojeném stavu a do sítě se musí registrovat. Každý z těchto uzlů se stává jedním bodem polygonální sítě. Uzly mají dva úkoly: připojení k podsíti (vlastní komunikace) a předávání dat sousedním prvkům.

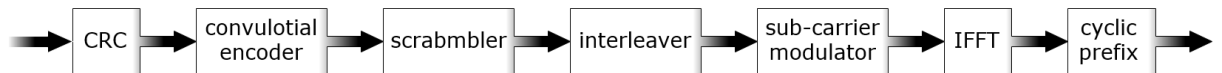
Servisní uzly mění dynamicky svoji funkci z „Terminal“ na „Switch“ a naopak, *obr. 2-3*. Změna funkčních stavů nastává na základě určitých předem definovaných událostí v síti.

Jsou tři možné režimy:

- **Disconnected** – v tomto stavu uzel není schopen žádné komunikace nebo přepínání provozu jiného uzlu. Primární funkce servisního uzlu v tomto stavu je hledat síť v jeho blízkosti, a pokusit se do ní zaregistrovat.
- **Terminal** – v tomto stavu je uzel schopen komunikovat, ale není schopen přepínání provozu jiného uzlu.
- **Switch** – tento stav umožňuje uzlu vykonávat všechny funkce stavu „Terminal“ a také předávat data sousedním uzlům (výhoda standardu PRIME).

2.2.3 Vrstva PHY

Na *obr. 2-4* je blokové schéma vysílače. Konvoluční kódér a prokládač se použijí pouze v režimu FEC. Odesílaný SDU je doplněn o CRC, je kódován, skramblován a pomocí DBPSK, DQPSK nebo D8PSK modulován na nosné kmitočty. Poslední krok je IFFT (inverzní rychlá Fourierova transformace), která převede signál do časové oblasti. Pak následuje „cyclic prefix“ (cyklická předpona).



obr. 2-4 Blokové schéma vysílače

Cyklický prefix se používá namísto Guard Interval (ochranný interval), který potlačuje ISI (Inter Symbol Interference) tzv. mezisymbolové interference, což je ovlivňování aktuálního symbolu předchozími zpožděnými signály. Cyklický prefix se vkládá mezi sousední symboly o délce T_{CP} . Délka předpony se volí dle parametrů přenosového kanálu. Tady platí, že čím je delší CP, tím je přenos odolnější vůči vícecestnému šíření, a naopak čím je menší, tím menší část OFDM symbolu je možno použít pro přenos užitečného signálu [12].

CRC (Cyklický redundantní součet) [13] je speciální hash funkce, která slouží k detekci chyb během přenosu nebo ukládání dat. Jedná se o základní a nejrozšířenější matematickou funkci, která slouží ke kontrole dat. Kontrolní součet se ukládá společně s přenášenými daty. Pokud je nezávisle spočítaný CRC odlišný od přeneseného nebo uloženého, je zřejmé že při přenosu došlo k chybě. V určitých případech je možné CRC chybu opravit.

Hlavní výhodou OFDM oproti systémům s jednou nosnou je jeho schopnost vyrovnat se s nepříznivými vlastnostmi kanálu bez složitých dodatečných mechanismů (ekvalizér apod.). Navíc, jak je popsáno výše, tak i přenosová rychlost omezuje vliv ISI, které na silových vedeních nastávají z důsledku odrazů.

Z důvodu splnění EMC limitů je maximální napětí na výstupu vysílače $1 V_{RMS}$ za definovatelných podmínek zátěže a také koexistenci se službou využívající přesnost s jednou či dvěma nosnými.

FEC (Forward Error Correction)

Dopředné kódování [4] je metoda zjišťování a opravy chyb vzniklých při přenosu, která nevyžaduje potvrzování správnosti přenosu ARQ (Automatic Request Repetition). Použitím nerekurzivního konvolučního kodéru v kombinaci s prokládáním, se vkládají redundantní (ochranné) bity k datovým bitům, které v dekodéru přijímače umožňují detekovat i korigovat chybně přenesené osamocené byty. Vyšší vrstvy mohou povolit použití FEC podle momentální situace. Použití FEC tedy snižuje rychlost přenosu.

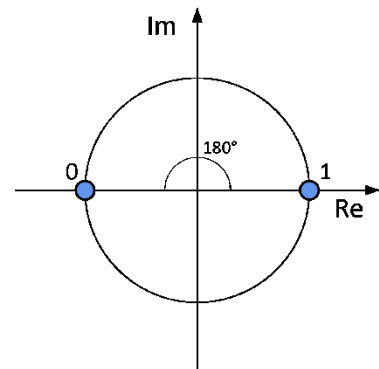
Využívané typy klíčování

- **DPSK – diferenciální klíčování fázovým posunem**

Modulace, které si budeme níže popisovat patří do skupiny diferenciálního klíčování fázovým posunem. DPSK je rozšířená metoda fázové modulace (PSK), u které se data kódují změnou fáze referenčního signálu (nosné vlny). Signál s jinou fází pak reprezentuje určitou hodnotu jednoho či několika bitů. Každý bitový vzor takto tvoří symbol, který je definován určitým fázovým posunem. Demodulátor určuje fázi přijímaného signálu a mapuje ji zpět na původní symbol. Jestliže demodulátor porovnává fázi přijímaného signálu s referenčním signálem, jedná se o koherentní fázové klíčování tzv. CPSK, což je jakýmsi ideálním modelem, ale v praxi se používá DPSK, při níž je informace uložena ve změně fáze sousedních symbolů. PSK/DPSK se hlavně využívá pro nižší rychlosti (také u komunikace přes Bluetooth, Wi-Fi a RFID).

- **DBPSK – diferenciální binární klíčování fázovým posunem**

Jedná se o nejjednodušší formu klíčování fázovým posunem. Využívá dvou stavů (fází), které se liší o 180° . Není důležité, kde přesně se nacházejí konstelační body, důležité je aby jejich rozdíl byl 180° . Na obrázku jsou znázorněny na reálné ose z úhlu 0° a 180° . Binární 1 je použita jako změna fáze o 180° (π). DBPSK je nejrobustnější ze všech PSK. Takto je popsána i modulace ROBO použitá u G3-PLC. Nejmenší robustnost tedy znamená vysokou ztrátovost při vyšších rychlostech v prostředí s vyšším rušením.



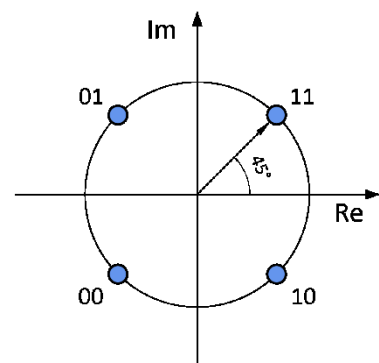
obr. 2-5 Konstelační diagram DBPSK

Možné varianty:

- **DBPSK+1/4 REP**
- **DBPSK+1/8 REP**

- **DQPSK – diferenciální kvadrurní fázové klíčování**

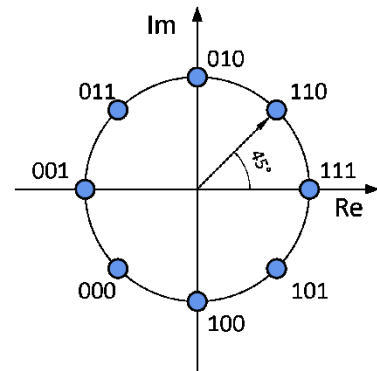
Rychlejší modulace na rozdíl od DBPSK je kvadrurní fázové klíčování. Někdy nazývaná jako kvadrurní modulace. Konstelační body jsou v tomto případě čtyři a jsou rovnoměrně rozmístěny po jednotkové kružnici o 90° ($\pi/2$). Z toho vyplývá, že modulace je čtyřstavová. Jedna z kombinací dvou bitů (00,01,10,11) je přiřazena ke čtyřem stavům nosné. Dvojice bitů je nazývaná dibit. Takto modulace dosahuje větších rychlostí.



obr. 2-6 Konstelační diagram DQPSK

- **D8PSK – diferenciální 8-stavové fázové klíčování**

Je dokonalejší verze DQPSK, která používá osm stavů a je o polovinu propustnější, protože přenáší tři bity na jeden stav. Informace je také uložena ve změně fáze sousedních symbolů. Nejhlavnější výhodou D8PSK je vyšší přenosová rychlost vůči modulacím s méně stavy.



obr. 2-7 Konstelační diagram D8PSK

- **OFDM – ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením**

Jedná se o modulační metodu používanou převážně u širokopásmových modemů. Základním rozdílem OFDM oproti jiným modulacím s více nosnými kmitočty je ortogonalita jednotlivých nosných, z níž plyne vyšší spektrální účinnost modulací OFDM. Tato metoda je mnohem náročnější, ale je velice odolná vůči rušení, díky rozdělení datového toku do několika paralelních větví tak, aby se sousední nosné navzájem neovlivňovali (interference). Každá paralelní větev je modulována na jiný nosný kmitočet.

Základní vlastnosti PRIME OFDM:

- rozestup nosných kmitočtů je 488,28125 Hz.
- z dostupné šířky pásma – 97 subnosných, z nichž je 96 pro data
- interval IFFT je 2,048 ms a cyklický prefix je 192 μ s.

2.2.4 Vrstva MAC

Vrstva MAC zajišťuje adresování a řízení přístupu ke sdílenému médiu pomocí identifikátoru MAC adresa.

Adresování

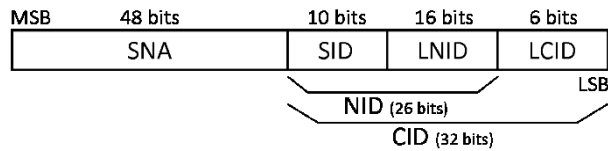
Každé spojení v síti může být jednoznačně identifikováno. Uzly používají adresy typu EUI-48, které přiděluje výrobce. Tyto adresy slouží k identifikaci uzlu v průběhu procesu registrace do sítě.

Základní uzel podsítě použije jeho EUI-48 jako adresu podsítě (Subnetwork Address – SNA). Následně základní uzel přiřadí SID (Switch IDentifier) pro každý přepínací uzel během procesu změny stavu. SID je jedinečný identifikátor o délce 10 bitů pro každý přepínač uvnitř podsítě. Přepínací uzel je obecně označen dvojicí SNA a SID. SID = 0, je vyhrazen pro základní uzel.

Každý přepínač má pravomoc přidělit ID každému uzlu, který se před něj registruje. Přepínač přiřadí „Local Node Identifier“ (LNID) o délce 16 bitů jednotlivým koncovým uzlům při registraci. LNID = 0, je vyhrazen pro přepínač. LNID jednoznačně identifikuje uzel v rámci uzlů, které obsluhuje přepínač. Proto je možné uzel jednoznačně identifikovat dvojicí SID a LNID, která se nazývá Node Identifier (NID).

Během navazování spojení je přiřazen místní identifikátor spojení (LCID). Toto pole, které je 6 bitů dlouhé, identifikuje specifické připojení v uzlu. Kombinace NID a LCID se nazývá Connection Identifier (CID). CID jednoznačně identifikuje spojení v podsíti.

Uzel (nebo spojení) může být univerzálně identifikován dvojicí SNA a NID (nebo CID). Struktura adresy je znázorněna na obrázku níže [5].

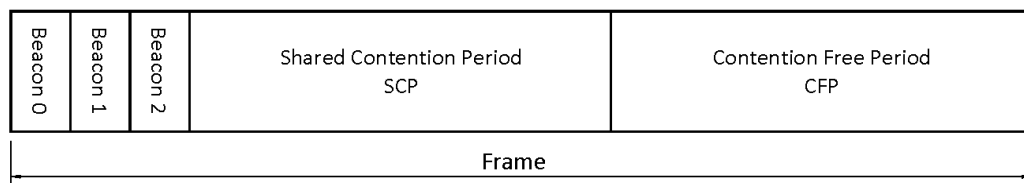


obr. 2-8 Struktura adresy v PRIME [5]

Každý servisní uzel má úroveň v topologii. Uzly, které jsou připojeny přímo k základnímu uzlu, mají úroveň 0. Úroveň jakéhokoli servisního uzlu, který není přímo připojen k základnímu uzlu, je úroveň jeho přepínače plus jedna.

Přístup ke sdílenému médiu

PRIME využívá kombinaci metod CSMA/CA a TDM. Čas je rozdělen do rámců, které se skládají ze soutěžního a nesoutěžního úseku.



obr. 2-9 Stavba rámce v PRIME

Rámec na *obr. 2-9* se skládá z jednoho nebo více značkovacího paketu (beacon), soutěžní periody (SCP) a nesoutěžní periody (CFP). Pokud se využívá nesoutěžní perioda, tak je její délka uvedena v značkovacím paketu.

V periodě CFP musí servisní uzel žádat základní uzel o přidělení části periody. V SCP žádat nemusí, ale je nutné respektovat hranice rámce.

Přepínání

Přepínací uzly nemusí být přímo připojeny k základnímu uzlu, ale mohou být připojeny k dalšímu přepínači. Hloubka takové kaskády není ve standardu omezena.

Přepínací uzly neprovádějí žádné řízení sítě s výjimkou vysílání značkovacího paketu. Všechny řídicí funkce jsou centralizovány v základním uzlu.

2.2.5 Konvergenční vrstva

Poslední verze protokolu specifikací PRIME (v1.3.6) [5] definuje tři aplikační protokoly:

- **IEC 61224-4-4-32 LLC** poskytuje oproti IEC 61334-4-32 ještě některé další služby, které pomáhají mapovat nespojovaný protokol na spojované služby PRIME MAC. V tomto režimu může servisní uzel komunikovat pouze základním uzlem.
- **IPv4 a IPv6** poskytuje metodu přenosu paketů IPv4 (IPv6) v síti PRIME. Servisní uzel může předat IP paket buď základnímu uzlu, nebo jinému servisnímu uzlu. Základní uzel pracuje jako směrovač mezi podsítí PRIME a páteřní sítí. Volitelně mohou být komprimovány hlavičky.
 - **CL IPv4 (IPv6)** má spojovaný charakter. Jakmile se provede zjištění adres, tak je otevřen permanentní kanál mezi komunikujícími uzly. Tento kanál musí být explicitně zrušen, nebo bude po nastaveném času pro neaktivitu uzavřen.
- **NULL SSCS** poskytuje vrstvu MAC vyšším vrstvám přímo (transparentně). Slouží pro přímé využívání sítě PRIME aplikacemi, které nevyžadují žádné speciální schopnosti konvergence.

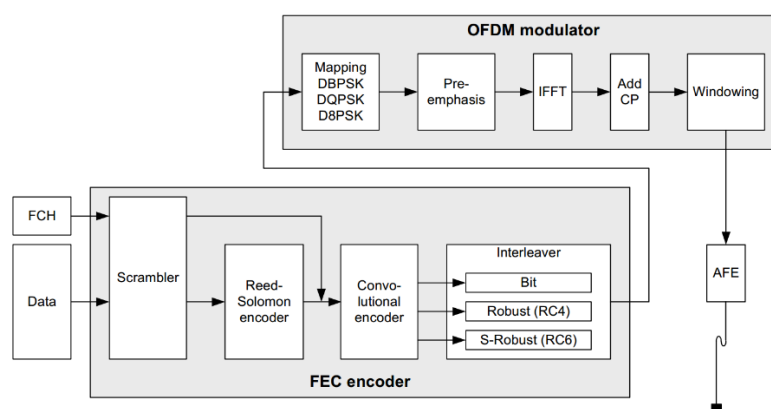
2.3 Standard G3-PLC

G3-PLC [6] byl oficiálně uveden v srpnu 2009. Může být nakonfigurován pro provoz v mezinárodně uznávaných pásmech od 10 kHz do 490 kHz. Jsou to FCC (Amerika), CENELEC (Evropa), ARIB (Japonsko). Maximální přenosová rychlost dat je cca 300 kb/s na fyzické vrstvě při modulacích DBPSK, DQPSK, D8PSK a za použití samoopravného Reed-Solomonova kódu, což je jeden z typů dopředného ochranného kódování (FEC).

2.3.1 Vrstva PHY

Pokud G3-PLC [6] využívá frekvenčního pásma CENELEC-A, tak jako ostatní protokoly, využívá pouze část spektra mezi 35,9 kHz až 90,6 kHz. K dispozici je také možnost navýšení horní frekvence na 180 kHz.

Modulační schéma používá OFDM s DBPSK a DQPSK podporuje rychlost 34,1 kb/s v normálním režimu provozu v pásmu CENELEC. Používá 36 subnosných kmitočtů s rozestupem frekvencí 1,56 kHz (délka IFFT je 256).



obr. 2-10 Struktura OFDM systému standardu G3-PLC [6]

Blokové schéma uvedeno na *obr. 2-10*. K dispozici jsou tři režimy práce vrstvy PHY: normální módy DBPSK, DQPSK a robustní mód. V normálních režimech je použito dopředné zabezpečení pomocí Reed-Solomonova kódu a konvolučního kodéru. V módu ROBUST je FEC sestaveno stejně jako v normálním režimu, za kterým následuje blok opakování. Tento blok zavádí 3 redundantní bity na každý přenášený bit. Existuje také super robustní režim, který se používá pro přenos hlaviček (Frame Control Header – FCH). Používá konvoluční kód v kombinaci s RS kódem, který zavádí pět redundantních bitů na každý datový bit.

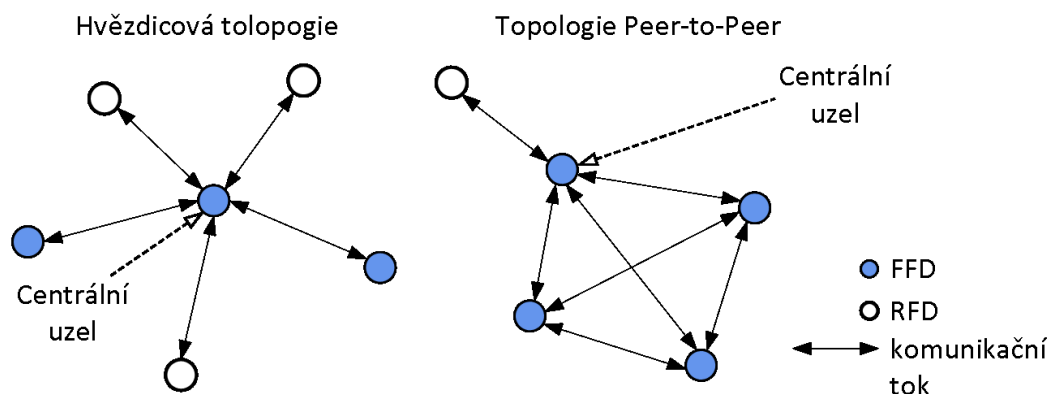
Vrstva PHY podporuje dva typy rámců, a to datové a ACK (Acknowledgement). Rámec začíná preambulí pro synchronizaci a pak následuje záhlaví (FCH), které nese informaci k dekódování další části rámce, například jeho typ, délku, tón mapy kmitočtů, které představuje úroveň vysílaných nosných. FCH je zabezpečena 5-ti bitovým CRC. Vlastní rámec může přenášet až 252 symbolů [6].

PHY vrstva také implementuje funkce, jako je fragmentace, sledování SNR a odhad vlastností kanálů. Modulace, které využívá standard G3-PLC jsou obdobné jako typy modulací popsaných v kapitole 2.2.3, bez možností dílčích modulací které nejsou potřeba, ale je doplněn o robustní režim ROBO.

2.3.2 Vrstva MAC

Typy zařízení:

- **Full-Function Device (FFD)** – Existují tři režimy FFD: koordinátor sítě PAN (Personal Area Network), koordinátor nebo jednoduché zařízení. FFD může komunikovat s ostatními FFD, a implementuje všechny funkce vrstvy MAC G3 a protokolu IEEE 802.15.4.
- **Reduced-Function Device (RFD)** – Toto zařízení implementuje redukovanou sadu funkcí vrstvy MAC. RFD zařízení mají omezené zdroje jako paměť a výpočetní kapacitu, a proto nemohou být koordinátorem. Kromě toho RFD nemůže komunikovat ani s dalšími RFD, ale pouze s FFD.



obr. 2-11 Možné topologie G3-PLC

Typy topologií u G3-PLC:

- **Hvězdicová topologie:** Skládá se z centrálního uzlu (koordinátora) obklopeného jinými uzly. Ostatní uzly mohou komunikovat pouze s koordinátorem, tudíž dva uzly si vyměňují zprávy pouze pomocí směrování paketů prostřednictvím koordinátora. Tato topologie má některé nevýhody: neexistuje žádná alternativní trasa v případě špatného komunikačního kanálu a koordinátor může být přetížen.
- **Topologie Peer-to-Peer:** Také v této struktuře existuje koordinátor, ale každý uzel může komunikovat s ostatními uzly ve svém dosažitelném okolí bez pomoci koordinátora. Systém umožňuje komunikaci přes prostředníka, který umožňuje dosáhnout na všechny uzly sítě, tj. mohou existovat alternativní cesty, které zvyšují redundanci. V tomto režimu se síť sama organizuje a obnovuje v případě poruchy.

Každý uzel udržuje tabulku svých sousedů, kterou aktualizuje při příjmu rámce.

2.4 Standard ITU G.hnem

Norma G.hnem se skládá ze sady doporučení [14] a to:

- **ITU-T G.9901** – určuje spektrální parametry, které definují spektrální obsah; požadavky spektrální hustoty výkonu (PSD); masku, nástroje na podporu snížení PSD; prostředky pro měření PSD
- **ITU-T G.9902** – specifikuje doplnění PHY vrstvy a DLL vrstvy
- **ITU-T G.9903** – popisuje implementaci standardu G3-PLC
- **ITU-T G.9904** – popisuje implementaci standardu PRIME

(G.hnem je pracovní název standardu před schválením, nicméně se v praxi aktuálně používá označení dvojice finálních standardů).

G.hnem je založen na uznání existujících standardů G3-PLC a PRIME a zavádí rozšíření fyzické vrstvy, které umožňují přenos o rychlosti až 1 Mbs, který je spíše specifický už pro širokopásmové přenosy.

Linková vrstva DLL (Data Link Layer) vytváří MPDU z rámců vyšších vrstev, které mohou být např. IPv6 nebo komprimovaná verze IPv6 APDU, 6LoW-PAN. G.hnem podporuje také Quality of Service (QoS) tím, že klasifikuje rámce do 4 různých priorit. Pro šifrování přenášených dat je možné volitelně použít metodu AES [7].

Atypickou vlastností standardu G.hnem je možnost měnit nastavení řady parametrů a tím přizpůsobit modem konkrétním podmínkám.

2.4.1 Vrstva PHY

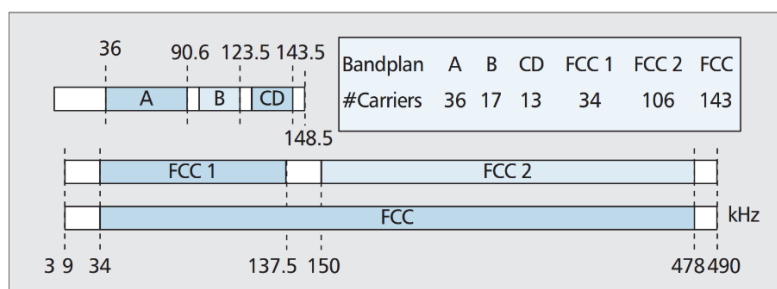
G.hnem využívá techniku OFDM s možností programově měnit základní parametry:

- rychlost až 1 Mb/s na PHY
- počet nosných: 128, 256
- Rozestup nosných 1,5625 kHz, 3,125 kHz
- na rozdíl od PRIME a G3 neuvžívá diferenciálních PSK modulací (DPSK), ale užívá modulace typu QAM

- ochranný interval: 0 pro záhlaví rámce, 30 μ s, 60 μ s a 120 μ s pro data
- velikost okna: 8, 16 vzorků

Vybrané hodnoty rozestupu nosných zjednoduší implementaci dodatků G.hnem, pro standardy G3 a PRIME, a harmonizují G.hnem s IEE P19001.2 (rozestupy nosných všech těchto systémů mají společného dělitele). Dopředná korekce a prokládání je obdobné jako u G3-PLC.

Vybrané délky ochranných intervalů pokrývají očekávaná zpoždění šíření pro všechny scénáře nasazení G.hnem a zbytková hodnota ISI bude mít menší vliv než šum na vedení. Vzhledem k tomu, že záhlaví rámce by mělo být detekovatelné i při záporném poměru signál-šum, byla zvolená délka ochranného intervalu 0, aby se snížila míra obsazení média. Maximální hodnota režie ochranného intervalu u datové části rámce je 18,75 procent.



obr. 2-12 Plán využívání frekvenčních pásem [35]

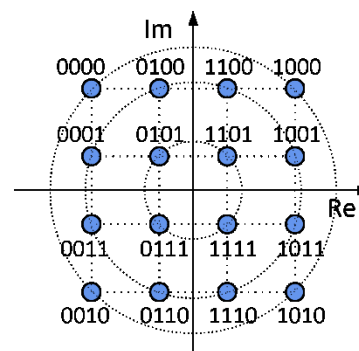
G.hnem definuje několik módů využívání kmitočtového pásma. Každý kmitočtový plán je sada nosných s po sobě jdoucími indexy. obr. 2-12 ukazuje platné možnosti. Pro pásmo CENELEC (A, B a CD) je rozestup nosných 1,5625 kHz. Pro pásma FCC je rozestup 3,125 kHz.

Pro přizpůsobení se proměnlivým podmínkám v kanále používá G.hnem mapování kmitočtů. Mapa určuje přizpůsobení se proměnlivým podmínkám v kanále. Mapa určuje počet bitů na symbol pro každou nosnou a je přenášena v záhlaví rámce. Hodnoty mapy závisí na konkrétním odstupu signál-šum. V současné době standard zahrnuje jen tzv. plochou mapu, kdy je počet bitů stejný pro všechny nosné. Použití jiného typu map je v současnosti zkoumáno.

Maskování tónů (tzn. nepoužívání vybraných frekvencí) umožňuje nastavení lokálních požadavků na EMC.

Způsoby modulace u G.hnem

Standard G.hnem nepoužívá modulační techniku diferenciálního fázového klíčování jako standardy PRIME a G3-PLC. Používá kvadraturní amplitudovou modulaci QAM, což je složená modulace, která k vytvoření symbolu využívá kombinaci amplitudového a fázového klíčování. Každý stav je reprezentován určitou hodnotou amplitudy a fáze jak demonstruje konstelační diagram na obr. 2-13. Díky více stavům je možné současně přenášet několik bytů současně.



obr. 2-13 Konstelační diagram 16QAM

Jedná se opět o více stavovou modulaci, která je schopná přenášet bity a symboly. QAM využívá dvojici obvykle sinusových signálů s konstantním kmitočtem a vzájemně posunutých fázově o 90° tzv. kvadraturní nosné nebo kvadraturní komponenty. Obě nosné jsou

vůči sobě nezávisle klíčované nebo modulované (digitální nebo analogový přenos). Výsledný signál má tedy podobu klíčovaného nebo modulovaného jak fázovým posunem (PSK), tak amplitudovým posunem (ASK).

Standard dále umožňuje modulace:

- 2-QAM
- 4-QAM
- 16-QAM

Například v případě 16-QAM může mít každá kvadrurní nosná 4 různé amplitudy, takže pomocí jedné nosné lze rozlišit 2 bity informace, pomocí obou nosných 4 bity. Konstelační diagram má 16 bodů.

Použitím patřičného konstelačního digramu lze dosáhnout libovolně vysoké spektrální efektivity, která je omezena mírou šumu a linearity vedení. Ke snížení nároků na SNR, se opět používá dopředné korekce chyb, FEC použitím Reed-Solomonova kódu.

2.4.2 Topologie sítě

Síť G.hnem je rozdělena do jedné nebo více domén [7]. Doména je logickou skupinou uzlů, tedy domény se mohou fyzicky zcela nebo částečně překrývat. Tyto domény jsou označeny 16-bitovým *DomainID*, který je jedinečný v síti G.hnem. Kromě toho může síť G.hnem obsahovat cizí domény, které tvoří zařízení komunikující jiným protokolem. Cizí domény jsou připojeny pomocí mostů.

Každý uzel je identifikován jedinečným 16-bitovým ID uvnitř domény. V síti G.hnem může být funkčnost uzlu rozšířena tak, aby vykonával žádnou anebo některou z těchto možností:

- **Global Master (GM):** Každá síť má GM, který koordinuje činnost, zdroje, priority a provozní vlastnosti různých domén v síti.
- **Domain Master (DM):** Každá doména musí obsahovat DM, který řídí a koordinuje činnost všech uzlů ve své doméně. Není nutné, aby všechny uzly byly schopné plnit funkci DM. DM může být aktivován jen jeden.
- **Inter-Domain Bridge (IDB):** IDB uzly umožňují komunikaci mezi uzly, které patří k různým doménám uvnitř stejné sítě.
- **Layer 3 Bridge (L3B):** Hlavní funkcí tohoto typu mostu je připojit cizí doménu s doménou G.hnem a koordinovat obě domény, aby se zabránilo vzájemnému rušení. Nicméně, tyto funkce jsou mimo G.hnem působnosti.
- **Relay:** Tyto uzly mají schopnost předávat zprávy jiným uzlům, pokud přímá komunikace mezi uzly není možná.
- **Domain Access Point (DAP):** Tento typ uzlu není povinný. Používá se, pokud doména funguje v centralizovaném komunikačním režimu. DAP dostává rámce od všech uzlů v doméně a předává je odpovídajícímu cílovému uzlu.

2.5 Srovnání standardů PRIME/G3-PLC/IEE P1901.2/G.hnem

Parametrické srovnání fyzické vrstvy pro standardy PRIME, G3, G.hnem a IEEE1901.2

Parametr		PRIME	G3	IEEE P1901.2 (pracovní verze)	G.hnem
Frekvenční pásmo	CEN A	42 – 89 kHz	35,9 – 90,6 kHz	35,9 – 90,6 kHz	35,9 – 90,6 kHz
	FCC	/	159,4 – 478,1 kHz	35,9 – 487,5 kHz	34,4 – 478,1 kHz
Vzorkovací frekvence	CEN A	250 kHz	400 kHz	400 kHz	400 kHz
	FCC	/	1,2 MHz	1,2 MHz	1600 kHz
Délka FFT	CEN A	512	256	256	256
	FCC	/	256	256	512
Cykl. prefix (trvání)	CEN A	48 (192 μ s)	30 (75 μ s)	30 (75 μ s)	20/32 (100/160 μ s)
	FCC	/	30 (25 μ)	30 (25 μ)	40/64 (50/80 μ s)
Velikost okna	CEN A	0	8	8	8
	FCC	/	8	8	16
Trvání CP	CEN A	48 (192 μ s)	22 (55 μ s)	22 (55 μ s)	12/24 (60/120 μ s)
	FCC	/	22 (18,3 μ s)	22 (18,3 μ s)	24/48 (30/60 μ s)
Rozestup nosných	CEN A	488 Hz	1,5625 kHz	1,5625 kHz	1,5625 kHz
	FCC	/	4,6875 kHz	4,6875 kHz	3,125 kHz
Trvání OFDM	CEN A	2240 μ	695 μ s	695 μ s	700/760 μ s
OFDM	FCC	/	231,7 μ s	231,7 μ s	350/380 μ s
Modulace		DPSK M=2,4,8	DPSK M=2,4,8	DPSK (QAM) M=2,4,8,16	QAM M= 2,4,8,16
Užitečná rychlost	CEN A	61,4 (123 _i) kb/s	45 kb/s	52,3 kb/s	101,3 kb/s
rychlost FEC	FCC	/	207,6 kb/s	203,2 / 207,6 kb/s	821,1 kb/s
FEC		Conv (volitelně)	Conv + RS	Conv + RS	Conv + RS

tab. 2-1 Srovnání fyzické vrstvy standardů [8]

¹ vypnuté dopředné zabezpečení

² pro nekoherentní a koherentní modulaci

Popis:

CEN A – pásmo CENELEC A

CP – soutěžní okno (přístup k médiu metodou CSMA/CA)

M – počet bitů na symbol

RS – Reed-Solomonův kód

FCC – pásmo FCC

FEC – dopředné zabezpečení

Conv – konvoluční kód

Nejvyšší užitečné rychlosti dosahuje standard G.hnem, který se jeví jako nejvhodnější na implementaci do modemu. Kvůli nedostupnosti potřebného čipu, ve kterém má být použit tento standard, je zatím nutné využít jeden ze standardů PRIME nebo G3-PLC. Pro standard IEE P1901.2. k dnešku také není k dispozici plně kompatibilní modem a na rozdíl od G.hnem není dokončen ani samotný vývoj standardu. V běžné praxi se tedy používají standardy PRIME a G3. Jejich klíčové odlišnosti jsou přenosová rychlost, způsob modulace, vzorkovací frekvence.

