



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

BROADBAND OVER POWERLINE MODEM

BROADBAND OVER POWERLINE MODEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Mahút

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. et Ing. Petr Musil

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Michal Mahút

ID: 211263

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Broadband over powerline modem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je prostudovat problematiku širokopásmového přenosu Broadband over powerline. Popsat jednotlivé hardwarové komponenty pro sestavení modemu a jejich funkcionalitu. Vybrat vhodné komponenty pro realizaci BPL modemu, provést rešerši dostupných čipů pro širokopásmové přenosy po elektrickém vedení. Vypracovat návrh desky plošných spojů modemu a následně modem sestrojít. Zrealizovat měření charakteristických vlastností prototypu a zaměřit se na problematiku snímání rušení, které pochází ze zařízení připojených do elektrické sítě. Porovnejte sestrojený modem s komerčně dostupnými modemy na trhu z hlediska odolnosti vůči rušení a přenosových charakteristik.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 19.5.2023

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Petr Musil

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Cieľom diplomovej práce je preskúmať problematiku širokopásmového prenosu Broadband Over Powerline, navrhnúť a zostrojiť BPL modem. V teoretickej časti sa práca zaoberá rozdelením a popisom Powerline Communication, jej štandardmi a faktormi ovplyvňujúcimi komunikáciu na elektrickom vedení. Praktická časť zahŕňa návrh dosky plošných spojov BPL modemu s výberom potrebných komponentov na zostrojenie modemu. Výstupom práce je zostrojený širokopásmový PLC modem, ktorého prenosové vlastnosti a odolnosť na rušenie sú porovnané s komerčne dostupnými riešeniami.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

BPL modem, elektrická sieť, G.hn, návrh DPS, PLC modem, priepustnosť, vplyv šumu, Xingtera MOD957

ABSTRACT

The aim of the diploma thesis is to look into the issues of Broadband Over Powerline Communication, design and construct a BPL modem. The theoretical part of the thesis covers the division and description of Powerline Communication, its standards, and factors affecting communication over electrical wiring. The practical part includes the design of a printed circuit board for the BPL modem with the selection of necessary components for the modem construction. The output of the thesis is a constructed broadband PLC modem, whose transmission properties and interference resistance are compared with commercially available solutions.

KEYWORDS

BPL modem, G.hn, noise impact, throughput, PCB design, PLC modem, power grid, Xingtera MOD957

MAHÚT, Michal. *Broadband over powerline modem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2022, 68 s. Diplomová práce. Vedúci práce: Ing. et Ing. Petr Musil

Vyhlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko autora: Bc. Michal Mahút
VUT ID autora: 211263
Typ práce: Diplomová práca
Akademický rok: 2022/23
Téma záverečnej práce: Broadband over powerline modem

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúcej/cého záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podpisuje iba v tlačenej verzii.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu diplomovej práce pánovi Ing. et Ing. Petrovi Musilovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Technológia PLC	13
1.1 Rozdelenie	13
1.1.1 Úzkopásmové	13
1.1.2 Širokopásmové	14
1.2 Štandardy	15
1.2.1 G3-PLC	15
1.2.2 HomePlug AV2	16
1.2.3 ITU-T G.hn	16
1.3 Prispôsobenie prenosového kanálu	17
2 Meranie šumu	21
2.1 Meranie šumu zariadení	21
2.2 Meranie domácej topológie	25
3 Riešenie praktickej časti	30
3.1 Prehľad dostupných BPL modulov	30
3.1.1 PLC Stamp 1200 Micro	30
3.1.2 MOD923	31
3.1.3 MOD957	31
3.2 Návrh DPS BPL modemu	33
3.2.1 Napájacia časť	34
3.2.2 Signálová časť s MOD957	35
3.3 Vyhodenie DPS BPL modemu	38
3.3.1 Prototyp BPL modemu v0.1	38
3.3.2 Prototyp BPL modemu v1.1	39
3.4 Vyhodenie prototypu v0.1 a v1.1	41
3.5 Prenosová maska modemu v1.1	43
3.6 Porovnanie priepustnosti BPL modemu v1.1 s komerčne dostupnými riešeniami	45
3.6.1 Zhodnotenie výsledkov meraní	47
Záver	49
Literatúra	51
Zoznam symbolov a skratiek	55

Zoznam príloh	58
A Schéma zapojenia BPL modemu v1.1	59
B Technický výkres 3D modelu krabičky	61
C Fotografická dokumentácia procesu práce	62
D Fotografie zostrojeného BPL modemu v1.1	66
E Obsah elektronickej prílohy	68

Zoznam obrázkov

1.1	Náhradná schéma elementárneho úseku vedenia dĺžky dx	18
2.1	Prispôbena topológia merania šumu zariadení	21
2.2	Graf šumu prispôbenej topológie	22
2.3	Graf šumu zariadení 1.	23
2.4	Graf šumu zariadení 2.	24
2.5	Graf šumu svietidiel	25
2.6	Počiatočná topológia redukcie šumu	26
2.7	Topológia s 2 m predlžovacieho prívodu	27
2.8	Topológia s 54 m predlžovacieho prívodu	27
2.9	Graf úrovne šumu pre topológiu s 2 m predlžovacieho prívodu	28
2.10	Graf úrovne šumu pre topológiu s 54 m predlžovacieho prívodu	28
2.11	Priepustnosť – poloha zapojenia v predlžovacom prívode.	29
3.1	Modul PLC Stamp 1200 Micro	30
3.2	Modul Xingtera MOD923	31
3.3	Modul Xingtera MOD957	32
3.4	Bloková schéma navrhovaného BPL modemu	33
3.5	Napájacia časť modemu	34
3.6	Väzobný obvod PLC signálu do 230 VAC	35
3.7	Konektor J3 modulu MOD957	35
3.8	Pripojenie Ethernetového čipu a výstup RJ45	37
3.9	Pripojenie LED, GPIO a UART	37
3.10	Návrh DPS prototypu v0.1, KiCad	39
3.11	Finálny návrh DPS BPL modemu v1.1, KiCad	40
3.12	Zostrojený prototyp v0.1	41
3.13	Zostrojený finálny prototyp v1.1	41
3.14	Výkonová maska modemu v1.1	44
3.15	Meranie SNR programom XCT3.1_Rel	44
3.16	Test priepustnosti modemov 50 m topológia	45
3.17	Test priepustnosti modemov 50 m topológia so zapnutými zariadeniami	46
3.18	Test priepustnosti modemov 50 m topológia s generátorom šumu	46
A.1	Schéma zapojenia napájacej a väzbovej časti	59
A.2	Schéma zapojenia signálovej časti	60
B.1	Technický výkres 3D modelu krabičky	61
C.1	Testovanie prenosu prototypu v0.1	62
C.2	Testovanie zapojenia DPS	62
C.3	Osadzovanie prototypu v1.1	63
C.4	Testovanie prenosu prototypu v1.1	63

C.5	Zostavená 50 m topológia	64
C.6	Testovanie prototypov v1.1 na odolnosť voči šumu	64
C.7	RFC testy BPL modemov	65
C.8	Meranie spektra PLC šumového generátoru	65
D.1	Osadená DPS modemu v1.1	66
D.2	Umiestnenie modemu v1.1 v krabičke	66
D.3	Bočný pohľad na modem	67
D.4	Zhotovený BPL modem v1.1	67

Zoznam tabuliek

1.1	Tabulka rozdelenia kmitočtového pásma podľa CENELEC pre úzkopásmovú PLC	14
2.1	Parametre testovaných BPL modemov	26
2.2	Priepustnosť pre rôzne typy zapojení a zariadení	29
3.1	Prehľad parametrov BPL modulov	33
3.2	Cenová kalkulácia nákladov na výrobu prototypu v1.1	42
3.3	Porovnanie priepustností BPL modemov v 2 domácich topológiach . .	46
3.4	Priepustnosť G.hn modemov v závislosti na úrovni blízkeho šumu . .	47

Úvod

Prenos dát po silnoprúdovom vedení nachádza v posledných rokoch široké využitie v množstve odvetví. Od využitia v domácich scenároch, po Smart Grids a v IoT sektore. Technológia je známa už od počiatku 20. storočia, kedy sa pomocou vhodnej modulácie využívala na prenos signalizačných dát. Nespočet energetických spoločností vo svete začalo túto technológiu využívať na prenos telefónnych kanálov.

Spolu so zvyšujúcim sa množstvom aplikácií, ktoré vyžadujú komunikáciu prostredníctvom internetu, rastú aj nároky na infraštruktúru. V posledných rokoch pribudli štandardizácie a modemy podporujúce prenos informácií po elektrických rozvodoch s kvalitou odpovedajúcou aj náročnému užívateľovi. Technológia prenosu po elektrickom vedení poskytuje široké možnosti využitia. Počínajúc používateľom, ktorý nechce zasahovať do vybudovaných rozvodov v mieste, kde potrebuje zostať internetovú sieť až po smart aplikácie akými sú napríklad vzdialené odčítavanie elektromerov, komunikácia v nabíjaciach staniciach elektromobilov alebo tvorba sietí pre IoT technológie.

Cielom diplomovej práce je preskúmať problematiku širokopásmového prenosu Broadband Over Powerline, navrhnúť a zostrojiť BPL modem. Zamerať sa na rozbor problematiky rušenia komunikácie, ktoré je spôsobené šumom produkovaným aktívnymi zariadeniami pripojených do elektrickej siete.

Teoretická časť prvej kapitoly sa venuje rozdeleniu technológie PLC na širokopásmovú a úzkopásmovú technológiu. Opisuje princíp fungovania technológií, ich parametre a štandardy. Pozornosť je venovaná aj problematike vplyvu šumu na komunikáciu modemov, ktorej rozbor sa nachádza v druhej kapitole.

Hlavnou časťou práce je riešenie praktickej časti v kapitole 3. Táto kapitola začína výberom vhodného modulu. Po výbere vhodného modulu nasleduje časť venujúca sa samotnému návrhu a opisu komponentov potrebných na zostrojenie návrhu DPS modemu. Navrhnutý a zostrojený BPL modem je podrobený testovaniu v rôznych meracích topológiach. Výsledky meraní slúžia na overenie prenosových vlastností zostrojeného BPL modemu a sú porovnávané s komerčne dostupnými riešeniami od rôznych výrobcov. Merania sú zamerané na reálne scenáre použitia BPL modemov. Dôraz je kladený na meranie vplyvu šumu a odolnosti modemov na rôzne typy a úrovne šumu.

1 Technológia PLC

Power Line Communication (PLC) je technológia prenosu dát využívajúca silno-prúdové vedenie, ako prenosové médium. Tento pojem sa používa pre všeobecné pomenovanie prenosovej technológie, ktorú ďalej delíme na úzkopásmový a širokopásmový prenos Broadband over Powerline (BPL). Technológia PLC a jej štandardy umožňujú prenos dát po existujúcich káblových vedeniach, čo rozširuje použitie aj na krútené páry, koaxiálne vedenia a rôzne napájacie prívody. Vďaka týmto možnostiam je možné implementovať technológiu na existujúce vedenia, bez nutnosti budovania novej infraštruktúry.

Široké možnosti nasadenia umožňujú aplikovať toto riešenie do domácností na rozvod internetového pripojenia, riadenie inteligentnej domácnosti cez použitie v distribučných sieťach pre odčítavanie elektromerov, meračov kvality dodávanej energie, riadenie nabíjajúcich staníc elektromobilov, až po prenos komunikačných a riadiacich signálov v dopravných prostriedkoch a podobne.

1.1 Rozdelenie

PLC technológiu rozdeľujeme na dva základné druhy podľa využívanej šírky prenosového pásma. Úzkopásmová PLC, ako názov napovedá, komunikuje v rádoch kHz a širokopásmová v MHz.

Česká technická norma ČSN EN 62488-1 vychádzajúca z európskej normy EN 62488-1:2013, platná od 1.2.2016 rozoznáva úzkopásmový prenos po elektrickom vedení VVN s kmitočtovým rozsahom 3–148,5 kHz a širokopásmový prenos komunikácie rozsahu 1–30 MHz [1].

1.1.1 Úzkopásmové

Úzkopásmovú technológiu PLC pre náš región definuje Európsky výbor pre normalizáciu CENELEC vydávajúci európske normy EN, z ktorého vychádzajú aj normy ČSN. Európsky využiteľné pásmo je rozdelené do 4 segmentov: A–D v rozsahu 3–148,5 kHz. V USA definuje organizácia FCC prenosové pásmo od 10–490 kHz. Pri využití maximálnej šírky pásma podľa štandardu IEEE 1901.2-2013 je možné dosahovať rýchlosti do 500 kb/s [2].

Z vlastností fungovania prenosových systémov sa úzkopásmové PLC využíva na diaľkové prenosy dosahujúce vzdialenosti až 9 km.

Tab. 1.1: Tabuľka rozdelenia kmitočtového pásma podľa CENELEC pre úzkopásmovú PLC [3].

Pásmo	Kmitočet [kHz]	Opis
A	3–95	využitie pre monitorovanie odberu na distribučnej sieti
B	95–125	voľne využiteľné
C	125–140	domáce využitie
D	140–148,5	zabezpečovacie systémy

Tabuľka 1.1 poskytuje prehľad delenia kmitočtového spektra v EU. Pre pásmo A CENELEC je vyhradených 36 OFDM nosných a teoretická prenosová rýchlosť sa pohybuje okolo 45 kbit/s pre pásmo B CENELEC je k dispozícii 16 OFDM symbolov s dostupnou teoretickou rýchlosťou 20 kbit/s, tieto rýchlosti využívajú D8PSK. Vyhradené pásmo v USA autoritou FCC ponúka využitie až 72 OFDM nosných s D8PSK a dosiahnutie teoretických rýchlostí do 300 kbit/s [4]. Úzkopásmové PLC prenosy sú využívané pre diaľkové riadenie a odčítavanie v energetickom sektore. Používajú sa v aplikáciách, kde je potrebné nepridávať ďalšiu kabeláž, prenášanými údajmi sú riadiace dáta a signály.

Štandardy v oblasti úzkopásmového prenosu po elektrickom vedení sú napríklad: PRIME, G3-PLC, ITU-T G.hnem, IEEE 1901.2.

1.1.2 Širokopásmové

Norma ČSN EN 62488-1 spomína typický rozsah kmitočtu širokopásmového prenosu po elektrickej sieti (Broadband Over Power Line-BPL) 1,6–30 MHz [2].

Odporúčania ITU-T so štandardom G.hn špecifikujú šírku pásma pre komunikáciu po elektrickom vedení od 2–100 MHz, kedy za použitia tzv. notchingu, ktorý sa stará o vylúčenie určitých frekvencií, prípadne zníženie vysielacieho výkonu na základe miestnej legislatívy dostávame v našom regióne rozsah 2–86 MHz, čo predstavuje využiteľnú šírku pásma 74 MHz [5]. Prenosový dosah technológie sa pohybuje v stovkách metrov s ohľadom na skutočnosť, že s narastajúcim kmitočtom rastie útlm signálu.

V ďalších štandardizáciách BPL sa spomína pracovný kmitočet 1,8–500 MHz a dosahované rýchlosti na fyzickej vrstve od pôvodných pár Mbit/s do niekoľko Gbit/s. Tieto rýchlosti poskytujú dostatočnú robustnosť technológie pre široké možnosti využitia. Technológiu možno nasadiť, ako hlavnú technológiu rozvodu internetového pripojenia v domácnosti, kedy nie je nutné budovať novú káblovú infraštruktúru, v aplikáciách Smart Building. Niektoré energetické spoločnosti aktuálne nasadzujú BPL, ako technológiu poskytovania internetu do domácnosti [6, 7].

Na trh sa postupne dostávajú moderné čipové zostavy umožňujúce zostavenie zariadení na požiadavku zákazníka, čo otvára nové možnosti aplikovania BPL. Existuje niekoľko štandardov širokopásmového prenosu po elektrickom vedení, ktorými sú napríklad HomePlug AV2, HD-PLC, ITU-G.hn, IEEE 1901.

1.2 Štandardy

Veľmi dôležitou súčasťou každej technológie je štandardizácia a vzájomná kompatibilita zariadení v určitom segmente. Tak, ako je rozdelený prenos na úzkopásmový a širokopásmový, rozoznávame pre každý typ prenosov vlastné sady protokolov. Protokoly štandardizované na medzinárodnej úrovni musia byť prispôbené regionálnymi autoritami, aby spĺňovali ich normy pre vysielanie.