Standard PRIME dosahuje vyšších rychlostí na fyzické vrstvě kvůli větší chybovosti přenášených dat a to i při velkém odstup signál šum. Na místech kde jsou sítě více tlumeny nebo v sítích s větší vzdáleností modemů, je odstup signál od šumu ještě menší což snižuje rychlost přenosu více.

G3-PLC je vzhledem k ostatním standardům pomalejší ale zaručuje kvalitnější přenos v sítích s nižším SNR. Je méně chybový, protože jeho fyzická vrstva je více robustní. Použití G3-PLC je proto nejvhodnější do míst s více rušeným vedením a špatně dostupných infrastruktur, kde je potřeba zejména kvalitního přenosu i za přítomnosti nízkého SNR. Vyšší stabilita komunikace použitím tohoto standardu je způsobena zejména aplikací Reed-Solomonova kódu.

G.hnem díky lepší modulační technice QAM zvyšuje užiteční rychlost až na dvounásobek užitečné rychlosti PRIME s výhodou, že je použitelný i v USA, tedy podporuje normu FCC. Další výhoda oproti ostatním standardům je zpětná kompatibilita s ostatními standardy, a proto je možné tvořit komplexnější sítě s víceúčelovým zaměřením, či už s požadavky implementace na nedostupná místa, nebo s požadavky na SNR, nebo rychlost přenášených dat. To umožňuje realizovat flexibilní platformu, po které je značná poptávka. Kvůli nedostupnosti funkčního modemu ale nebylo možné testovat možnosti G.hnem.

3 POROVNÁNÍ G3 A PRIME POMOCÍ SW DEFINOVANÉHO MODEMU

Pro realizaci standardů v první kampani byla zvolena dvojice vývojových kitů PLC modemu TMDSPLCKIT-V3 od Texas Instruments. Tento modem byl vybrán zejména kvůli dobré podpoře potřebného SW a implementaci obou standardů PRIME a G3-PLC. Tato vývojová sada obsahuje procesorovou desku s MCU F28069 rodiny PICCOLO a analogovým AFE rozhraním – AFE031. Modemy komunikují po síťovém napětí (230 V/50 Hz) za pomoci sériového rozhraní UART nebo SPI. Možnost ladění, flash MCU, monitorování komunikace a konfiguraci zařízení, lze provádět přes rozhraní J-TAG (USB2.0). Modem dále obsahuje pro diagnostiku rozhraní RS-232. V sadě tohoto kitu je k dispozici řada firmware pro měření a testování standardů PRIME a G3, které jsou k dispozici ve formě image souboru. Samozřejmostí je i potřebná dokumentace k jednotlivým HW a SW prvkům. Ne vždy byly tyto dokumentace dostačující. Standardy podporují normy jak CENELEC tak FCC. Pomocí vývojového prostředí Code Composer Studio je možné vytvářet aplikace za použití služeb PHY a MAC. Další software, který tato sada obsahuje je ZERO Configuration GUI (v2.90), za pomoci kterého je možno sledovat statistiky přenosu a nastavovat parametry standardů v grafickém prostředí. Toto rozhraní je podrobně popsáno níže, kde jedné části tohoto prostředí (Intermediate), je věnována samostatná kapitola.

3.1 ZERO Configuration GUI

Prostředí ZERO Configuration GUI slouží k přehledné konfiguraci a vypsání všech dostupných parametrů. Uživatel může jednoduchým způsobem přenášet jak textové zprávy formou dialogového okna, tak přenášet soubory z modemu A do modemu B a naopak. Program umožňuje dva režimy použití. Zero Configuration Mode – jednodušší, uživatelsky přátelštější, avšak ochuzen o většinu možností konfigurace. Dále Intermediate Mode – obsahuje většinu dostupných parametrů konfigurace, které dovoluje kompilace standardu dostupná v sadě vývojového kitu ve formě image souborů. Poslední režim je režim Expert, který je zatím ve verzi 2.90 uzamčen vydavatelem.

Pozn. 1: Jakákoliv hodnota, která se v průběhu jakékoliv činnosti změní je zobrazena červeně jak v režimu Zero Configuration mode, tak v Intermediate Mode.

Pozn. 2: Veškerá konfigurace v módu Intermediate se po přepnutí do režimu Zero Configuration Mode, projevují u testu fyzické vrstvy. V režimu přenosu souborů a posílání zpráv se nepodařilo zcela určit použité konfigurace.

3.1.1 Zero configuration mode

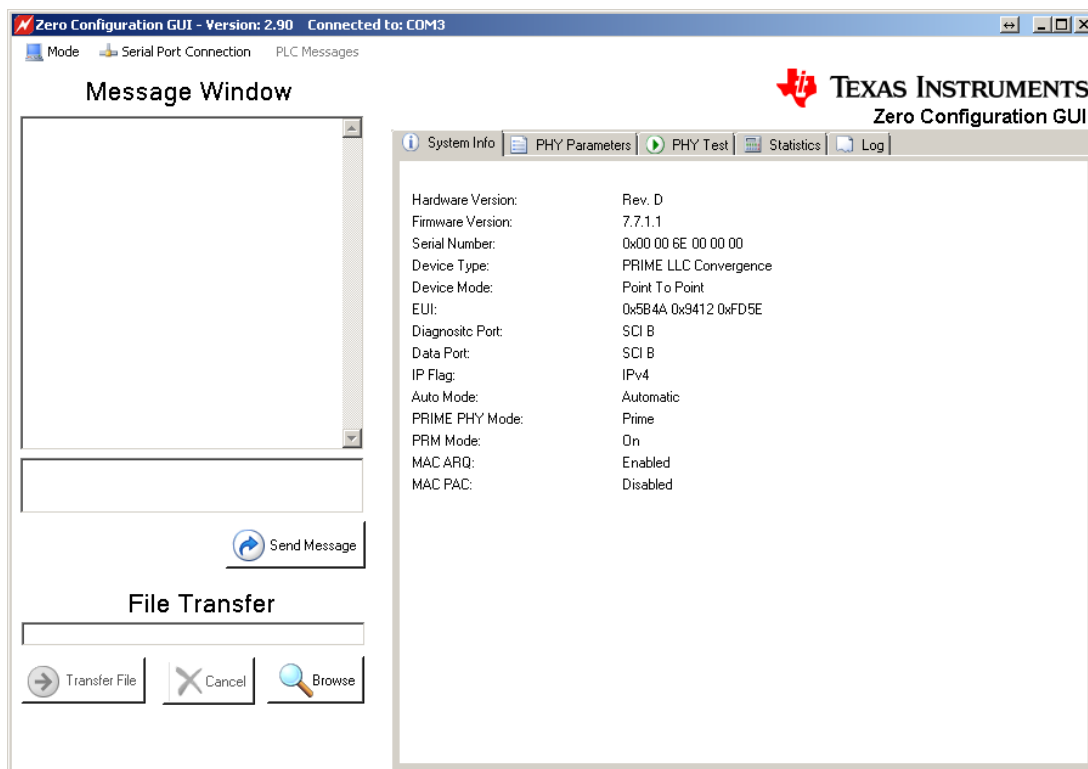
Tento mód umožňuje jen několik věcí a to:

- výpis systémových informací o aktuálním firmwaru, a základní konfiguraci
- zasílání textových zpráv mezi modemy
- přenos jakéhokoli druhu souboru mezi modemy
- spuštění testovacího režimu na fyzické vrstvě
- sledování statistik aktuálního procesu
- zobrazení nastavení TX/RX parametrů na fyzické vrstvě

- volba schématu modulace
- výpis nastavitelného logu do textového souboru

obr. 3-1, demonstruje program v daném režimu při připojeném modemu v konfiguraci PRIME. Zde vidíme několik parametrů, které určují revizi hardwaru a firmwaru, sériové číslo, typ zařízení, typ konfigurace, nastavená MAC adresa typu EUI, a nastavení portů jak pro data, tak pro diagnostiku. V našem případě bude vždy nastaven port pro diagnostiku a data na port SCI B což je port USB.

Nutno podotknout, že pro jakékoliv testování přenosu je nutno připojit počítač ke každému modemu, aby bylo možné modemy konfigurovat samostatně a také monitorovat stav procesu na obou modemech současně.



obr. 3-1 Úvodní obrazovka Zero Configuration GUI

Konfigurační soubor

V konfiguračním souboru aplikace „PLC_Application_Suite.exe.config“ je možné nastavit defaultní konfiguraci o několika základních parametrech: Počet opakování, kdy se GUI pokusí provést inicializaci a konfiguraci PLC v síti; počet bytů, které obsahuje paket při odesílání souborů, počítá se i s hlavičkovými bity; nastavení výchozího SCI portu.

Záložky „PHY Parameter“ a „PHY Test“

Parametry RX a TX, jsou ve druhé záložce. Změna modulačního schématu bude mít vliv na spolehlivost a přenosovou rychlost přenosu po vedení, avšak pouze u přenosu souborů. V záložce PHY Test se uskutečňuje posílání PHY paketů mezi dvěma modemy. Jeden modem je nutno nastavit do režimu odesílání paketů (Transmit Test) a na druhý přijímání (Recieve Test). V režimu Zero Confuguration Mode je nastaveno cyklické odesílání PHY paketů.

Záložky „Statistics“ a „Log“

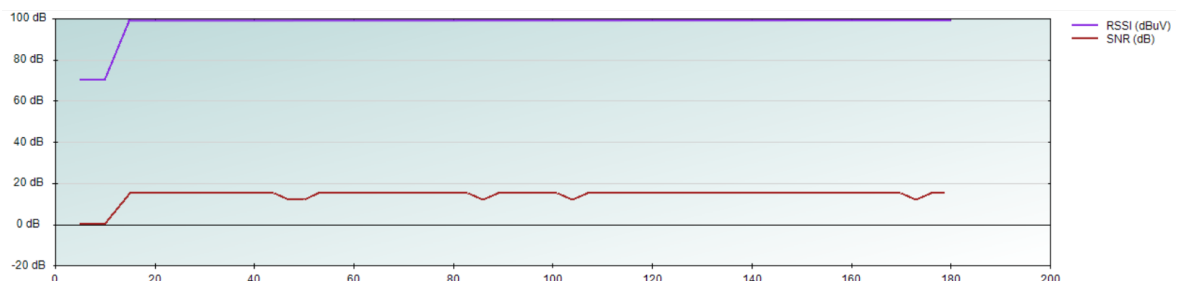
Obsah těchto záložek je podrobně popsán u režimu „Zero Configuration GUI - Intermediate Mode“.

3.2 Zero Configuration GUI - Intermediate Mode

Tento režim obsahuje podstatně větší možnosti konfigurace. Samotný interface obsahuje na levé straně tři bloky tvořené plochami pro grafy. Na pravé části je obsah rozšířen o pokročilejší monitorovací prvky. Dále přibývají možnosti v lištovém menu, ze kterých jsou v této kapitole popsány ty nejdůležitější.

3.2.1 Monitorovací prvky

- **RSSI a SNR** – Blok, který obsahuje plochu pro vykreslení průběhu kvality signálu na vedení, zobrazuje průběh úrovně RSSI [dB μ V] (Received Signal Strength Indication) a SNR [dB] (Signal to Noise Ratio) v čase [s]. Kde RSSI je hodnota síly přijatého signálu který se indikuje z vedení. Tato hodnota je v průběhu přenosu prakticky nehybná. Ovlivňuje ji pouze vliv silnějšího rušení, nebo větší vzdálenosti modemů (řádově stovky až tisíce metrů, dle konfigurace). V tomto rozhraní je ale zobrazení RSSI ve verzi 2.90 omezeno na limitní hodnotu 70 dB μ V vydavatelem. SNR je poměr odstupu signálu od šumu, což určuje kvalitu podmínek pro komunikaci. Čím je tato hodnota nižší, je vedení více rušené a tedy více problematické pro komunikaci. Naopak při větším SNR je možné vykonávat přenosy na vyšších rychlostech. To však platí pouze v případě, že se SNR výrazně nemění v krátkém časovém intervalu. Na základě těchto hodnot získaných měření určujeme, zda modem za použití daného standardu a konfigurace vyhovuje podmínkám, ve kterých se má komunikace uskutečnit. Veličinu SNR modem vyhodnocuje tak, že přijímač obdrží zprávu od vysílače, že nebude nějaký časový interval vysílat data. Přijímač za tuto dobu změří stávající signál, tedy šum. Následně vysílač pošle zprávu, že v dalším časovém intervalu bude vysílat data. Přijímač změří signál obsahující data i šum. Přijímač pomocí těchto změřených hodnot určí podle nastaveného algoritmu celkový odstup signálu od šumu. Následně je tato hodnota vypsána v grafickém rozhraní. Je pravděpodobné, že modem využívá několik metod pro určení SNR a metodu volí dle aktuálních podmínek na vedení, nebo konfigurace pro přenos.



obr. 3-2 Ukázka průběhů RSSI a SNR

- „Log BER“ a „Log PER“ – Tyto dva bloky přímo vykreslují chybovost přenosu.

BER (Bit Rate Error Rate) vyjadřuje poměr chybně přijatých bitů k celkovému počtu přijatých bitů. Její hodnota je udávána v exponenciálním tvaru v čase.



obr. 3-3 Ukázka průběhu BER

PER (Packet Error Rate) vyjadřuje poměr chybně přijatých paketů k celkovému počtu paketů. Parametry BER a PER jasně definují kvalitu přenosu.




obr. 3-4 Ukázka průběhu PER

- **Záložky „Systém Info“ a „Transfer Info“** – „System Info“ zobrazuje stejné parametry jako v režimu Zero Configuration Mode. Karta „Transfer Info“ zobrazuje informace o aktuálním přenosu na pinech TX a RX vysílače a přijímače, a také celkové informace o odeslaných a přijatých datech. Vypisuje hodnoty uvedené níže, obr. 3-5.

System Info		Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
TEXAS INSTRUMENTS Zero Configuration GUI						
Current TX Transfer:						
File:	:					
Packets Sent:	0					
Bytes Sent:	0					
Errors:	0					
Resends:	0					
Duration (seconds):	0					
bps:	0					
Last Error:	:					
Current RX Transfer Totals:						
File:	:					
Packets Received:	0					
Bytes Received:	0					
CRC Errors:	0					
Missing Packets:	0					
Duration (seconds):	0					
bps:	0					
Last Error:	:					
Transfer Totals:						
Packets Sent:	0					
Bytes Sent:	0					
Files Sent:	0					
Messages Sent:	0					
Errors:	0					
Aborts:	0					
Resends:	0					
Durations (seconds):	0					
Average bps:	0					
Receive Totals:						
Packets Received:	0					
Bytes Received:	0					
Files Received:	0					
Messages:	0					
Aborts:	0					
CRC Errors:	0					
Missing Packets:	0					
Duration (seconds):	0					
Average bps:	0					

obr. 3-5 Karta Transfer info

- **Záložky „PHY PIB“ a „MAC PIB“** – karta „PHY PIB“ (PRIME Information Base) popisuje statistiky přímo na fyzické vrstvě a karta „MAC PIB“ popisuje statistiky na vrstvě MAC a vrstvě konvergenční.
- **Záložky „Statistics“ a „Log“** – Karta statistik shrnuje v konečném důsledku kvalitu použitého vedení, vypsané parametry demonstrují parametry kvality přenosu. Jedná se o hodnoty RSSI a SNR (viz *obr. 3-5*) parametry chybovosti přenesených bitů a paketů (kterých hodnoty jsou barevně přiděleny konkrétnímu typu klíčování, které bylo při přenosu aplikováno); dále čas od posledního paketu či zahájení přenosu; počtu detekovaných paketů, chybných hlaviček CRC, pak počtu odeslaných paketů na pin TX a rychlost přenosu (propustnost) „PHY ontime throughput“ a aktuální reálnou přenosovou rychlost „PHY actual data throughput“. Tyto výstupní data jsou klíčové pro zhodnocení konfigurace PLC modemu a samotného přenosu.

 TEXAS INSTRUMENTS Zero Configuration GUI					
System Info	Statistics	Transfer Info	PHY PIB	MAC PIB	Log
Channel Sync Status:					
Time since last packet:					0
Time since switched on:					0
Number of packets detected:					0
Number of Header CRC failures:					0
Number of PHY TX Packets:					0
RSSI:					
RSSI (dBu V):					0
SNR (dB):					0
BER:					
Total Bit Errors:					0:
DBPSK:					0
DQPSK:					0:
D8PSK:					0
DBPSK+FEC:					0
DQPSK+FEC:					0
D8PSK+FEC:					0
DBPSK+1/4 REP:					0
DBPSK+1/8 REP:					0
PER:					
Total Packet Errors:					0
DBPSK:					0
DQPSK:					0
D8PSK:					0
DBPSK+FEC:					0
DQPSK+FEC:					0
D8PSK+FEC:					0
DBPSK+1/4 REP:					0
DBPSK+1/8 REP:					0
Data Rate:					
PHY ontime throughput (bps):					0
PHY actual data throughput (bps):					0

obr. 3-6 Karta statistik

Záložka „Log“ shrnuje informace o přenosu do textového souboru s výpisem všech parametrů přenosu v daném čase. Při delším měření je možno z tohoto logu vytvořit graf, který popisuje průběh kvality signálu v čase, vzhledem k rušivým elementům.

Popis položek menu

Menu „Functions“ nabízí tyto funkce: odesílání a přijímání textu pomocí dialogového okna, přenosu souborů, flash modemu binárními soubory, možnost zobrazení sledování zpráv přenosu (jedná se o dokonalejší log událostí), zasílání adresačních příkazů MAC vrstvě a přepnutí do programu „PLC Logger“, který formátuje generované rozšířenější log zprávy.

Položka nastavení má největší uplatnění v tomto módu. Lze pomocí jejich nabídek konfigurovat modem na fyzické vrstvě a také nastavovat systémové volby modemu pro nastavení módu v jakém se bude modem používat. Závisí tedy na účelu použití modemu. V tomto případě se zabýváme pouze nastavením v módu Point-to-Point. Specifické vlastnosti jednotlivých možností jsou popsány v kapitole *Konfigurace PRIME vybraného PLC modemu TMDSPCKIT-V3*.

3.2.2 Konfigurace PRIME vybraného PLC modemu TMDSPCKIT-V3

Control Set Up

Toto nastavení umožňuje následující doporučení:

- **Aktualizace stavu kanálu** – synchronizuje statistiky parametrů v kartě statistik
- **Aktualizace hlášení o kvalitě** – aktivuje aktuální zobrazování RSSI, SNR, BER a PER
- **Aktualizace statistik MAC** – aktivuje synchronizaci statistik MAC vrstvy
- **Interval aktualizace** – nastavení intervalu značí, po jakém čase se budou aktualizovat všechny statistiky, pokud není na jednotlivých kartách tato možnost nastavená dodatečně. Tuto hodnotu je doporučeno nastavit na 3 s, a to aby se zabránilo nadbytečné komunikaci mezi hostitelským PC a PLC modemem. Toto doporučení je vhodné dodržet v případě, když na hostitelském PC běží také LQM (Link Quality Monitor).

Konfigurace začíná systémovým nastavením modemu *obr. 3-7*.

The screenshot shows a configuration window for a PRIME PLC modem. The window is titled 'Control Set Up' and contains several sections:

- Device Type:** PRIME LLC Convergence
- FW Ver.:** 7.07.01.01
- Hdw Rev.:** Rev. D
- Device Mode:** Point-to-Point (selected in a dropdown menu)
- Automatic Mode:**
- Ports:**
 - Host Port:** SCI-A, SCI-B
 - Diag Port:** SCI-A, SCI-B
- System:**
 - Serial #:** 00:00:6E:00:00:00
 - Serial # Length:** 6
 - EUI:** 5B:4A:94:12:FD:5E
- PHY:**
 - PRM Flag
 - Enable Robo
- MAC:**
 - Default ARQ Enabled
 - Default PAC Enabled

At the bottom of the window are four buttons: OK, Apply, Refresh, and Cancel.

obr. 3-7 Systémová nastavení

3.2.2.1 Systémová nastavení

obr. 3-7 popisuje možnosti režimu PLC modemu, nastavení komunikačních kanálů s PC a vlastnosti specifické pro PRIME. Režim modemů je pro veškerá měření nastaven Point-to-Point. Další možnosti jsou: IEC-432 LLC, AppEMU – MAC, AppEMU – LLC a MAC. Tyto režimy nebudou v této práci popisovány. Dá se zde také konfigurovat hodnota MAC adresy nebo sériové číslo reprezentující modem.

Nastavení na fyzické vrstvě PRM Flag zabezpečí režim, který kontroluje, zda je zařízení v normálním režimu (device mode 0) a pokouší se modem automaticky registrovat do sítě. Tento parametr je přehlížen v režimu PHY Test. ROBO mode je nastavení robustního režimu.

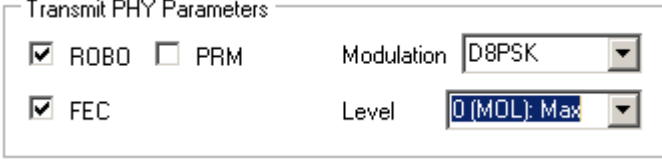
Nastavení na MAC vrstvě

Automatické opakování dotazu – ARQ (Automatic Repeat Request) [15], což je mechanismus pro kontrolu chyb při přenosu dat. Používá potvrzení (zprávy odeslané příjemcem indikují správné přijetí datového rámce nebo paketu) a časové limity (určený časový interval, který může uběhnout před potvrzením obdržených dat), aby bylo dosaženo spolehlivého přenosu dat přes nespolehlivé služby. Pokud odesílatel neobdrží potvrzení před vypršením časového limitu, obvykle odešle datový rámec nebo paket, dokud odesílatel neobdrží potvrzení nebo překročí definovaný počet opakovaných přenosů. Povolení ARQ pomáhá stabilizovat celkovou komunikaci a eliminovat chybovost. Za špatných podmínek může výrazně zpomalit přenos.

Paketová agregace – PAC (Packet Aggregation) neboli proces paketové agregace, zajišťuje spojování více paketů do samostatné přenosové jednotky, aby se snížilo zatížení spojené s každým přenosem. Například spojení více MSDU do jednoho MPDU, která může být doručena PHY vrstvě jako jedna jednotka přenosu [16]. Způsoby paketové agregace jsou efektivně implementovány ve standardu G.hnem.

Nastavení na fyzické vrstvě

Na fyzické vrstvě nastavujeme klíčové parametry ke konfiguraci modemu pro test na fyzické vrstvě. Jedná se o nastavení parametrů modemu do vysílačích a přijímačích režimů.



Transmit PHY Parameters

<input checked="" type="checkbox"/> ROBO	<input type="checkbox"/> PRM	Modulation	D8PSK
<input checked="" type="checkbox"/> FEC		Level	0 (MOL): Max

obr. 3-8 Základní nastavení PHY vrstvy

Nastavení parametrů přenosu fyzické vrstvy

Zde se nastavuje robustní režim (ROBO), dopředné kódování (FEC), robustní řízení vrstvy PHY (PRM), volba modulace (DBPSK, DQPSK, D8PSK, D8PKS+1/4 Rep, DBPSK+1/8 Rep) a hodnota maximální výstupní úrovně (MOL). ROBO a FEC byly v tomto textu už popsány v 2.2.3. Nyní jsou uvedeny nové parametry.

Poznámka: volba modulace a použití FEC jsou nepřístupné po aktivaci režimu PRM nebo Sweep MCS.

- **PRM (PHY Robustness Management)** – pokud je možnost povolena, fyzická vrstva provádí robustní řízení, jak je popsáno v [5]. Výběr modulací je řízen automaticky s použitím FEC. Tyto parametry není možné v tomto režimu měnit, pokud je modem v režimu PHY Test.

Aby bylo možné uskutečnit test fyzické vrstvy, je nutné zabezpečit správnou konfiguraci jednotlivých modemů, a to pomocí režimů vysílače a přijímače.

Nastavení vysílacího režimu (TX parametrů)

Parametry nastavení režimu vysílače, je určeno parametry na obr. 3-9. Hodnota datové jednotky (PPDU), časový odstup od jednotlivých PPDU (Inter-PPDU Time), počet jednotek PPDU (Number od PPDU), typ přenášených dat (Data Pattern) a volba konkrétní hodnoty při nastavení dat statických v HEX, povolení nepřetržitého přenosu nastavených dat (Continuous), při nepřetržitém přenosu dat se dále nastavuje „Sweep MCS“ a „Sweep PPDU Length“.

Parameter	Value
Enable TX Test Mode	<input checked="" type="checkbox"/>
Sweep MCS	<input type="checkbox"/>
Sweep PPDU Len	<input type="checkbox"/>
Continuous	<input type="checkbox"/>
PPDU Payload (bytes)	0
Inter-PPDU Time (10 us)	0
Number of PPDU / setting	0
Data Pattern	Ramp Data
Byte (hex)	0

obr. 3-9 Nastavení vysílače

- **PPDU (Presentation Protocol Data Unit) a jejich odstup** – délka vyslané datové jednotky v bytech. Aktuální verze firmwaru podporuje délku PPDU z 1 bytu na 756 bytů. To určuje maximální povolenou délku pro použité modulační schéma. Tato možnost je nepřístupná po aktivaci „Sweep PPDU Length“. Odstup mezi PPDU (Inter-PPDU Time) se volí v řadách 10 μ s.
- **Data Pattern** – nastavení datových vzorků pro testovací režim ze tří možností:
 - **Ramp Data** – jsou hodnoty od 0 do 255
 - **PRIME Cert data** – co je podstatou těchto dat nebylo zjištěno. Jedná se pravděpodobně o data definované PRIME Alliance
 - **Static** – možnost konkrétního nastavení hodnoty oktetu v HEX
- **Continuous** – nepřetržitě posílání PPDU až do ukončení testování nebo odpojení modemu. Pokud je tato volba aktivní je možné nastavit automatické postupné řízení všech dostupných modulací a automatické řízení délky jednotky PPDU.

Nastavení přijímacího režimu (RX parametrů)

Režim přijímače na obr. 3-10. Nastavení modemu do přijímacího režimu je z hlediska parametrů jednoduché. Jedná se pouze o možnost nastavení automatického řízení zisku (AGC) a nastavení typu dat, které má přijímač očekávat od vysílače (Data Pattern).

The image shows two configuration windows. The top window, titled 'Receive PHY Parameters', contains two checked checkboxes: 'ROBO' and 'AGC'. To the right of 'AGC' is a label 'Gain Value' followed by a dropdown menu showing the value '0'. The bottom window, titled 'Receive PHY Test', contains one checked checkbox: 'Enable RX Test Mode'. To its right is a label 'Data Pattern' followed by a dropdown menu showing 'Ramp Data'. Below this is a label 'Byte (hex)' followed by a text input field containing '0x00'.

obr. 3-10 Nastavení přijímače

- **Řízení zisku (Automatic Gain Control)** – zisk je míra schopnosti zvětšit výkon nebo amplitudu signálu. Definuje ji poměr výkonu nebo amplitudy na výstupu ke vstupu. Udáván je v decibelech a jeho manuálním nastavením je možné volit mezi hodnotami 0-7, kde rozdíl kroků je 6 dB.

Nastavení útlumu a zesílení na TX fyzické vrstvy

Firmware standardu PRIME, defaultně nastavuje hodnotu PGA útlumu na -3 dB a úroveň poměru digitálního zeslabení/zisk na 0 dB. V tomto nastavení bude PLC EVM vyrábět na výstupu 1 V_{RMS} se zátěží 2 Ω .

Načtení a nastavení základních proměnných atributů vrstvy MAC

Zde je možné nastavení proměnných atributů MAC a dále editovat.

The image shows a configuration window for MAC attributes. It features six input fields arranged in two columns. The left column contains: 'Min Switch Search Time' (32), 'Max Promotion PDU' (2), and 'Promotion PDU TX Period' (5). The right column contains: 'SCP Max TX Attempts' (5), 'Ctrl ReTX Timer' (15), and 'Max Ctrl ReTX' (5). Below these fields is a section titled 'Action PIBs' containing five checkboxes: 'MAC Action TX Data' (checked), 'MAC Action Conn Close' (unchecked), 'MAC Action Req Reject' (checked), 'MAC Action Pro Reject' (checked), and 'MAC Action Unregister' (unchecked). At the bottom of the window are four buttons: 'OK', 'Apply', 'Refresh', and 'Cancel'.

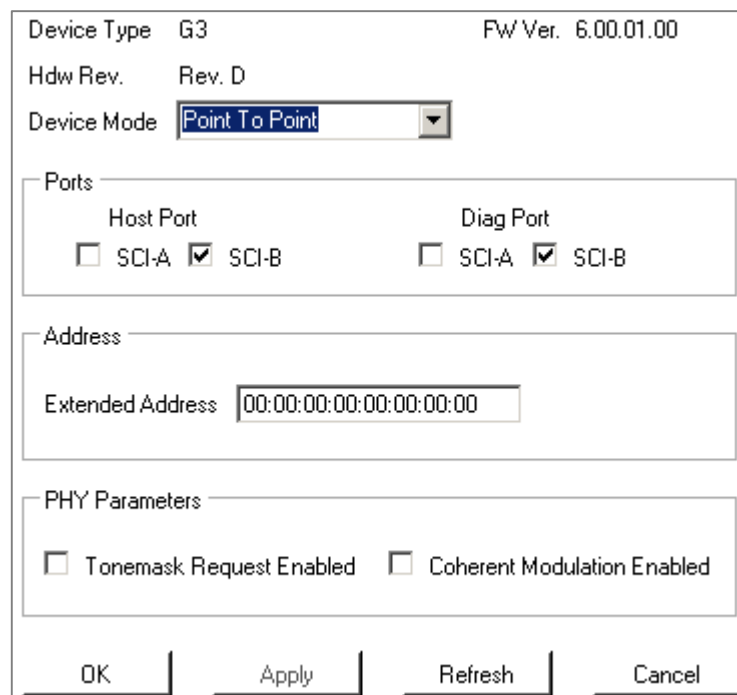
obr. 3-11 Atributy MAC

3.2.3 Konfigurace G3-PLC vybraného PLC modemu TMDSPCKIT-V3

Konfigurace G3 je z velké části stejná jako u PRIME, proto jsou popsány pouze odlišné parametry v rozhraní Zero Configuration GUI.

Konfigurace systémového nastavení

Na fyzické vrstvě se v systémovém nastavení nastavují parametry: žádost o vypuštění nepoužívaných frekvencí (Tonemask Request) a povolení koherentní modulace.



The screenshot displays the configuration window for a G3-PLC modem. At the top, it shows 'Device Type: G3' and 'FW Ver.: 6.00.01.00'. Below this, 'Hdw Rev.' is set to 'Rev. D'. The 'Device Mode' is selected as 'Point To Point' from a dropdown menu. The 'Ports' section contains two columns: 'Host Port' and 'Diag Port'. Under 'Host Port', 'SCI-A' is unchecked and 'SCI-B' is checked. Under 'Diag Port', 'SCI-A' is unchecked and 'SCI-B' is checked. The 'Address' section features an 'Extended Address' field with the value '00:00:00:00:00:00:00:00'. The 'PHY Parameters' section has two checkboxes: 'Tonemask Request Enabled' (unchecked) and 'Coherent Modulation Enabled' (unchecked). At the bottom, there are four buttons: 'OK', 'Apply', 'Refresh', and 'Cancel'.

obr. 3-12 Systémové nastavení

- **Tonemask request** – funkce pro žádost o vypuštění nepoužívaných frekvencí
- **Coherent Modulation** – povolení koherentní modulace CPSK

Nastavení PHY vrstvy

Parametry ke konfiguraci fyzické vrstvy: Modulace ROBO, BPSK, QPSK, D8PSK (pokud je aktivováno „Sweep MCS“ tak je volba neaktivní), povolení maskování (TMR), povolení koherentní modulace, výběr normy pro komunikaci, upřesnění frekvenčního pásma normy.

The image shows a configuration dialog box for the PHY layer, divided into four main sections:

- Transmit PHY Parameters:** Includes dropdown menus for Modulation (ROBO), Level (32), Band (Cenelec), and Mask (Cenelec A 36). It also has checkboxes for TMR and Coherent Modulation.
- PHY Transmit Test:** Contains several test mode options: Enable TX Test Mode, Sweep MCS, Sweep PDU Len, Continuous, and Enable Zero Crossing. Each has associated input fields for PDU Payload (bytes), Inter-PPDU Time (10 us), Number of PDU / setting, Data Pattern (Ramp Data), Tone Map (hex) (0x0000003F), Byte (hex) (0), and Zero Crossing Delay (ms) (0).
- Receive PHY Parameters:** Includes checkboxes for AGC and Coherent Modulation, a Gain Value dropdown (4), and dropdown menus for Band (Cenelec) and Mask (Cenelec A 36).
- Receive PHY Test:** Contains Enable RX Test Mode, Data Pattern (Ramp Data), and Byte (hex) (0x00).

At the bottom of the dialog are four buttons: OK, Apply, Refresh, and Cancel.

obr. 3-13 Nastavení PHY vrstvy, vysílače a přijímače

- **TMR (Tone Map Request)** – tón masky a související sub-pásma jsou udržovány v souboru XML „AvaibleToneMask.xml“. Každá maska představuje oktet 8 tónů s LSB, které definuje nejmenší tónovací číslo. Oktety jsou uspořádány od nejnižšího oktetu (index 0-7) do nejvyššího oktetu v kmitočtovém pásmu.
- **Band** – konfigurace pro platnou normu
- **Mask** – výběr konkrétního kmitočtového pásma normy

Možnosti Band a Mask se objevují i při nastavení modemu jako přijímač pro testovací režim, kde je nutné nastavit stejné parametry jako na vysílači.

Načtení a nastavení základních proměnných atributů vrstvy MAC

PAN Information			
PAN ID (0x0x100010F)	0x0001		
Service Node Information			
Short Address (0x01000112)	0xABCD		
DSN (0x01000108)	84		
Coordinator Extended Address (0x0100106)	0x00 00 00 00 00 00 00 00		
Coordinator Short Address (0x01000107)	0		
Other Information			
Beacon Sequence Number (0x01000105)	120		
Max CSMA Backoffs (0x0100010B)	20		
Min Backoff Exponent (0x0100010E)	4		
Max Backoff Exponent (0x0100010A)	8		
MAC in Promiscuous Mode (0x01000115)	<input type="checkbox"/>		
Max Frame Retries (0x0100010D)	5		
MAC High Priority Window Size (0x01000113)	7		
OK	Apply	Refresh	Cancel

obr. 3-14 Atributy MAC

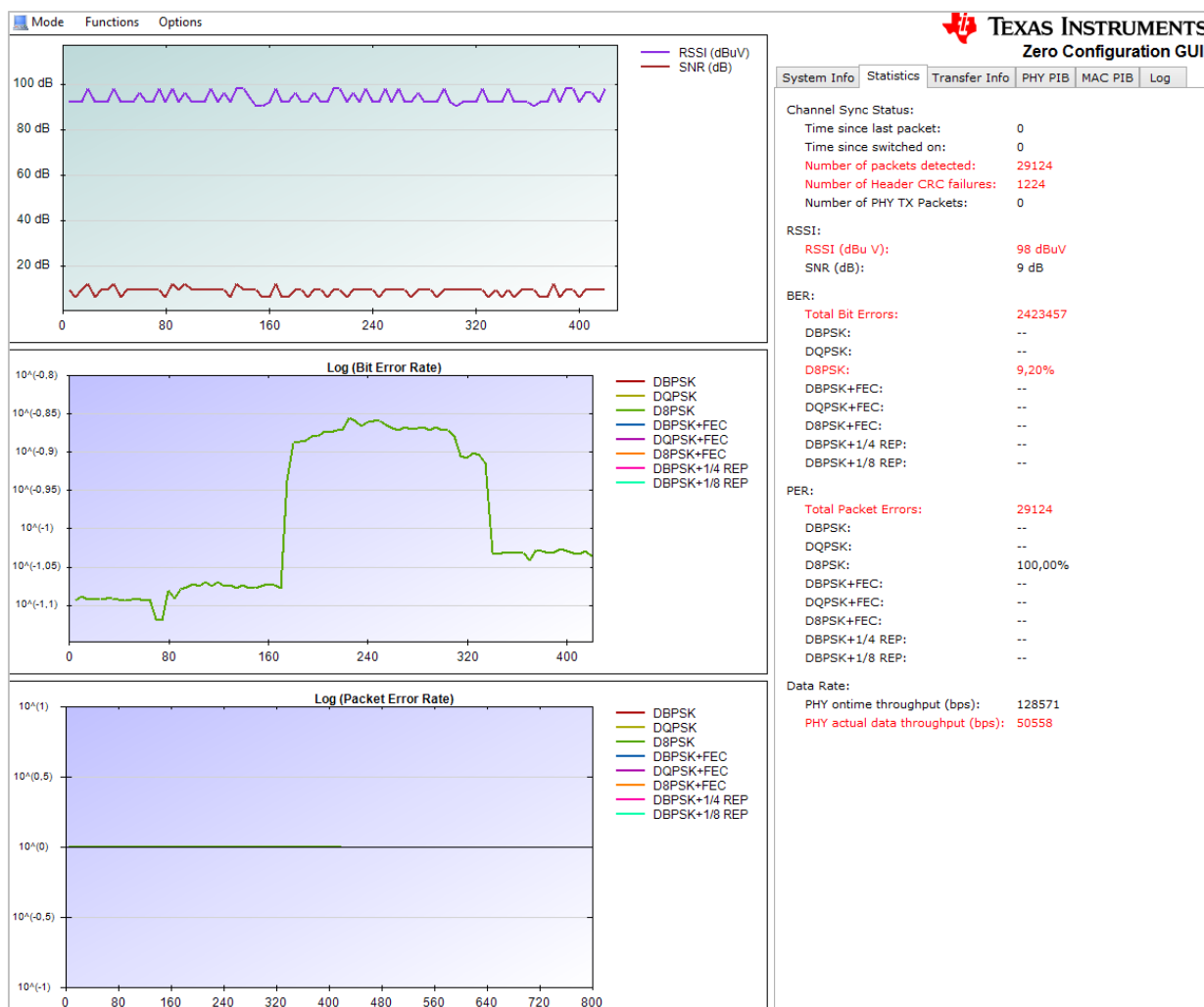
3.3 Měření standardů PRIME a G3-PLC

Měření standardů probíhalo v několika různých prostředích. Dosažené výsledky potvrdily význam rušení na jednotlivé typy komunikací v jednotlivých konfiguracích. Klíčové měření PRIME a G3 se uskutečnilo na ústavu UREL na Technické 12 a následně v počítačové laboratoři ústavu výkonové elektroniky. Veškerá měření probíhala v testovacím režimu fyzické vrstvy v různých konfiguracích, kde přenášené data byly kontinuálně vysílány typu Ramp Data (0-255). Dále probíhal přenos souborů. Vždy bylo použito automatické řízení zisku AGC. U měření standardu G3-PLC bylo zvoleno frekvenční pásmo CENELEC A 36 (celkem 36 nosných, první nosná 35,938 kHz, poslední nosná 90,625 [17]).

3.3.1 PRIME

Měření na UREL

Měření probíhala v ranních hodinách, kdy byl provoz na ústavu minimální a také v době, kdy byly 2-3 PC laboratoře v plném provozu. Modemy byly od sebe vzdálené nejdříve cca 30 m, následně 60 m. Ve vzdálenosti 30 m a minimálním provozu bylo pro PRIME s konfigurací pro nejrychlejší přenos dosaženo těchto výsledků:



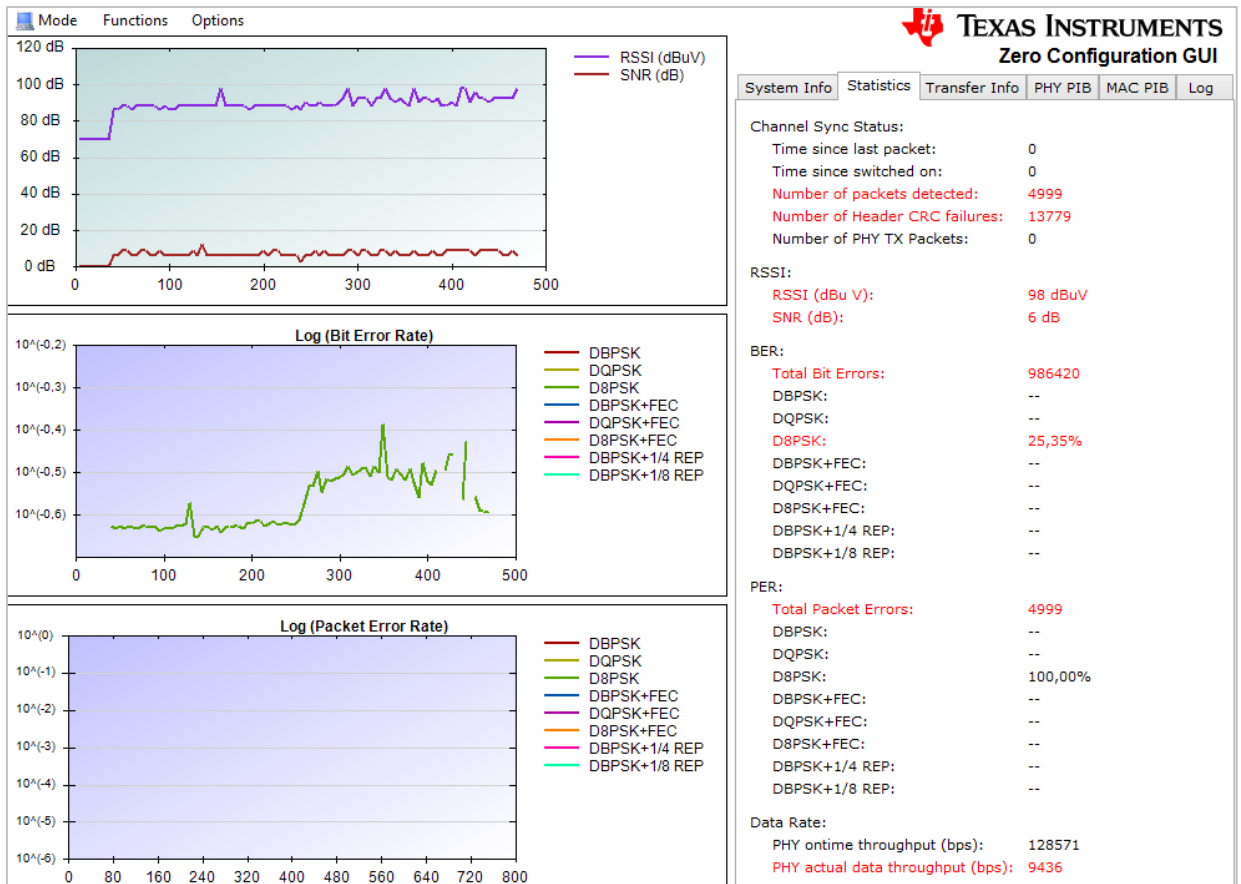
obr. 3-15 Měření PRIME – UREL, D8PSK, menší provoz

Konfigurace pro toto měření:

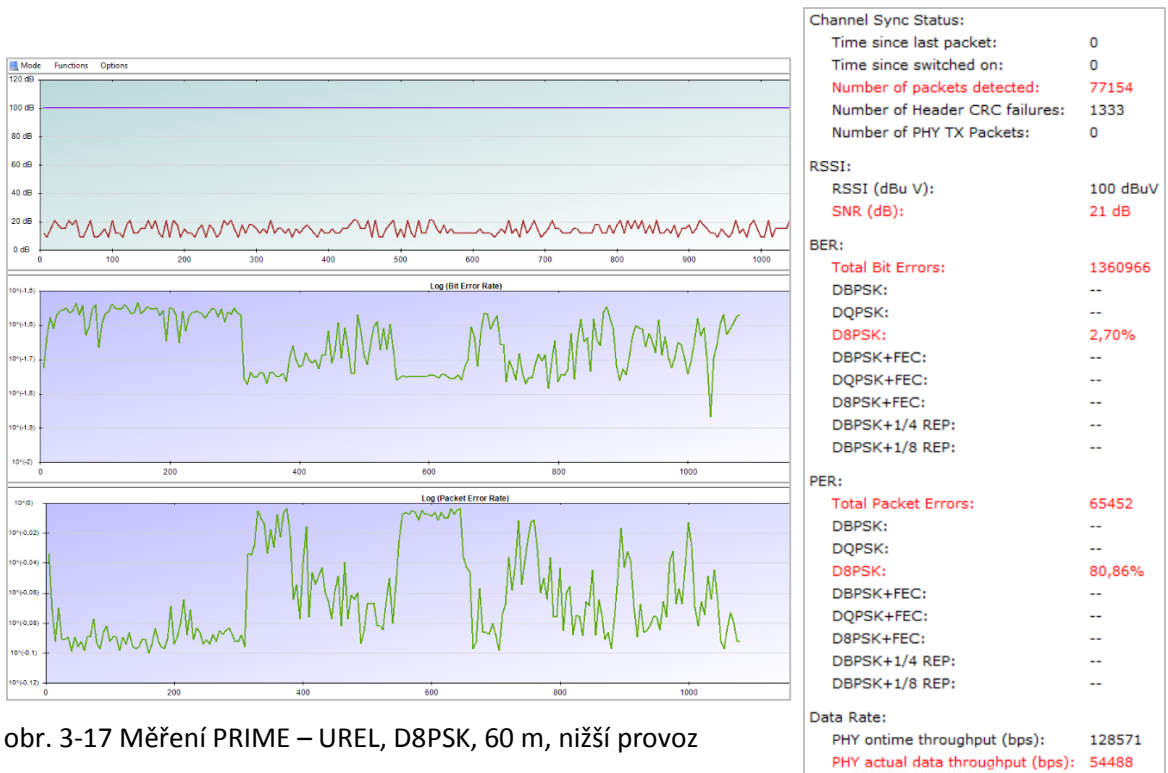
Bylo zvoleno nejrychlejší dostupné klíčování a to D8PSK. Pro dosažení nejvyšších rychlostí nebylo použito robustního režimu ani dopředného kódování FEC.

Jak je vidět na *obr. 3-15*, intenzita signálu RSSI se pohybovala v rozmezí od 90 do 98 dB μ V a poměr signál šum od 6 do 15 dB. Vliv rušení v čase měření se projevil do bitové chybovosti BER, která se pohybovala v rozmezí 7 % po 14 %.

Při měření ve větším provozu bylo znatelné kolísání rychlosti, intenzity signálu a bitové chybovosti. V průběhu BER na *obr. 3-16* je v intervalu posledních 100 vteřin vidět úplné přerušení přenosu, které se opět projevilo po cca 30 minutách měření, na dobu více než pěti minut. Zde je vidět pokles rychlosti o cca 80%. Aplikací robustního režimu byla chybovost menší, ale rychlost se konstantně držela přibližně u 16 kb/s.



obr. 3-16 Měření PRIME – UREL, D8PSK, 60 m, vyšší provoz

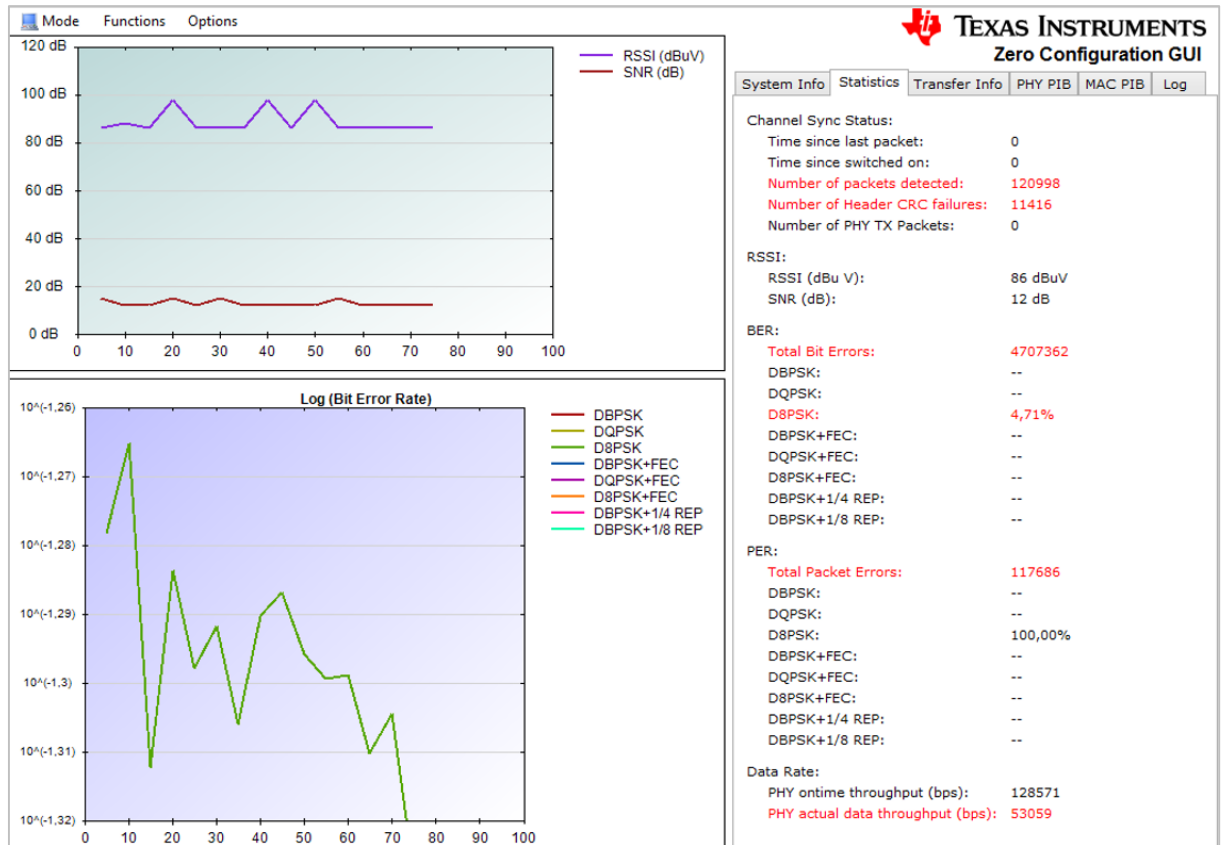


obr. 3-17 Měření PRIME – UREL, D8PSK, 60 m, nižší provoz

Je vidět, že intenzita signálu po dobu 20 minut měření byla konstantní. SNR se pohybovala od 9 po 21 dB. Rozdíl úrovně chybovostí byl minimální a přenos tedy dosahoval nejvyšších rychlostí.

Měření v PC laboratoři

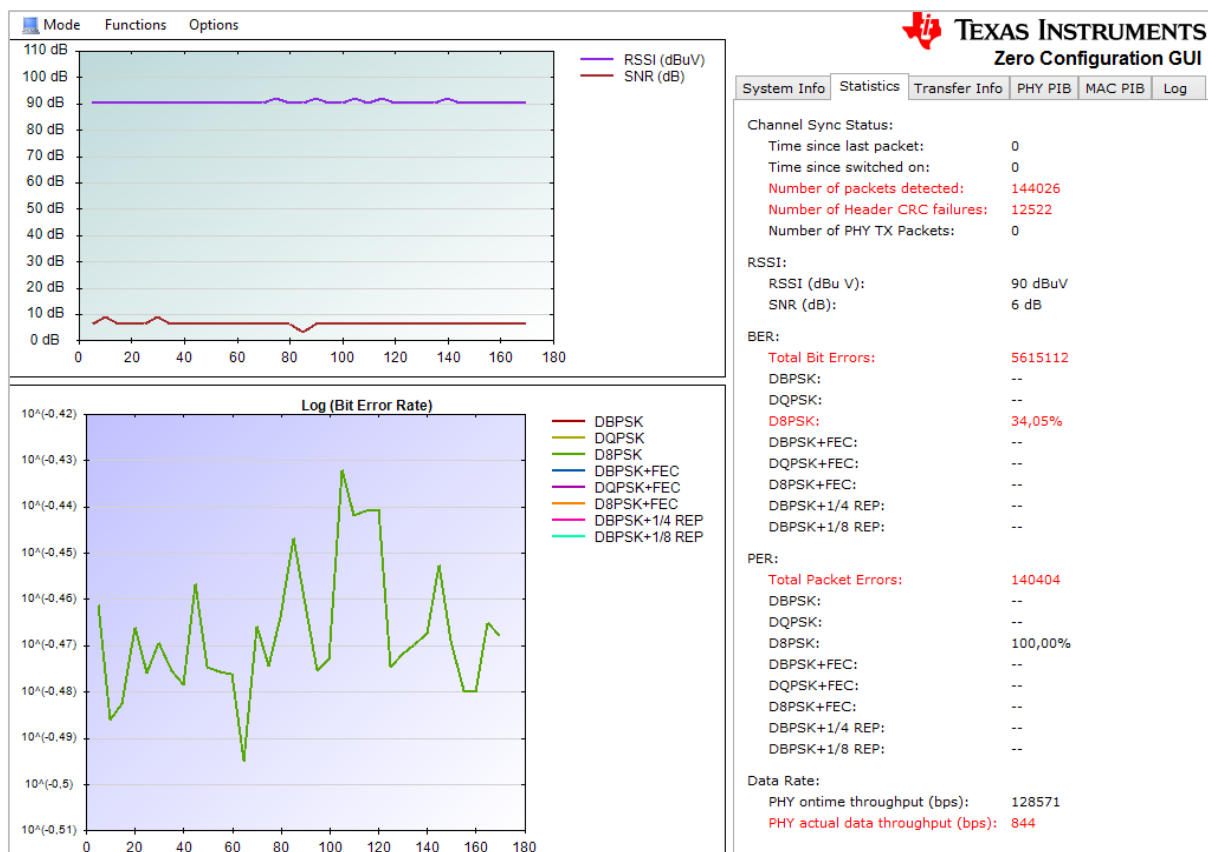
Toto měření probíhalo v síti, v níž bylo 26 PC. Při měření bylo zapnuto 14 PC. Modemy byly od sebe vzdálené cca 10 m. Na obr. 3-18 je zobrazeno měření s použitím D8PSK bez aplikace robustního režimu a dopředného kódování pro dosažení nejvyšší přenosové rychlosti.



obr. 3-18 Měření PRIME – laboratoř, D8PSK, nejbližší PC vypnut

Zde pozorujeme snížení intenzity signálu s relativně konstantním SNR. Přenosová rychlost však dosahuje konstantně vyšších hodnot.

Při zapnutém PC, který byl zapojen v největší blízkosti modemu bylo nutné pro uskutečnění přenosu použít robustní režim. Tento PC zásadně ovlivňoval veškerý přenos. Průběh tohoto měření je na obr. 3-19.



obr. 3-19 Měření PRIME – laboratoř, D8PSK, nejbližší PC zapnut

Zde lze pozorovat rapidní snížení rychlosti přenosu v tomto režimu, avšak také i dobrou stabilitu přenosu. Použití ostatních modulací bylo obdobné, tedy bez aplikace robustního režimu nebylo možné provádět test fyzické vrstvy. Pro přehlednost je v tab. 3-1 uvedeno srovnání jednotlivých modulací bez/s použitím ROBO a se zapnutým/vypnutým sousedním PC.

Klíčování	DBPSK	DBPSK+ROBO	DBPSK (PC)	DBPSK+ROBO (PC)
RSSI [dBμV]	88	88	92	94
SNR [dB]	12	12	3	3
Data Rate [kb/s]	28,4	13,4	0	0,79
Klíčování	DQPSK	DQPSK+ROBO	DQPSK (PC)	DQPSK+ROBO (PC)
RSSI [dBμV]	88	88	90	90
SNR [dB]	12	12	3	3
Data Rate [kb/s]	41,4	15,1	0	0,86
Klíčování	D8PSK	D8PSK+ROBO	D8PSK (PC)	D8PSK+ROBO (PC)
RSSI [dBμV]	86	84	90	90
SNR [dB]	12	12	3	6
Data Rate [kb/s]	53	16	0	0,84

tab. 3-1 Srovnání přenosů PRIME

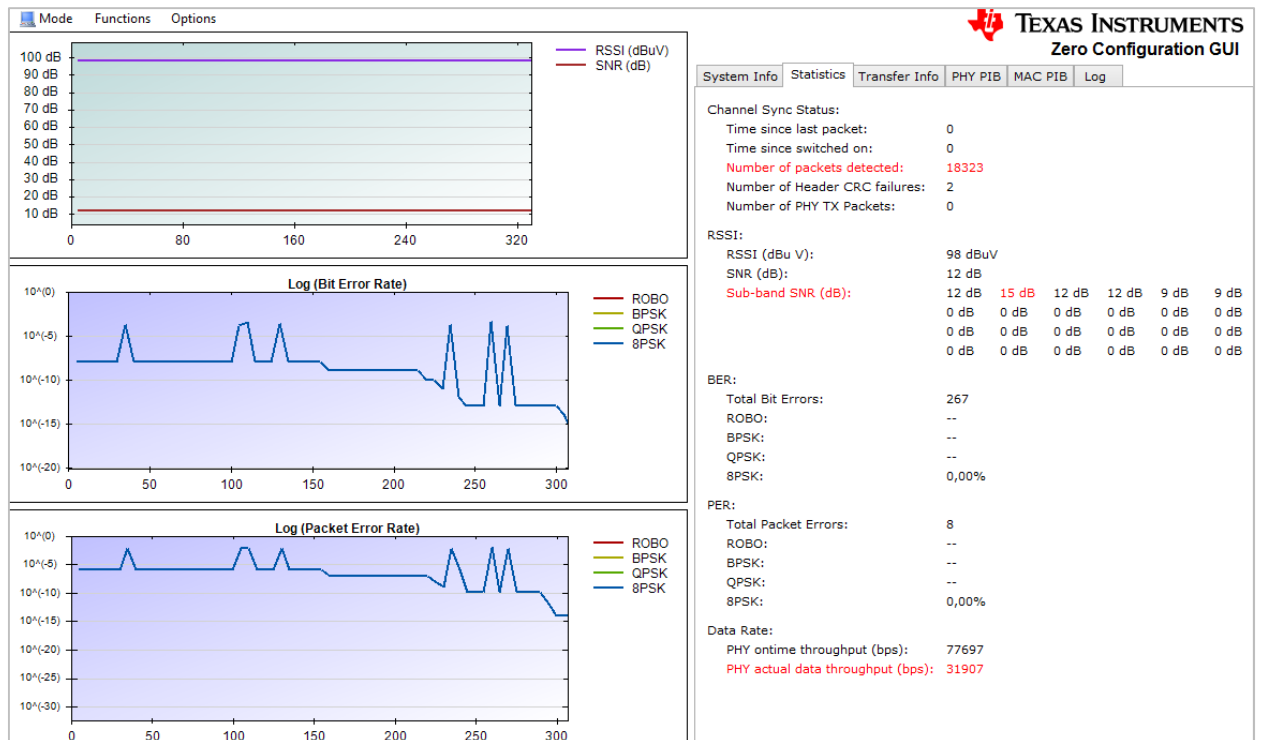
Pozn.: Některé měření ostatních konfigurací (změna modulací, povolení robustního režimu) jsou uvedeny v Příloha B a Příloha C.

3.3.2 G3-PLC

Měření na UREL

Měření tohoto standardu taktéž probíhala v ranních hodinách, kdy byl provoz na ústavu minimální a také v době kdy byly 2-3 PC laboratoře v plném provozu. Modemy byly od sebe vzdálené stejně jako u PRIME, tedy cca 30 m následně 60 m. Ve vzdálenosti 30 m a minimálním provozu bylo pro G3-PLC, s konfigurací pro nejrychlejší přenos dosaženo těchto výsledků:

Toto měření probíhalo při minimálním rušení v síti za použití D8PSK bez dopředného kódování FEC, se vzdáleností mezi modemy cca 30 m.



obr. 3-20 Měření G3 – UREL, D8PSK, 30 m

Z měření na obr. 3-20 je patrná vyšší stabilita a nižší chybovost standardu. Chybovost v dalším průběhu měření byla mnohem menší než 0,1 % a to při stejné přenosové rychlosti. Při vzdálenosti modemů 60 m, jsou průběhy měření na obr. 3-21.

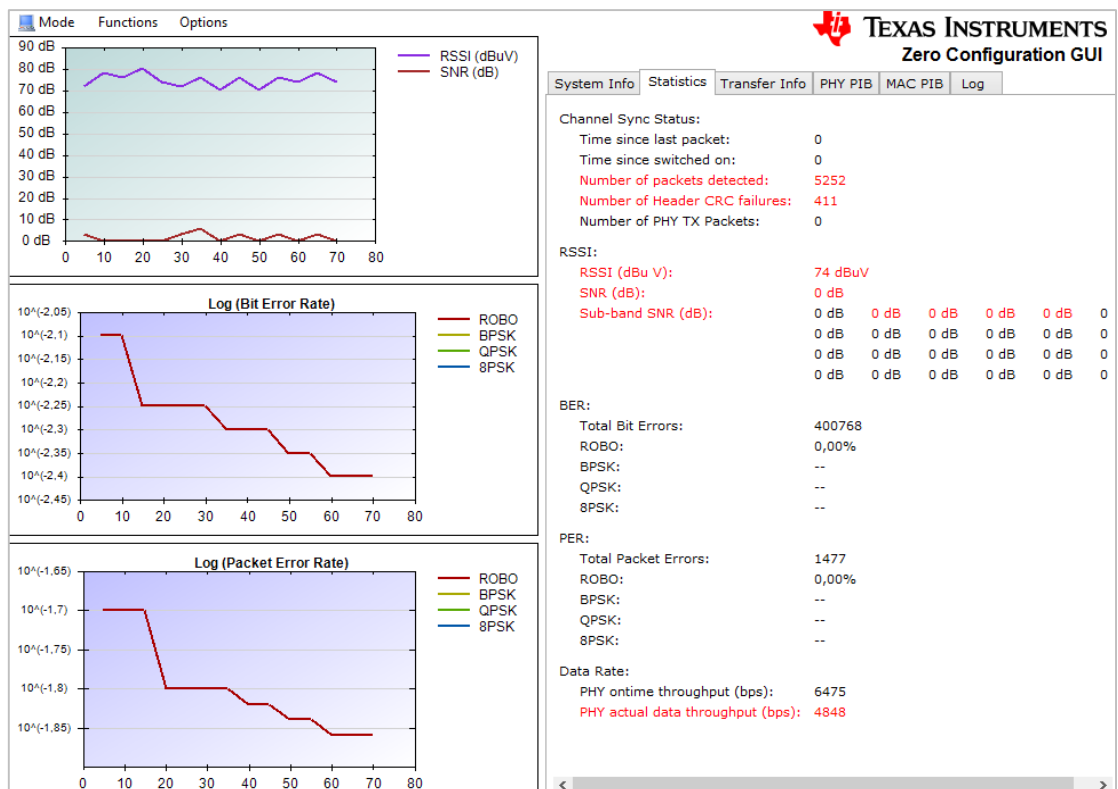


obr. 3-21 Měření G3 – UREL, D8PSK, 60 m

Zde je patrná vyšší chybovost a kolísání rychlostí (od 20 kb/s po 34 kb/s).