1.2.1 G3-PLC

Medzinárodná telekomunikačná únia (ITU) vydala v roku 2012 odporúčanie ITU-T G.9903 na základe ktorého je vystavaný otvorený medzinárodný štandard úzkopásmového prenosu G3-PLC. Vytvorený bol s ohľadom na nedostatočnú robustnosť predchádzajúcich štandardov PLC. Umožňuje dosahovať veľké prenosové vzdialenosti, rýchlu komunikáciu na výmenu signalizačných správ a zahrňuje zabezpečenie vysokej spoľahlivosti doručenia dát a opravy chýb, keďže prenosový kanál PLC prenosov je vystavený veľkému druhu rušivých vplyvov. Obsahuje vlastný smerovaný sieťový protokol zameraný na výber najvýhodnejšej komunikačnej cesty medzi vzdialenými uzlami. Priebežne vyhodnocuje aktuálnu situáciu v prenosovom kanáli, ktorému prispôsobuje modulačnú schému na výmenu dát medzi dvoma uzlami. Pri šume na určitých frekvenciách, ktorý by znemožňoval komunikáciu je tu podpora vynechania týchto frekvencií. Zahrňuje definíciu robustného režimu ROBO umožňujúci prenos pod úrovňou šumu -1 dB SNR. Podporou IPv6 protokolu, poskytuje širšiu škálu využitia a poskytne podporu do budúcnosti. V EU regióne sa používa kmitočtové pásmo 3–148,5 kHz vymedzené organizáciou CENELEC na základe normy EN 50065-1. G3-PLC umožňuje využitie kmitočtového rozsahu 10–500 kHz. Rešpektujúc európske normy v našom regióne využíva pásmo s názvom CENELEC-A 35,9–90,6 kHz a CENELEC-B 98,4–121,9 kHz. V rámci USA a štandardov FCC je využité pásmo 154,7–487,5 kHz. Prenosová vzdialenosť medzi dvoma modemami dosahuje až 1,7 km. Teoretická priepustnosť prenosového kanálu pri použití UDP datagramu dosahuje pri CENELEC-A 17 kbit/s a FCC 83 kbit/s. Využívaná je OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) širokopásmová modulácia, ktorá rozdeľuje frekvenčné spektrum na jednotlivé subnosné, ktoré sú ďalej voliteľne modulované BPSK, QPSK a 8PSK. Šírka jednotlivých subnosných je

1,5625 kHz. Bezpečnosť komunikácie MAC úrovne je realizovaná symetrickou blokovou šifrou AES-128. Zabezpečenie spoľahlivého prenosu realizuje Reed Salomonove, konvolučné protichybové kódovanie a opakovanie prenosu [8, 9, 10].

1.2.2 HomePlug AV2

Štandard pre BPL HomePlug AV2 vychádza z rodiny štandardov vydaných HomePlug Powerline Alliance založených na štandarde IEEE 1901 a je nástupcom úspešného HomePlug AV, ktorého pôvodné frekvenčné pásmo 2–30 MHz rozširuje až do 86 MHz. Zväčšenie kmitočtového rozsahu umožňuje navýšenie priepustnosti technológií z pôvodných 200 Mbit na fyzickej vrstve, na 1500 Mbps pri použití 2×2 MIMO (Multiple Input Multiple Output). Zariadenia podporujúce techniku viacnásobného prístupu MIMO dokážu prijímať a odosielať dáta v dvoch nezávislých prúdoch, čo má za následok dvojnásobné navýšenie prenosovej kapacity. Technika MIMO u BPL modemov zapojených do elektrickej siete TN-S využíva ku komunikácii aj ochranný vodič PE. Využívaná je modulačná technika OFDM rozdeľujúca kanály na subnosné kanály. Výhodou je odolnosť komunikácie voči úzkopásmovému rušeniu a impulznému šumu. Po rozdelení pásma pomocou OFDM môžeme dostať až 3455 nosných frekvencií z rozsahu 1,8–86,13 MHz. Šírka jednej takejto nosnej frekvencie je približne 24,414 kHz. Využívané modulácie nosných frekvencií sú BPSK, QPSK, 8, 16, 64, 256, 1024, 4096-QAM. Použitie konkrétnej modulačnej techniky je závislé na podmienkach prenosového kanálu. Štandard HomePlug AV2 zahŕňa tiež možnosť robustných módov, aby sa zabezpečila spoľahlivosť prenosu. Pri robustnom móde je použitá modulácia nosných QPSK a turbokonvolučné kódovanie, zvyšuje sa redundancia. Prijímač môže požiadať o opakovanie vysielania. Použitím najspoľahlivejšieho z troch robustných kódov sa rýchlosť fyzickej vrstvy môže znížiť až na 3,77 Mbps. O kryptografické zabezpečenie dát sa stará šifra AES-128 v móde prúdovej blokovej šifry. V USA je pôvodné prenosové pásmo rozšírené o pásmo od 86,13–100 MHz, ktoré je v Európe vyhradené FM vysielaniu. Modemy HomePlug AV a AV2 sú spätne kompatibilné s modemami štandardu IEEE 1901. Nekompatibilita je medzi zariadeniami HomePlug 1.0 a HomePlug AV, rovnako ako všetky zariadenia postavené na špecifikáciách z rodiny HomePlug nie sú kompatibilné s modemami štandardov HD-PLC, G.hn atď. [11, 12].

1.2.3 ITU-T G.hn

G.hn štandard vznikol na základe doporučení Medzinárodnej telekomunikačnej únie ITU-T G.996x v roku 2009. Cieľom vytvorenia balíku štandardizácií G.hn bolo získať štandard pre rôzne typy vedení od koaxiálneho vedenia, cez krútenú dvojlinku,

elektrické rozvody až po optické vlákna. Dôraz bol kladený na dosiahnutie vysokej priepustnosti médiom. Využitie štandardu G.hn na elektrickom vedení umožňuje v dnešnej dobe dosahovať rýchlosti Gbit/s. Technológia využíva OFDM frekvenčné delenie spektra so 4096 subnosných, so šírkou 24,4141 kHz. Podporuje niekoľko typov definovaných profilov od 0 do 25, 50, 100 MHz na elektrickom vedení [13, 14].

Pre európsky trh je toto pásmo upravené normami EN50561-1 vymedzujúce 1,6–30 MHz a EN50561-3 pre 30–118 MHz. Po prekročení vysielacieho kmitočtu nad 80 MHz radikálne klesá povolený vysielací výkon pre BPL technológie [15, 16].

Znamená to, že na našom trhu je možné efektívne prevádzkovať štandard G.hn v rozmedzí frekvencií 1,6–80 MHz. Tento rozsah predstavuje pri využití šírky jednotlivých nosných 24,4141 kHz počet subnosných 3202. Kryptografickým prostriedkom na zabezpečenie komunikácie je u tejto technológie použitá prúdová šifra AES-128 v móde CCM, ktorý sa navyše stará oproti módu prúdovej blokovej šifry o autentizáciu komunikujúcich strán. Modulácia jednotlivých subnosných je realizovaná pomocou QPSK a 8-2048 QAM. Jednotlivé vrstvy tejto technológie nie sú obsiahnuté v jednej špecifikácii, ale fyzickú vrstvu opisuje G.9960 a linkovú G.9961. Riadenie komunikácie špecifikuje G.9962, MIMO viacnásobný prístup G.9963 a rozloženie výkonovej spektrálnej hustoty G.9964 [17, 18, 19, 20, 21].

Prenosové rýchlosti na fyzickej vrstve sa líšia od použitého čipu a dosahujú rýchlosti až 2400 Mbps. Prenosová vzdialenosť je možná do 500 m [22, 23].

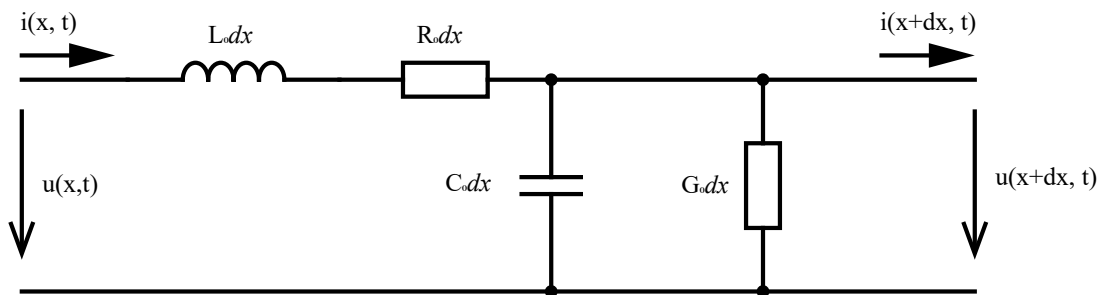
1.3 Prispôsobenie prenosového kanálu

Problematika prispôsobenia prenosového kanálu PLC technológie je veľmi dôležitou súčasťou zabezpečenia vysokej efektivity priepustnosti médiom. Táto oblasť je častokrát zanedbávaná. Vedenie elektrického napätia je svojimi vlastnosťami prispôbené distribúcii elektrickej energie predstavujúcej vysoké napätie a nízku frekvenciu. Prenosové vedenia prostredníctvom ktorých prenášame dáta sú skonštruované s parametrami vyhovujúcim prenosu vysokých frekvencií a nízkemu napätiu. Prípájaním, odpájaním a zároveň vypínaním a zapínaním zariadení dochádza často k zmenám prispôsobenia elektrických rozvodov.

V oblasti telekomunikačných prenosov po symetrickom vedení sú podmienky prenosu optimalizované samotnými nárokmi na prenosové vedenia, ktoré podliehajú normám. Komunikačné modemy sú korektne zakončené charakteristickými impedanciami v závislosti na vysielacích kmitočtoch. Impedancia je veličinou, ktorá významným spôsobom vplýva na prenosovú charakteristiku média, jej hodnota závisí od frekvencie. Príkladom sú tieto charakteristické impedancie: telefónne zariadenia komunikujúce v pásme okolo 1 kHz majú 600Ω , ADSL technológia 120Ω a VDSL komunikačný kanál je z oboch strán prispôsobený 100Ω impedanciou. Modelovanie

kmitočtových závislostí parametrov vedenia sa realizuje prostredníctvom náhradnej schémy elementárneho úseku vedenia dĺžky dx .

Modemy komunikujúce na elektrickej sieti majú charakteristickú impedanciu 100Ω . Hodnota 100Ω je hodnotou zakončenia pre jeden pár, tzv. diferenčná hodnota. Každý z vodičov L, N, PE je zakončený 50Ω impedanciou voči zemi [12, 21]. Štandardné telekomunikačné vedenia napríklad telefónne spoje, ADSL technológia, technológia štandardu IEEE 802.3 (Ethernet) sú typicky korektne zakončené vo všetkých odbočkách, spojoch, zásuvkách. Použitá kabeláž má stanovené hodnoty impedancie. Prvky a pripojené zariadenia elektrickej siete, nie sú prispôsobené na korektnú komunikáciu PLC modemov. Šum nachádzajúci sa prirodzene v elektrických rozvodoch je zosilňovaný šumom, ktorý vnášajú do vedenia pripojené a aktívne zariadenia. Nepripojené zásuvkové zakončenia sú taktiež zdrojom šumu. Ide o nekorektné zakončené vedenie, čo vedie k vzniku presluchov spôsobujúcich odrazy a tým narastá hodnota šumu prenosového kanálu. Nesmieme opomenúť ani samotné elektrické vodiče, medzi ktorými dochádza k presluchoch. Všetky tieto faktory spôsobujú problémy v komunikácii. Tieto vplyvy riešia modemy voľbou vhodného opravného kódu a zmenami modulácie subnosných. Rovnako, ako to je pri telekomunikačných vedeniach, na modelovanie kmitočtových charakteristík vedenia používame náhradnú schému zobrazenú na obrázku 1.1 s elementárnym úsekom dx . Charakteristická impedancia vedenia je vypočítaná z rozprestrených primárnych parametrov vedenia, ktorými sú R_0 pozdĺžny merný odpor, L_0 pozdĺžna merná indukčnosť, G_0 priečna merná vodičnosť a C_0 priečna merná kapacita. Parametre sú rozdielne pre každé vedenie a závisia od jeho konštrukcie.



Obr. 1.1: Náhradná schéma elementárneho úseku vedenia dĺžky dx .

Aby sme mohli vyjadriť hodnotu charakteristickej impedancie Z_0 , potrebujeme poznať primárne parametre vedenia. Potom môžeme vyjadriť sekundárny parameter vedenia, charakteristickú impedanciu ako:

$$Z_v(j\omega) = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}. \quad (1.1)$$

Druhým zo sekundárnych parametrov vedenia je konštanta šírenia γ :

$$\gamma(j\omega) = \beta + j\alpha = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}, \quad (1.2)$$

kde β je merný útlm a α fázová konštanta [24].

Hodnota impedancie sa mení spoločne so zmenou frekvencie, kedy maximálne hodnoty na určitých frekvenciách súvisia s rezonančnými frekvenciami vedenia. Otvorené zakončenia paralelného vedenia predstavujú nepripojené zásuvky a zvyšujú hodnotu impedancie. V závislosti na dĺžke prívodu, ktorými sú pripojené do siete zväčšujú počet vrcholov zvýšenej impedancie [25]. Čím výraznejšie je elektrická sieť rozvetvená a korektne nezakončená (nepripojená), tým narastá impedancia a zvyšujú sa odrazy spôsobujúce nárast šumu v miestach rezonančných frekvencií. Výrobcovia PLC modemov uvádzajú tieto poznatky v návodoch na obsluhu. Napríklad, aby užívateľ nepripájal PLC modem do predĺžovacieho prívodu a tým nedochádzalo k ďalšiemu neželanému vetveniu siete.

Zariadenia obsahujúce spínané zdroje tvorené diódovými usmerňovacími obvodmi vnášajú do elektrickej siete časovo premennú hodnotu impedancie s určitými frekvenciami, ktoré sú násobkami sieťovej frekvencie. Aby sa predišlo týmto parazitným vplyvom umiestňuje sa medzi neutrálny a fázový vodič kondenzátor, alebo EMI filter. Tieto riešenia umožňujú potlačiť šum. Výrazným spôsobom minimalizujú časové zmeny impedancie. EMI filter pozostáva z indukčnej a kapacitnej časti, aby bolo zabezpečené potlačenie negatívnych vplyvov nie len medzi fázovým a nulovým vodičom, ale aj medzi vedením a uzemňovacím vodičom. Na základe noriem o elektromagnetickej kompatibilite musia zariadenia dodávané na Európsky trh spĺňať požiadavky na reguláciu takéhoto správania [26].

Ak splníme podmienku, že vnútorná impedancia vysielačnej strany je rovná vstupnej impedancii prijímača, koeficient odrazu vlny je nulový na strane vysielača a nedochádza k nežiadúcim odrazom. Preto prijímacia a vysielačňa strana modemov má charakteristickú impedanciu 50Ω . Potom, ak prenosové elektrické vedenie (záťaž), má tiež hodnotu impedancie rovnú 50Ω , je tento prenos bez odrazov. Takýto scenár je z hľadiska reálnych podmienok a topológií elektrických sietí nereálny vzhľadom na ich zložitosť. Optimálne impedančné prispôbenie vedie k maximalizácii amplitúdy vstupného napätia na prijímacej strane. Zároveň zvyšuje hladinu odstupujúceho signálu od šumu - SNR.

Impedančnému prispôbeniu modemov predchádza väzobný člen realizovaný kapacitnou väzbou. Ním sa eliminuje jednosmerné alebo striedavé napätie sieťového signálu. A potom je to galvanická väzba, ktorá pomocou transformátoru oddeľuje silovú a signálovú časť obvodu. Podľa [27] sú vysielač a prijímač konektor natoľko vzájomne oddelené elektrickou sieťou, že možno považovať vnútornú impedanciu prijímacej strany za nezávislú na impedancii elektrického vedenia.

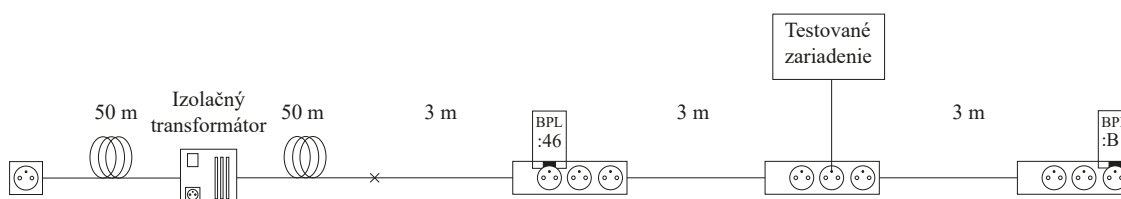
Domácu sieť môžeme charakterizovať ako stromovú štruktúru. Vodiče sú vetvami a zásuvky predstavujú koncové uzly siete. Medzi ľubovoľnými dvoma zásuvkami je možné len jedno spojenie, jedna cesta. Zásuvky môžeme tiež vyjadriť ako pripojovacie porty, kde modemy pripájame do dvoch z nich. Ostatné zariadenia sú pripojené do rôznych portov elektrickej siete a predstavujú zdroj šumu s určitou hodnotou vnútornej impedancie. Dva modemy pripojené do dvoch portov v sieti možno charakterizovať frekvenčnou odozvou kanálu. Z [27, 28] vyplýva, že optimalizácia impedancie a výkonová optimalizácia impedancie je vhodná len v nižších prenosových frekvenciách do 30 MHz, kde umožní zlepšenie o 1–4 dB SNR, kdežto u vyšších frekvencií neposkytuje zlepšenie odstupú SNR, ale môže dokonca hodnotu SNR znížiť. Odborné články nás informujú, že optimalizácia impedancie vzhľadom na impedanciu prenosového média poskytuje prínos v oblasti dosahovania vyšších prenosových rýchlostí, ale je pomerne náročné takéto riešenie realizovať v praxi, preto používame normami a štandardami definovaných 50Ω .

2 Meranie šumu

Prenos informácií prostredníctvom komunikačného kanálu, elektrické vedenie, je ovplyvnený šumom produkovaným zariadeniami pripojenými do vedenia. Meranie šumu slúži, ako prostriedok skúmania vplyvov šumu na vzájomnú výmenu informácií medzi BPL modemami. Hlavným cieľom tohoto merania je určiť vhodnú topológiu zapojenia modemov pre elimináciu nežiadúcich vplyvov a zároveň dosiahnutie optimálnej priepustnosti pre užívateľský komfort. Zariadenia, ktoré sú pripojené do elektrickej siete a zároveň spustené sú hlavným zdrojom šumu vo frekvenciách na ktorých je prevádzkovaná BPL technológia. Okrem samotného šumu komunikáciu ovplyvňuje aj impedancia zariadenia a dĺžka napájacích prívodov. Meranie je predovšetkým zamerané na domáce využitie BPL modemov. Na meranie boli vytvorené podmienky optimalizované tak, aby čo najviac korešpondovali s typickým zapojením modemov v domácich rozvodných sieťach. V blízkosti modemov sú pripájané zariadenia ako počítač, monitor, LED lampa, nabíjačka od mobilného zariadenia a podobe. Stanovené sú regulácie a štandardy, napríklad EMC – elektromagnetická kompatibilita určujúca výrobcom zariadení povolené limity produkovaného šumu. I napriek tomuto faktu lacnejšie a menej kvalitné zariadenia častokrát nespĺňajú požadované regulácie čím ovplyvňujú ostatné zariadenia pripojené do elektrickej siete. Minimalizáciou šumov je možné dosiahnutie optimálnych prenosových podmienok.

2.1 Meranie šumu zariadení

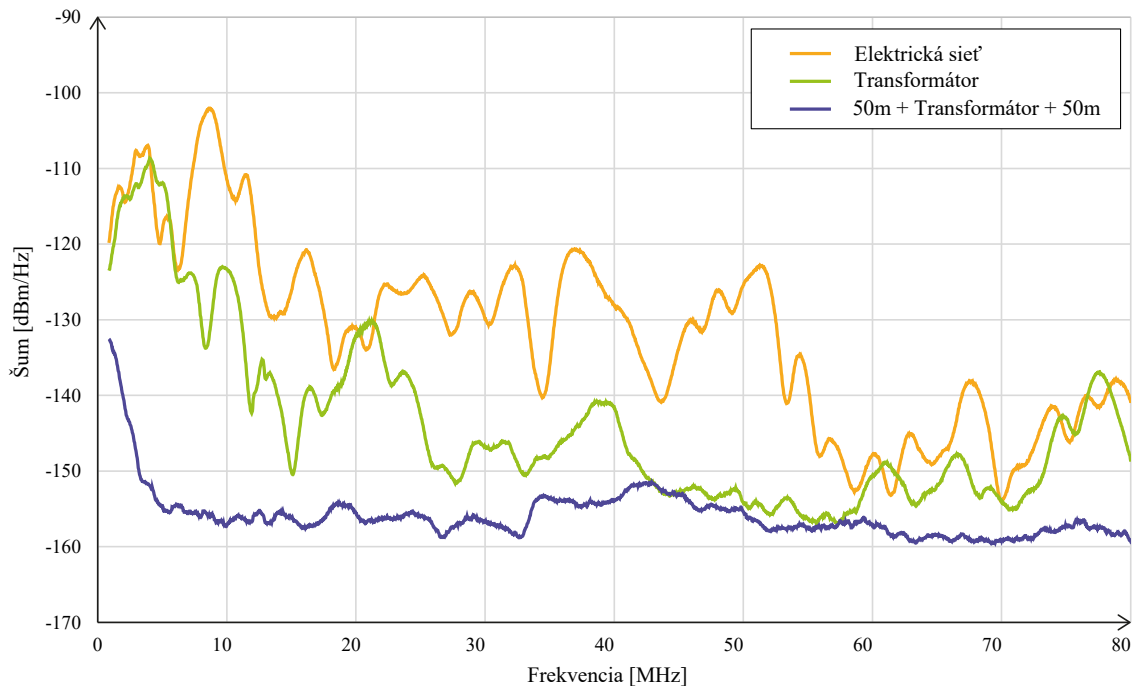
Každé zariadenie, ktoré je pripojené a aktívne napájané z elektrickej siete vnáša do prenosovej sústavy určitú úroveň šumu. Aby sme mohli zabezpečiť optimálne snímanie výsledkov úrovní šumu jednotlivých zariadení, bolo nutné pre tento účel zostaviť meraciu topológiu. Topológia si kladie za účel maximalizovať elimináciu okolitých šumov a zachovať iba šum produkovaný konkrétnym meraným (testovaným) zariadením.



Obr. 2.1: Prispôbena topológia merania šumu zariadení.

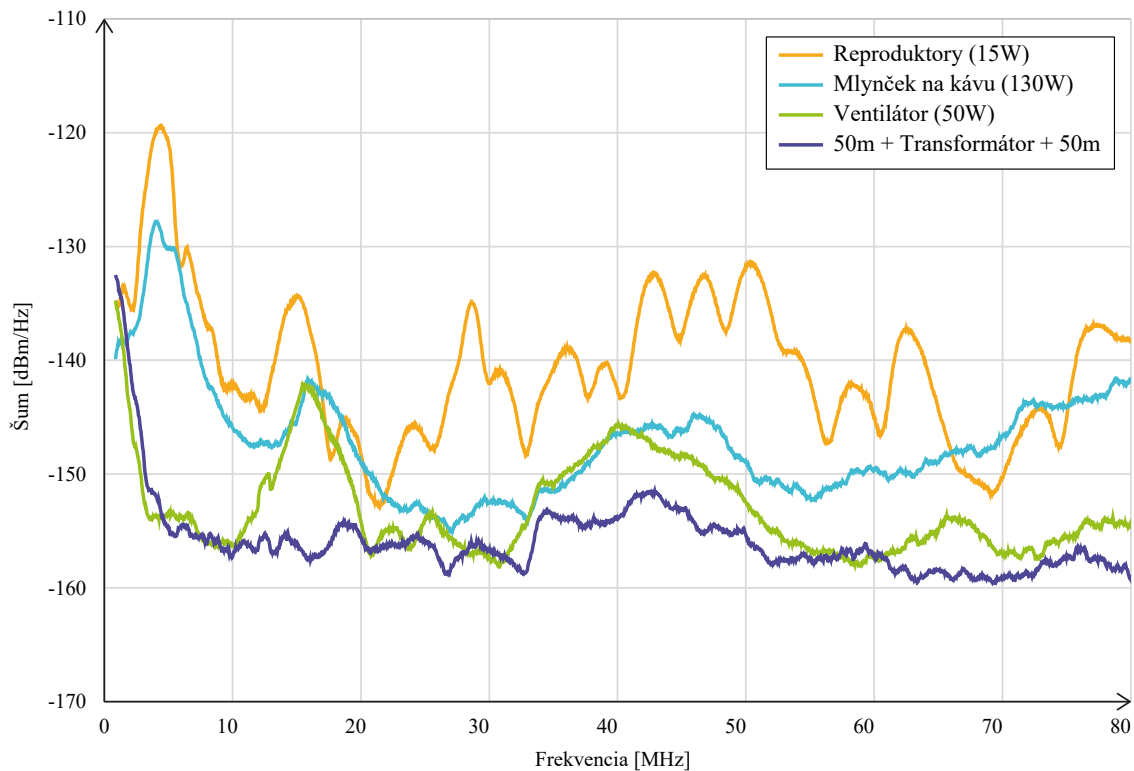
Topológia vyobrazená na schéme 3.3 pozostáva z 50 m predlžovacieho prívodu zabezpečujúceho prvotné utlmenie šumu pochádzajúceho z elektrickej siete. Do tejto

zásuvky pripojíme oddeľovací transformátor, za ktorý pripojíme 50 m ďalšieho predĺžovacieho prívodu, aby sme utlmili maximum nežiadúceho šumu. Po zostavení takejto topológie dosiahneme takmer úplne očistenie siete od šumu a pripravíme tým optimálne podmienky merania jednotlivých zariadení. Šum siete postupne eliminovaný pripojovaním prvkov redukujúcich šum siete je vyneseny v grafe 2.2. Spodné fialové krivky v nasledujúcich grafoch tejto kapitoly znázorňujú úroveň šumu, cieľene zníženú útlmovými prvkami sústavy. Od tejto úrovne šumu je možné porovnať nárast šumu jednotlivých zariadení pripojených a aktívnych na elektrickej sieti.



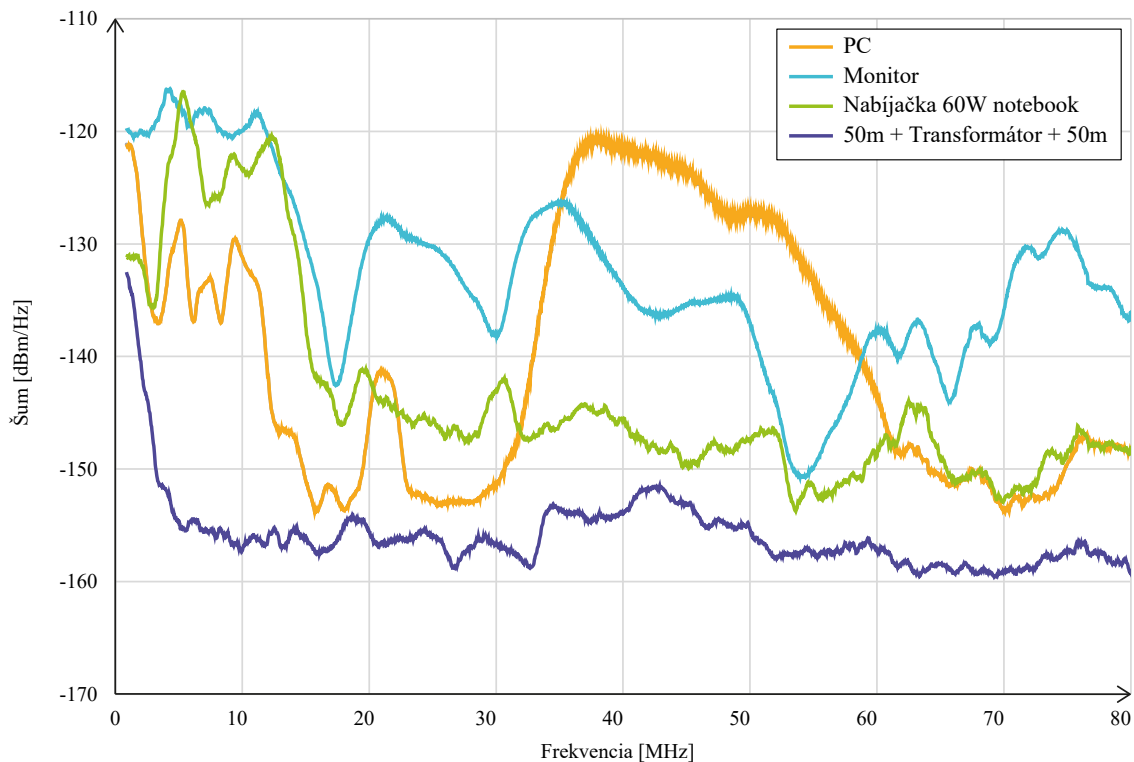
Obr. 2.2: Graf šumu prispôsobenej topológie.

Graf 2.3 ilustruje 2 indukčné záťaže, predstavujúce motor mlynčeku na kávu, ktorý má výkon 130 W a ventilátor s výkonom 15 W. Tento typ záťaže má prevažne zvýšený šum v oblasti okolo 15 MHz a 40 MHz. Mlynček na kávu ďalej svoj šum zvyšuje od 55 MHz. Testované reproduktory sú z lacnejšej produkcie a majú spínací zdroj z tranzistorov. Z meraní, ktoré boli ďalej realizované, tieto zariadenia sú charakteristické zvýšeným šumom v oblasti 5 MHz. Vychádzajúc z tohoto predpokladu, testovaný mlynček na kávu obsahuje tiež spínací prvok.



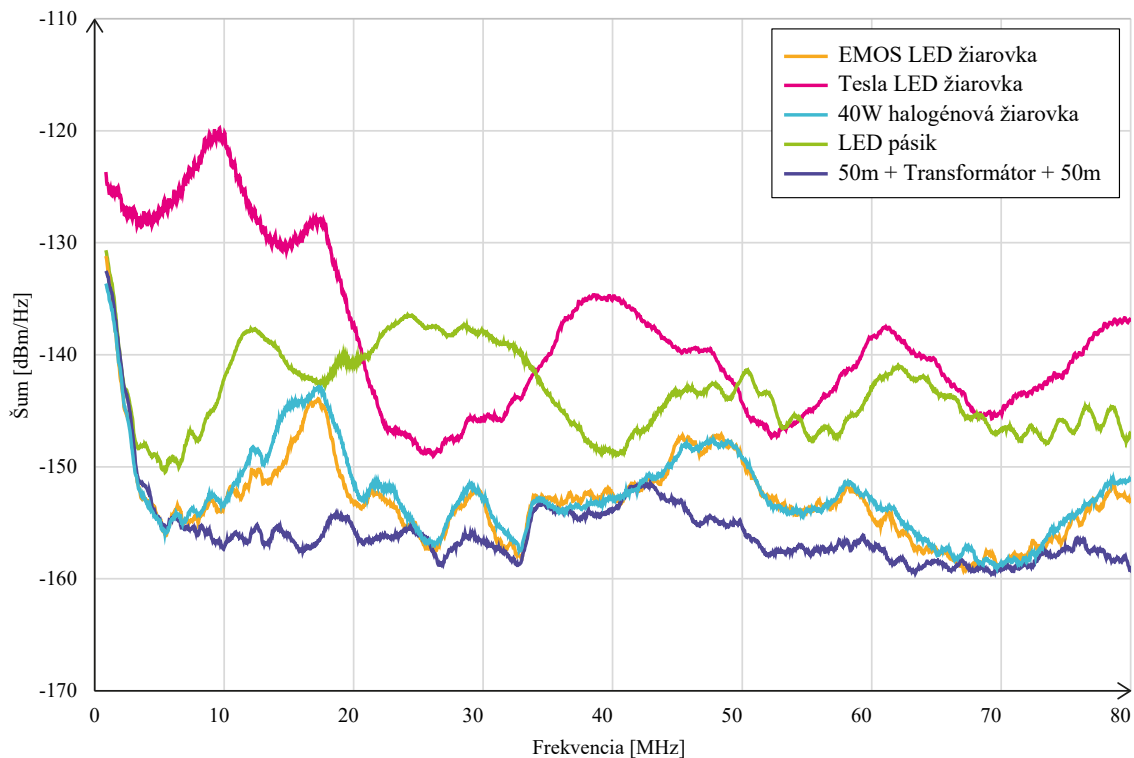
Obr. 2.3: Graf šumu zariadení 1.