Měření v PC laboratoři

Měření standardu G3 bylo také provedeno v PC laboratoři s 26 PC. Při měření bylo zapnuto 14 PC. Modemy byly od sebe vzdálené cca 10 m. Na obr. 3-22 je zobrazeno měření robustní modulace (ROBO) bez použití TMR, se zapnutým sousedním PC.



obr. 3-22 Měření G3 – laboratoř, robustní režim

V tomto případě také můžeme hodnotit chybovost jako relativně nízkou vzhledem k prakticky nulovému SNR.

Pro přehled ostatních naměřených hodnot, jsou v *tab. 3-2* uvedeny hodnoty pro ostatní modulační při vypnutém/zapnutém sousedním PC který výrazně ovlivňoval přenos.

Klíčování	ROBO	ROBO (PC)
RSSI [dB μ V]	84	86
SNR [dB]	0	0
Data Rate [kb/s]	4,8	0
Klíčování	BPSK	BPSK(PC)
RSSI [dB μ V]	76	82
SNR [dB]	3	0
Data Rate [kb/s]	1,7	0
Klíčování	BQPSK	BQPSK (PC)
RSSI [dB μ V]	76	83
SNR [dB]	6	0
Data Rate [kb/s]	13	0
Klíčování	D8PSK	D8PSK (PC)
RSSI [dB μ V]	78	80
SNR [dB]	3	3
Data Rate [kb/s]	0	0

tab. 3-2 Srovnání přenosů G3

3.3.3 Zhodnocení měření

Zhodnocení přenosu v režimu testu fyzické vrstvy

Měřením v režimu testování přenosu fyzické vrstvy se ověřily základní vlastnosti standardů PRIME a G3-PLC.

Přenos implementovaného standardu PRIME dosahoval maximální rychlosti 55 kb/s. U standardu G3-PLC byla maximální dosažená rychlost 37 kb/s. U obou standardů v režimu bez aplikace FEC, ROBO, s klíčováním D8PSK, v méně nebo minimálně rušeném prostředí. Tyto hodnoty se v praxi ověřily s minimálními odchylkami (jednotky kilo-bitů).

Při měření na UREL bylo zjištěno, že samotná vzdálenost modemů o délce vedení v řádech deseti metrů, nijak neovlivňuje rychlost přenosu. Chybovosti BER/PER byly také beze změn a to u obou standardů. Co však přenos ovlivňovalo, bylo rušení na vedení. To bylo způsobováno několika elementy. Například uvedení do provozu počítačové laboratoře, nekvalitně odrušené spotřebiče například spuštění sušiče rukou na WC se vždy viditelně projevilo ve výchylce grafu vykreslující BER. Ostatní zdroje se nepodařilo jednoznačně identifikovat. Dále se projevila vzdálenost zapojeného modemu od zdroje rušení. Nejlépe bylo možné tento fakt ověřit v PC laboratoři, kde celý přenos ovlivňoval jeden počítač, který byl zapojen v bezprostřední blízkosti modemu s tím, že bylo aktivních 14 dalších počítačů. Při tomto měření se hlavně projevoval nízký odstup signálu od šumu SNR (dosahoval i nulových hodnot) a také hodnota intenzity signálu RSSI. Klesala až na hodnotu 70 dB μ V od referenční hodnoty 100 dB μ V. Tato hodnota je ale limitní v rozhraní Zero Configuration GUI, jak je uvedeno v kapitole 3.2.1.

Dále se ověřilo, že aplikací robustního režimu je přenos dat mnohem odolnější vůči rušení na vedení, avšak na úkor znatelně nižších přenosových rychlostí u obou standardů. V tomto srovnání byl jednoznačně výkonnější standard G3-PLC, protože ve stejném prostředí, kde implementovaný G3 přenášel data o rychlost 13-16 kb/s, standard PRIME přenos neuskutečnil. Při použití dopředného kódování byla přenosová rychlost vždy znatelně snížena.

Maximální rychlosti na fyzické vrstvě PHY byly ale nižší, než uvádí specifikace jednotlivých standardů. To může být způsobeno z části nedokonale optimalizovaným protokolem přenosu dat fyzické vrstvy, jelikož se jedná o vývojový kit.

Navzdory dosaženým výsledkům PRIME, je ale světově na první pozici (milióny instalací). Naměřené výsledky se shodují s nezávislými měřeními firem po celém světě, kde tento kit verze 3, nebyl schopen dosáhnout kvalitnějších výsledků [32].

Zhodnocení přenosu souborů

Maximální rychlost při přenosu souborů pomocí Zero Configuration GUI (při PRIME a G3) dosahuje maximální přenosové rychlosti 4-6 kb/s v optimálním nastavení optimální velikosti paketu, která představuje celkovou velikost paketu včetně všech hlaviček protokolu. Tyto rychlosti jsou oproti rychlostem při testu fyzické vrstvy mnohem menší. To může být způsobeno změnou parametrů fyzické vrstvy v režimu přenosu souborů a v režimu testu fyzické vrstvy. Toto tvrzení je ale nejednoznačné, protože se nepodařilo určit, jaké změny vykonává Zero Configuration GUI při této operaci.

Částečné zpomalení přenosu souborů může být v nastavení vyšších síťových vrstev referenčního modelu ISO/OSI popsáno v *kapitole 2.1*.

Aby bylo možné data úspěšně přenést, je nutné, aby se přenosová rychlost výrazně zmenšila a proběhl proces opravy chybných bitů. Přenosové služby v nižších vrstvách mohou být také nedostatečně kvalitní. Tento nedokonalý proces je způsobený neefektivní optimalizací algoritmů v nastavení transportní vrstvy, sloužící k detekci chyb, opravě chybných bitů a následně paketů. I když je transportní vrstva zcela odstíněna od skutečné topologie sítě, předávané přenosové služby pravděpodobně nejsou dostatečně kvalitní a neprobíhá bezchybný přenos dat a tím je tedy částečně snížena přenosová rychlost přenášeného souboru.

Kvalita přenosových služeb na fyzické a následně linkové vrstvě je taktéž nedostačující a tedy ani v testu přenosu na fyzické vrstvě nedosahoval modem rychlostí zadaných v parametrech standardů. Tato skutečnost je také z části způsobena rušivými elementy přítomnými v síti, a také nastavenými algoritmy zpracování dat a opravy chybných přenášených dat.

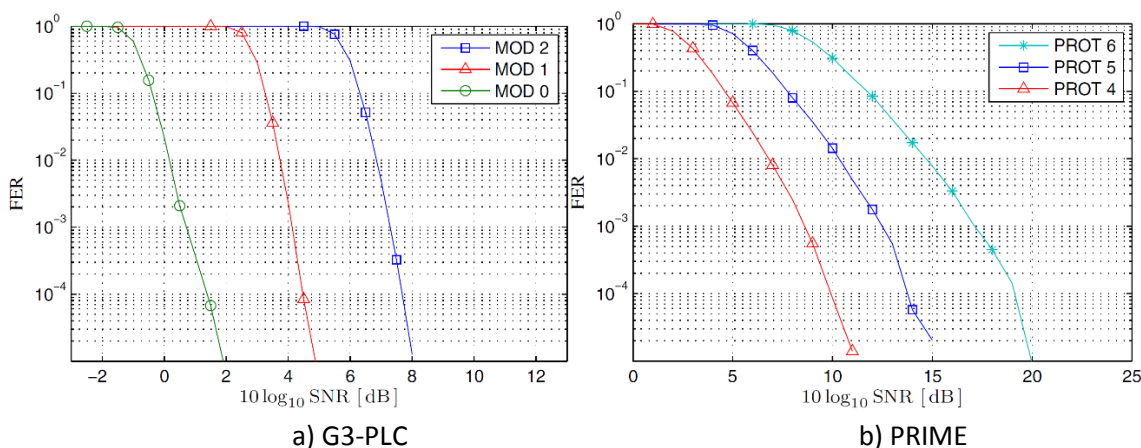
Další element, který výrazně snižuje rychlost přenosu souborů, je už výše uvedený, a to záměrné nastavení dlouhého času nečinnosti vysílače, když čeká na ACK od přijímače.

Řešením tohoto problému je tedy při návrhu modemu aplikovat vlastní nebo upravený kód, který výše uvedené optimalizační nedostatky odstraní. Jednalo by o reimplementaci vrstvy, která způsobuje největší zpoždění v komunikaci. Nejlépe tedy implementací standardu G.hnem, který by měl podobné negativa z větší části eliminovat, za podmínky pokud bude k dispozici čip, který tento standard bude plně realizovat. V tomto případě ale není potřeba řešit rychlosti nad transportní vrstvou, protože účel funkce modemu obslouží nižší vrstvy, můžeme tedy ostatní vrstvy nastavit jako transparentní a optimalizovat pouze vrstvu fyzickou. Řešení ze strany Texas Instruments je možné očekávat v budoucnu.

4 REALIZOVANÝ PLC MODEM

Na základě měření v předchozí kapitole byla zvolena implementace standardu G3-PLC. Dostupný IO pro dokonalejší standard G.hnem není k dispozici, proto byl v návrhu zařízení využit PLC modul SGCM-P40. Navržené zařízení plní funkci datového koncentrátoru a obsahuje i rádiové rozhraní.

Z výsledků měření v reálné síti jasně vyplynul jeden základní problém. Komunikace technikou OFDM v pásmu do 150 kHz vede při respektování maximálních úrovní výstupního signálu dle normy CENELEC EN 50065 k relativně špatnému poměru signál šum na vstupu přijímače. V řadě měření klesal tento poměr i pod hodnotu 10 dB jen při rušení běžnými spotřebiči. Jak plyne ze simulací na *obr. 4-1* a předchozích měření, tak pro nejdolnější módy (MOD0 a PROT4 na *obr. 4-1*) dosahuje standard G3 lepších výsledků zejména díky použití Reed-Solomonova kódování.



obr. 4-1 Závislost rámcové chybovosti na poměru signál šum podle [19]

Legenda značek na *obr. 4-1*

MOD0 – DBPSK + rep, dvoustavové fázové klíčování s opakováním

MOD1 – DBPSK, dvoustavové diferenciatní fázové klíčování

MOD2 – DQPSK, čtyřstavové diferenciatní fázové klíčování

PROT4 – DBPSK + FEC, dvoustavové diferenciatní fázové klíčování s dopředným kódováním

PROT5 – DQPSK + FEC, dvoustavové diferenciatní fázové klíčování s dopředným kódováním

PROT6 – D8PSK, osmistavové diferenciatní fázové klíčování

Na základě porovnání obou standardů je možné formulovat výhody G3 oproti PRIME:

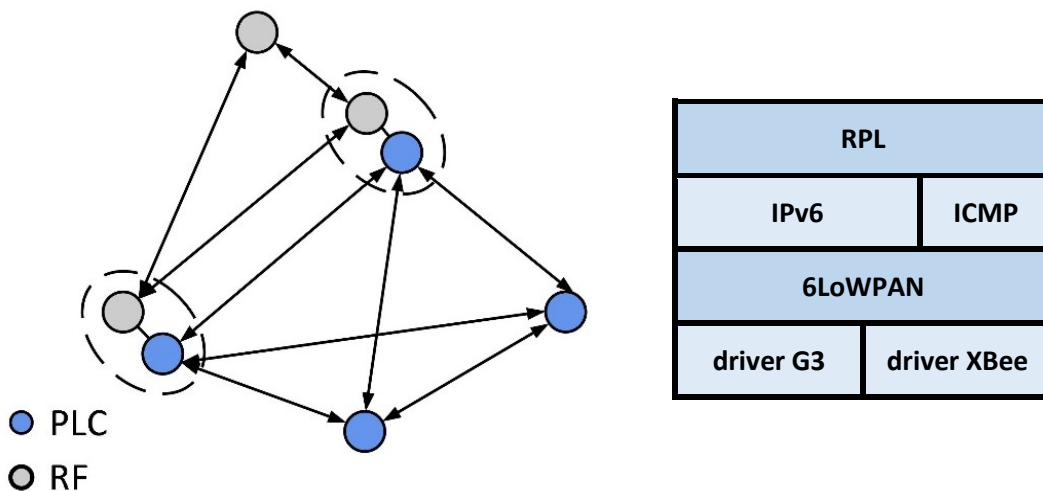
- Standard G3 pokrývá pásmo FCC až do kmitočtu 480 kHz. Mimo regulační oblast CENELEC (export mimo Evropu) je možné zvýšit datový tok pouhou změnou konfigurace tónové masky OFDM. Čipové sady PRIME jsou k tomuto datu omezeny jen na pásmo CENELEC A. Jak dále vyplývá z rozboru v [18], je možné i pro Evropu certifikovat komunikační zařízení, která využívají pásma mimo rozsahy CENELEC. V této oblasti lze v budoucnu očekávat změny, na což je v případě G3-PLC možné reagovat jen změnou tónové masky a nastavení filtru (změna hodnot součástek).
- G3 umožňuje polygonální konfiguraci sítě, kdy jednotlivé uzly komunikují přímo. PRIME umožňuje pouze stromovou topologii.

- Linková vrstva G3 vychází ze standardu IEEE 802.15.4, který byl původně vyvinutý pro bezdrátové sítě. Proto je možné rozšířit logickou polygonální síť G3 o radiový polygon na bázi stejného protokolu. Oba segmenty pak mohou být sjednoceny koncentrátorem na bázi standardu 6LoWPAN.

Z těchto důvodů byla zvolena čipová sada MAX2991/2992 pro realizaci PLC modemu, modulu HDR.

Koncentrátor slouží k vytvoření hybridní polygonální sítě s moduly pro komunikaci po napájecím vedení a rádiovou komunikaci v rámci segmentu veřejného osvětlení nebo budovy. Samozřejmě je možné i nejjednodušší spojení dvou modulů typu „Point-To-Point“. Vytvoření sítě, směrování a adaptabilitu podle aktuálních změn zajišťuje protokol 6LoWPAN, který je implementovaný v hlavním MCU koncentrátoru.

Software koncentrátoru, který není předmětem tohoto projektu, bude založen na operačním systému RIOT. Jedná se o systém s mimořádně malými nároky na parametry hostitelského MCU. Nejjednodušší konfigurace vyžaduje 5 kB paměti flash (ROM) a 1,5 kB paměti RAM, pro což plně vyhovuje zvolené MCU Cortex-M3. RIOT implementuje protokol 6LoWPAN (RFC6282 a RFC6775) a směrovací protokol RPL (RFC6550 a RFC6719) pro ztrátové sítě.



obr. 4-2 Logická polygonální síť RF/PLC a struktura software koncentrátoru

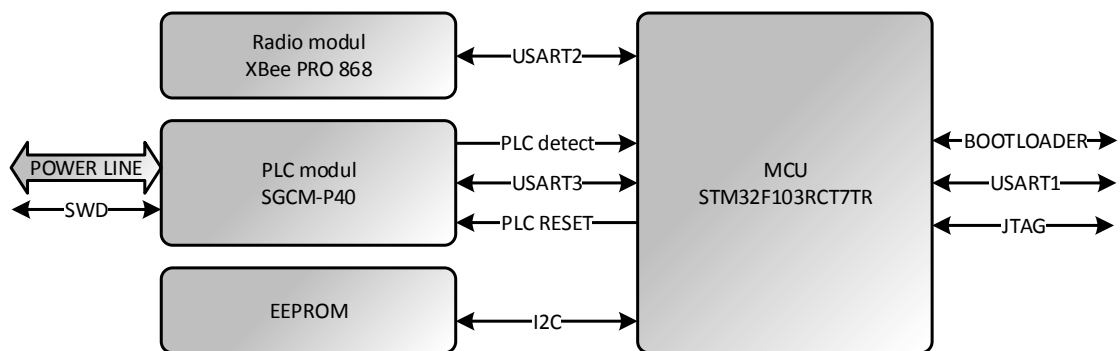
Realizované zařízení obsahuje PLC modul pro komunikaci po elektrickém vedení a jak je výše uvedeno, je doplněno o rádiový modul. Celkově byla vyrobena dvě zařízení. Použité komunikační moduly jsou osazeny v základní desce, která mimo jiné obsahuje řídicí procesor který má v tomto projektu za úkol pouze přeposílat data buď do PLC modulu, nebo do modulu rádiového, a to pomocí přepínače. Konkrétní schematické prvky a jejich funkce jsou popsány v kapitole 4.1. a blokový rozbor zařízení je uveden na obr. 4-3. Software, který umožňuje tok dat je uložen na příloženém DVD.

Účelem tohoto zařízení je integrovat spolehlivý komunikační systém například do veřejného osvětlení, za účelem sběru nebo přeposílání dat různých senzorů, měřených údajů, nebo informačních dat pro daný úsek, typu rozpoznávání hustoty dopravy nebo správ alarmujících o dění na vozovce. Zajistit spolehlivost přenosu, je možno přidáním alternativního komunikačního rozhraní, v tomto případě rádiového modulu XBee, který může plně nahrazovat PLC komunikaci nebo v reálném čase odesílat právě získaná data na určené místo dovolenou rychlostí.

Je zde tedy možnost úplného nahrazení PLC rozhraní, rozhraním rádiovým. Tím by se také současně eliminovaly veškeré výhody spojené s komunikačním systémem založeným na PLC. Podmínky pro rádiovou komunikaci jsou totiž odlišné a díky nim není možné na některých

místech nebo nějakém časovém období takovou komunikaci uskutečnit z hlediska pokrytí a rušení signálu. Oproti polygonální PLC síti rozprostřené o ploše průměrného města, není možné, aby rádiová komunikace zabezpečila dostatečně kvalitní přenos mezi všemi uzly, pokud by nebyla zabezpečená přímá viditelnost rádiových antén. Naopak PLC využívá pevného elektrického vedení. Samozřejmě i PLC komunikace často selže díky silnému rušení, ale i navzdory této skutečnosti je PLC komunikace efektivnější v rámci propojení se vzdálenějšími uzly a také z hlediska nákladů pro stavbu kvalitní bezdrátové polygonální sítě. Rádiový přenos může také významně ovlivňovat nepříznivé počasí (bouřka).

Kombinace PLC a rádiového rozhraní tvoří komunikační zařízení, které může zabezpečit kompletní komunikaci po stávající napájecí infrastruktuře v budovách, kde rádiový přenos pokrývá malou část nebo komunikaci přes ulice kde rádiovému signálu stíní budovy. Naopak rádiová komunikace umožní přenos na větší vzdálenosti mezi takovými body, které přímo nespojuje pevné vedení. Rádiové rozhraní může také posílit PLC komunikaci jako paralelní kanál sousedních uzlů.



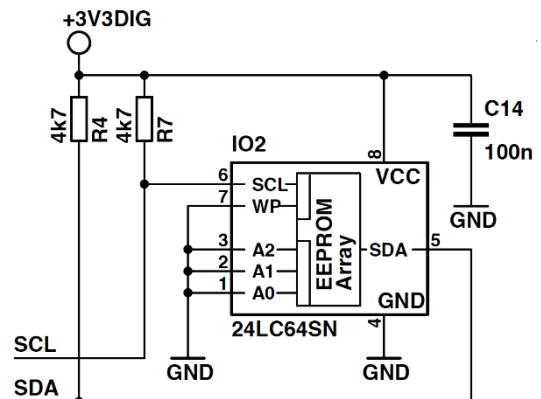
obr. 4-3 Blokové schéma koncentrátoru NB-HDR

4.1 Funkční prvky modemu

Veškeré funkce modemu kombinuje procesor STM32F103 [20] s externím krystalem o kmitočtu 8 MHz. Jak bylo výše uvedeno, aktuální program řídí pouze tok dat buď to PLC modulu, nebo bezdrátového modulu. Jsou také vyvedeny 2 univerzální piny, z nichž je jeden využit právě na přepínání toku dat. Kromě digitálních linek modulů je procesor zapojen v základním zapojení. Kompletní zapojení v příloze *Příloha I*, *Příloha J* a *Příloha K*.

4.1.1 Paměť EEPROM

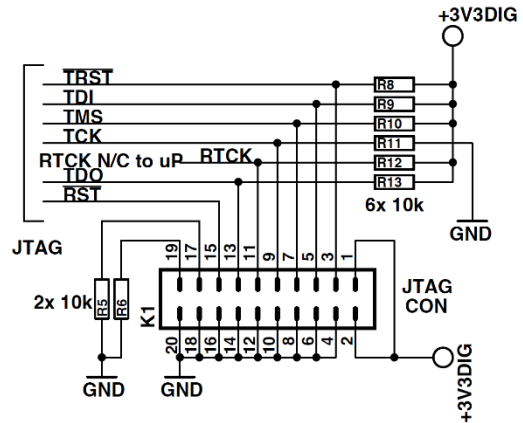
K MCU je také připojena paměť EEPROM 24LC64SN [21] (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) sloužící jako externí rozšiřující paměť o 64 kb. Paměť má omezenější počet zápisů oproti flash paměti. Používá se pouze jako úložiště dat, parametrů programu, nikoliv však k uložení firmware, který je uložen ve flash paměti MCU. Výhoda připojení této paměti k procesoru spočívá v tom, že paměť je možno přepisovat po bajtech oproti paměti flash, kterou je možné přepisovat pouze po stránkách neboli po několika bajtech (512, 1k, 2k, atd.).



obr. 4-4 Paměť EEPROM

4.1.2 JTAG

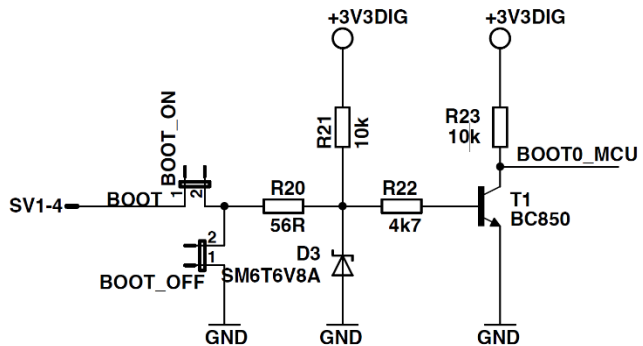
Na pinové liště K1 je vyvedeno standardní připojení JTAG. Tento standard (Joint Test Action Group) byl vyvinut za účelem testování desek plošných spojů, programování flash paměti, a ladění programu. Tento konektor je vyveden z MCU na základní desce modemu. Veškeré významné piny jsou připojeny k napájení MCU přes pull-up rezistory. Data jsou přenášena sériově.



obr. 4-5 JTAG konektor

4.1.3 Zavaděč pro mikrokontrolér

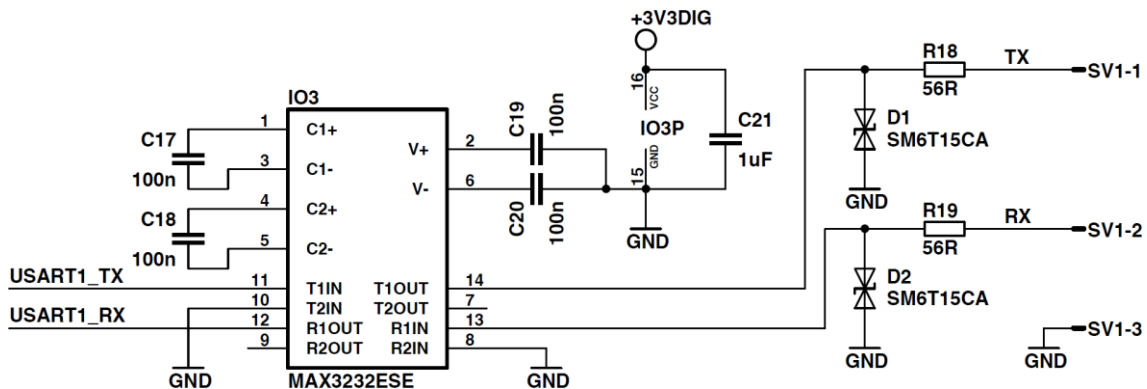
Tzv. bootloader je pin na procesoru (boot0) sloužící k rozlišení místa odkud je program nahráván. Piny „BOOT_ON“ a „BOOT_OFF“ slouží k odpojení tohoto pinu, protože rozhraní RS-232 se může použít jak k programování, tak pro přijímaná a odesílaná data na výstupech modemu. Aby nedocházelo k neočekávaným chybám komunikace, tento pin je v běžném provozu vypnut, protože když je na pinu aktivní logická 1, MCU vyčkává na příchozí program.



obr. 4-6 MCU Bootloader

4.1.4 Rozhraní RS-232

Toto rozhraní zabezpečuje převod s RS-232 na TTL. Na svorkové liště SV1 jsou vyvedeny piny pro RS-232. Integrovaný obvod MAX3232 spojuje nábojovou pumpu (pro RS-232) a převodník úrovní na TTL. Piny RX, TX jsou připojeny na piny procesoru TX, RX. Transily D1, D2 slouží jako přepětová ochrana.

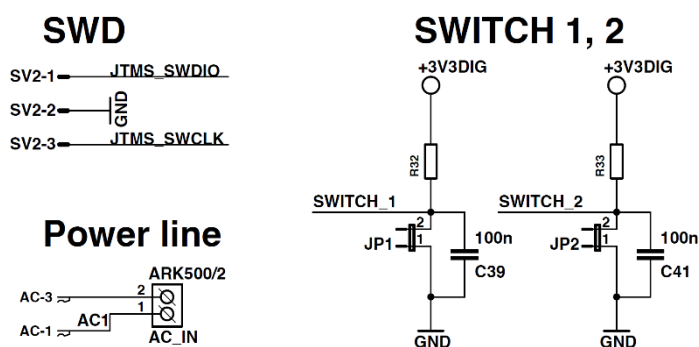


obr. 4-7 RS-232 Interface

4.1.5 Powerline, piny „SWD“, „JP1“ a „JP2“

Svorkovnice ARK slouží k přivedení napájecí sítě pro komunikaci. Následně jsou piny „AC-1“ a „AC-3“ přivedeny kroucenou dvoulinkou přímo na komunikační PLC modul.

Konektor SWD slouží k programování PLC modulu pomocí ST-LINK/V2 [22] programátoru. Vedle SWD je umístěné resetovací tlačítko pro PLC modul.



obr. 4-8 SWD, SWITCH 1, 2, Power line

Tlačítka, nebo přepínače „SWITCH 1, 2“ jsou univerzální piny MCU „PC10“ „PC11“, z nichž piny JP2 jsou použity jako přepínač toku dat buď do PLC modulu nebo modulu bezdrátového.

4.1.6 Komunikační modul XBee PRO 868

Jelikož je úzkopásmová komunikace po silovém vedení více náchylná na rušení, tedy její chybovost je větší než u většiny zavedených typů komunikací, bylo pro tento modem zvoleno další komunikační rozhraní, které zabezpečuje velmi stabilní komunikační přenosy v případě, že PLC kanál bude z nějakých důvodů nepropustný (např. velké rušení). Jedná se o bezdrátový modul XBee PRO 868 [23]. Jeho úkolem bude v pozdějších verzích vývoje koncentrátoru, paralelní nebo doplňující komunikace k PLC modulu. V praxi to může znamenat například: Když procesor základní desky zjistí, že rámcová chybovost nebo stabilita přenosu po silovém vedení klesla pod minimální hranici požadovanou pro danou komunikaci, automaticky přepne datový tok do XBee a veškerá komunikace bude odkloněna do bezdrátového přenosu a celkově tedy přenos nebude přerušen. Další možnost využití rádiového modulu je případné odesílání měřených dat na větší vzdálenosti (centrála) až do cca 40 km v přímé viditelnosti. Měření přenosu pomocí tohoto rozhraní nebyla proměřena, nýbrž nejsou náplní tohoto projektu.

Základní vlastnosti modulu:

- komunikační pásmo: protokol 868 MHz ISM (Industrial, Scientific and Medical)
- rychlost rádiového přenosu je 24 kb/s
- ověřování dat pomocí vícenásobných přenosů a ACK
- použité šifrování je AES-128 (stejně jako u PLC modulu)
- napájecí napětí je 3 – 3,6 V s odběrem 500 mA (800 mA max.)
- rádiový dosah uvedený výrobcem 40 km (přímá viditelnost), v budově 550 m
- vysílací výkon je 315 mW (+25 dBm)

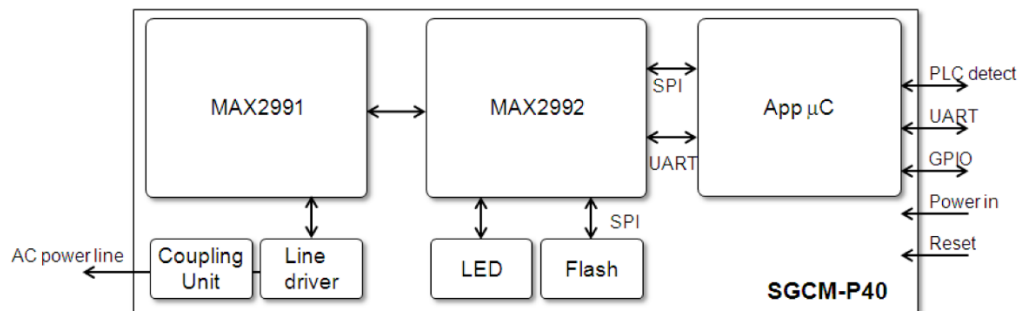
4.1.7 Komunikační modul SGCM-P40

Pro realizaci funkčního modemu byl zvolen PLC modul SGCM-P40 [24]. Modul je výkonný NB-HDR-PLC, který je tvořený PLC vysílačem Maxim MAX2992 [25] v kombinaci AFE – MAX2991 [26] a MCU od firmy STMicroelectronics – STM32F103. Použitím tohoto modulu je možné snížit náklady na infrastrukturu díky komunikaci i přes transformátory, a není nutné v síti používat velké datové koncentrátory. Dále tyto náklady může snížit také komunikace na vzdálenost

cca 6 km bez použití opakovačů. Další předností modulu je režim ATM (Adaptive Tone Mapping) – pouze u standardu G3-PLC. Tento režim zabezpečuje maximální robustnost komunikace na fyzické vrstvě. Jeho realizace spočívá na základě přijatých subnosných, tzv. tónů, ze kterých je odhadována hodnota SNR, pomocí které systém volí optimální druh kódování signálu automaticky (využívá modulace typu ROBO, DBPSK a DQPSK). Na základě těchto informací systém rozpozná frekvenci, jestli je použitelná pro komunikaci. Pokud ne, je tato frekvence ignorována. Mapování tónů také automaticky řídí úroveň vysílacího výkonu a hodnoty zesílení vysílače, které jsou použity pro různé části spektra. Účel tohoto režimu je automatizovaně řídit parametry pro komunikaci, aby byla zabezpečena co největší propustnost mezi přijímačem a vysílačem, i při zhoršených podmínkách na vedení [27]. Možnost „Tone Mapping“ je výhrada modemů podporujících G3-PLC. U vývojového kitu od TI byla tato možnost přístupná jako manuální volba tónů (nosných) do textového souboru. Realizovaný modul umožňuje rozpoznat a ignorovat subnosné automaticky. Blokové schéma modulu na obr. 4-9.