Najčastejšími zariadeniami pripájanými do jednej zásuvky spoločne s BPL modemom sú počítač, monitor a nabíjačka notebooku. Charakteristika vysiadaného výkonu BPL modemu s narastajúcou frekvenciou klesá. Úrovne šumov pripojených a zapnutých zariadení sú zaznamenané v grafe 2.4. Ako možno pozorovať všetky skúmané zariadenia majú zvýšenú produkciu šumu od 0 MHz do 12 MHz, kde charakteristika nadobúda klesajúcu tendenciu. Nabíjací adaptér úspešne túto charakteristiku ďalej tlmí, avšak zariadenia počítač a monitor naberajú stúpajúcu tendenciu. Monitor nadobúda ďalšie maximá v 35 MHz a následne počítač v 38 MHz. Pripojenie týchto dvoch zariadení v blízkosti modemu BPL s aktívnou komunikáciou, môže mať značný vplyv na zníženie prenosovej rýchlosti, ako je zaznamenané v nasledujúcej kapitole.



Obr. 2.4: Graf šumu zariadení 2.

Najčastejšími zariadeniami pripojenými do elektrickej siete v budovách a obytných priestoroch sú svietidlá. V posledných rokoch dochádza k masívnej výmene tradičných zdrojov osvetlenia za technológiu LED. Táto technológia má nesporne mnoho výhod od možnosti špecializovaných LED svietidiel s regulovateľnou intenzitou a farebným spektrom vyžarovaného svetla až po značnú redukciu prevádzkových nákladov na osvetľovanie priestorov. Masívnou náhradou LED svietidiel za tradičné zdroje osvetlenia dochádza i k zmene šumových charakteristík elektrickej siete. Existujú štandardy a regulácie vyžarovaného šumu do siete EMC, ktorými by mali disponovať všetky predávané svetelné zdroje na našom trhu. Nie je to však pravidlom, mnoho lacnejších LED zdrojov stále produkuje neprimeraný šum. Z tohoto dôvodu je realizované testovanie LED svietidiel zaznamenané na grafe 2.5. Najvyšší šum, ktorý môže značne vplyvať na komunikáciu BPL modemov je zaznamenaný produkciou LED svietidla Tesla. Úroveň šumu sa nachádza vysoko nad ostatnými testovanými svietidlami. Použitie lacnejšieho LED pásiku napájaného externým spínaným zdrojom spôsobuje zvýšenú produkciu šumu. Vzhľadom na nameranú úroveň šumu LED pásiku je predpoklad, že nebude výrazným spôsobom ovplyvňovať komunikáciu modemov pripojených do danej siete. LED žiarovka od značky EMOS má dobre vyriešené odšumenie. Úroveň šumu ktorý produkuje je zhodná s klasickou 40 W halogénovou žiarovkou.



Obr. 2.5: Graf šumu svietidiel.

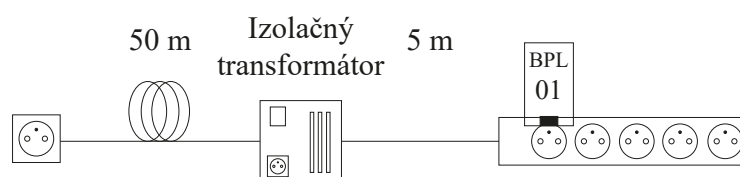
2.2 Meranie domácej topológie

Meranie domácej topológie zahŕňa výber modemov dvoch výrobcov. Prototypový modem (od značky XINGTERA) označovaný, ako D1 a komerčne dostupný modem (DEVOLO Magic 2) D2. Obe zariadenia sú postavené na štandarde G.hn a pracujú v podobnej šírke pásma. Modem D2 disponuje o 6 MHz vyšším prenosovým spektrom ako D1. Jednotne podporujú MIMO komunikáciu umožňujúcu dosiahnutie väčšej priepustnosti sieťového rozhrania. Obe spomínané zariadenia s ich parametrami sú zhrnuté v tabuľke 2.1. Ako meracie zariadenie úrovni šumu v spektre slúži modem D1 disponujúci touto funkcionalitou a užívateľskou aplikáciou s podporou vizualizácie priebehov. Umožňuje export údajov do .csv formátu. Z tohoto formátu boli následne spracované aj výsledné dáta. Modem meria úroveň šumu pre každú OFDM subnosnú samostatne. Ako bolo spomenuté v kapitole štandardu G.hn, šírka OFDM subnosnej má šírku 24,4141 kHz, čo predstavuje pre pásmo 2-80 MHz 3202 hodnôt. Počet hodnôt je dostatočne vysoký pre podrobné vyhodnocovanie šumu na elektrickom vedení.

Tab. 2.1: Parametre testovaných BPL modemov.

Label	BPL Modem	Štandard	Šírka pásma	PHY priepustnosť MIMO
			[MHz]	[Mbit/s]
D1	Prototyp	G.hn	2–80	1200
D2	Komerčný	G.hn	2–86	2000

Nasledujúce merané topológie pozostávajú z 50 m dlhého predlžovacieho prívodu, ktorý prepája topológiu so zdrojom elektrickej energie v zásuvke laboratória. Izolačný transformátor je využitý, ako oddelovacie zariadenie pre zvýšenú minimalizáciu rušenia z elektrických rozvodov. Predlžovací prívod dlhý 5 m prepája prvý modem s oddelovacím transformátorom. Táto opísaná časť usporiadania meracieho pracoviska zobrazená na obrázku 2.6 je rovnaká pre všetky merania, aby sa zabezpečili čo najefektívnejšie podmienky merania. Všetky odmerané hodnoty pochádzajú z polohy druhého modemu BPL02.

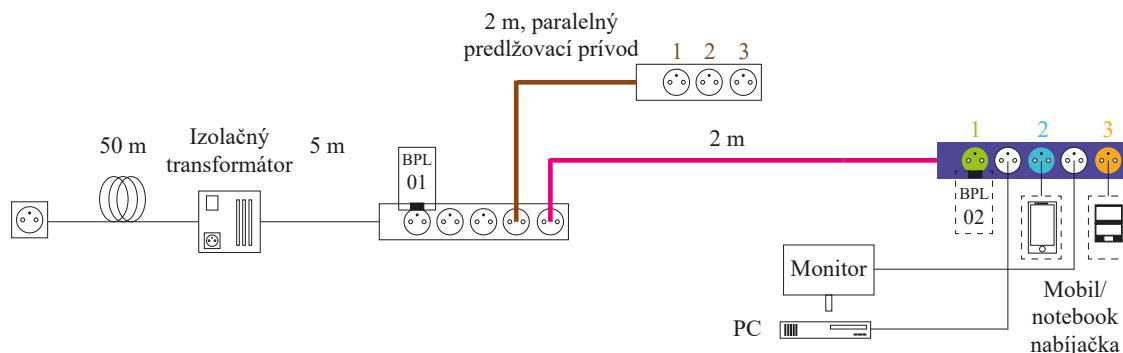


Obr. 2.6: Počiatočná topológia redukcie šumu.

Prvá meraná topológia je znázornená na obrázku 2.7. Dve 2 m predlžovacie šnúry sú pripojené do 5 m predlžovacej šnúry. Druhý modem BPL02 je najskôr paralelne pripojený k predlžovacej šnúre (hnedej farby), ktorá sa v tomto zapojení využíva na meranie dátovej priepustnosti a šumu. Druhá predlžovacia šnúra slúži na pripojenie napájania pre počítač, monitor, nabíjacieho adaptéru mobilného telefónu a adaptéru notebooku. Tieto zariadenia rušia komunikáciu produkciou šumu, ktorý simuluje šum v domácom scenári. Prvým meraním (zapojenie 0 na obrázku 2.11 priepustnosti) je meranie, kde boli všetky zariadenia odpojené od druhého predlžovacieho prívodu.

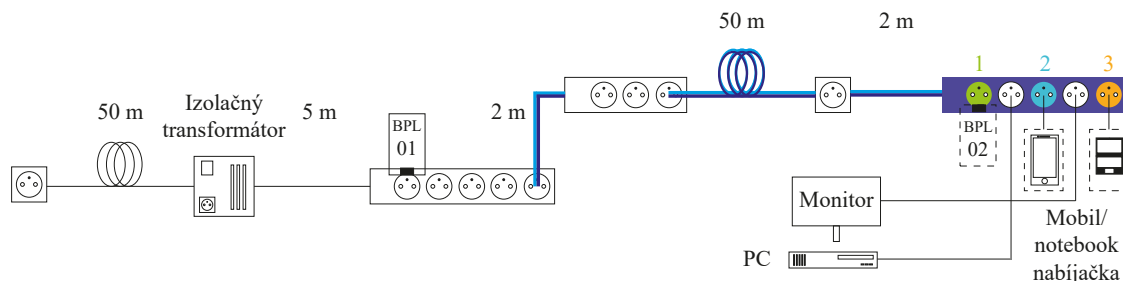
Druhý predlžovací kábel (purpurový) sa použil na meranie šumu a priepustnosti BPL modemov, kedy bol druhý BPL02 postupne pripojený v rôznych polohách: 1 – zelená, 2 – modrá (nabíjačka mobilného telefónu bola presunutá do pozície 1), 3 – oranžová (nabíjačka notebooku presunutá do pozície 2), 0 – fialová (všetky zariadenia odpojené, referenčné meranie). Hnedé a purpurové káble predlžovacích prívodov zobrazené na obrázku 2.7 predstavujú polohu merania priepustnosti zaznamenané v grafe 2.11 a v tabuľke 2.2 pre rôzne polohy pripojenia.

Farebné označenie čísel a zásuviek predstavujú polohu zapojenia BPL modemu vyobrazenú v grafe 2.9, kedy bola snímaná úroveň šumu.



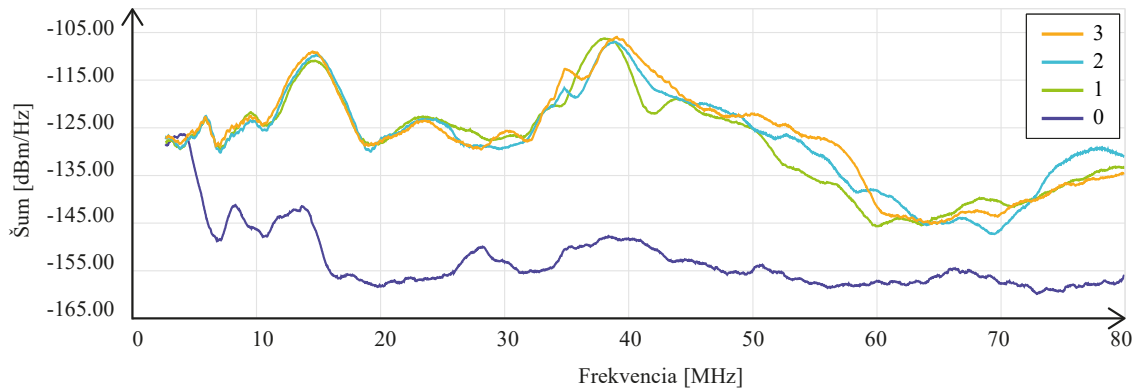
Obr. 2.7: Topológia s 2 m predĺžovacieho prívodu [29].

Druhá meraná topológia 2.8 využíva vyššie popísané pripojenie s oddelovacím transformátorom. Topológia zahŕňa 2 m, 50 m, a 2 m predĺžovacie prívody, ku ktorým sú pripojené zariadenia produkujúce šum a druhý BPL modem. Spôsob merania v poslednom predĺžovacom prívode so zapojenými zariadeniami a farebný popis sú totožné so spôsobom použitým v prvej meranej topológii. Výsledky úrovni šumu sú zobrazené v grafe 2.10. Modré a tmavomodro označené káble predĺžovacieho prívodu označujú linky v grafe merania priepustnosti 2.11. Hodnoty boli zaznamenané do tabuľky 2.2.



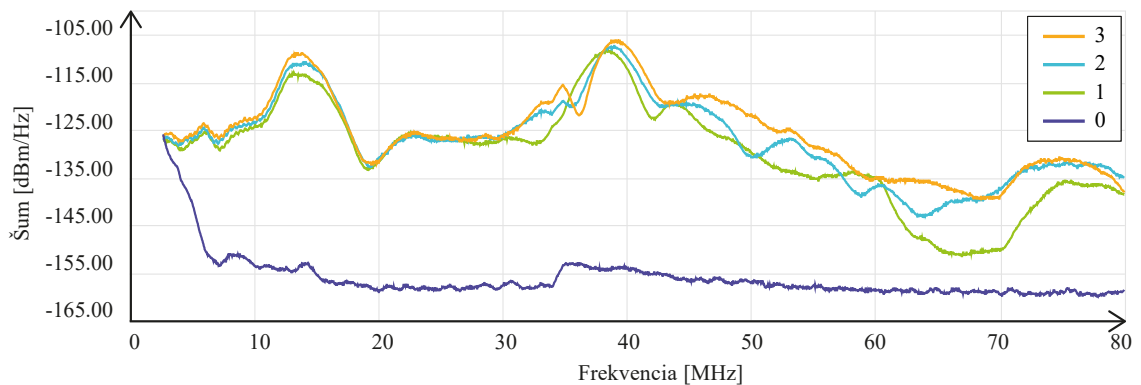
Obr. 2.8: Topológia s 54 m predĺžovacieho prívodu [29].

Graf na obrázku 2.9 zobrazuje úroveň šumu závislého od frekvencie z prvej meranej topológie, v ktorej hodnoty sa zaznamenávajú na druhom predĺžovacom prívode so zariadeniami. 0 – fialová krivka reprezentuje referenčné meranie bez šumu zariadení, kde bol BPL02 v polohe 1 a ostatné zariadenia odpojené. Krivky 1, 2, 3 zobrazujú zmeny pozície zariadení a BPL modemu v predĺžovacej šnúre, ako je znázornené na obrázku 2.7. Obrázok 2.9 znázorňuje situáciu, kedy po pripojení zariadení nastáva nárast hladiny šumu v priemere o 10–15 dB. Zelená krivka reprezentuje polohu 1 v predĺžovacom prívode s nižšou úrovňou šumu, ako ostatné dve polohy.



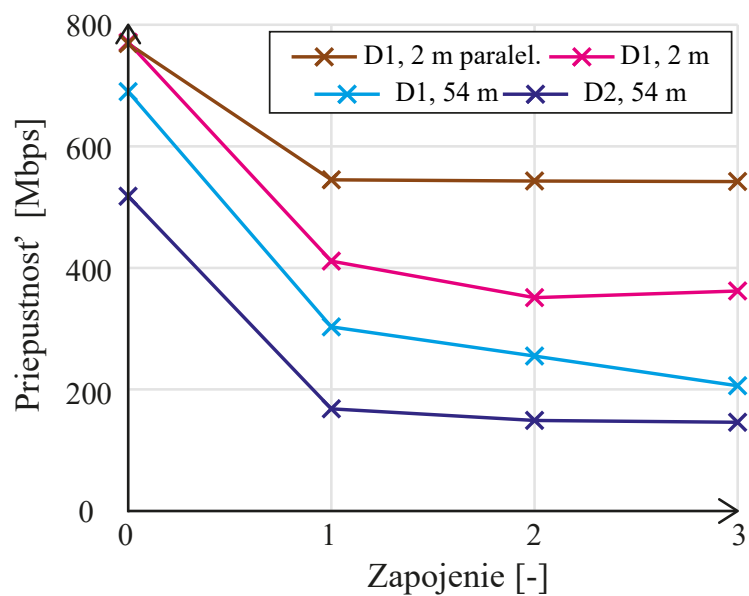
Obr. 2.9: Graf úrovně šumu pre topológiu s 2 m predĺžovacieho prívodu [29].