Základní vlastnosti:

- disponuje podporou standardu G3-PLC
- integruje modulační techniku OFDM využívající PHY/MAC vrstvy (vedení 90 – 240 VAC)
- adaptační vrstva 6LoWPAN pro přenos IPv6 paketů po elektrické síti
- provozní frekvence 145,3 – 478,12 kHz (splňuje pásmo i pro normu FCC – 72 nosných)
- lepší detekci chyb a spolehlivost přenosu zajišťuje ARQ
- pro maximální využití pásma, podpora režimu ATM
- šifrování je zabezpečeno šifrováním AES-128
- autentizační server EAP-PSK při použití transparentního protokolu
- modulace: ROBO, DBPSK, QPSK, D8PSK
- flash paměť: 512 kb
- RAM paměť: 64 kb



obr. 4-9 Blokové schéma SGCM-P40

4.1.8 Napájecí zdroj

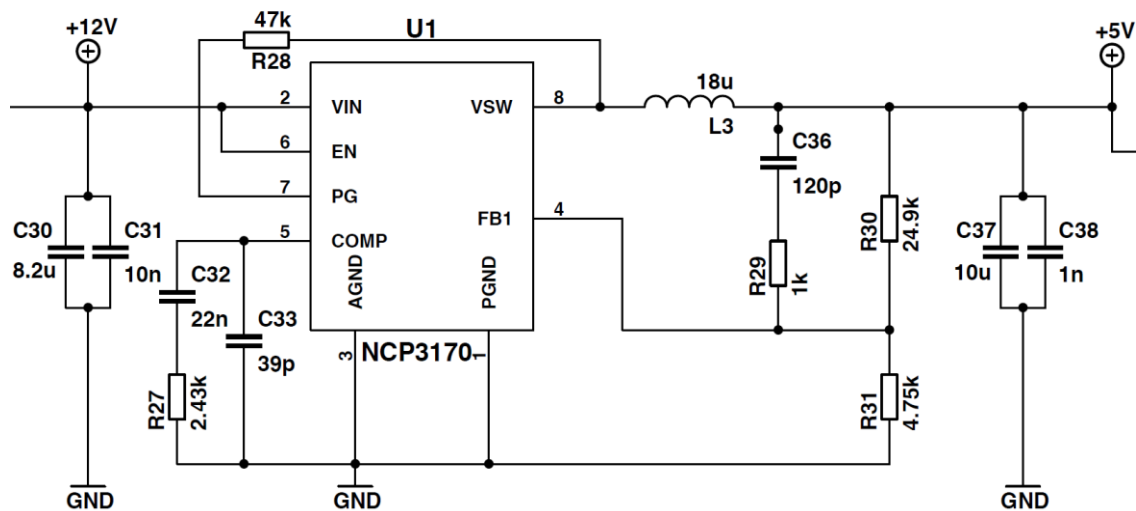
Komponenty zařízení vyžadují trojici napájecích napětí: +12 V, +5 V a 3,3 V.

Napětí +12 V je počáteční napětí, které je přímo přivedeno k PLC modulu spolu s napětím +5 V, o které se stará synchronní PWM konvertor NPC3170A [28]. Napájecí napětí pro procesor vytváří lineární stabilizátor napětí LM1117DT [29] a to 5 V → 3,3 V, které je rovněž přivedeno k XBee, PLC modulu a všem ostatním integrovaným obvodům.

	SGCM-P40	XBee PRO 868	STM32F103
Maximální proud 3,3 V [mA]	–	800	50
Maximální proud 5 V [mA]	620	–	–
Maximální proud 12 V [mA]	300	–	–

tab. 4-1 Proudové odběry komponent modemu

Ostatní integrované obvody v zařízení mají zanedbatelný odběr proudu, jednotky mA. Zdroj byl dimenzován k odběru 1,2 A. Tedy maximální odběr zařízení v plném výkonu obou modulů činí celkem 1,47 A, čemuž výkon zdroje odpovídá. Pracovní frekvence zdroje je v tomto zapojení 500 kHz, která nezasahuje do komunikačního pásma PLC modulu.



obr. 4-10 Schéma zapojení DC/DC PWM konvertoru (12 V na 5 V)

Požadavky napájecího zdroje jsou: $V_{IN} = 12\text{ V}$; $V_{1\text{ OUT}} = 5\text{ V}$; $V_{2\text{ OUT}} = 3,3\text{ V}$; $I_{OUT} = 1,2\text{ A}$

Pro nastavení výstupního napětí 5 V bylo potřeba dimenzovat hodnoty rezistorů R_{30} a R_{31} . Základní vztah (1) určující výstupní napětí za pomoci dvou rezistorů a referenčního napětí ($U_{REF} = 0,8\text{ V}$) obvodu NCP3170.

Vztah pro určení hodnoty rezistoru R_2

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{U_{REF}}{U_{OUT} - U_{REF}} \quad (1)$$

Dle doporučení katalogového listu byla zvolena hodnota $R_1 = 24,9\text{ k}\Omega$.

$$4,743\text{ k}\Omega = 24,9\text{ k}\Omega \cdot \frac{0,8\text{ V}}{5\text{ V} - 0,8\text{ V}} \quad (2)$$

Reálné hodnoty byly tedy zvoleny $24,9\text{ k}\Omega$ a $4,75\text{ k}\Omega$ s přesností 0,1 %.

Cívka L_3 na výstupním pinu „FSW“ je dimenzována na proud 1,2 A podle vztahu (3):

$$L_{OUT} = \frac{U_{OUT}}{I_{OUT} \cdot r_a \cdot F_{SW}} \cdot (1 - D) \quad (3)$$

$$16,2 \mu H = \frac{5 V}{1,2 A \cdot 30 \% \cdot 500 kHz} \cdot \left(1 - \frac{5 V}{12 V}\right) \quad (4)$$

D – je poměr výstupního napětí a napětí vstupního

r_a – zvolené výstupní zvlnění proudu na 30 %

F_{SW} – pracovní frekvence 500 kHz

L_{OUT} – indukčnost cívky L_3 (reálná hodnota 18 μH)

Hodnoty pro kompenzační smyčku z pinu „COMP“ tvoří odpor R_{27} , kondenzátory C_{32} a C_{33} .

Vztah pro určení kapacity C_{32}

$$C_{32} = \frac{\frac{U_{REF}}{U_{OUT}} \cdot gm}{2\pi \cdot F_{PO}} \quad (5)$$

$$3,78 nF = \frac{0,16 \cdot 201 \mu S}{2\pi \cdot 1,354 kHz} \quad (6)$$

gm – transkonduktance vnitřního zesilovače

F_{PO} – hodnota pólové frekvence podle katalogového listu

Spočítaná hodnota 3,78 nF odpovídá katalogové hodnotě 3,9nF, avšak reálná hodnota v zapojení byla použita 22 nF určena nástrojem pro design obvodů přímo od výrobce.

Vztah pro určení hodnoty rezistoru R_{27}

$$R_{27} = \frac{1}{2\pi \cdot C_{32} \cdot F_{PO}} \quad (7)$$

$$5,3 k\Omega = \frac{1}{2\pi \cdot 22 nF \cdot 1,354 kHz} \quad (8)$$

Spočítaná hodnota 5,3 k Ω podle vztahu z katalogového listu odpovídá řádově jak katalogovému listu, tak designéru výrobce. V reálném zapojení byla zvolena hodnota designéru a to 2,4 k Ω .

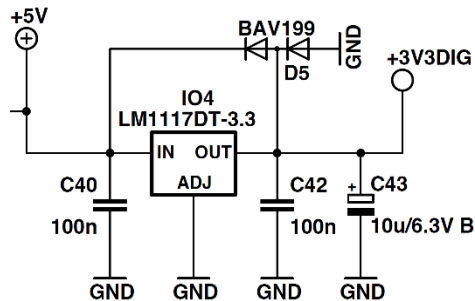
Vztah pro určení hodnoty C_{33}

$$C_{33} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{27} \cdot F_{ESR}} \quad (9)$$

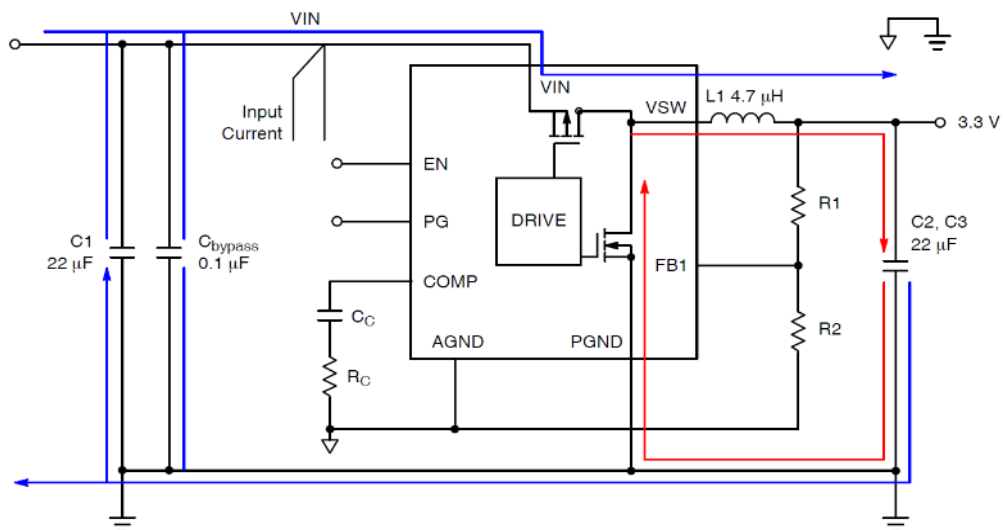
$$40 pF = \frac{1}{2\pi \cdot 5,3 k\Omega \cdot 750kHz} \quad (10)$$

Tato hodnota odpovídá reálné použité kapacitě v kompenzační smyčce obvodu, 39 pF.

Vstupní a výstupní kapacity obvodu C_{30} , C_{31} , C_{37} a C_{38} byly zvoleny rovněž nástrojem výrobce. Tento obvod nevyžaduje výstupní diodu, nýbrž tranzistor integrován v pouzdru zajišťuje tok proudu při rozpojení spínacího tranzistoru (viz obr. 4-11). Ochranné zpoždění při zapnutí obvodu na pin „ENABLE“ nebylo aplikováno žádné, nýbrž k tomuto účelu slouží vstupní transil dimenzován na průraznou hodnotu 15 V.



obr. 4-11 Stabilizátor na 3,3 V



obr. 4-12 Ilustrační schéma toku proudů NCP3170 [28]

Součástky v reálném osazení byly zvoleny podle simulačního nástroje od výrobce, který zaručuje spolehlivější funkčnost zapojení, neboť tento nástroj zohledňuje více aspektů návrhu, jenž nejsou uvedeny v dostupném katalogovém listu.

4.1.8.1 Měření napájecího zdroje koncentrátoru

Při stavbě modemu bylo nutné ověřit správnou funkci zdroje před plným osazením a oživením zařízení. Za tímto účelem byla provedena základní měření a to měření napětového zvlnění na výstupu, dále skokové připojení odporové zátěže s odběrem 1,2 A a byla změřena zatěžovací charakteristika. K měřením byla jedna základní deska z dvojice koncentrátorů. Použité přístroje pro měření byli:

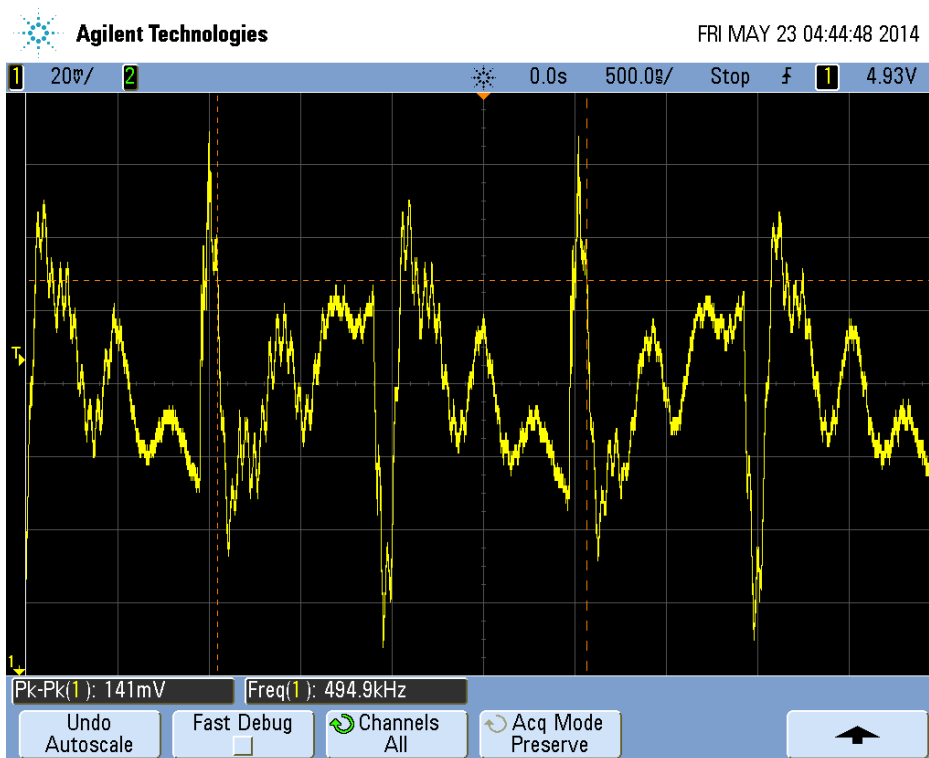
napájecí zdroj Tesla 2CH 0-30 V; multimetr UT60A; reostat 0-30 Ω ; osciloskop Agilent DSO6052A

Napětové zvlnění na výstupu PWM konvertoru

Měření byla uskutečněna po krocích výstupního proudu 200 mA, kde zvýrazněné hodnoty v *tab. 4-2*, určují maximální odběr PLC modulu a dimenzovaný proud. Průběh při 1,2 A na *obr. 4-13*.

I_{OUT} [mA]	Zvlnění V_{PP} [mV]
1 200	141
1 000	96
800	85
620	68
400	59
200	54
0	39

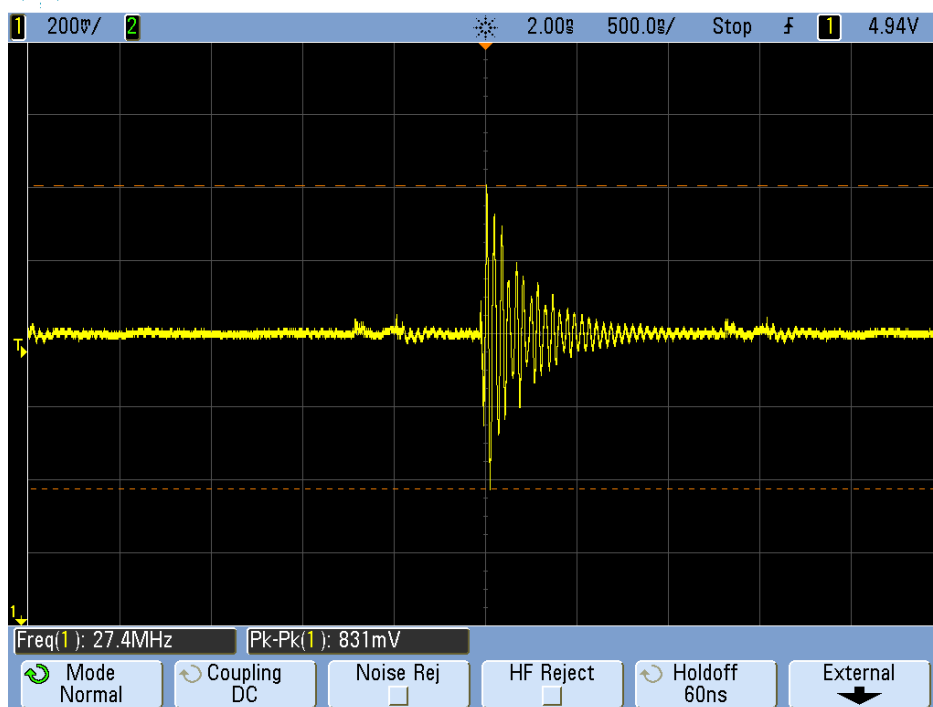
tab. 4-2 Měření napětového zvlnění



obr. 4-13 Průběh V_{OUT} s odběrem 1,2 A

Reakce na skokové připojení zátěže

K tomuto měření bylo pro rychlé sepnutí zátěže k výstupu a eliminaci zákmitů kontaktů, použito elektromagnetické relé s DC cívkou, spínané při 12 V. Průběh na *obr. 4-14* demonstruje reakci na připojení zátěže s proudovým odběrem 1,2 A. Opakovaným měřením byl zjištěn přibližný rozsah zvlnění, a to 500 – 1 600 mV.



obr. 4-14 Reakce na skokové připojení zátěže

Měření zatěžovací charakteristiky

Pomocí zatěžovací charakteristiky (obr. 4-16) byl zjišťován vnitřní odpor zdroje. Pomocí základního vztahu 11 byly spočítány hodnoty vnitřního odporu, ze kterých byl následně určen vážený průměr. Zjištěná hodnota vnitřního odporu zdroje byla $R_i = 66,9 \text{ m}\Omega$.

I_x [mA]	$U_0 - U_x$ [mV]	R_i [m Ω]
0	0	–
200	20	100
400	25	62,5
600	30	50
800	50	62,5
1 000	60	60
1 200	80	66,7

obr. 4-15 Měření zatěžovací charakteristiky zdroje koncentrátoru

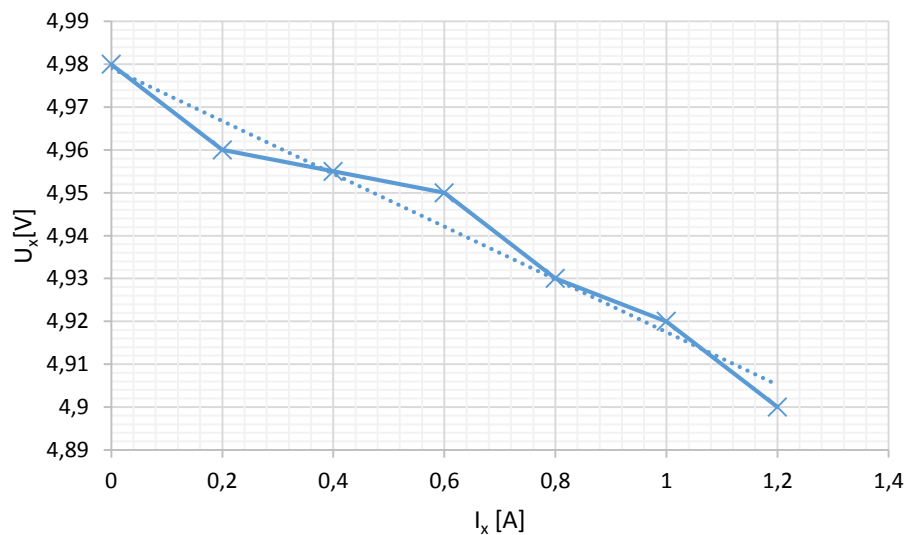
$$R_i = \frac{U_0 - U_x}{I_x} \quad 11$$

R_i – vnitřní odpor zdroje

U_0 – napětí na prázdko - 4,98 V

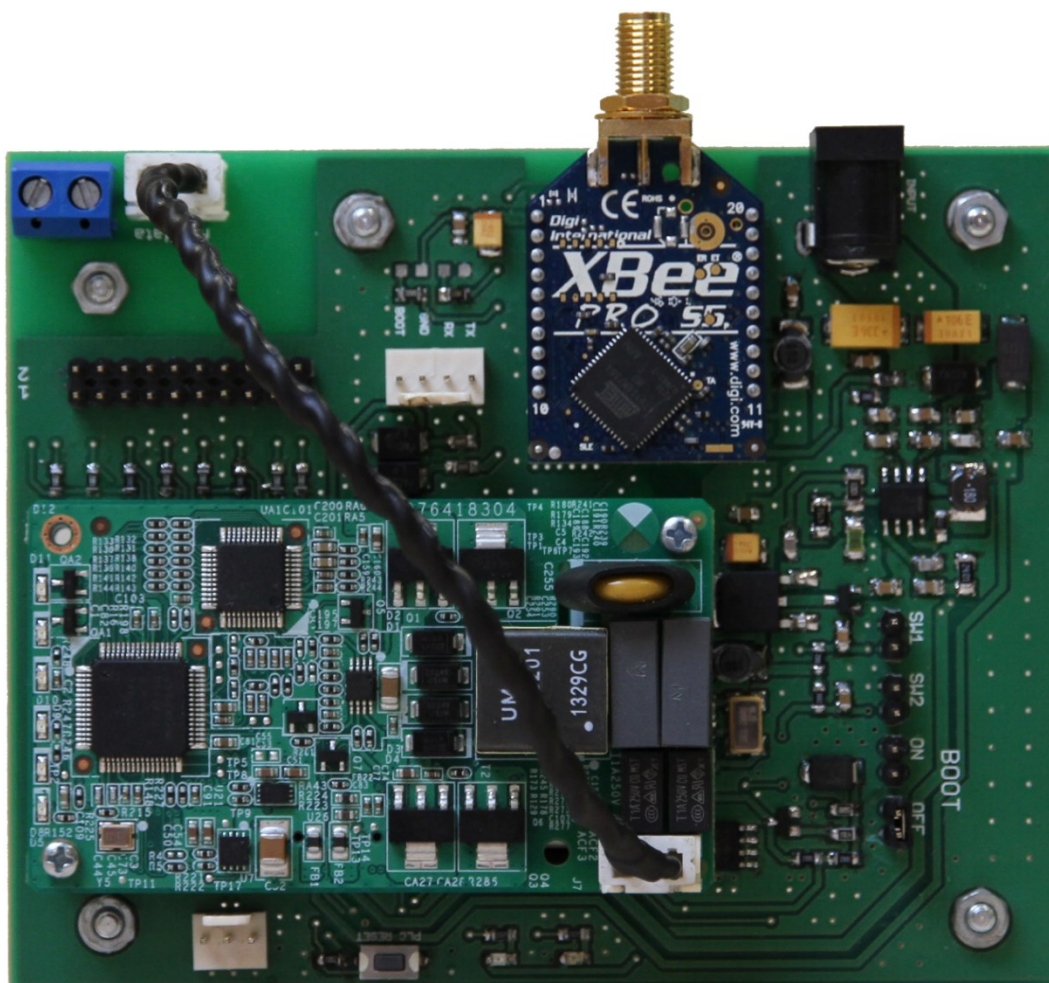
U_x – hodnota napětí na zatěžovacím odporu

I_x – hodnota protékajícího proudu na zatěžovacím odporu

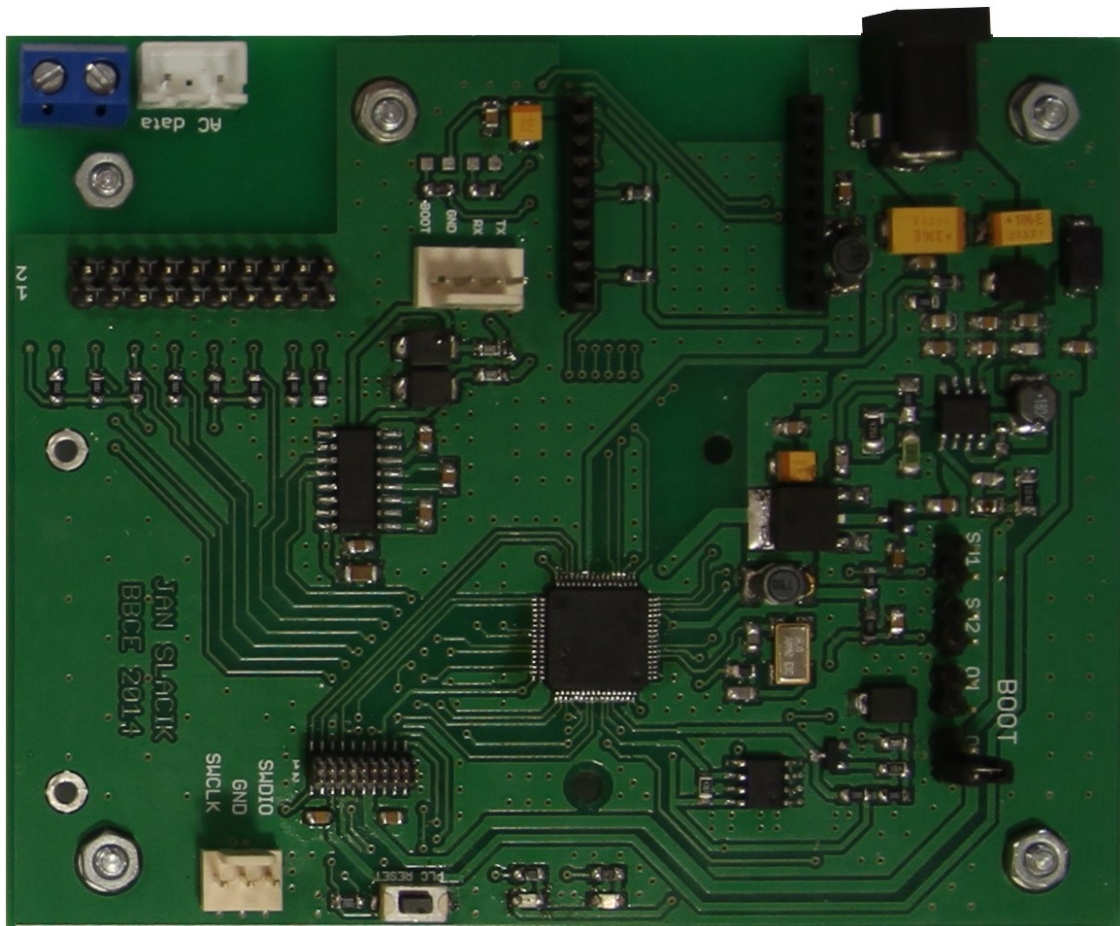


obr. 4-16 Zatěžovací charakteristika PWM konvertoru

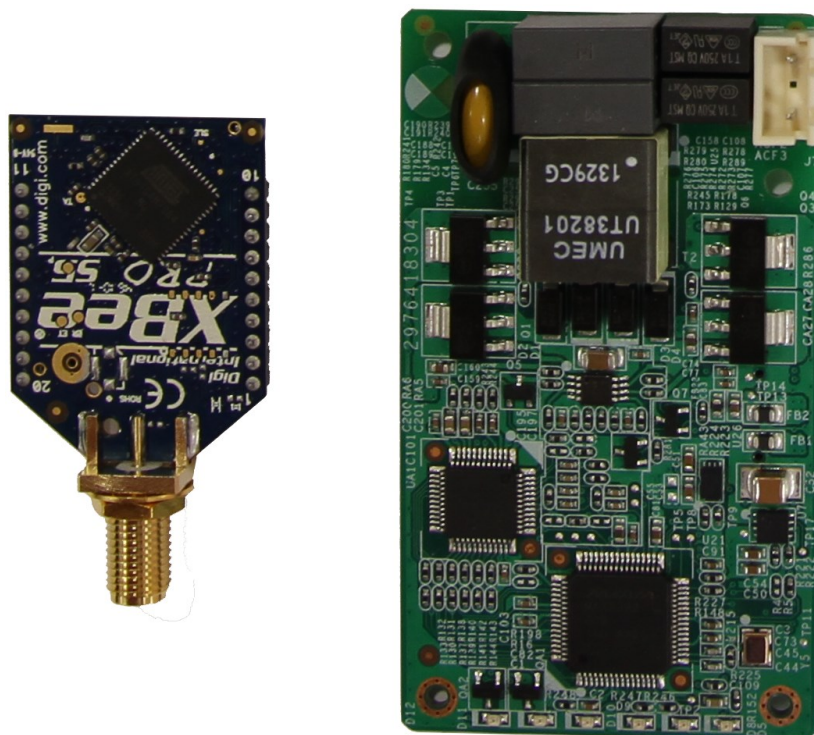
4.2 Fotodokumentace realizovaného zařízení



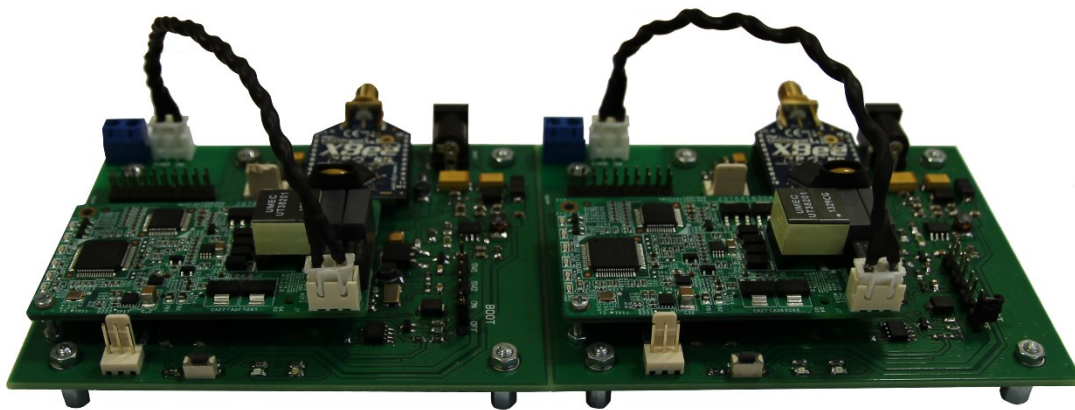
obr. 4-17 Osazený modem



obr. 4-18 Základní deska modemu



obr. 4-19 Rádiový modul a PLC modul



obr. 4-20 Oba zhotovené modemy

4.3 Měření realizovaného modemu

Pro ověření funkčnosti modemu a zjištění reálných výsledků v praxi, bylo realizováno několik sérií měření. Měření tohoto modemu byla realizována v různých podmínkách – různé vzdálenosti, při různých rušeních v síti na daný typ kódování. Při každém měření byly také dodržovány stejné parametry odesílaných dat. Vždy se jednalo o 1 000 paketů o maximální hodnotě dané typem modulace a maximální zesílení vysílače – 6 dB a bez použití ověřovacích zpráv typu ACK. První série měření probíhala na Ústavu UREL v podobných podmínkách jako u měření kitů od Texas Instruments (*Měření standardů PRIME a G3-PLC*) s rozdílem použitého vedení. Měření, které nejsou uvedena v tomto dokumentu, jsou uložena v podobě zpracovaných grafů a tabulek na příloženém DVD.

Režim klíčování	Velikost paketu [bit]
ROBO	133
ATM	automaticky
DBPSK	235
DQPSK	235
D8PSK	235

tab. 4-3 Maximální velikosti odesílaných paketů

V sérii měření s kity TMDSPCKIT-V3 na Ústavu radioelektroniky, bylo využito pouze rozvodné sítě v zástavbě. K měření tohoto modemu byla topologie vedení vytvořena pomocí kabelů v různých vzdálenostech s úsekem ve zdi a také s otevřeným koncem bez napájecího napětí. Měření probíhala pro všechny dostupné režimy modulací (ROBO, DBPSK, DQPSK, D8PSK, ATM) při maximálním zesílení vysílače nastaveném na +6 dB pro standard G3-PLC (mimo režimu ATM).