Úrovně šumu zobrazené na obrázku 2.10 predstavujú meranie druhej topológie. Krivka 0 má plochejšiu charakteristiku priebehu v porovnaní s predchádzajúcim meraním (obrázok 2.9), pretože 50 m dlhá predĺžovacia šnúra mohla odfiltrovať na základe vyššej hodnoty útlmu viac šumu pochádzajúceho z napájacieho vedenia. Úroveň šumu vo frekvenčnom pásme nad 45 MHz je vyššia ako v predchádzajúcich meraniach. Je to spôsobené nižším vysielačím výkonom BPL modemov na týchto frekvenciách. Podobne, ako pri predchádzajúcom meraní, najnižšiu úroveň šumu možno pozorovať v polohe 1.



Obr. 2.10: Graf úrovně šumu pre topológiu s 54 m predĺžovacieho prívodu [29].

Graf na obrázku 2.11 predstavuje porovnanie priepustnosti siete v závislosti na polohe BPL modemu a zariadení pripojených do predĺžovacieho káblu pre prvú a druhú topológiu. Namerané hodnoty sa nachádzajú v tabuľke 2.2. Hnedá a purpurová krivka predstavujú D1 – XINGTERA v prvej topológii. Azúrová a tmavomodrá krivka pre zariadenia D1, D2 – DEVOLO v druhej topológii. Zapojenie 0 reprezentuje predĺžovací prívod bez pripojených zariadení produkujúcich šum iba s pripojením BPL modemu. 1, 2, 3 označujú pozície pripojenia modemu v predĺžovacom prívode [29].



Obr. 2.11: Priepustnosť – poloha zapojenia v predlžovacom prívoде [29].

Tab. 2.2: Priepustnosť pre rôzne typy zapojení a zariadení [29].

BPL Modem		D1	D1	D1	D2
Dĺžka vedenia [m]		2	2, paralel.	54	54
		Priepustnosť [Mbps]			
Zapojenie	Bez zariadení (0)	771	769	690	518
	1	411	545	303	168
	2	351	543	255	149
	3	362	542	206	146

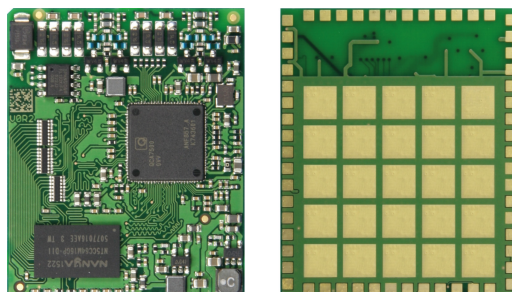
3 Riešenie praktickej časti

3.1 Prehľad dostupných BPL modulov

Pri výbere vhodného BPL modulu aplikovateľného do návrhu DPS (doska plošných spojov) prototypu BPL modemu je predovšetkým nutné dbať na dostupnosť vývojových kitov, časové možnosti doručenia modulu a následnú dostatočnú dokumentáciu zapojenia. Možnosť dostupnosti vývojového kitu s osadeným BPL modulom je dôležitým faktorom pri výbere finálneho modulu z dôvodu vyvarovania sa možným problémom s nedostatočnou dokumentáciou. Výrobcovia BPL modulov bežne poskytujú možnosť nákupu iba veľkého množstva modulov veľkým firmám. Preto je náš výber obmedzený na dodávateľov umožňujúcich nákup malého množstva modulov a poskytujúcich dodanie vývojového kitu s osadeným modulom. Pozornosť bola venovaná aj softwarovým riešeniam dodávaným k jednotlivým vývojovým kitom.

3.1.1 PLC Stamp 1200 Micro

Tento modul od firmy I2SE je založený na BPL čipe QCA7500 od firmy Qualcomm Atheros. Komunikácia po metalickom vedení, na ktoré je naviazaný širokopásmový signál je založená na štandarde HomePlug AV2, podporovaným širokým spektrom zariadení. Metalickým vedením môže byť striedavá 110/230 V elektrická sieť, jednosmerné vedenie, alebo 2–3 vodičové vedenie bez napätia. Fyzická vrstva sa vyznačuje rýchlosťou maximálne 1,2 Gbit/s. Modulačnou technológiou je OFDM v šírke pásma 1,5–67,5 MHz. Podporuje techniky SISO aj MIMO. O kryptografické zabezpečenie komunikácie sa stará symetrická bloková šifra AES-128. Prepojenie medzi QCA7500 a Ethernetovým čipom umožňujú dve komunikačné rozhrania RGMII a RMII. Rozhranie RGMII umožňuje prevádzku Gigabit Ethernetu [30]. Modul PLC Stamp 1200 Micro je súčasťou vývojového kitu PLC Stamp 1200 Micro Evaluation Kit, ktorý bol pri výbere vhodného modulu otestovaný.



Obr. 3.1: Modul PLC Stamp 1200 Micro [30].

3.1.2 MOD923

Modul od firmy Xingtera MOD923 implementuje v sebe chipset od rovnakej spoločnosti XT810/200. Modul dokáže prenášať signál rôznymi typmi káblov, zahrňujúc využitie koaxiálneho káblu, krúteného páru, jednosmerného a striedavého elektrického vedenia. Výrobca uvádza silnú odolnosť voči rušeniu. Modulačnou technikou je OFDM, ktorej 432 subnosných je umiestnených v spektre od 2 do 28 MHz. Rýchlosť fyzickej vrstvy je 240 Mbit/s a MAC vrstvy 140 Mbit/s. Riešenie tejto firmy poskytuje Ethernetový čip integrovaný na jednej DPS spolu s BPL chipsetom a podporu 10/100 Ethernet. Komunikácia medzi modemami je šifrovaná AES-128. Vyznačuje sa tiež komplexným riešením s integrovanou väzobnou časťou signálu do metalického vedenia. Súčasťou zakúpenia vývojového kitu XTV3031 je aj software XTManager poskytujúci podrobné nastavenia topológie cez Ethernetové a UART rozhranie. K dispozícii je aj automatické čítanie údajov SNR a Noise elektrickej siete, avšak tieto údaje sú k dispozícii len ako náhľad na aktuálne javy. Výrobca tento modul prezentuje vďaka jeho optimálnym vlastnostiam ako užitočné priemyselné riešenie nachádzajúce uplatnenie v zabezpečovacích kamerách, automobilových riešeniach, automatickom odčítavaní dát z elektromerov a iné [31]. Testovanie modulu s vývojovým kitom XTV3031 zahŕňalo testy priepustnosti, odolnosti voči šumu a taktiež konfiguračné možnosti dodávaného software.

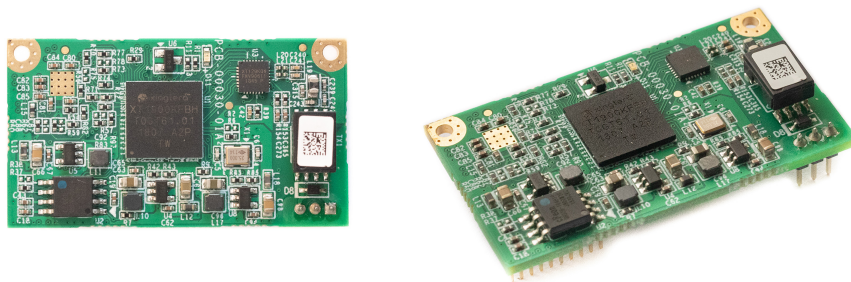


Obr. 3.2: Modul Xingtera MOD923.

3.1.3 MOD957

Jedným z najnovších zariadení dostupných na trhu je vývojový kit XTV6000 od firmy Xingtera, ktorý bol uvedený na trh v roku 2021. Tento vývojový kit je postavený na BPL chipsete XT1900/129 podporujúcom najnovší z BPL štandardov, štandard G.hn. Modul MOD957 rovnakého výrobcu stavia na rovnakom chipsete. Prenos modulovaného signálu podporuje prostredníctvom ľubovoľného diferenčne vedeného média predovšetkým po koaxiálnom kábli, krútenom pári alebo po elektrickom vedení. Na tieto tri spomenuté média má špeciálne upravený firmware a väzobný obvod pre dosiahnutie optimálnych prenosových vlastností. Zhodne ako u predchádzajúcich modulov je použitou modulačnou technikou OFDM využívajúce šírku pásma

od 2–80 MHz. Rýchlosť PHY udáva výrobca 600 Mbit/s a rýchlosť na MAC vrstve maximálne 400 Mbit/s. MOD957 obsahuje na jednej doske spoločne s BPL čipsetom a väzobným členom aj Ethernet čip podporujúci 10/100/1000M Ethernet. Druhým dátovým rozhraním, ktoré podporuje modul je UART a to do rýchlosti 115200 bps. O zabezpečenie komunikácie sa stará AES-128. Modul je navrhnutý, ako zariadenie s ultra-nízkou spotrebou energie v pracovnom režime do 2,3 W. Doplnený je o menič DC/DC vzhľadom na minimalizáciu a jednoduchosť zapojenia na rôzne scenáre [32]. Ovládanie modulu MOD957 je možné priamym prístupom z webového rozhrania alebo prostredníctvom dodaného software XCT3.1_Rel umožňujúcim od výberu profilu pre daný typ použitého metalického vedenia, cez základné a pokročilé možnosti smerovania až po vyčítavanie komunikačných parametrov a parametrov elektrického vedenia. Výrobca uvádza niekoľko scenárov využitia riešenia MOD957 napríklad opätovné využitie existujúcich koaxiálnych káblov na obnovu analógových kamier na IP, IoT konektivita prostredníctvom využitia existujúcich koaxiálnych káblov a krútených dvojliniek, inteligentná domácnosť prostredníctvom AC rozvodov, využitie jednosmerného napätia kombinovaného s IP tokom dát, zabezpečenie IP konektivity cez vlečné káble výťahov, ovládanie robotov cez 1,5 km dlhý kábel. Vývojový kit bol testovaný na možnosti priepustnosti, odolnosť voči blízkemu šumu zariadení a preskúvané boli jeho možnosti prepojenia s dodávaným software XCT3.1_Rel, ktorý okrem konfiguračných položiek zahŕňa vyčítavanie údajov ako SNR_PROBE, SNR_DATA, PSD_RX a NOISE.



Obr. 3.3: Modul Xingtera MOD957.

Všetky spomínané moduly boli otestované na priepustnosť, ktorú dosahujú v rôznych meracích scenároch a za pôsobenia šumu. Preskúmaná bola možnosť konfigurácie modemov prostredníctvom dodaných software. Vzhľadom na výsledky meraní a testov je pre tvorbu BPL modemu zvolený modul od firmy Xingtera MOD957. V rámci testovania dosahoval najpriaznivejšie hodnoty priepustnosti vo všetkých testovaných scenároch. Poskytuje taktiež najpriaznivejšie softwarové riešenie, ktoré okrem konfiguračných možností umožňuje meranie spektra šumu v rozsahu jeho

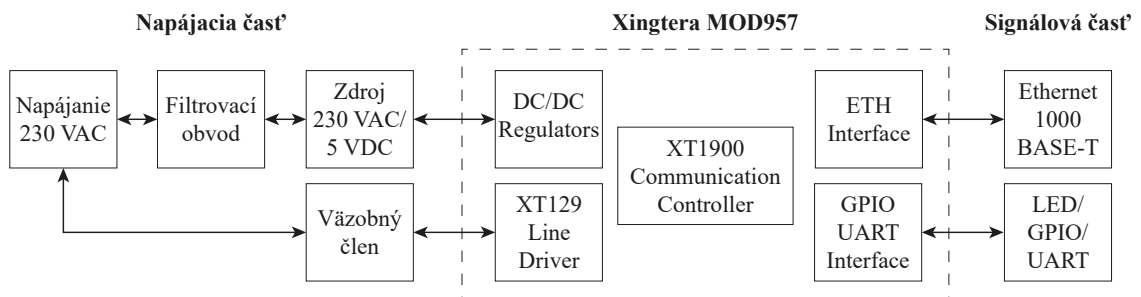
pracovnej šírky pásma. Tieto hodnoty možno vyčítať pomocou dodaného software XCT3.1_Rel a ukladať do .csv súboru. Takto získané dáta môžu byť využité, ako zdrojové súbory pre vyšetovanie vlastností prenosového média a detekciu pripojených zariadení do elektrického vedenia na základe spektra šumu, ktoré je pre každé zariadenie jedinečné. Tabuľka 3.1 zobrazuje prehľad základných parametrov testovaných modulov.

Tab. 3.1: Prehľad parametrov BPL modulov.

Modul:	PLC Stamp 1200 Micro	MOD923	MOD957
Vývojový kit:	PLC Stamp 1200 Ev. Kit	XTV3031	XTV6000
Štandard:	HomePlug AV2	IEEE HD-PLC	ITU-T G.hn
Rýchlosť PHY:	1,2 Gbit/s	240 Mbit/s	1,2 Gbit/s
Módy prenosu:	SISO, MIMO	SISO	SISO
Šírka pásma:	1,5–67,5 MHz	2–28 MHz	2–80 MHz
Šifrovanie:	AES-128	AES-128	AES-128

3.2 Návrh DPS BPL modemu

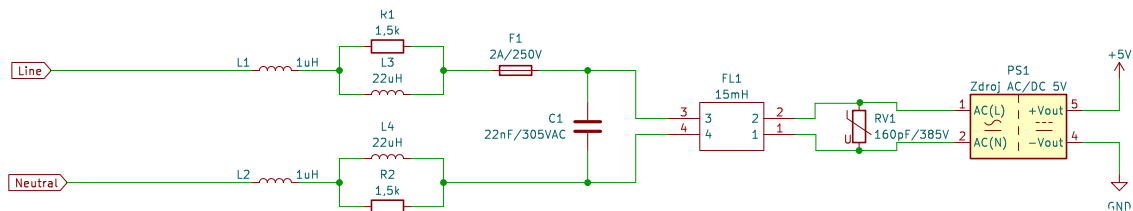
Návrh DPS sa riadi referenčným dizajnom zapojenia MOD957 [33] dodaného výrobcom. Zjednodušená bloková schéma navrhovaných častí sa nachádza na obrázku 3.4 V rámci návrhu je riešený EMI filter, ktorý sekunduje EMI filtru implementovanom v napájacom zdroji 230 VAC/5 VDC. V napájacej časti návrhu sa nachádza aj väzobná časť PLC signálu. Za modulom MOD957 sa nachádza signálová časť pozostávajúca predovšetkým z komponentov starajúcich sa o bezproblémový tok signálov medzi Ethernetovým čipom a konektorom RJ45. GPIO výstupy slúžia na obsluhu modulu a indikáciu stavu prostredníctvom LED. Modul podporuje prenos dát cez UART rozhranie, ktoré je zohľadnené aj v návrhu DPS.



Obr. 3.4: Bloková schéma navrhovaného BPL modemu.

3.2.1 Napájacia časť

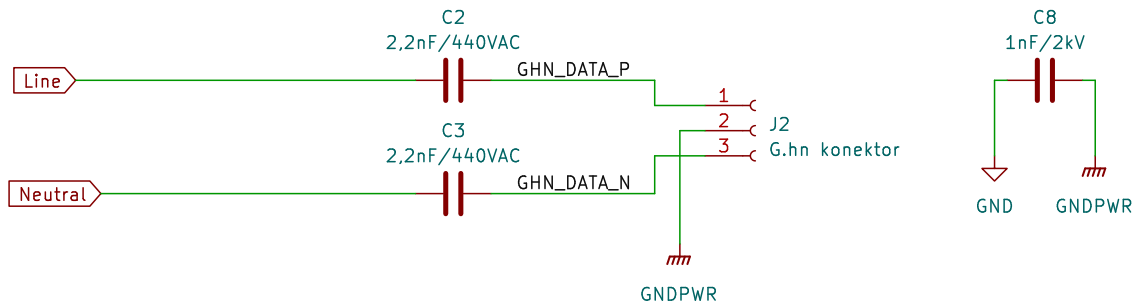
Napájacia časť na schéme 3.5 pozostáva z dvoch častí. Prvá, s funkciou filtrovania signálov okolo 20 MHz, za ktorou sa nachádza ochranná poistka F1. Zostavená je z výkonového induktoru s hodnotou 1 uH v sériovom zapojení s paralelnou kombináciou 1,5 k Ω rezistoru a 22 uH výkonového induktoru. Výkonové induktory sú zvolené s optimálnou toleranciou 20 %, ktorá je dostačujúca a poskytuje priaznivú cenu. Poistka na fázovom vodiči chráni obvod pred prúdmi väčšími ako 2 A a jedná sa o komponent s pomalým nábehom a nízkym vnútorným odporom. Druhou časťou je filtrovacía časť, s ochranným kondenzátorom C1 a tlmivkou FL1, filtrujúcou frekvencie okolo 50 MHz. Kondenzátor C1 s hodnotou 22 nF je umiestnený paralelne medzi fázový a neutrálny vodič. Ide o ochranný EMI kondenzátor filtrujúci vysoko-frekvenčné signály a zabraňuje prenosu impulzného rušenia. Tlmivka FL1 má hodnotu 15 mH a slúži na potlačenie elektromagnetického rušenia zo spínaného zdroja. Ochranu proti prepätiu zabezpečuje varistor RV1 s hodnotou 160 pF, za ktorým sa nachádza napájací zdroj. Modul MOD957 je napájaný jednosmerným napätím 5 V s maximálnym odberom 2,7 W a priemernou spotrebou 2,3 W. Preto je zvolený napájací zdroj PS1 RAC05-05SK meniaci 230 VAC na 5 VDC a 1 A s maximálnym výkonom 5 W poskytujúci dostatočné parametre na napájanie BPL modemu. Tento typ napájacieho zdroja je zvolený do návrhu DPS pre jeho minimálne rozmery, čím sa výrazne optimalizuje veľkosť celého modemu.



Obr. 3.5: Napájacia časť modemu.

Modul MOD957 obsahuje osadený väzobný obvod PLC signálu TNK TSQ211. Osadený väzobný člen na DPS MOD957 je veľkou prednosťou vybraného modulu. Umožňuje jednoduché pripojenie signálu do elektrického vedenia prostredníctvom väzobných kondenzátorov. PLC signál je privedený na navrhovanú DPS prostredníctvom trojpinového konektora označeného J2. Signál je vedený diferencne prispôbeným vedením na impedanciu 100 Ω po väzobné kondenzátory C2 a C3. Väzobné kondenzátory majú hodnotu 2200 pF a sú vybrané na základe simulácie parametru S na stránkach dodávateľa Mouser. Z charakteristiky plynie, že kondenzátory efektívne naviažu signál do elektrického vedenia v spektre 2–150 MHz. Toto rozmedzie spĺňa požiadavky na spektrum, v ktorom vysielala BPL modul. Pod diferencnými párami je

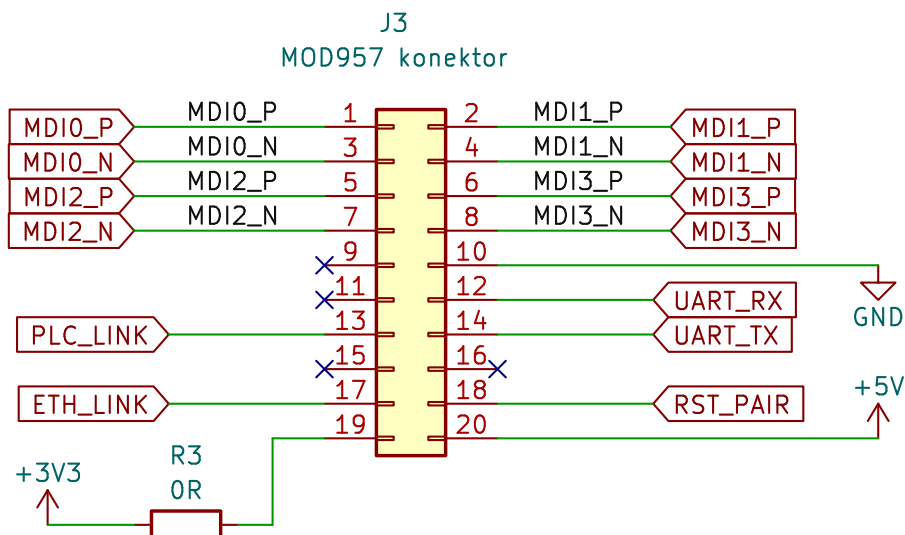
vedená silová zem GNDPWR, prepojená so zemou GND cez vysokonapäťový kondenzátor C8 s hodnotou 1 nF podľa doporučenej schémy zapojenia. Pripojenie PLC signálu do vedenia 230 VAC sa nachádza na schéme 3.6.



Obr. 3.6: Vázobný obvod PLC signálu do 230 VAC.

3.2.2 Signálová časť s MOD957

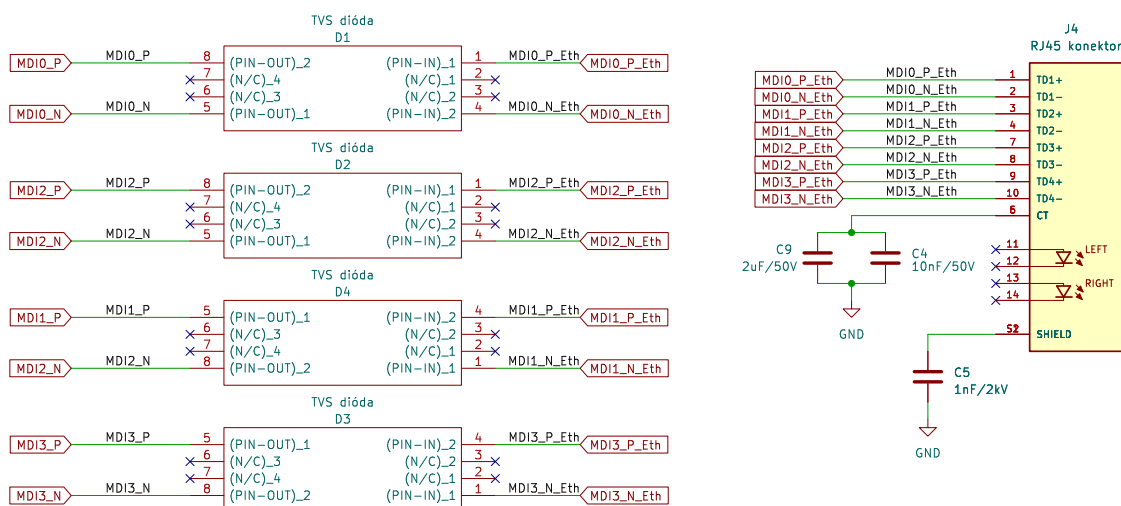
Signálová časť navrhovanej DPS BPL modemu obsahuje pripojenie komponentov na konektor J3 zobrazený na obrázku 3.7, do ktorého je pripojený modul MOD957. Konektor J3 pozostáva z 20 pinov, na ktoré sú vyvedené signály z Ethernetového čipu, LED indikátory stavu PLC a Ethernet spojenia, ovládanie funkcie reset, párovania a komunikácia rozhrania UART. Na tento konektor je privedené napájanie +5 V a zem GND. Integrovaný DC/DC menič napätia prevádza +5 V na napätie +3,3 V, ktoré je z konektoru J3 vyvedené na 19 pin a na DPS cez rezistor R3 s hodnotou 0 Ω.



Obr. 3.7: Konektor J3 modulu MOD957.

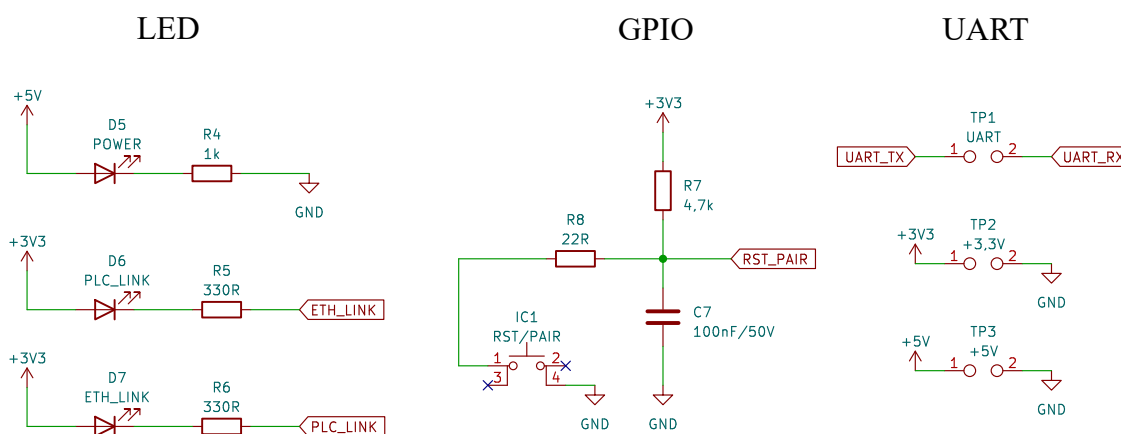
Vybraný modul implementuje v sebe Ethernetový čip RTL8211F, čím sa návrh DPS modemu zjednodušuje a odpadajú možné problémy spojené so správnym nastavením konfigurácie samotného Ethernetového čipu. Zapojenie medzi Ethernetovým čipom, ktorého výstupy sú značené ako MDI piny a konektorom RJ45 sa riadi doporučeniami zapojení MID rozhrania. Základnou požiadavkou na spoľahlivú komunikáciu rýchleho gigabitového Ethernetu je viesť pod diferenčnými párami súvislú zemniacu vrstvu. Diferenčné páry viesť čo najviac priamo, minimalizovať prechody medzi vrstvami a zabezpečiť rovnakú dĺžku diferenčných párov, a tiež dĺžku vodičov diferenčného páru. Vyhnúť sa križovaniu signálových ciest, aby nedošlo k vzájomnému ovplyvneniu signálov. Poslednou z hlavných požiadaviek je oddeliť zem RJ45 konektoru od ostatného zemnenia prostredníctvom vhodne zvoleného kondenzátoru.

Z konektoru modulu J33.7 sú vyvedené 4 diferenčné páry MDI (Medium Dependent Interface) rozhrania. Pod celou dĺžkou týchto spojov je navrhované vedenie zeme GND. Aby sa zabránilo nadbytočným napätiam a elektrostatickým výbojom, ktoré by mohli poškodiť Ethernetové rozhranie alebo aj samotný modul, je pre každý diferenčný pár použitá ochranná TVS (Transit Voltage Suppression) dióda D1–D4. Výber TVS diódy je sústredený na aplikačný scenár uplatnený v našom zapojení. TVS dióda SP4031 je jedným z najdrahších komponentov zapojenia. Zohľadnený bol nárok na bezpečnú komunikáciu tak, aby sa zamedzilo možnému poškodeniu zariadení pred a za diódou. Dióda má kapacitanciu 2 pF. Táto hodnota umožňuje veľmi rýchle prenosy medzi ETH rozhraním a RJ45 konektorom. Dokáže absorbovať až 35 A. Okrem ochrany sú v púzde diódy aj rezistory na každom vodiči. Umožňujú pohltiť nežiadúce pulzy. Zabezpečuje ochranu medzi PHY rozhraním Ethernetového čipu a konektorom RJ45. Cieľom návrhu bolo minimalizovať rozmery DPS a preto je vo finálnom návrhu použitý konektor RJ45 v schéme 3.8 označený J4, obsahujúci filtrovacie transformátory a balančné rezistory spojené na ochranný kondenzátor v tele konektoru. Pin CT konektoru RJ45 spájajúci stredy filtrovacích transformátorov zo strany Ethernetového čipu je pripojený k zemi pomocou paralelnej kombinácie C9 a C4 slúžiacej na vyhladenie priebehov signálov. Hodnota kondenzátoru C9 je 2 μ F a C4 10 nF. Balančné rezistory spojené ochranným kondenzátorom, na strane prípojky Ethernetového kábla v tele konektoru. Vyvedené sú cez tienenie konektoru a pripojené k zemi vysokonapäťovým kondenzátorom C5, ktorého hodnota je 1 nF. Zapojenie konektoru RJ45 sa riadi doporučeným zapojením.



Obr. 3.8: Pripojenie Ethernetového čipu a výstup RJ45.

Rozhranie konektoru J3 3.7 poskytuje možnosti pripojenia indikačných LED diód stavu PLC a ETH spojenia, resetovacieho tlačítka so spojenou funkciou párovania modemov a UART rozhrania. Realizácia pripojenia je zobrazená na schéme 3.9. Prvým zapojením je pripojenie LED indikačných diód, kde prvou je indikácia stavu napájania diódou D5 priamo z pinu +5V. Indikácia stavu aktivity prenosu PLC a ETH signálu prebieha na diódach D6 a D7. LED diódy sú vybrané v THT (Through-Hole Technology) prevedení, aby odpadla nutnosť použitia svetlovodov z diód. Spojením pinu RST_PAIR konektoru J3 na zem je modem uvedený do stavu reset alebo pri párovej procedúre v programe XCT3.1_Rel uvedený do stavu párovania. Pre prípadné možnosti debuggingu sú na DPS modemu vyvedené piny rozhrania UART a príslušné napäťové úrovne na pripojenie špecializovaného prevodníku.



Obr. 3.9: Pripojenie LED, GPIO a UART.

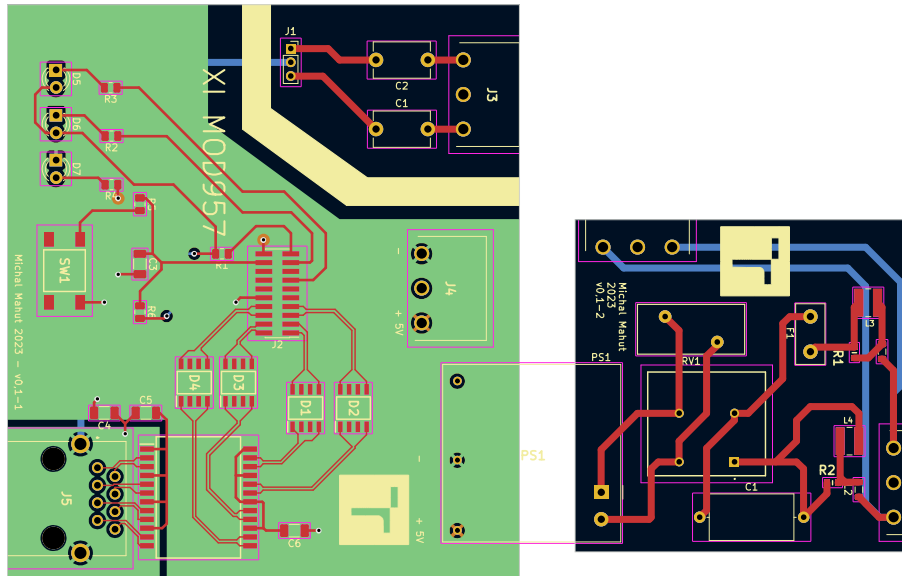
3.3 Vyhodenie DPS BPL modemu

Podkapitola 3.2 opisuje jednotlivé časti návrhu schémy finálnej verzie modemu. Návrh dosky plošných spojov bol realizovaný v programe KiCad PCB Editor vo verzii 7.0.1.. Pri navrhovaní DPS BPL modemu bol zohľadnený dôraz na minimalizáciu jeho veľkosti s cieľom dosiahnuť optimálny rozmer vyhotovenia spoločne s krabičkou z 3D tlače. Väčšina vybraných komponentov na osadenie je THT veľkosti. Pri komponentoch, kde bolo možné vyberať veľkosť, boli volené SMD (Surface Mount Device) komponenty. Veľkosti rezistorov boli zvolené s veľkosťou púzdra 603 a kondenzátorov 1206. Tieto veľkosti boli zvolené s ohľadom na ručné osádzanie komponentov. Súčiastky v návrhu DPS boli vyberané primárne z dostupných knižníc, ktoré poskytoval navrhovací program. Tam, kde to nebolo možné, stránky distribútorov poskytli potrebné súbory, ktoré boli importované do návrhového programu.