Kromě měření na Ústavu VUT byla také provedena měření v centru pro inteligentní energetiku firmy Modemtec, sídlící v Třinci, kde bylo možné měřit přenosy na větší vzdálenosti, až na jeden kilometr. Tato společnost se zabývá výhradně PLC komunikací. Jejich zařízení se orientují na modemy využívající výhradně FSK oproti zde využívanému modulačnímu typu OFDM. Bylo zde také možné měřit při definovaném rušení v síti, přičemž byly zjištěny parametry šumu, které určují hranice pro úspěšnou komunikaci modemů (*Měření v centru pro inteligentní energetiky*).

Všechna měření byla realizována pomocí programu „MAX2992 Simple Connect“ (obr. 4-21) komunikující s firmwarem „Maxim Simple MAC“ [30]. Tento software slouží pouze základním účelům. Umožňuje nastavení pouze těchto parametrů:

Volba komunikačního pásma

Možnosti frekvenčních pásem:

- (USA) Plné FCC – 145-478 kHz
- (JPN) ARIB – 201-384 kHz
- (JPN) ARIB1 – 154-262 kHz
- (JPN) ARIB2 – 154-412kHz
- (JPN) ARIB3 – 304-412 kHz
- (EU) CENELEC A – 36-90 kHz
- (EU) CENELEC B – 98-121 kHz
- (EU) CENELEC BC – 89-137 kHz

Operační mód

- RX a TX – režimy přijímače a vysílače komunikační topologie „Point-To-Point“
- FILE RX/TX – režim posílání textových zpráv ideálně v reálném čase (dialogové okna „RX“ a „TX“ na *obr. 4-21*)

Režim modulace

Možnosti popsané v *kapitole 4.1.7*.

Zesílení vysílače v dB

Tyto hodnoty je možné volit od -10 dB do +6 dB v každém režimu, mimo režimu ATM.

Počet paketů, a jejich velikost

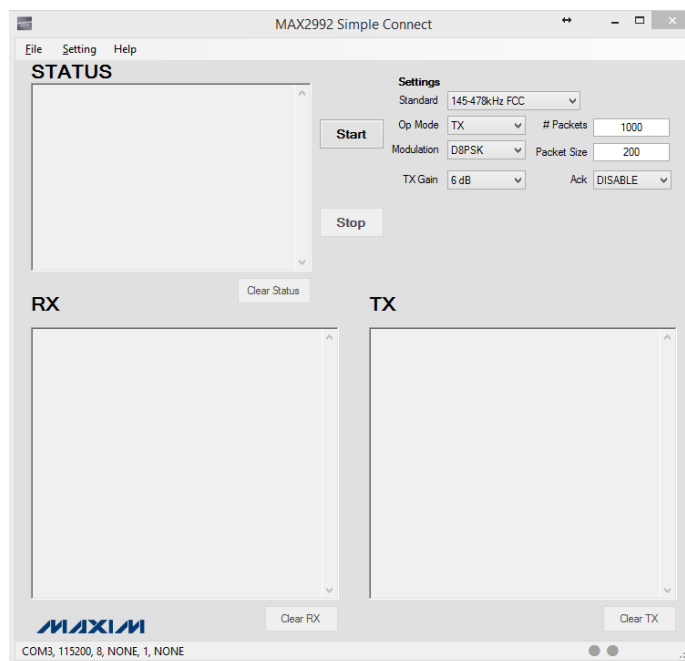
Nastavení počtu paketů k odesílání je limitováno na počet 10^8 . Maximální velikost paketu je určena modulací a vybraným frekvenčním pásmem.

Potvrzování zpráv

Možnost povolení nebo zakázání ověřovacích zpráv. Při povolení ACK je přenos bezchybný na úkor celkové rychlosti přenosu za podmínky, že nebyla ničím zásadním komunikace přerušena (odpojením datového kabelu, velmi velké rušení, atd.).

Výstup dat

Výstup všech měřených dat je poměrně v nepřehledné a nepoužitelné formě. Pro zpracování výsledku do přehledných tabulek a grafů z měření, byl vytvořen pomocný program pro konverzi těchto dat v Excelu. Tento konvertor je uvedený na DVD.



obr. 4-21 Software MAX2992 Simple Connect

4.3.1 Měření UREL

Měření na ústavu radioelektroniky proběhlo ve třech sériích měření, které se odlišovaly topologií. První a druhá topologie byla sestavena pomocí kabelů o délkách 50 a 80 m. Třetí obsahovala uzel ve vzdálenosti 50 metrů od přijímače, kde byla připojena odbočka s volným koncem o délce 30 m. Tento uzel byl také přiveden do vedení ve zdi o délce 10 metrů, jak demonstruje *tab. 4-4*. Data, vyplývající z měření jsou: Počet právě odeslaných dat typu TX a počet právě přijatých dat typu RX v b/s.

Měření č.1		Měření č.2		Měření č.3	
CENELEC A 36 - 90 kHz	FCC 145 - 478 kHz	CENELEC A 36 - 90 kHz	FCC 145 - 478 kHz	CENELEC A 36 - 90 kHz	FCC 145 - 478 kHz

tab. 4-4 Topologie vedení sestavené pro měření na URELu

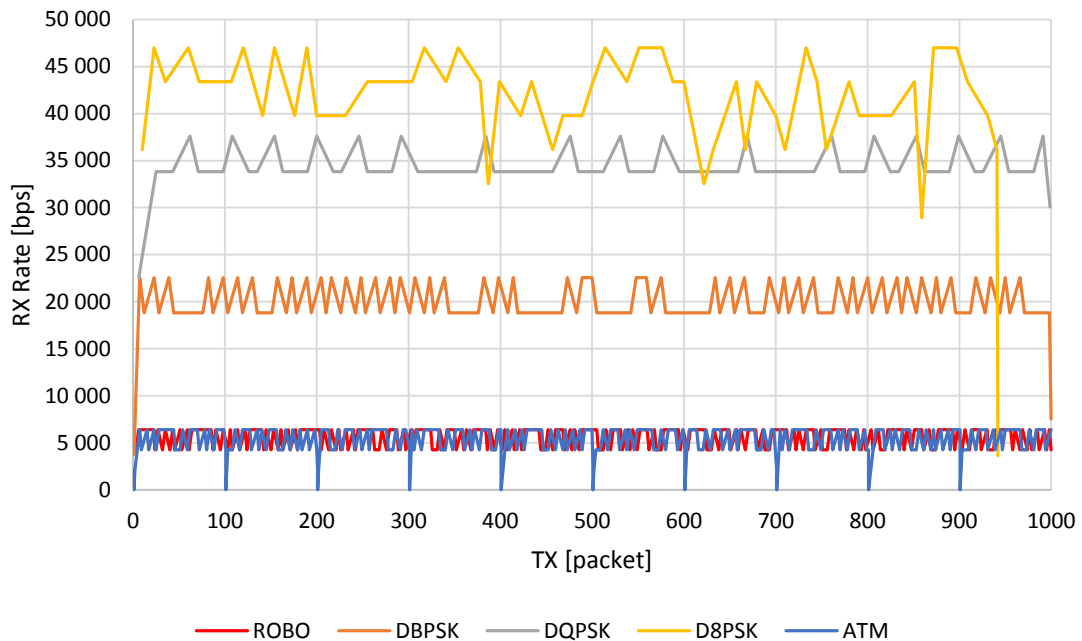
UREL, měření č.1

První měření probíhalo ve frekvenčním pásmu CEN A ve všech režimech modulací s relativně nízkým rušením v síti. V tomto měření se projevily typické vlastnosti jednotlivých modulací v daném pásmu. V tomto měření se očekával přenos bez chyb nejen u nejrobustnějších režimů ale také u více stavových modulací. Přenosy nejrobustnějšími režimy ROBO, ATM a DBPSK byly s nulovou chybovostí a velmi dobrou stabilitou.

U režimu ATM je vidět, že každých 100 paketů přijímač nepřijímá. To je způsobeno předáváním tzv. tónovacího indexu, kterým přijímač informuje vysílače o sub nosných, které budou použity k odeslání „falešných“ dat, což způsobí, že vysílače tyto subnosné nebude využívat

pro data. Tím se zabezpečí robustnější přenos a efektivnější využití komunikačního pásma. [27]

Přenos s modulacemi využívající více stavů (DQPSK a D8PSK) proběhl s minimální chybovostí. Kde u D8PSK lze pozorovat vyšší nestabilitu na obr. 4-22. Jednotlivé paketové chybovosti jsou uvedeny v tab. 4-5.

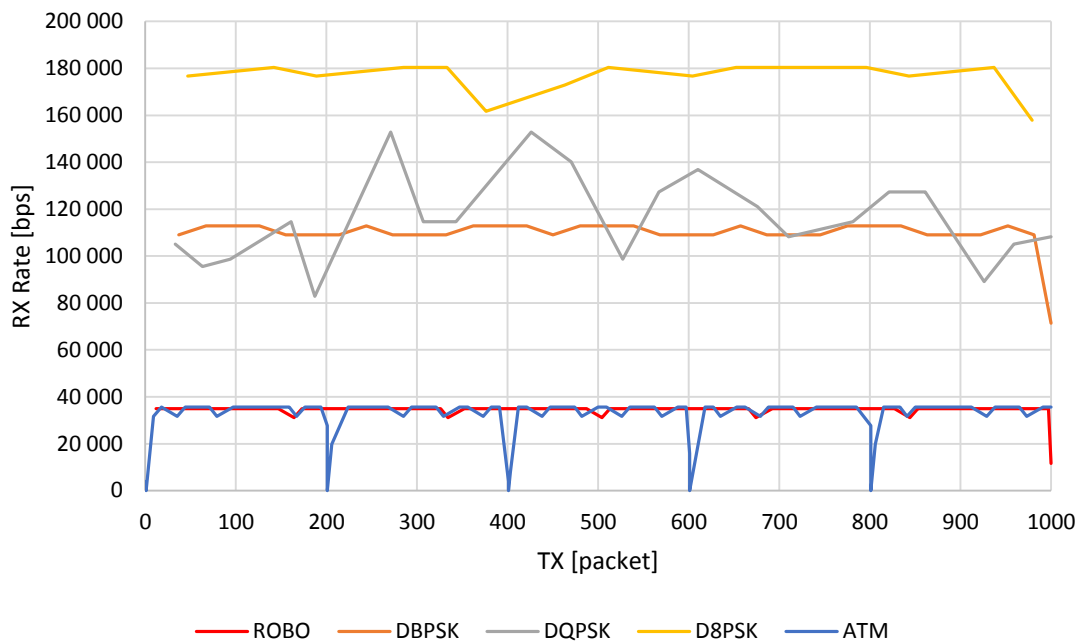


obr. 4-22 Měření č.1 – UREL, 50 m, CENELEC A

Režim klíčování	PER [%]
ROBO	0
ATM	0
DBPSK	0
DQPSK	0,1
D8PSK	5,8

tab. 4-5 PER měření č.1 – UREL, 50 m, CENELEC A

Totožné měření proběhlo pro frekvenční pásmo FCC. V širším frekvenčním pásmu jsou vhodnější podmínky pro více stavové modulace. Zejména kvůli většímu počtu nosných a širšímu pásmu. Proto byly zde dosaženy více než dvojnásobné rychlosti u více stavových typů modulací. Můžeme opět pozorovat robustnost přenosu v režimech ROBO a ATM. Nižší chybovost dokazuje lepší stabilitu přenosu a kvality přenosu i při vyšších rychlostech. Tyto tvrzení se dokázali opakovanými měřeními.



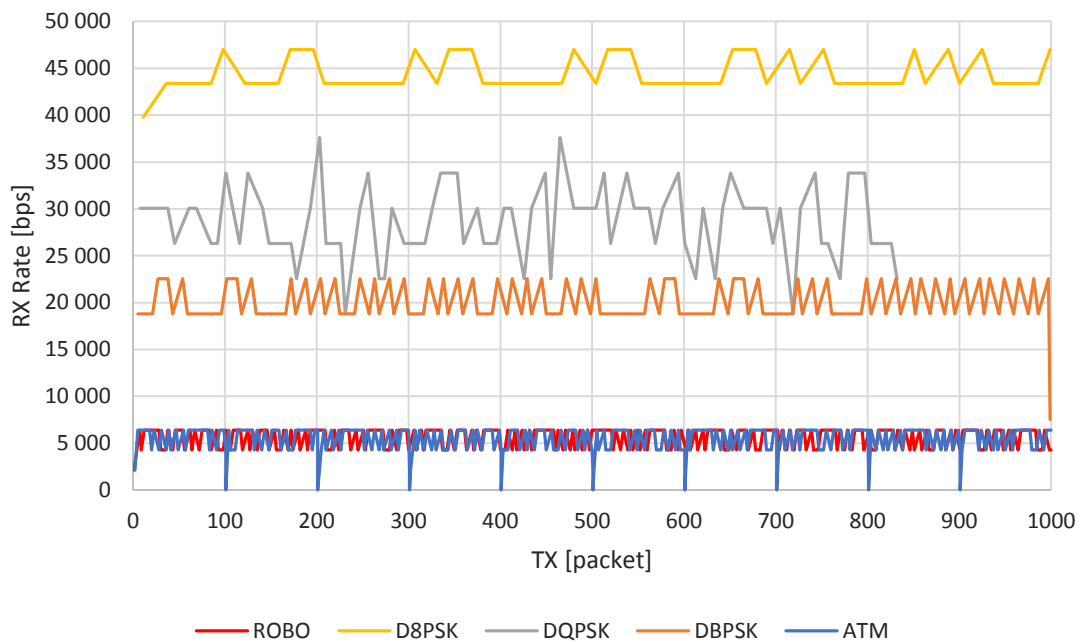
obr. 4-23 Měření č.1 – UREL, 50 m, FCC

Režim klíčování	PER [%]
ROBO	0
ATM	0
DBPSK	0
DQPSK	1,5
D8PSK	1

tab. 4-6 PER měření č.1 – UREL, 50 m, FCC

UREL, měření č.2

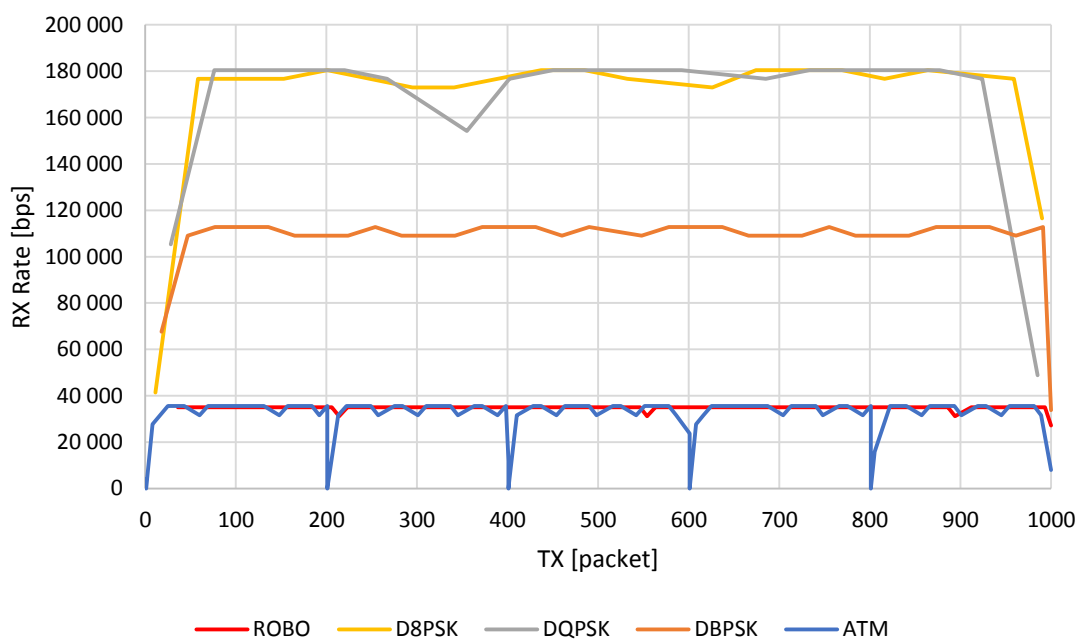
U druhého měření se topologie sítě upravila z 50 na 80 m za účelem zjištění vlivů změny vzdálenosti řádově 10 metrů. Malá odchylka v chybovostech více stavových modulací se sice projevila, ale opakovaným měřením bylo dosaženo pokaždé velmi podobných výsledků jako u předchozího měření.



obr. 4-24 Měření č.2 – UREL, 80 m, CENELEC A

Režim klíčování	PER [%]
ROBO	0
ATM	0
DBPSK	0,1
DQPSK	16,8
D8PSK	0,1

tab. 4-7 PER měření č.2 – UREL, 80 m, CENELEC A



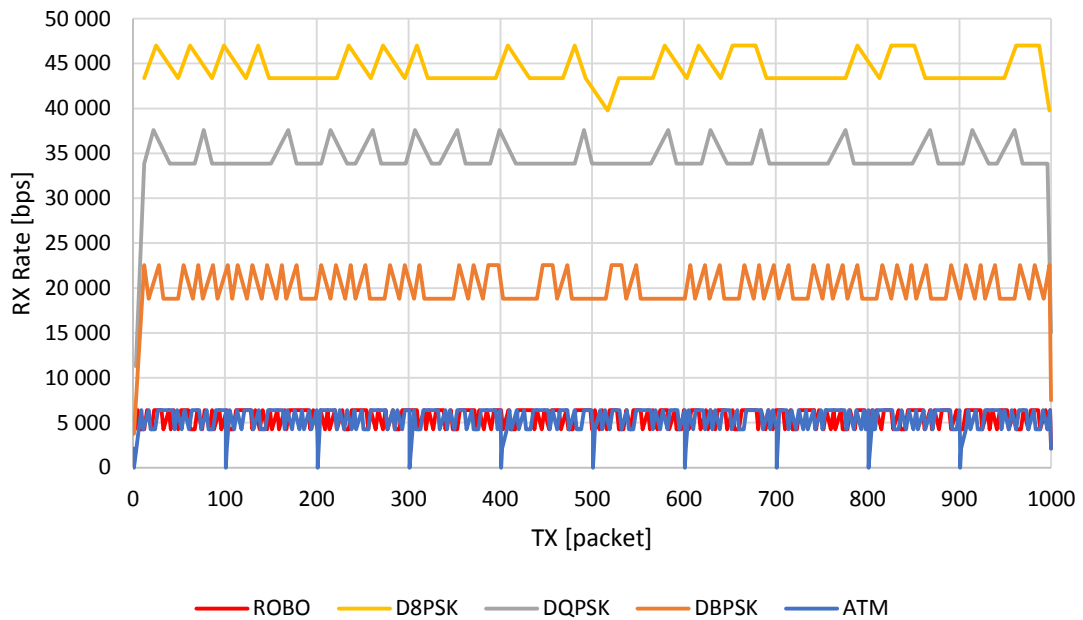
obr. 4-25 Měření č.2 – UREL, 80 m, FCC

Režim klíčování	PER [%]
ROBO	0
ATM	0
DBPSK	0
DQPSK	1,5
D8PSK	1

tab. 4-8 PER měření č.2 – UREL, 80 m, FCC

UREL, měření č. 3

Poslední typ topologie měření na Ústavu UREL, byla spíše experimentálního charakteru, a to za účelem zjistit vliv odbočky nějaké délky s otevřeným koncem na přenos. V tomto měření bylo dosaženo stejných výsledků jako u předchozích měření, jak je možno pozorovat na *obr. 4-26*.



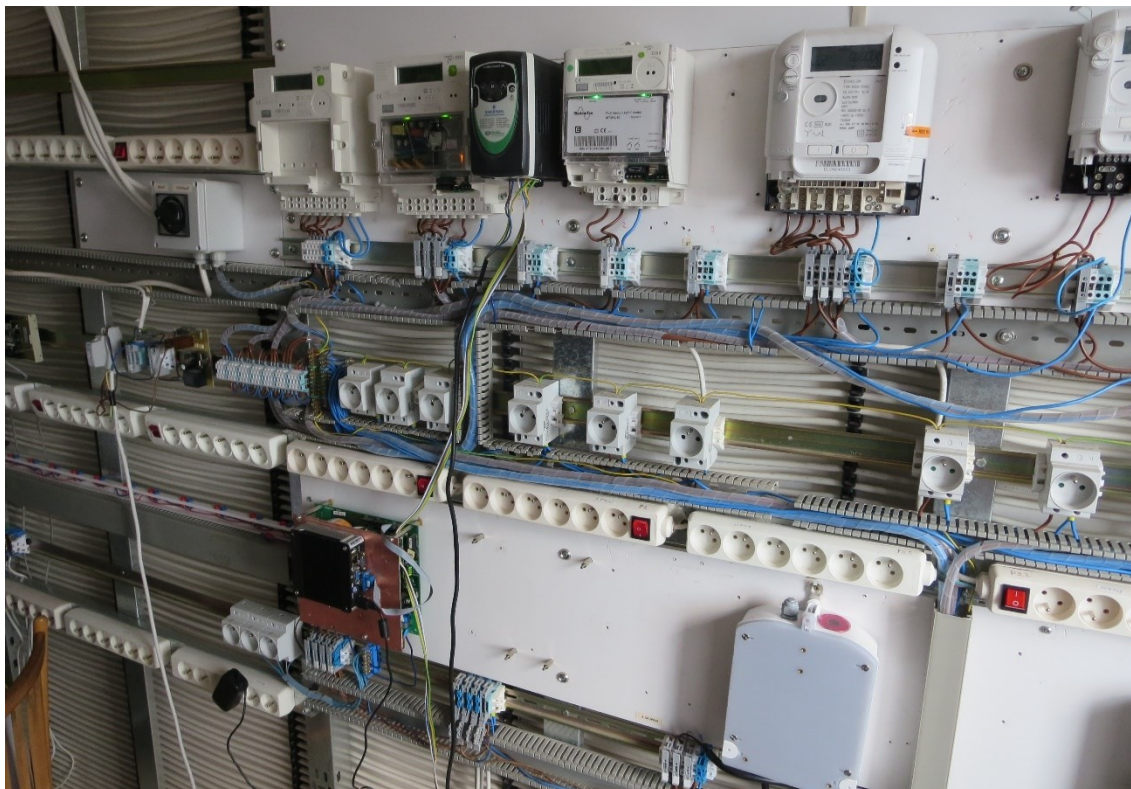
obr. 4-26 Měření č.3 – UREL, 50 m + open load 30 m, CENELEC A

Režim klíčování	PER [%]
ROBO	0
ATM	0
DBPSK	0
DQPSK	1,5
D8PSK	1

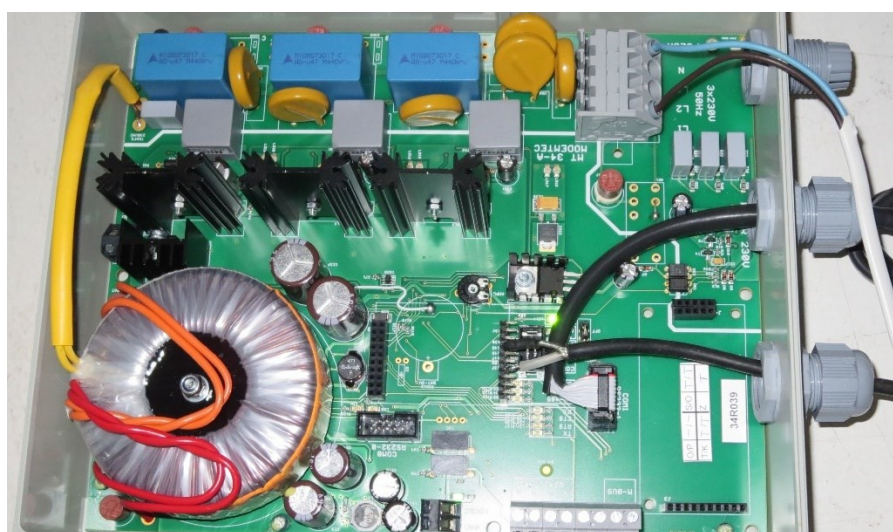
tab. 4-9 PER měření č.3 – UREL, 50 m + open load 30 m, CENELEC A

4.3.2 Měření v centru pro inteligentní energetiku – Modemtec

Jak je výše uvedeno, na tomto pracovišti (viz obr. 4-27) bylo možné měřit PLC přenos ve vzdálenosti až jednoho kilometru a byla zde možnost vysílat do sítě sinusový signál s nastavitelnou frekvencí o definované amplitudě generátoru. Tak je tvořeno rušení, které je modulováno na frekvenci napájecího vedení pomocí vazebních členů (viz obr. 4-28) stejným principem jako modulovaná data po síti. Bylo také možné vysílat do sítě šum měniče o výkonu 0,25 kW připojeného ke komutátorovému motoru. Můžeme tedy konstatovat, že se jednalo o definovatelné rušení. Bylo zjišťováno, za jakých podmínek mohou tato rušení ovlivňovat propustnost komunikace ve vzdálenostech vysílače a přijímače 500 a 1 000 metrů. Ostatní parametry byly totožné s předchozími měřeními.



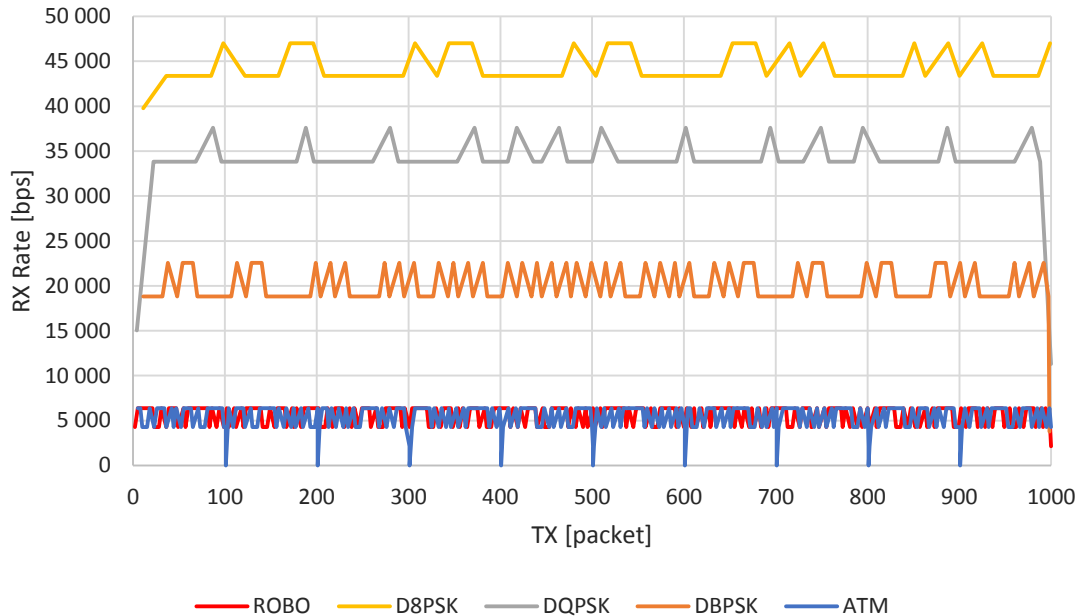
obr. 4-27 Měřicí pracoviště – ModemTec



obr. 4-28 Vazební člen na výstupu generátoru

Modemtec, měření č. 1

První měření demonstruje komunikaci modemů ve vzdálenosti 500 metrů bez výrazného rušení. Toto měření potvrzuje stabilní komunikaci všech dostupných typů klíčování v dobrých podmínkách.



obr. 4-29 Měření č.1 – ModemTec, 500 m, CENELEC A

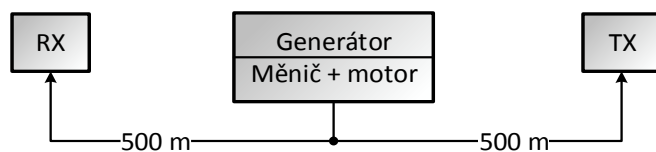
Režim klíčování	PER [%]
ROBO	0
ATM	0
DBPSK	0,2
DQPSK	0
D8PSK	0,1

tab. 4-10 PER měření č.1 – ModemTec, 500 m, CENELEC A

Bylo zde ověřeno, že vzdálenost 500 metrů nemá na rychlosti žádný vliv oproti měřením na kratší vzdálenosti (viz obr. 4-24). Stejných výsledků bylo dosaženo i na vzdálenost modemů jednoho kilometru. Tedy elektrické vedení řádově stovek metrů (dá se předpokládat i jednotek kilometrů) nijak neovlivňuje komunikaci. Z těchto důvodů není graficky znázorněno měření v pásmu FCC a další měření budou zkoumat pouze vliv definovaného rušení na komunikaci v určité vzdálenosti.

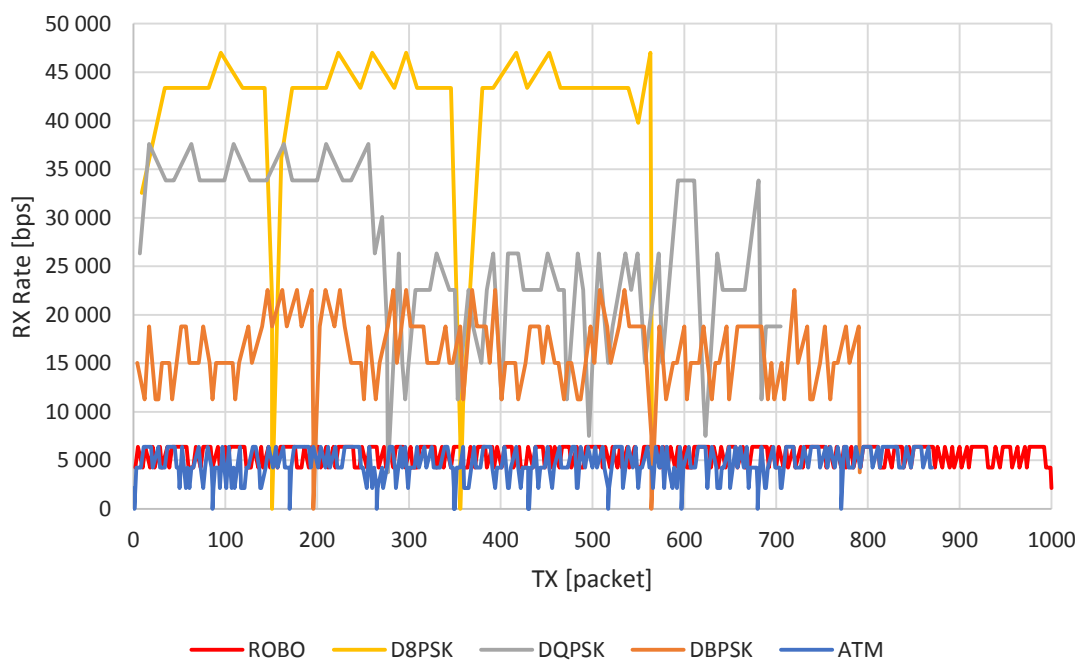
Modemtec, měření č.2

V tomto měření bylo využito napěťového měniče připojeného ke komutátorovému motoru umístěného od vysílače a přijímače 500 metrů jak je zobrazeno v ilustraci topologie na obr. 4-30.



obr. 4-30 Topologie sítě měření s definovaným rušením

Napěťový měnič byl v průběhu měření přenosů všech typů klíčování zapnut a vypnut celkem 3x. Výsledky těchto měření na obr. 4-31 demonstrují pokles rychlosti v časovém intervalu, kdy byl měnič s motorem spuštěn. Celkově se také projevila vyšší chybovost jednotlivých klíčování. Je zde vidět nejvyšší chybovosti od osmistavového fázového klíčování až po dvoustavové. Také lze pozorovat, že v režimu ATM se výrazně zvýšila chybovost navzdory volenému klíčování ROBO po celou dobu přenosu, kde přenos v samotném režimu ROBO dosáhl 0 % paketových ztrát. Z časových důvodů se v centru pro inteligentní energetiku nepodařilo pro tento scénář měření zopakovat v pásmu FCC, nicméně je nutno konstatovat, že k dnešku není povoleno v Evropě komunikovat po napájecím vedení v tomto pásmu, a tedy měření v pásmu CENELEC A, bylo pro tento projekt upřednostněno.



obr. 4-31 Měření č.2 – ModemTec, 1 km (měnič a motor), CENELEC A

Režim klíčování	PER [%]
ROBO	0
ATM	13
DBPSK	20,9
DQPSK	29,5
D8PSK	43,5

tab. 4-11 PER měření č.2 – ModemTec, 1 km (měnič a motor), CENELEC A

Modemtec, měření č.3

Tato série měření je ve třech bodech. První a druhý bod popisuje vliv rušení z generátoru. Do sítě bylo vždy možné generovat jeden signál definovaný frekvencí a amplitudou, na základě čeho se zjišťovali parametry rušení, které celkově znemožňovaly komunikaci na vzdálenost jednoho kilometru. Třetí bod zkoumá komunikaci přes jiné fáze.