3.3.1 Prototyp BPL modemu v0.1

Prvý vyrobený prototyp BPL modemu bol zostavený z dvoch dosiek 3.10. Prvá signálová doska má rozmery 83×74 mm a druhá združujúca filtrovanie a napájanie 48×49 mm. Tento koncept mal za cieľ otestovať funkčnosť väzby PLC signálu a možnosti samotného modulu MOD957. Rozdelenie DPS modemu na dve časti sa ukázalo ako dobré riešenie, pretože na filtrovacej doske sa nachádzala vážna záhada. Pri návrhu sa vychádzalo z dodanej dokumentácie od výrobcu čipu a jednotlivých komponentov. Očíslovanie výstupov tlmivky v dokumentácii však nekorešpondovalo s reálnym zapojením. Došlo k situácii, kedy tlmivka osadená na doske skratovala celé zapojenie, to znamená fázový a neutrálny vodič boli priamo spojené v tlmivke. Po zistení tejto závady bola tlmivka osadená do DPS správnym smerom a tým bola záhada skratu odstránená. Následne bola celá filtrovacía časť podrobená meraniu, aby overilo správne výstupné napätie v časti osadenia vstupu 230 VAC do napájacieho zdroja. Signálová doska bola najskôr testovaná pripojením na napájanie z laboratórneho zdroja. Po overení funkčnosti napájacej dosky a signálovej, boli dosky plošných spojov vzájomne prepojené prostredníctvom napájacieho zdroja. Na signálovej doske sa počítalo s použitím dedikovaného filtrovacieho obvodu pred konektorom RJ45. Toto riešenie nebolo z hľadiska minimalizácie rozmerov finálneho zapojenia vhodné pre veľkosť samotného komponentu. Riešenie s dedikovaným filtrovacím obvodom bolo tiež finančne nákladnejšie, pretože bolo možné zakúpiť RJ45 konektor s filtrovacím obvodom za polovičnú cenu, ako bol samotný filtrovací obvod. Modul vykázal známky vyššieho odberu po naboťovaní a nedokázal realizovať komunikáciu s pripojeným PC. Tým bola odhalená druhá chybná časť zapojenia. Išlo o pripojenie tlačítka na ovládanie párovania a resetu, ktoré privádzalo modul do stavu konštantne

zopnutého reset príkazu. Testom bol podrobený aj samotný modul MOD957, pri ktorom bola odskúšaná funkcionlita prenosu signálu po elektrickom vedení a komunikácia cez Ethernet rozhranie. Otestované zapojenie prototypu v0.1 poskytlo cenné poznatky, ktoré boli zapracované do finálneho návrhu DPS modemu v1.1.



Obr. 3.10: Návrh DPS prototypu v0.1, KiCad.

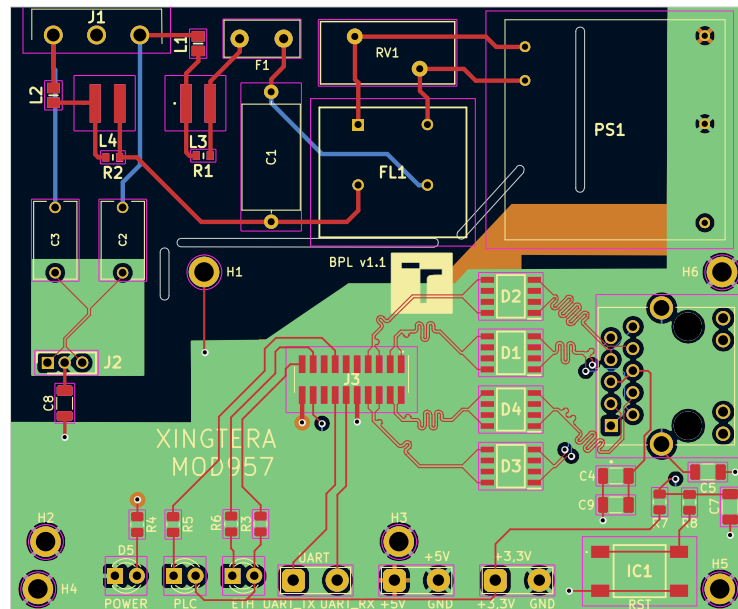
3.3.2 Prototyp BPL modemu v1.1

Návrh 3.11 zobrazuje finálnu DPS BPL modemu so zapracovanými poznatkami z prototypu v0,1. Celková veľkosť bola zmenšená na 85×70 mm. Návrh je rozdelený do dvoch logických častí, na silovú časť a signálovú. Obe časti sú od seba oddelené izolačnou medzerou (Clearance – vzdušná vzdialenosť vodivých častí) a zároveň oddelené prídavnou vrtanou oddelovaciou dierou (Creepage – vzdialenosť dvoch vodivých častí po povrchu dosky) zväčšujúcou dištančnú medzeru. Odstránený bol filtračný transformátor pred konektorom RJ45, rovnako opravené bolo aj zapojenie tlačítka a tlmivky silovej časti. Diferenčné páry medzi výstupom Ethernetového čipu na konektore J3 a konektorom RJ45 boli upravené na rovnaké dĺžky medzi sebou a aj samostatná dĺžka ciest diferénčného páru. Pridané bolo aj diferénčné vedenie PLC signálu z konektoru J2 do väzbových kondenzátorov prispôsobené na 100Ω . Pridané boli vývody UART rozhrania, montážne diery na osadenie MOD957 a samotnej DPS do 3D krabičky. Doska plošných spojov pozostáva zo 4 vrstiev. Prvá, vrchná vrstva zahŕňa vedenie väčšiny silových a signálových ciest. Prechádzanie cez vrstvy na poslednú spodnú vrstvu, bolo využité v prípade silovej časti na optimalizáciu vzdialeností komponentov. V signálovej časti boli prechody medzi vrstvami využité

na lepšie vedenie diferenčných párov medzi TVS diódami a RJ45 konektorom. Na zabezpečenie rovnakých dĺžok diferenčných párov boli vzdialenosti prechodov dopočítané a páry následne dorovnané na rovnaké dĺžky. Na druhej vrstve sa nachádza v signálovej časti vyvedená zemniaca plocha. V tretej vrstve je vedené napájanie +5 V a v časti pod konektorom RJ45 čiastočne vedená zem pod diferenčnými pármami.

Výroba DPS bola objednaná v Číne vo firme JLCPCB, ktorá umožňuje objednanie malého počtu dosiek s nízkymi nákladmi na výrobu a rýchle dodanie. Finálna verzia bola objednaná v 5 kusoch pri voľbe 4 vrstvomého vyhotovenia. Hrúbka dosky je 1,6 mm. Zostavenie vrstiev dosky JLC04161H-3313 umožňuje šírku cesty diferenčného páru 0,1222 mm s medzerou medzi cestami 0,2032 mm, aby bolo dodržané diferenčné prispôsobenie impedancie 100 Ω.

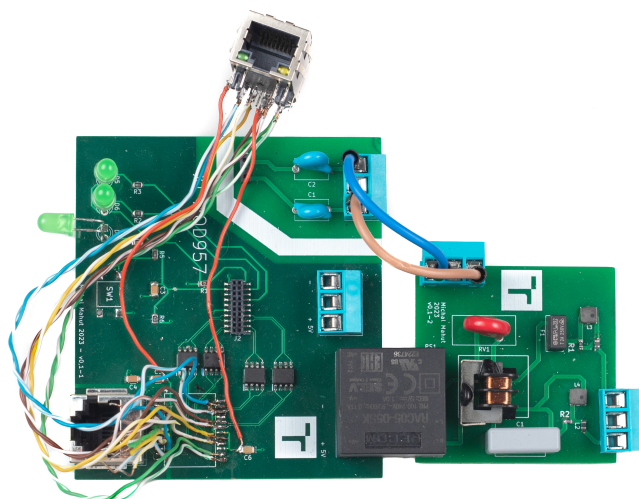
Nákupná cena 5 kusov 4-vrstvovej dosky do veľkosti 100 × 100 mm s výberom zostavenia vrstiev JLC04161H-3313 bola 7 \$. Medzinárodná doprava s dodaním do 10 pracovných dní spoločnosťou FedEx stála 19.28 \$.



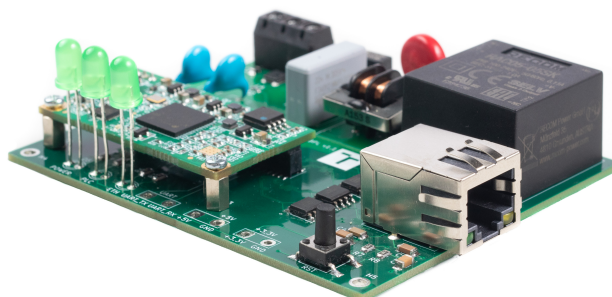
Obr. 3.11: Finálny návrh DPS BPL modemu v1.1, KiCad.

3.4 Vyhotovenie prototypu v0.1 a v1.1

Vyhotovenie prvého prototypu v0.1 zobrazuje obrázok 3.12 a finálny prototyp v1.1 obrázok 3.13. Obe verzie boli osadené ručne v priestoroch študentského laboratória. Cenová kalkulácia na výrobu jedného kusu prototypu v1.1 je zobrazená v tabuľke 3.2. Testovanie vlastností prototypu v1.1 je opísané v kapitole 3.6.



Obr. 3.12: Zostrojený prototyp v0.1.



Obr. 3.13: Zostrojený finálny prototyp v1.1.

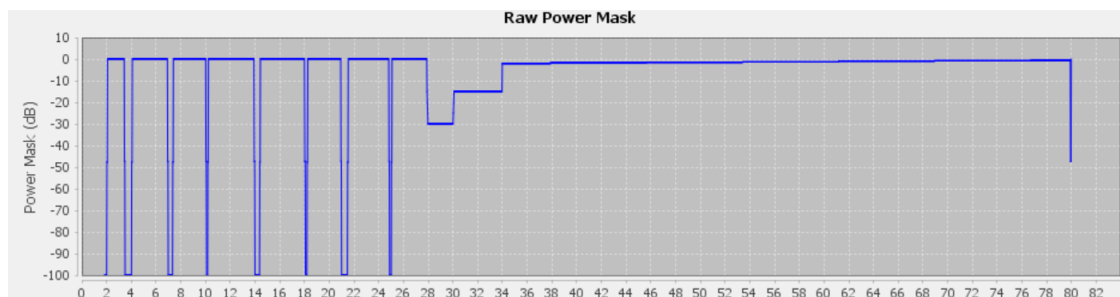
Tab. 3.2: Cenová kalkulácia nákladov na výrobu prototypu v1.1.

Označenie	Popis	Hodnota	Dodávateľ	Kusov	Cena/Kus
C1	Kondenzátor	22 nF/250 V	Mouser	1	21,31 CZK
C2,C3	Kondenzátor	2,2 nF/440 VAC	Mouser	2	9,15 CZK
C4	Kondenzátor	10 nF/50 V	Mouser	1	2,27 CZK
C5,C8	Kondenzátor	1 nF/2 kV	Mouser	2	19,04 CZK
C7	Kondenzátor	100 nF/50 V	Mouser	1	0,56 CZK
C9	Kondenzátor	2 uF/50 V	Mouser	1	1,42 CZK
D1–D4	TVS dióda	2 pF/30kV	Mouser	4	53,70 CZK
D5–D7	LED	THT zelená	Mouser	3	5,68 CZK
F1	Poistka	2 A/250 VAC	Mouser	1	27,50 CZK
FL1	Tlmivka	15 mH	Mouser	1	16,42 CZK
IC1	Tlačítko	6 × 6 mm	Mouser	1	4,69 CZK
J1	Konektor	3 × 1 16A/250V	GME	1	5,14 CZK
J2	Konektor	3 × 1 pin	Mouser	1	32,96 CZK
J3	Konektor	10 × 2 pin	Mouser	1	58,81 CZK
J4	Konektor	RJ-45	Farnell	1	29,10 CZK
L1,L2	Induktor	1 uH	Mouser	2	2,76 CZK
L3,L4	Induktor	22 uH	Mouser	2	7,78 CZK
PS1	Zdroj	230 V/5 V 5 W	Mouser	1	305,98 CZK
R1,R2	Rezistor	1,5 k	Mouser	2	0,40 CZK
R3	Rezistor	0 R	Mouser	1	1,12 CZK
R4	Rezistor	1 k	Mouser	1	0,74 CZK
R5,R6	Rezistor	330 R	Mouser	1	0,91 CZK
R7	Rezistor	4,7 k	Mouser	1	1,02 CZK
R8	Rezistor	22 R	Mouser	1	0,94 CZK
RV1	Varistor	160 pF/385 V	Mouser	1	12,64 CZK
	DSP	4 vrstvová	JLPCB	1	39,77 CZK
	BPL Modul	MOD957	Xingtera	1	1 712,12 CZK
Spolu =					2 585,52 CZK

Cenová kalkulácia jednotlivých komponentov použitých na zostrojenie finálneho modemu v1.1 nezahŕňa prepravné náklady. Ceny položiek sú vyššie z dôvodu malého odberu komponentov. Súčiastky potrebné na zostrojenie modemov boli zakúpené na zostrojenie 6 kusov modemov, tým pádom bola aj cena komponentov značne vyššia. Tento počet komponentov bol určený z dôvodu plánovaného zostrojenia viacerých verzií dosiek plošných spojov. Najvyššia cena jednotlivého komponentu sa nachádza pri zdroji PS1. Cenu zdroja je možné znížiť o trojnásobok a to na hodnotu 100 CZK, kúpou iného zdroja. Ďalšou značne nákladnou položkou boli TVS diódy pred ETH konektorom, ktorých jednotková cena je 53,70 CZK. Túto cenu by bolo možné znížiť zakúpením menej presného, ale pre prácu dostačujúceho komponentu, na 50 CZK za 1 kus s 8 pinmi, namiesto použitia 4 komponentov. Ostatné komponenty boli volené presne a s danou cenou z dôvodu dodržania predpísaných hodnôt výrobcom v dodanej dokumentácii. Najväčšou možnosťou úspory celkových nákladov na zostrojenie BPL modemu je samotný modul. Firma Xingtera umožňuje len veľké odbery komponentov. Na základe toho bola pri zakúpení len 10 kusov modulov cena za jeden kus značne vyššia. Pri zakúpení väčšieho množstva modulov je možné znížiť cenu za jeden kus, až o polovicu. Na základe týchto úspor je pri výrobe väčšieho množstva kusov predpokladaná cena výroby 1 kusu BPL modemu 1362 CZK.

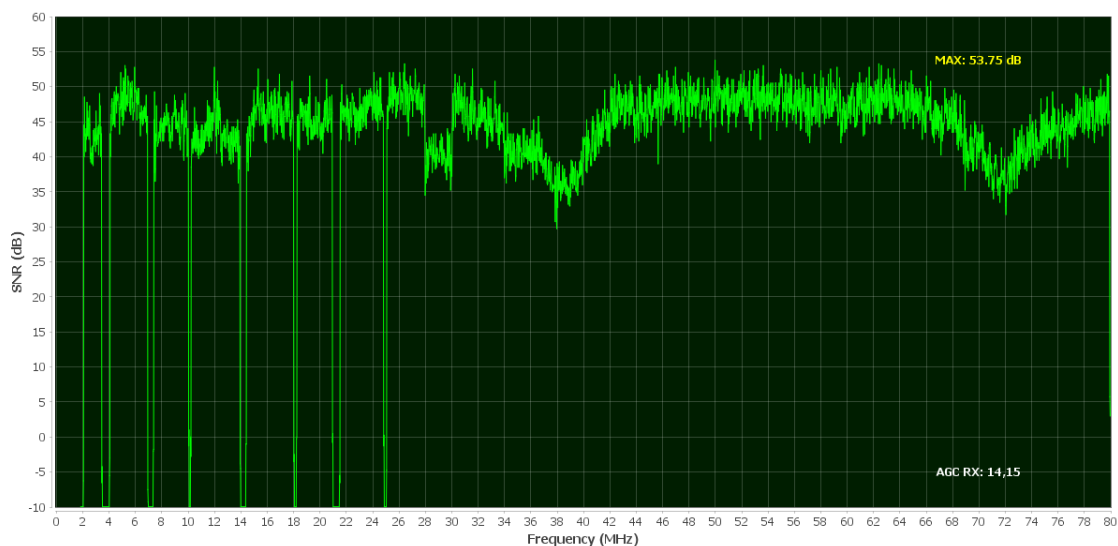
3.5 Prenosová maska modemu v1.1

Prenosová maska modemu v1.1 pracujúceho na štandarde G.hn je ovplyvnená doporučeniami ITU-T a európskou legislatívou. Aby boli splnené tieto požiadavky je nevyhnutné využitie tzv. notchingu. Ide o obmedzenie alebo vyňatie určitých vysielačích frekvencií. Výkonová maska s nochingom zobrazuje 3.14. Frekvencie od 0–1,8 MHz sú odobraté na základe doporučení ITU-T, tak aby nebol ovplyvňovaný prenos xDSL systémov. Ostatné frekvencie sú podľa [15, 16] vyňaté alebo výkonovo obmedzené, vzhľadom na to, že na týchto frekvenciách prebieha komunikácia rádioamatérskych vysielačích staníc. Širokopásmový prenos modemu v1.1 na elektrickom vedení prebieha po aplikovaní notchingu v šírke pásma od 2–80 MHz. Konfiguračný software XCT3.1_Rel umožňuje prídanie vlastných pravidiel. Je možné nakonfigurovať si vlastné vyňatie určitých frekvencií, prípadne znížiť výkon vysielačania v určitom spektre. Meniť výrobné pravidlá rešpektujúce doporučená a normy nie je možné z dôvodu legislatívy.