1. Komunikace probíhala v pásmu CENELEC A za použití klíčování ROBO, pro zjištění maximálních mezí nulové propustnosti komunikace. Zdroj rušení byl umístěn v bezprostřední blízkosti vysílače. obr. 4-32 zobrazuje přenosové spektrum.

Změřené parametry rušení pro bezproblémovou komunikaci:

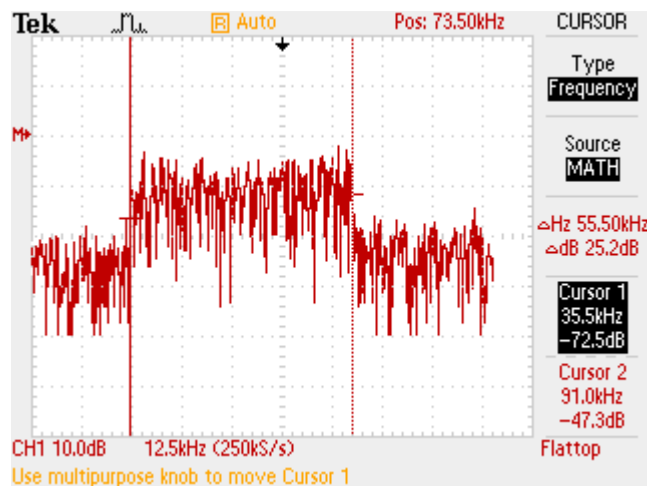
- Amplituda signálu $V_{pp} = 400$ mV
- Frekvence signálu $f = 5$ -15 kHz

Změřené parametry rušení pro výpadek komunikace:

- Amplituda signálu $V_{pp} = 2,4$ V – amplituda signálu značně ovlivňovala pásmo propustnosti datového signálu (tato hodnota celkově zrušila komunikaci)
- Frekvence signálu $f > 15$ kHz – zvýšení frekvence způsobovala problematickou komunikaci (nižší rychlosti, zvýšená chybovost)

Parametry datového signálu bez rušení:

- Amplituda signálu $V_{pp} = 250$ mV
- Šířka pásma komunikačního kanálu 37,2 - 92,5 kHz
- Dolní hladina pásma -61 dB
- Horní hladina pásma -42 dB



obr. 4-32 Spektrum pásma CENELEC A

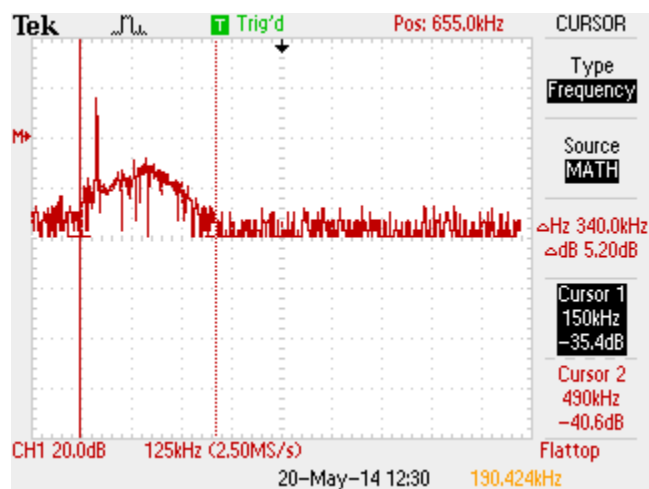
2. Přenos byl uskutečněn v pásmu FCC v režimu klíčování ATM, kde byl zdroj rušení opět umístěn v bezprostřední blízkosti vysílače.

Změřené parametry rušení pro bezproblémovou komunikaci:

- Amplituda signálu $V_{pp} = 2$ mV
- Frekvence signálu $f = 145$ - 490 kHz

Změřené parametry rušení pro výpadek komunikace:

- Amplituda signálu $V_{pp} = 4$ V (skoky až k 10 V)
- Frekvence signálu $f = 29,8$ kHz
- Úzkopásmové rušení na frekvenci 190 kHz na obr. 4-33, kde $V_{pp} = 6$ V



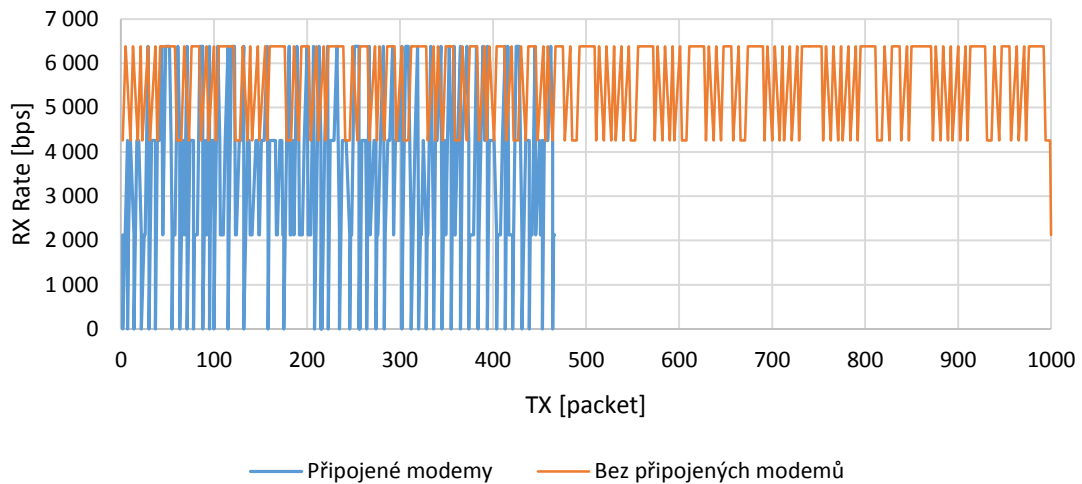
obr. 4-33 Spektrum pásma FCC s úzkopásmovým rušením

Parametry datového signálu bez rušení:

- Amplituda signálu $V_{pp} = 2$ V
 - Šířka pásma komunikačního kanálu 130 - 490 kHz
 - Dolní hladina pásma -57 dB
 - Horní hladina pásma -26 dB
3. Komunikace po vedení přes sousední fáze v pásmu CENELEC A. Pracoviště vybavené vedením o délce jeden kilometr bylo třífázové. Sousední fáze byly od sebe vzdálené maximálně 2 cm. Z toho vyplývá, že docházelo k velkým přeslechům, nicméně komunikace s nízkou chybou bylo dosaženo pouze komunikací v robustnějších režimech mezi fázemi L1-L2 (ROBO, ATM, DBPSK). Při přenosu mezi fázemi L1-L3 byl zaznamenán pokles rychlostí robustnějším klíčováním cca o 50 %. Komunikace s více stavovými modulacemi neproběhly.

Modemtec, měření č.3

Poslední měření na pracovišti centra pro inteligentní energetiku porovnává komunikaci modemů při připojených PLC modemů MT39-L1-ver.R [31], společnosti ModemTec s.r.o., kterých bylo celkem připojeno do sítě 13. Modemy mezi sebou v dobu měření nijak nekomunikovali, nýbrž byly pouze v režimu naslouchání. Skutečnost, že každý modem impedančně zatěžoval vedení svými vazebními LC členy, byla snížena amplituda přenášených dat. V tomto scénáři proběhlo měření pouze v režimu CENELEC A, za použití klíčování ROBO. Průběhy přenosů impedančně zatížené a nezatížené sítě, jsou zobrazeny na obr. 4-34. PER tohoto měření byla 54,3 %.



obr. 4-34 Měření č.3 – ModemTec, 1 km, rušení PLC modemy, CENELEC A

4.3.3 Shrnutí měření

Jak je vidět v tab. 4-12 a předchozích měřeních tohoto standardu, bylo dosaženo velmi uspokojivých výsledku v pásmu FCC jak v minimálně rušeném tak i ve více rušeném vedení.

Jelikož není možné v Evropě a tedy i na území ČR používat toto pásmo, je potřeba přizpůsobit komunikaci normě CENELEC EN 50065-1, kde pro nasazení do praxe jsou nejvhodnější modulační techniky ROBO a ATM. Tyto typy klíčování obstáli velmi dobře i ve více rušeném prostředí a to jak stabilní rychlostí, tak ztrátovostí PER. Jak bylo uvedeno v kapitole 4.3 uvedeno, veškerá komunikace probíhala bez ověřovacích zpráv ACK. Bylo také ověřeno, že tento režim skutečně zaručuje kvalitní přenos s 0 % PER i při vyšším rušení.

Podařilo se také ověřit skutečnost, že jsou modemy schopny komunikovat v řádech kilometrů bez použití opakováče a to v obou komunikačních pásmech stabilním přenosem. Výhoda režimu ATM oproti ROBO je, že je možné ji 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. V případě absolutního výpadku, je k dispozici rádiový modul který plně nahradí PLC komunikaci (za splnění podmínek rádiové komunikace).

	Pásmo	CENELEC A	FCC
Propustnost klíčování [kb/s]¹ Chybovost PER [%]²	ROBO	6 384	35 568
	PER	0,0	0,0
	ATM	18 800	180 480
	PER	13,0	0,0
	DBPSK	22 560	112 800
	PER	0,1	0,0
	DQPSK	37 600	140 096
	PER	16,8	1,5
	D8PSK	47 008	210 144
	PER	5,8	2,1
Povolené rušení	V _{PP} [mV]	400	200
	f [kHz]	5-15	145-490
Parametry datového signálu v napájecím vedení	V _{PP} [V]	0,25	2
	Dolní hladina pásma	-61 dB	-57 dB
	Horní hladina pásma	-42 dB	-26 dB
	Komunikační pásmo [kHz]	37,2-92,5	130-490

tab. 4-12 Shrnutí výsledků měření

¹ maximální změřené hodnoty daného klíčování

² maximální dosažené – nesouvisí s uvedenou rychlostí

5 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo prostudovat dostupné standardy a dostupné obvody pro úzkopásmovou komunikaci po napájecím vedení, s větší rychlostí než 19,2 kb/s a hardwarově realizovat takové zařízení s ochranou dat proti chybám.

Jsou zde představeny základní principy komunikace PLC, starší a novější úzkopásmové modemy (některé dle výrobce dosahují maximálních rychlostí až do 500 kb/s). Dále jsou popsány a porovnány dostupné standardy, které je možno implementovat do podporovaných čipových sad.

Porovnáním dostupných standardů vychází jako nejvhodnější varianta, již uvedený standard G.hnem, kterého vývoj byl dokončen jako poslední. Přináší pokrokovější, rychlejší a spolehlivější modulační techniky. V pořadí další jsou G3-PLC a PRIME. PRIME může být upřednostňován kvůli vyšším rychlostem na fyzické vrstvě. Oproti G3-PLC ale neumožňuje komunikaci v širších pásmech (FCC) a také neumožňuje dostatečně robustní komunikaci. Z toho důvodu realizovaný modem obsahuje implementaci G3-PLC standardu, realizovaný čipovou sadou MAX2991/2992 v podobě modulu. Dále je zařízení rozšířeno o rádiový modul XBee. Modem plní funkci datového koncentrátoru.

Uskutečnily se série měření, kterými se dokázaly základní principy PLC modemů a jejich komunikace v různých podmínkách napájecího vedení odpovídajících praxi. K prvnímu sérii měření byl využit vývojový kit od Texas Instruments k porovnání standardů PRIME a G3. Výsledky těchto měření dosahovaly nízkých rychlostí. Bylo zjištěno, že další nezávislá měření těmito kity, vykazovala stejných výsledků, jak popisuje například uvedený zdroj [32]. Další série měření byly uskutečněny realizovaným modemem ve více scénářích rušení v několika variantách síťových topologií.

Měření probíhala na ústavu radioelektroniky VUT (UREL) pro pozorování komunikace v běžné praxi a v centru pro inteligentní energetiku ModemTec s.r.o., kde bylo možné podmínky provozu sítě částečně definovat. Výsledky těchto měření dokazují perspektivnější možnosti využití standardu G3-PLC v běžném provozu, z hlediska adaptivity, celkové stability a možnost přímé komunikace mezi uzly díky polygonální konfiguraci.

Dosažené celkové výsledky z měření realizovaného modemu jsou uvedené v *tab. 4-12*. Hodnoty odpovídají maximálním dosaženým rychlostem a chybovostem. Odpovídají také hodnotám, které uvádí výrobce PLC modulu.

Jak bylo uvedeno v *kapitole 4*, v další etapě vývoje bude vyvíjen software řídicí přenos v hybridní polygonální síti elektrickým vedením a rádiovou komunikací, v hlavním mikroprocesoru navržené základní desky koncentrátoru.

LITERATURA

- [1] WWW.HW.CZ. *Komunikace po síťovém rozvodu 220V* [online]. 1999 [cit. 2013-12-15]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/komunikace-po-sitovem-rozvodu-220v.html>
- [2] GALLI, Stefano, Anna SCAGLIONE a Zhifang WANG. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. *For the Grid and Through the Grid* [online]. 2011, č. 2 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://arxiv.org/pdf/1010.1973.pdf>
- [3] EN 50065-1:2001: Specification for signaling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz. General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances CENELEC.
- [4] Forward Error Correction. *Forward Error Correction* [online]. 2006, č. 2 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Forward_error_correction
- [5] Draft Specification for Powerline Intelligent Metering Evolution. *Draft Specification for Powerline Intelligent Metering Evolution* [online]. 2013, č. 1, s. 251 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: http://www.prime-alliance.org/wp-content/uploads/2013/04/PRIME-Spec_v1.3.6.pdf
- [6] MCLOUGHLIN, F., A. DUFFY a M. CONLON. Analysing domestic electricity smart metering data using self organising maps. *CIREN 2012 Workshop: Integration of Renewables into the Distribution Grid* [online]. 2008, č. 1 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: http://e2e.ti.com/cfs-file.ashx/_key/communityserver-discussions-components-files/171/6354.G3_5F00_Specifications_5F00_low_5F00_layers.pdf
- [7] SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. *IET Communications* [online]. 2012, č. 2 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9902-201210-1!!PDF-E&type=items
- [8] NASSAR, Marcel, Jing LIN, Yousof MORTAZAVI, Anand DABAK, Il KIM, Brian EVANS, Edward GUILLEN, Julian LOPEZ a Daniel PADILL. Local Utility Power Line Communications in the 3–500 kHz Band: Channel Impairments, Noise, and Standards. *IEEE Signal Processing Magazine* [online]. 2010, vol. 29, issue 5, s. 116-127 [cit. 2013-12-20]. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/9428>. Dostupné z: <http://users.ece.utexas.edu/~bevans/papers/2012/powerline/powerlineCommNoiseIEEESPMDraft.pdf>
- [9] Referenční model ISO/OSI. In: *Referenční model ISO/OSI* [online]. 2005 [cit. 20.12.2013]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Referen%C4%8Dn%C3%AD_model_ISO/OSI#Vrstvov.C3.BD_model
- [10] Referenční model ISO/OSI - sedm vrstev. *Referenční model ISO/OSI - sedm vrstev* [online]. 2010, č. 1 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://pc-site.owebu.cz/?page=ISO-OSI-12>

- [11] LonWorks. *LonWorks* [online]. 2009, č. 1 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/LonWorks>
- [12] Opatření k eliminaci vlivu vícecestného šíření. In: *Opatření k eliminaci vlivu vícecestného šíření* [online]. 2013 [cit. 20.12.2013]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?Syst%E9my_s_v%EDce_nosn%FDmi%2C_OFDM:Opat%F8en%ED_k_eliminaci_vlivu_v%EDcecestn%E9ho_%B9%ED%F8en%ED
- [13] ROUSE, Margaret. Cyclic redundancy checking. *Cyclic redundancy checking* [online]. 2010, č. 1 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://searchnetworking.techtarget.com/definition/cyclic-redundancy-checking>
- [14] . SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS. *IET Communications* [online]. 2012, č. 2 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9902-201210-!!PDF-E&type=items
- [15] Channel Coding. *Channel Coding* [online]. 2010, č. 1 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://site.iugaza.edu.ps/abdos/files/CHANNEL-CODING.pdf>
- [16] HONG, Jung a Khosrow SOHRABY. On modeling, analysis, and optimization of packet aggregation systems. *IEEE Transactions on Communications* [online]. vol. 58, issue 2, s. 660-668 [cit. 2013-12-20]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/tcomm.2010.02.080667>.
- [17] G3-PLC-Physical-Layer-Specification. *G3-PLC-Physical-Layer-Specification* [online]. 2013, č. 1, s. 46 [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/products/powerline/pdfs/G3-PLC-Physical-Layer-Specification.pdf>
- [18] M. Koch, EU Regulation of high-speed Powerline Communication in the spectrum 150-500 kHz, Devolo AG, Aachen, DE, 2013. On-line: <http://www.devolo.com/downloads/data/Regulation-PLC-12.pdf> [cit. z prosince 2013].
- [19] Hoch, M. "Comparison of PLC G3 and PRIME." *Power Line Communications and Its Applications (ISPLC)*, 2011 IEEE International Symposium on. IEEE, 2011.
- [20] *Medium-density performance line ARM-based 32-bit MCU with 64 or 128 KB Flash, USB, CAN, 7 timers, 2 ADCs, 9 com. interfaces* [online]. 2013 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00161566.pdf>
- [21] *64K 12 C™ Serial EEPROM* [online]. 2002 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/194681/MICROCHIP/24LC64.html>
- [22] *ST-LINK/V2 in-circuit debugger/programmer for STM8 and STM32* [online]. 2012 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00027105.pdf
- [23] *XBee-PRO®868 RF Modules* [online]. 2011 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://elmicro.com/files/digi/xbec-pro-868-manual.pdf>

- [24] *SGCM-P40 Specification: Smart Grid Communication Module series*. Taiwan, 2012. Dostupné z: [DVD]:\\G3-PLC module\G3-PLC Evaluation Suit_I Disk\Documents\SGCM-P40_specification_v1.1.pdf
- [25] *MAX2992: G3-PLC MAC/PHY Powerline Transceiver* [online]. 2011 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.intertek.com.br/pdf/MAX2992.pdf>
- [26] *MAX2991: Power-Line Communications (PLC) Integrated Analog Front-End Transceiver* [online]. 2010 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.intertek.com.br/pdf/MAX2991.pdf>
- [27] AN OVERVIEW, HISTORY, AND FORMATION OF IEEE P1901.2 FOR NARROWBAND OFDM PLC. [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/app-notes/index.mvp/id/5676>
- [28] *NCP3170: Synchronous PWM Switching Converter* [online]. 2014 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP3170-D.PDF
- [29] *LM1117-N, LM1117: LM1117-N/LM1117I 800mA Low-Dropout Linear Regulator* [online]. 2013 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/sn0s412m/sn0s412m.pdf>
- [30] *G3-PLC module SGCM-P4x series*. Taiwan, 2012. Dostupné z: [DVD]:\\G3-PLC module\G3-PLC Evaluation Suit_I Disk\Documents\G3-PLC module introduction.pdf
- [31] *MT39-L1-ver. R: Modul PLC komunikace* [online]. [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://www.modemtec.cz/MT39-L1-R-datasheet_%C4%8Desk%C3%BD.pdf
- [32] Mlynek, Petr; Koutny, Martin; Misurec, Jiri; Kolka, Zdenek, "Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for Street Lighting Control," Power Line Communications and its Applications (ISPLC), 2014 18th IEEE International Symposium on , vol., no., pp.238,243, March 30 2014-April 2 2014 Dozstupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6812318&isnumber=6812309>
- [33] *Smart Grid: Flexible PLC Solution, USA*, 2010. Dostupné z: [DVD]:\\Texas Instruments TMDSPCKIT-V3\5810.Flexible-PLC-solution-using-C2000.pdf
- [34] *M16C/6S1 Group: RENESAS MCU M16C Family / M16C/60 Series* [online]. 2013 [cit. 2014-05-29]. Dostupné z: http://documentation.renesas.com/doc/products/mpumcu/doc/m16c/r01uh0105ej0110_m16c6s1.pdf
- [35] Oksman, V.; Jin Zhang, "G.HNEM: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology," Communications Magazine, IEEE , vol.49, no.12, pp.36,44, December 2011; doi: 10.1109/MCOM.2011.6094004

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

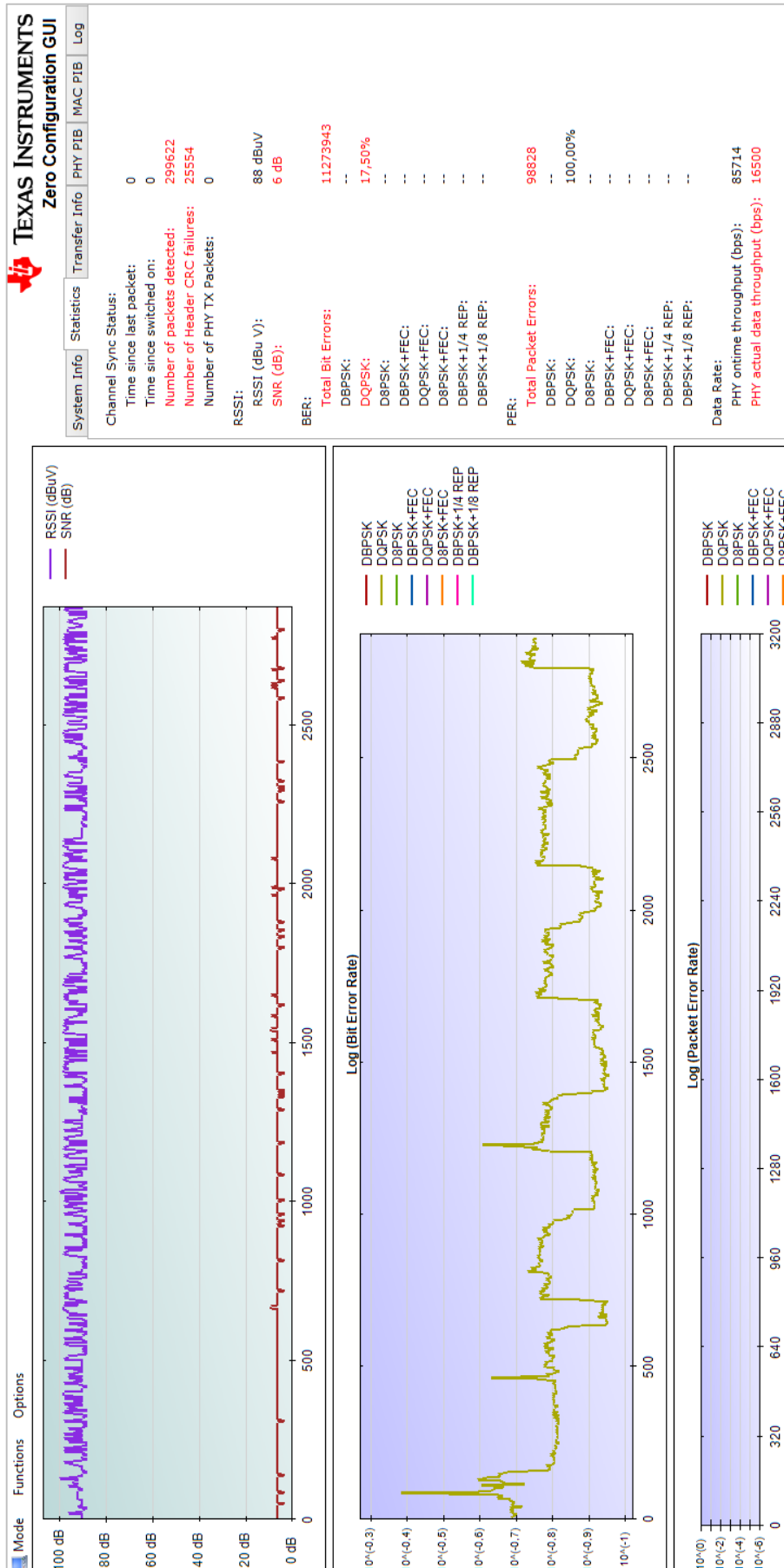
ACK	potvrzení o úspěšném přenosu paketu
AFE	Analog Front-End
ANSI	American National Standards Institute
APDU	Application Protocol Data Unit
APDU	Application Data Unit
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ARM	Advanced RISC Machine
ARQ	Automatic Request Repettion
ASK	Amplitude Shift Keying
BB	Broad Band
BER	Bit Error Rate
BPSK	Binary-Phase Shift Keying
CCITT	Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique
CENELLEC	Evropský výbor pro elektrotechnickou normalizaci
CID	Connection Identifier
CP	Cyklický prefix
CPSK	Koherentní klíčování fázovým posunem
CRC	Cyklycký Redundantní Součet
CS	Convergence layer
DBPSK	Diferenciální Bínární Klíčování Fázovým Posunem
DCSK	Differential Code Shift Keying
DLL	Data Link Layer
DSL	Digital Subscribe Line
EIA	Environmental Impact Assessmen
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EUI	European University Institute
FCC	Federal Communications Commission
FEC	Forward error correction
FSK	Frequency-shift keying
FW	Firmware
GI	Guard Interval
HDR	Hight Data Rate

HW	Hardware
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverzní rychlá Fourierova Transformace
ISI	Inter Symbol Interference
ISO	International Organization for Standardization
LDR	Low data rate
LLC	Logical Link Control
LNID	Local Node Identifier
MAC	Medium Access Control
MPIB	MAC Information Base
MPDU	MAC protocol data unit
NACK	potvrzení o chybě přenášeného paketu
NB	Narrow Band
NULL SSCS	NULL Service-Specific Convergence Sublayer
OFDM	ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením
PDU	Protocol Data Unit
PER	Packet Error Rate
PIB	PRIME Information Base
PLC	Poweline communication
PPDU	Presentation Protocol Data Unit
PRIME	Powerline Intelligent Metering Evolution
PRM	PHY Robustness Management
PSD	Power Spectral Density – spektrální hustota výkonu
REP	Repetition
RFID	Identifikace na rádiové frekvenci
RSSI	Received Signal Strength Indication
RX	Přijímání (receive)
SCI	Serial Control Interface
SDU	Service Data Unit
SID	Switch Identifier
SNR	Odstup signál šum
SPDU	Service Protocol Data Unit
SW	Software
TPDU	Transaction Protocol Data Unit
TX	Vysílání (transmit)
UNB	Ultra Narrow Band

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A – PRIME, UREL, vyšší rušení, DQPSK	81
Příloha B – PRIME laboratoř, DQPSK	82
Příloha C – PRIME laboratoř, DBPSK.....	82
Příloha D – PRIME laboratoř, přerušení přenosu zapnutím PC	83
Příloha E – Plošný spoj TOP	84
Příloha F – Plošný spoj BOTTOM.....	85
Příloha G – Osazení součástek TOP	86
Příloha H – Osazení součástek BOTTOM	87
Příloha I – Schéma 1/3	88
Příloha J – Schéma 2/3.....	89
Příloha K – Schéma 3/3.....	90
Příloha L – Seznam použitých součástek	91

Příloha A – PRIME, UREL, vyšší rušení, DQPSK

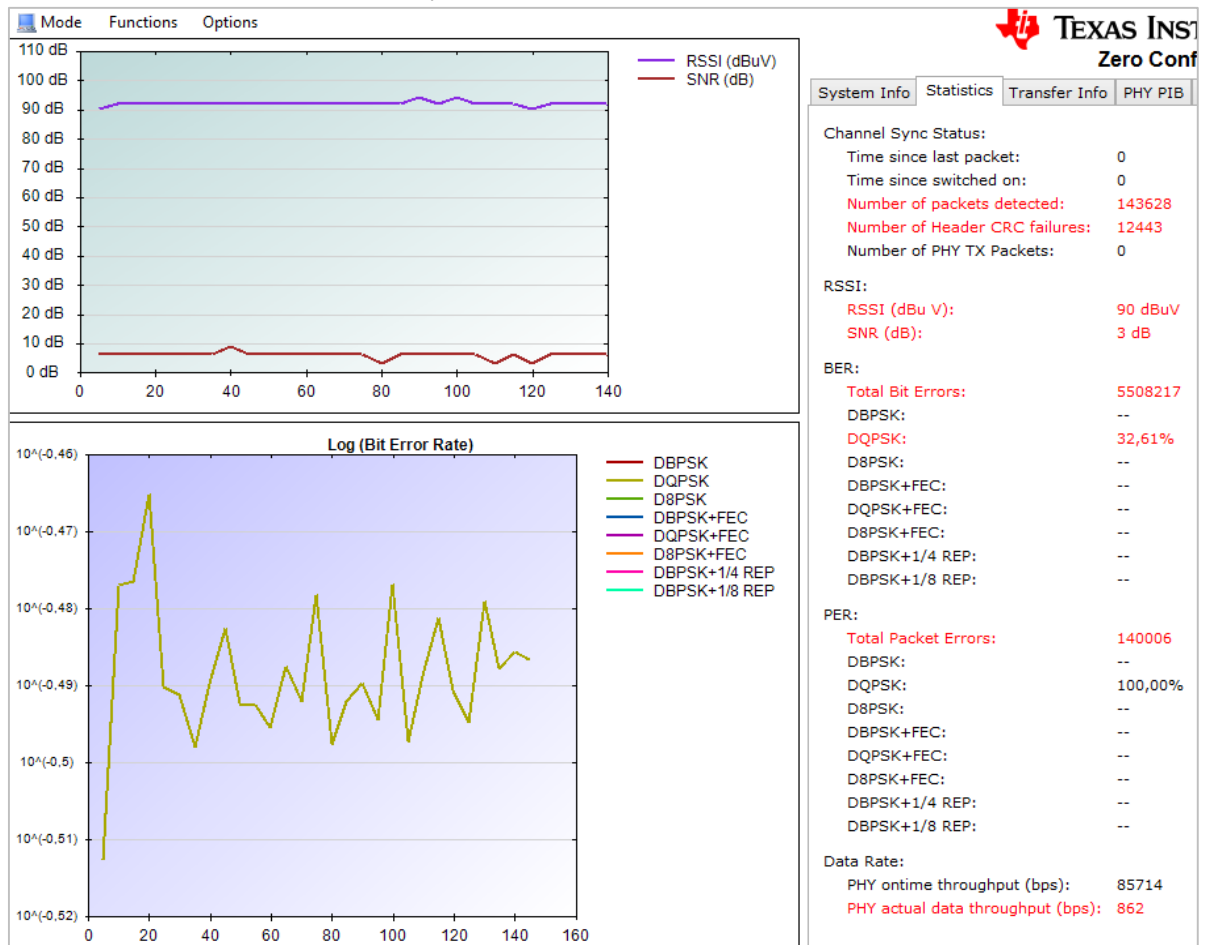




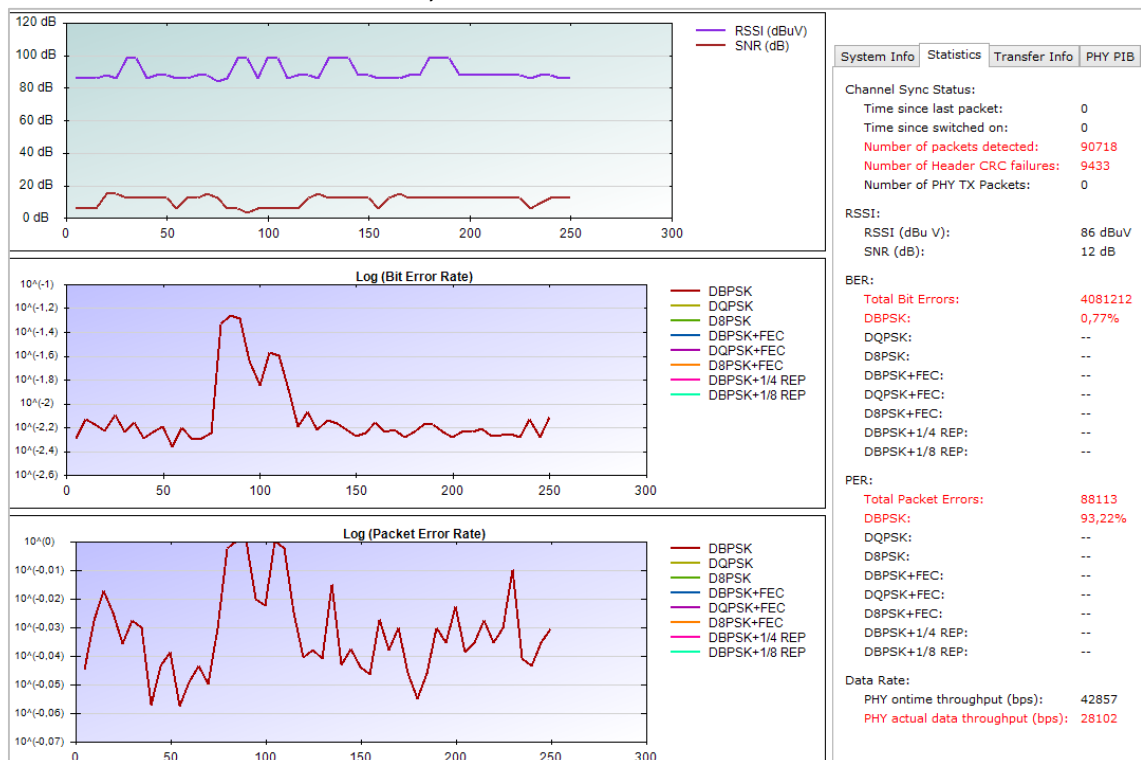




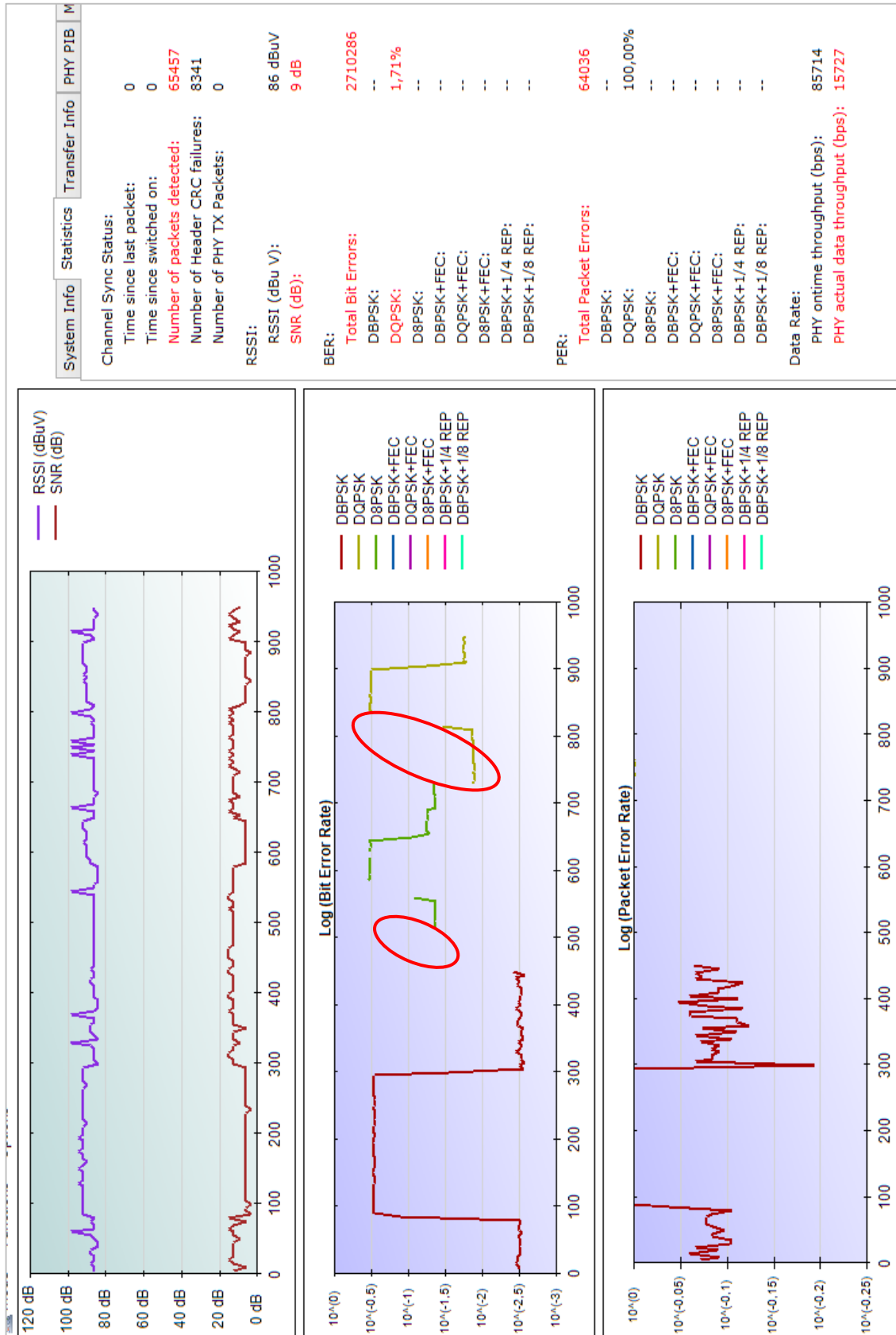
Příloha B – PRIME laboratoř, DQPSK



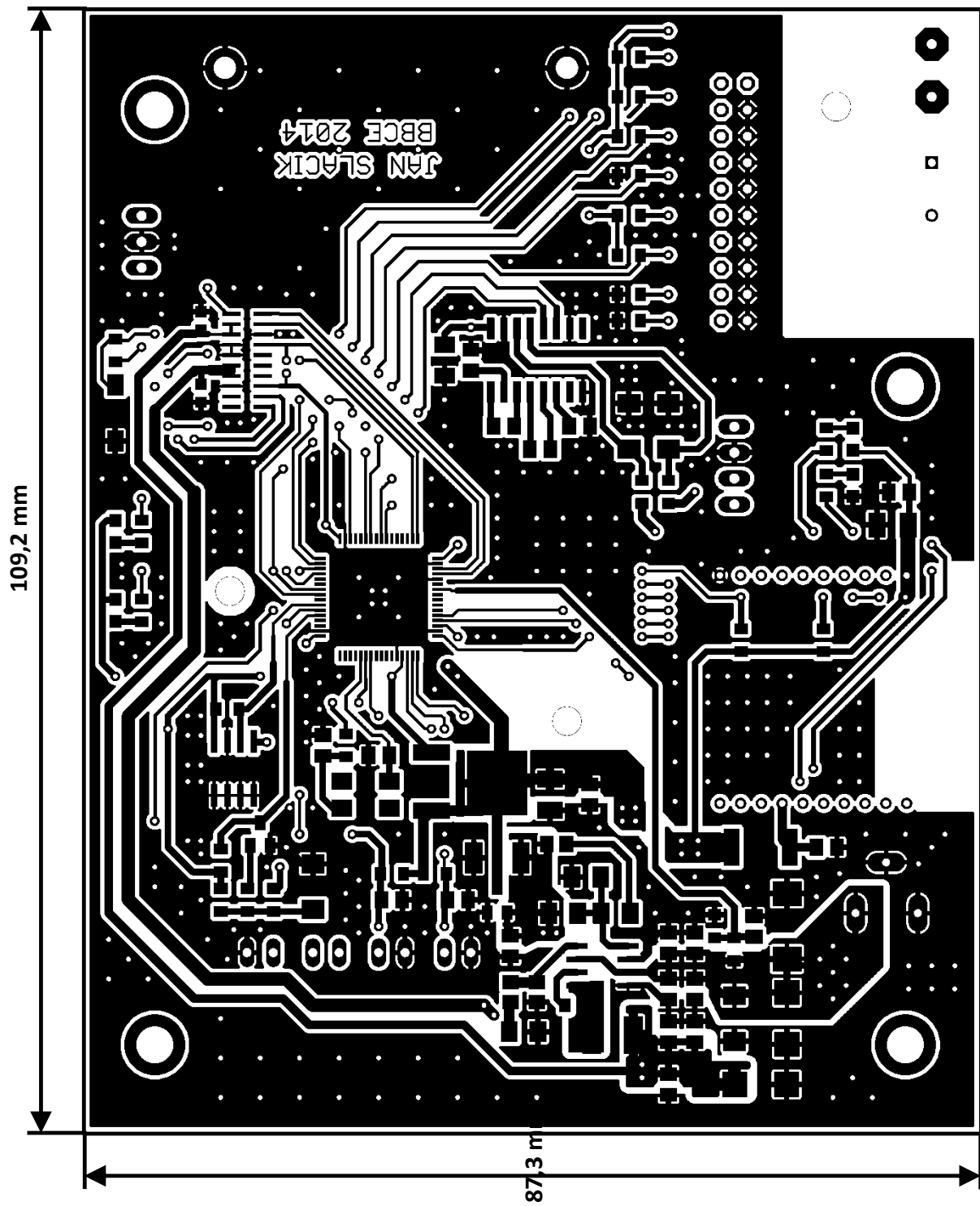
Příloha C – PRIME laboratoř, DBPSK



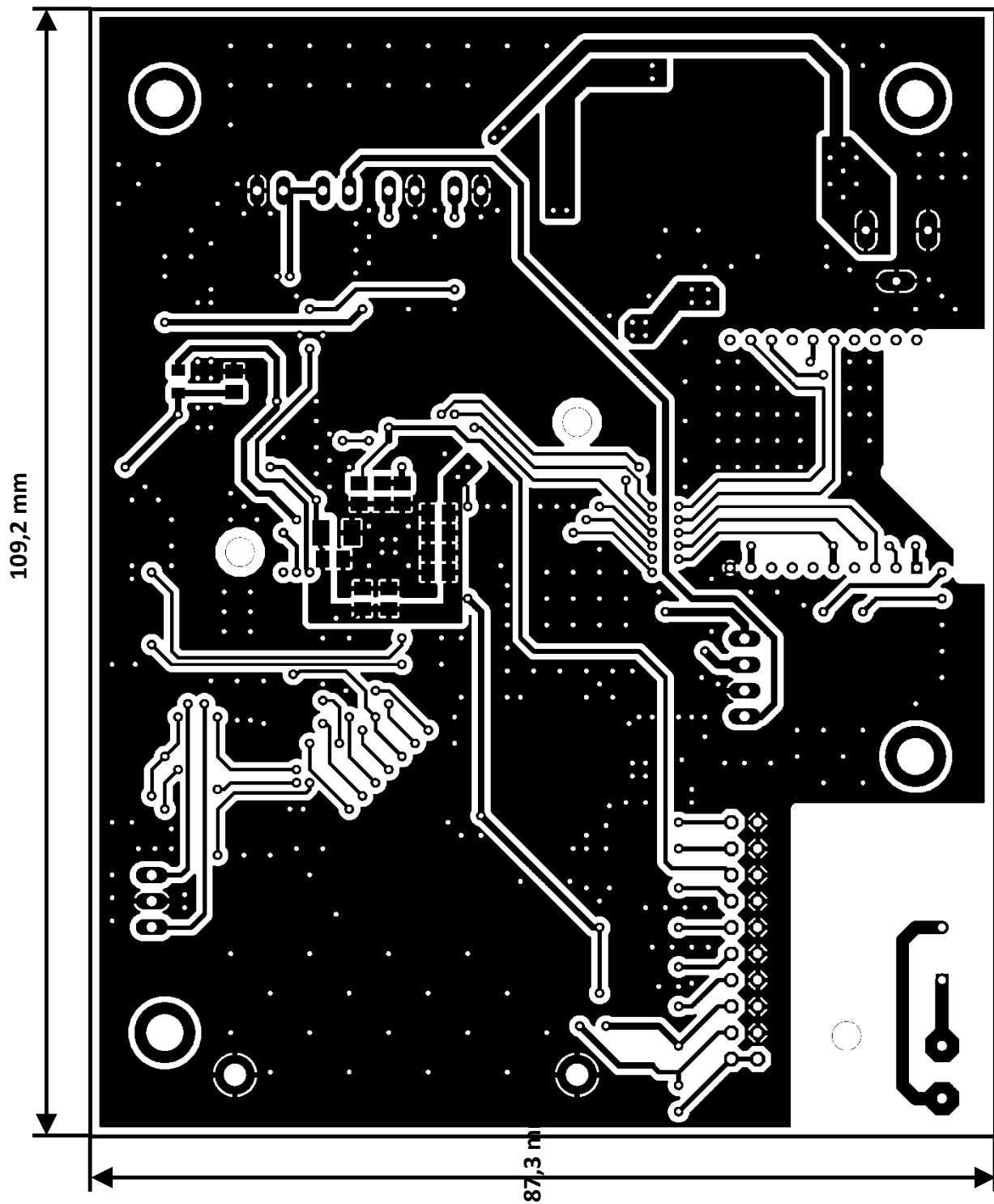
Příloha D – PRIME laboratoř, přerušení přenosu zapnutím PC



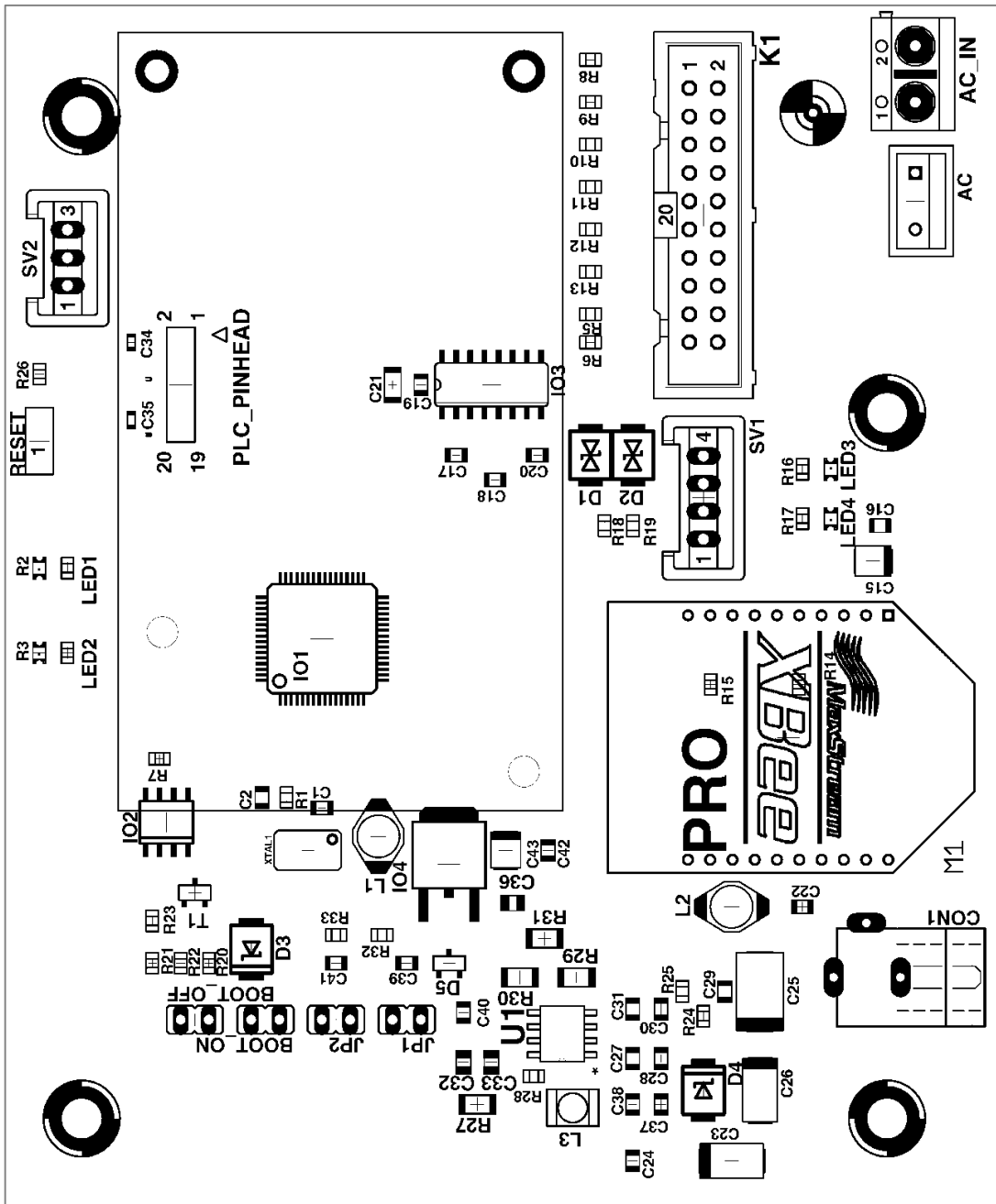
Příloha E – Plošný spoj TOP



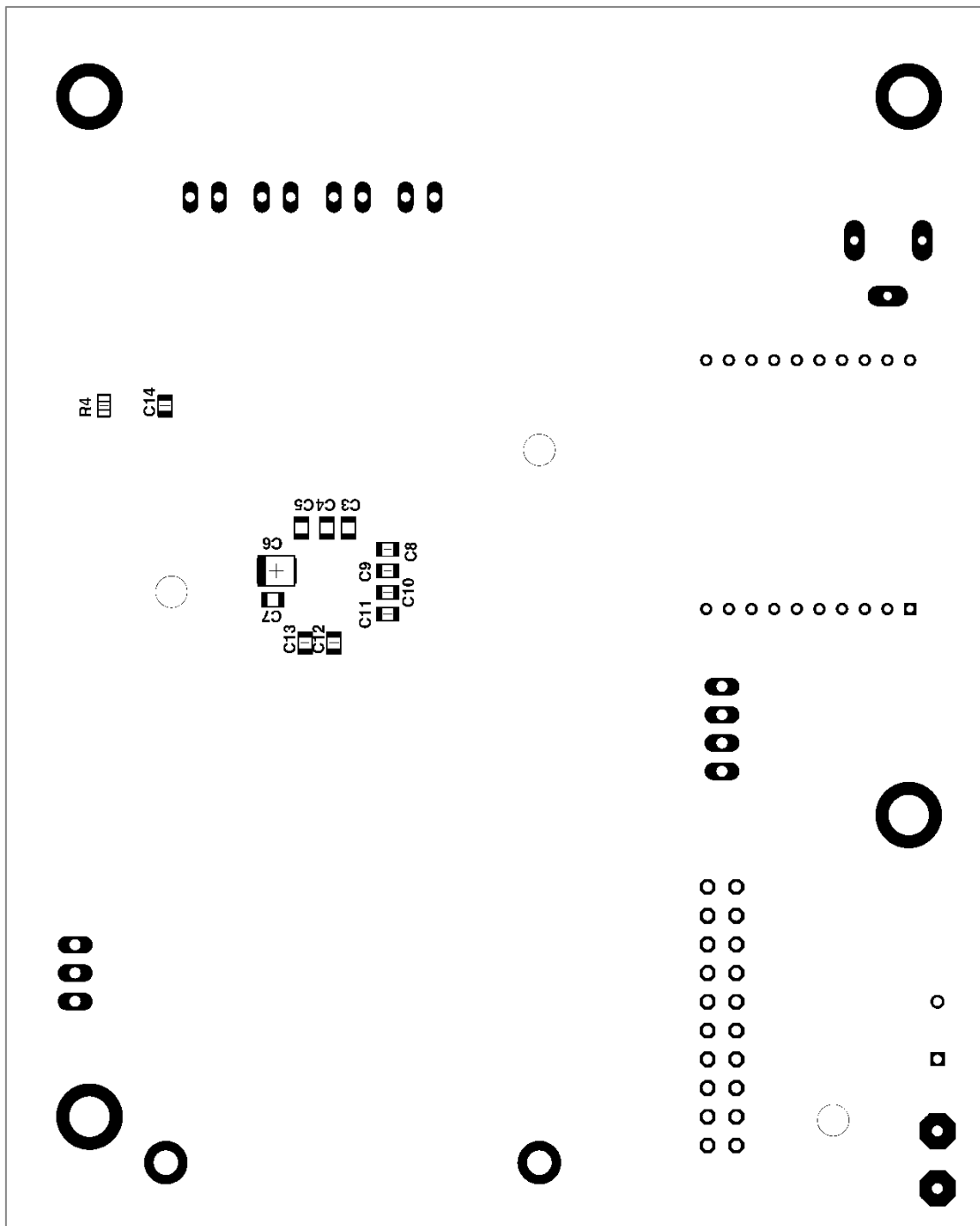
Příloha F – Plošný spoj BOTTOM

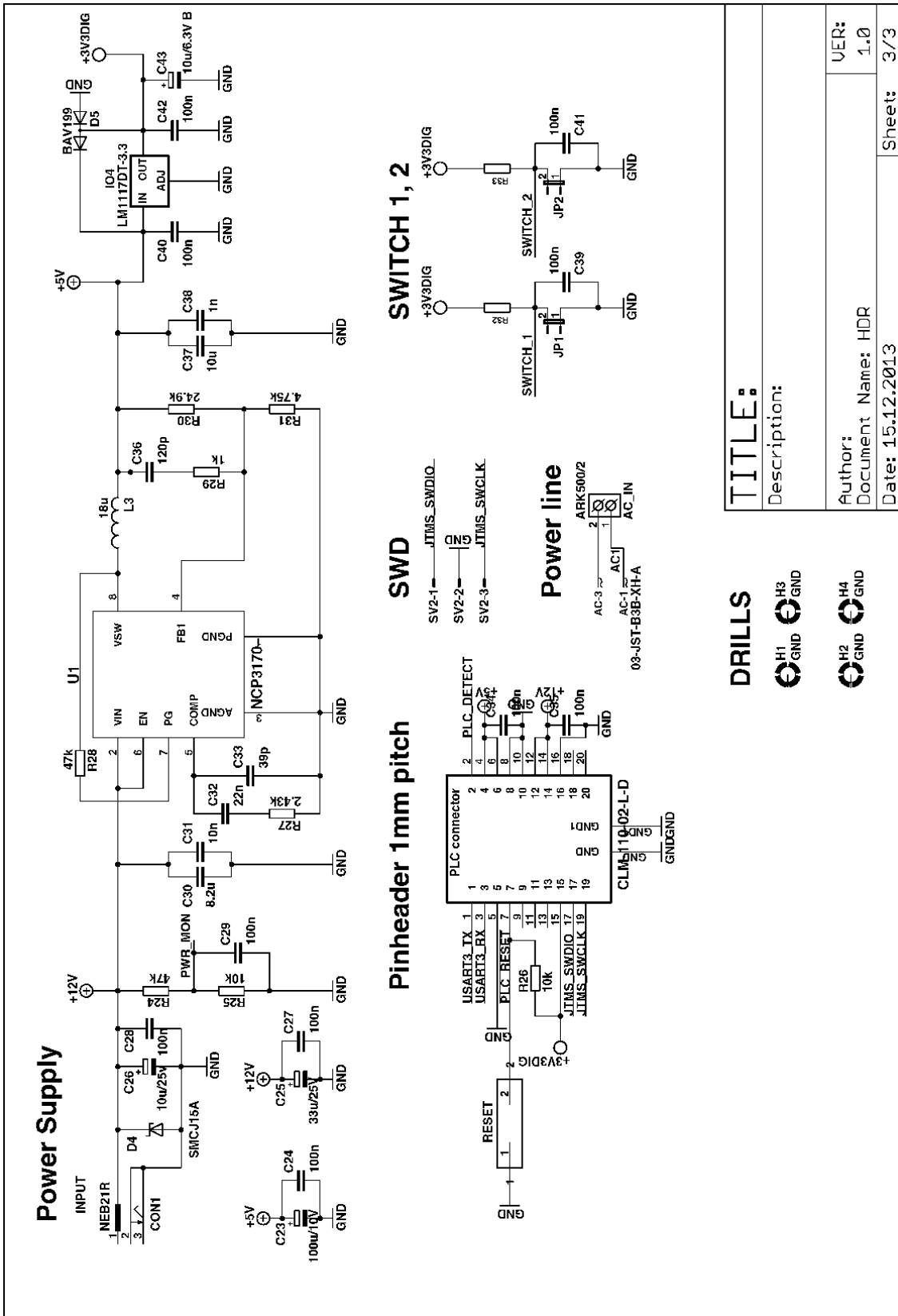


Příloha G – Osazení součástek TOP



Příloha H – Osazení součástek BOTTOM





Příloha L – Seznam použitých součástek

Part	Value	Device	Package
AC	AC	03-JST-B3B-XH-A	B3B-XH
AC_IN	ARK500/2	ARK500/2	ARK500/2
BOOT_OFF		JP1E	JP1
BOOT_ON		JP1E	JP1
C1	10p	C-EUC0805K	C0805K
C2	10p	C-EUC0805K	C0805K
C3	1u	C-EUC0805K	C0805K
C4	100n	C-EUC0805K	C0805K
C5	100n	C-EUC0805K	C0805K
C6	10u/6.3V B	CPOL-EUSMCB	SMC_B
C7	100n	C-EUC0805K	C0805K
C8	100n	C-EUC0805K	C0805K
C9	1u	C-EUC0805K	C0805K
C10	100n	C-EUC0805K	C0805K
C11	1u	C-EUC0805K	C0805K
C12	100n	C-EUC0805K	C0805K
C13	1u	C-EUC0805K	C0805K
C14	100n	C-EUC0805K	C0805K
C15	100u/6.3V	CPOL-EUSMCB	SMC_B
C16	100n	C-EUC0805K	C0805K
C17	100n	C-EUC0805K	C0805K
C18	100n	C-EUC0805K	C0805K
C19	100n	C-EUC0805K	C0805K
C20	100n	C-EUC0805K	C0805K
C21	1uF	C-EUC1206K	C1206K
C22	100n	C-EUC0805K	C0805K
C23	100u/10V	CPOL-EUSMCC	SMC_C
C24	100n	C-EUC0805K	C0805K
C25	33u/25V	CPOL-EUSMCD	SMC_D
C26	10u/25v	CPOL-EUSMCC	SMC_C
C27	100n	C-EUC0805K	C0805K
C28	100n	C-EUC0805K	C0805K
C29	100n	C-EUC0805K	C0805K
C30	8.2u-10u	C-EUC0805K	C0805K
C31	10n	C-EUC0805K	C0805K
C32	22n	C-EUC0805	C0805
C33	39p	C-EUC0805	C0805
C34	100n	C-EUC0603K	C0603K
C35	100n	C-EUC0603K	C0603K
C36	120p	C-EUC0805	C0805
C37	10u	C-EUC0805K	C0805K
C38	1n	C-EUC0805K	C0805K

C39	100n	C-EUC0805K	C0805K
C40	100n	C-EUC0805K	C0805K
C41	100n	C-EUC0805K	C0805K
C42	100n	C-EUC0805K	C0805K
C43	10u/6.3V B	CPOL-EUSMCB	SMC_B
CON1	NEB21R	NEB21R	NEB21R
D1	SM6T15CA	SM6T15CA	DO214AA
D2	SM6T15CA	SM6T15CA	DO214AA
D3	SM6T6V8A	SM6T6V8A	DO214AA_UNI
D4	SMCJ15A	SM6T6V8A	DO214AA_UNI
D5	BAV199	BAV199	SOT23
H1	GND	MOUNT-PAD-ROUND3.6	3,6-PAD
H2	GND	MOUNT-PAD-ROUND3.6	3,6-PAD
H3	GND	MOUNT-PAD-ROUND3.6	3,6-PAD
H4	GND	MOUNT-PAD-ROUND3.6	3,6-PAD
IO1	SMT32F103RCT7TR	SMT32F103RCT7TR	LQFP64
IO2	24LC64SN	24LC64SN	SO-08
IO3	MAX3232ESE	MAX3232ESE	SO16
IO4	LM1117DT-3.3	LD117ADT33TR	DPACK
JP1		JP1E	JP1
JP2		JP1E	JP1
K1	JTAG	ML20	ML20
L1	10uH/0.37A	SRE6603-100M	SRE6603
L2	10uH/0.37A	SRE6603-100M	SRE6603
L3	18u	L-USL4532P	L4532P
I.01	RED	LEDCHIPLED_0805	CHIPLED_0805
I.02	RED	LEDCHIPLED_0805	CHIPLED_0805
I.03	GREEN	LEDCHIPLED_0805	CHIPLED_0805
I.04	GREEN	LEDCHIPLED_0805	CHIPLED_0805
M1	XBEE-PRO	XBEE-PRO	XBEE-PRO
PLC_PINHEAD	CLM-110-02-L-D	CLM-110-02-L-D	SAMTEC_CLM-110-02-L-D
R1	390R	R	R0805
R2	680R	R	R0805
R3	680R	R	R0805
R4	4k7	R	R0805
R5	10k	R	R0805
R6	10k	R	R0805
R7	4k7	R	R0805
R8	10k	R	R0805
R9	10k	R	R0805
R10	10k	R	R0805
R11	10k	R	R0805
R12	10k	R	R0805
R13	10k	R	R0805
R14	47k	R	R0805

R15	47k	R	R0805
R16	680R	R	R0805
R17	680R	R	R0805
R18	56R	R	R0805
R19	56R	R	R0805
R20	56R	R	R0805
R21	10k	R	R0805
R22	4k7	R	R0805
R23	10k	R	R0805
R24	47k	R	R0805
R25	10k	R	R0805
R26	10k	R	R0805
R27	2.43k	R-EU_M1206	M1206
R28	47k	R	R0805
R29	1k	R-EU_M1206	M1206
R30	24.9k	R-EU_M1206	M1206
R31	4.75k	R-EU_M1206	M1206
R32	10k	R	R0805
R33	10k	R	R0805
RESET	434123050816	434123050816	434123050816
SV1		S04P	S04P
SV2		S03P	S03P
T1	BC850	BC850	SOT23
U1	NCP3170	NCP3170	SOIC127P600X175-8N
XTAL1	ABMM2	ABMM2	ABMM2