Obr. 3.14: Výkonová maska modemu v1.1.

Obrázok 3.15 zobrazuje meranie odstupú signálu od šumu pri prenose modemov v1.1. Z odmeraného priebehu je vidieť odstránené frekvencie a frekvencie na ktorých je obmedzený výkon vysielaného signálu. Namerané údaje presne nekopírujú výkonovú masku, pretože prenos je ovplyvnený prirodzeným šumom na elektrickom vedení. Meranie bolo realizované obslužným software XCT3.1_Rel dodaného k modulom MOD957.

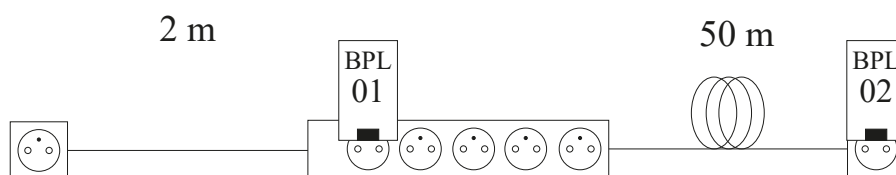


Obr. 3.15: Meranie SNR programom XCT3.1_Rel.

3.6 Porovnanie priepustnosti BPL modemu v1.1 s komerčne dostupnými riešeniami

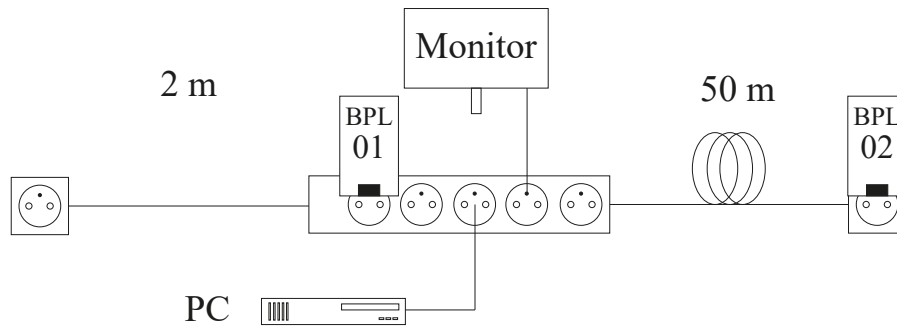
Zhotovený finálny prototyp BPL modemu v1.1 bol podrobený testovaniu priepustnosti v 3 rôznych topológiach spoločne s komerčne dostupnými riešeniami viacerých výrobcov. Každá z nameraných hodnôt je priemerom 4 meraní. Meranie priepustnosti bolo realizované prostredníctvom programu iPerf3 s nastavením TCP dátového toku, veľkosť dátového okna 2 MB, interval merania 1 s a s dĺžkou testu 5 minút. Na meranie priepustnosti boli použité dva počítače. Jeden mal spustený program iPerf3 v režime serveru a druhý slúžil ako klient. Počítač v režime klient bol pripojený ethernetovým káblom do prvého z BPL modemov (BPL01). Klientský počítač bol pripojený do BPL02. Niektoré z testovaných modemov podporovali aj MIMO komunikáciu, ktorá bola pre jednoduchosť porovnania s prototypom v1.1 vypnutá a testovanie prebiehalo v SISO móde.

V prvej topológii 3.16 bola 2 m predlžovačka pripojená do zásuvky v školskom laboratóriu. Následne bol do nej pripojený aj prvý modem a následovalo 50 m predlžovacieho prívodu, do ktorého konca je zapojený druhý z modemov. Otestovaných bolo 7 modemov rôznych výrobcov a štandardov. Výsledky konkrétnych modemov sú zobrazené v tabuľke 3.3.



Obr. 3.16: Test priepustnosti modemov 50 m topológia.

Druhá topológia 3.17 bola doplnená o pripojenie a následné zapnutie zariadení: monitor a počítač. Zapojenie modemov zostalo v rovnakých pozíciach ako v predchádzajúcej topológii. V tejto topológii bolo zhodne otestovaných 7 modemov. Výsledky tohoto merania zachytáva tabuľka 3.3 v stĺpci "Topológia 2". Prvá a druhá topológia slúžia na otestovanie modemov z hľadiska odolnosti na šum po pripojení a zapnutí zariadení často pripájaných vedľa modemov. Porovnávaným parametrom je pokles priepustnosti medzi týmito topológiami. Vzďialenosť 50 m medzi modemami je stanovená z reálnych vzdialeností modemov pripojených v domácich rozvodoch.



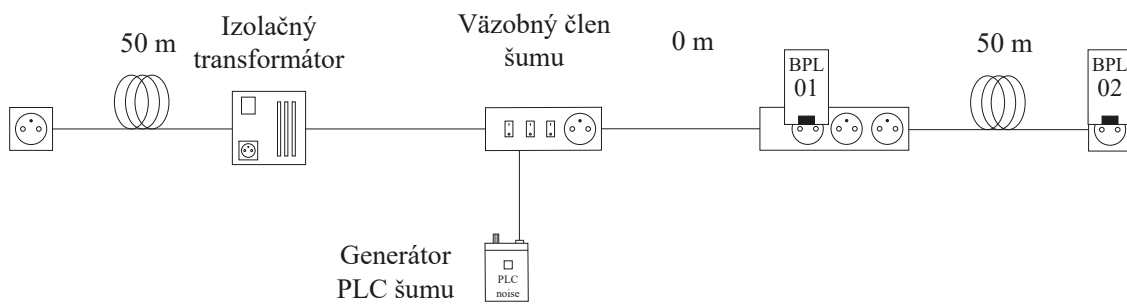
Obr. 3.17: Test priepustnosti modemov 50 m topológia so zapnutými zariadeniami.

Tab. 3.3: Porovnanie priepustností BPL modemov v 2 domácich topológiach.

Modem	Štandard	Topológia 1	Topológia 2
		Priepustnosť [Mbit/s]	
ZyXEL PLA5206	HomePlug AV2	292	238,3
ZyXEL PLA5206 v2	HomePlug AV2	313	262
NETGEAR PL1200	HomePlug AV2	106	69,77
Xingtera XTV3031	IEEE HD-PLC	95,13	92,9
devolo Magic 2	G.hn	297	211
Xingtera XTV6000	G.hn	321	262
Prototyp v1.1	G.hn	284	261

Merania boli zamerané na porovnanie modemov rôznych výrobcov v zapojeniach, ktoré mali čo najlepšie demonštrovať domácí scenár ich pripojenia.

Posledným, tretím, meraním 3.18 bolo meranie realizované na maximálne možné odrušenom elektrickom vedení. Aby bolo zabezpečené odrušenie, je izolačný transformátor zapojený do 50 m predlžovačky, ktorá slúžila ako prvotný útlmový člen signálov prenikajúcich zo zásuvky. Zvyšné signály oddelil transformátor, do ktorého je pripojený väzobný člen šumu [34], ktorý viaže šum z PLC šumového generátoru PROPOWER-1.



Obr. 3.18: Test priepustnosti modemov 50 m topológia s generátorom šumu.

Generovanie šumu je v rozsahu 1–50 MHz s výstupným výkonom 17 dBm. Prípravok na viazanie šumu má 1 zásuvku, v ktorej bola pripojená roztrójka s prvým BPL modemom a 50 m predĺžovačkou, do ktorej výstupu bol pripojený druhý BPL modem. Väzobný prípravok na meranie vplyvov šumu umožňuje nastavenie troch rôznych väzobných zapojení. V tomto prípade boli zapnuté všetky naraz, pretože toto zapojenie umožňuje najefektívnejšie viazanie šumu do elektrického vedenia. Meranie bolo realizované s cieľom otestovania odolnosti modemov na blízky šum a to konkrétne v 4 intenzitách. Prvým meraním bolo meranie bez pôsobenia šumu a následne bola postupne zvyšovaná intenzita generovania šumu v 3 krokoch: minimálny (MIN), stredný (MID) a maximálny (MAX) šum. Modemy, ktoré boli otestované prenášajú signál na elektrickom vedení rovnakým štandardom G.hn. Odmerané boli: komerčne dostupný modem devolo Magic 2, vývojový kit Xingtera XTV6000 a zostrojený prototyp v1.1. Sledovaná je hodnota priepustnosti v stave bez šumu a pozornosť je zameraná najmä na pokles priepustnosti po zapnutí šumu. Testované modemy s výsledkami priepustnosti zobrazuje tabuľka 3.6.

Tab. 3.4: Priepustnosť G.hn modemov v závislosti na úrovni blízkeho šumu.

	Bez šumu	MIN šum	MID šum	MAX šum
Modem	Priepustnosť [Mbit/s]			
devolo Magic 2	351	129	88	57
Xingtera XTV6000	360	207	146	95
Prototyp v1.1	302	197	154	121

3.6.1 Zhodnotenie výsledkov meraní

V prvej meranej topológii 3.16, bol skúmaný vplyv šumu zo zásuvky školského laboratória na komunikáciu modemov, ktoré boli od seba vzdialené 50 m. Porovnané údaje sa nachádzajú v tabuľke 3.3. Porovnaním s vývojovým kitom Xingtera XTV6000 dosahuje prototyp v1.1 iba 8,1 % pokles priepustnosti po pripojení a zapnutí zariadení (topológia 3.17) počítač a monitor v blízkosti prvého z modemov. XTV6000 v tomto prípade dosiahol poklesu 18,38 %. Porovnaním samotných rýchlostí je prototyp v1.1 o 11,53 % horší bez aktívnych zariadení. Po zapnutí zariadení je prototyp v1.1 horší len o zanedbateľný pokles 0,38 % oproti vývojovému kitu. Tento pokles je s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobený zvýšeným šumom spínaného zdroja prototypu v1.1, ktorý bol odmeraný samotnými modemami. Tento zvýšený šum sa pri prototypu v1.1 nachádza v 20–24 MHz, kde je nárast oproti XTV6000 o 10 dBm. V pásmach 46–48 MHz a 53–55 MHz je šum vyšší o 5 dBm. Podobný, komerčne dostupný modem na rovnakom štandarde ako prototyp v1.1, devolo Magic 2,

má pokles po zapnutí zariadení o 20,86 % vyšší oproti prototypu a to 28,96 %.

Tretie meranie zobrazené na obrázku 3.18 skúmalo vplyv blízkeho šumu na odrušenej sieti za izolačným transformátorom. Porovnávané modemy boli rovnakého štandardu G.hn. Meranie zachytáva tabuľka 3.6, ktorej hodnoty sú použité v tomto porovnaní. V situácii, kedy bola meracia topológia bez prítomnosti šumu je prototyp v1.1 horší v hodnotách priepustnosti o 13,96 % oproti devolo Magic 2 a o 16,11 % voči XTV6000. Po zapnutí šumu na minimálnu hodnotu vykazuje prototyp v1.1 o 34,52 % lepšie hodnoty priepustnosti ako devolo Magic 2. V porovnaní s XTV6000 je horší len o 4,83 %. Pri meraní strednej úrovne generovaného šumu je prototyp lepší ako oba porovnávané modemy. V poslednom meraní pri maximálnej úrovni šumu je zostrojený prototyp lepší o 21,49 % oproti XTV6000 a až o 52,89 % ako komerčne dostupné devolo Magic 2.

Z nameraných hodnôt a skúmaním poklesov priepustnosti vo všetkých topológiach vykazuje zostrojený prototyp v1.1 lepšiu odolnosť na pôsobenie šumu voči všetkým skúmaným modemom. Výnimkou je rozdiel priepustnosti medzi prvou a druhou topológiu pri modeme XTV3031. Pokles priepustnosti bol len 2,34 %.

Záver

Diplomová práca sa zaoberala problematikou návrhu a zostrojenia BPL modemu. Prvá časť práce bola venovaná teoretickému rozboru PLC komunikácie a jej rozdeleniu na úzkopásmový a širokopásmový prenos. Predstavené boli najčastejšie používané štandardy úzkopásmovej PLC a širokopásmovej BPL technológie. Pozornosť bola venovaná problematike prispôsobenia prenosového kanálu a vplyvu šumu na prenosové vlastnosti komunikujúcich BPL modemov. Pri problematike vplyvu šumu boli realizované merania šumových charakteristík vybratých zariadení a meranie prenosových vlastností BPL modemov. Zostavené testovacie topológie cieľili na otestovanie vhodného zapojenia modemov v domácej topológii tak, aby bol minimalizovaný šum produkovaný aktívnymi zariadeniami pripojenými v blízkosti modemu a tým zabezpečená optimálna priepustnosť.

Riešenie praktickej časti práce prináša detailný rozbor BPL modulov, ktoré boli uvažované na realizáciu návrhu DPS. Vybraným modulom bol MOD957 od firmy Xingtera, ktorý poskytoval najpriaznivejšie vlastnosti, dobrú dokumentáciu a softwarové riešenie so širokou ponukou meracích nástrojov a možností konfigurácie. Finálnemu návrhu BPL modemu predchádzal návrh DPS a osadenie prototypu v0.1, na ktorom boli otestované jednotlivé časti zapojenia. Po zapracovaní zmien a vylepšení bol vypracovaný návrh finálneho prototypu v1.1 a zostrojená doska plošných spojov s rozmermi 85 × 70 mm. Náklady na komponenty a výrobu DPS jedného kusu BPL modemu v1.1 predstavovali 2585 CZK. Vyčíslená cena nezahŕňa prepravné náklady.

Poslednou časťou boli merania prenosových vlastností zostrojeného BPL modemu. Priepustnosť bola meraná prostredníctvom programu iPerf3. Odmerané scenáre zahrňovali 3 meracie topológie, v ktorých boli odmerané aj komerčne dostupné modemy od rôznych výrobcov. Prvá topológia porovnávala pokles priepustnosti BPL modemov po zapnutí zariadení z druhej topológie. V tomto meraní dosahoval zostrojený modem veľmi dobré výsledky, pretože voči modemom rovnakého štandardu dosahuje najmenší pokles priepustnosti po zapnutí zariadení a to len o 8%. Tretie meranie porovnávalo priepustnosti modemov štandardu G.hn pri troch rôznych úrovniach šumu. Základná priepustnosť prototypu v1.1 bez pôsobenia šumu, bola v porovnaní s vývojovým kitom Xingtera XTV6000 o 16,11 % menšia. Tento pokles bol spôsobený predovšetkým spínaným zdrojom. Porovnaním percentuálnej hodnoty poklesu priepustnosti po otestovaní všetkých úrovní šumu voči stavu bez jeho pôsobenia vykazoval prototyp v1.1 lepšie výsledky ako ostatné odmerané BPL modemy.

Na základe nameraných percentuálnych hodnôt poklesov priepustností za pôsobenia šumu je možné konštatovať, že zostavený modem v1.1 je odolnejší voči šumu, ako ostatné porovnávané modemy rovnakého štandardu. Tieto vlastnosti sú

vhodné na nasadenie modemu do aplikácií, v ktorých sa blízko modemov pripájajú rôzne zariadenie spôsobujúce šum. Možnosti ďalšieho rozšírenia práce sú v zostrojení inteligentného SmartHome BPL modemu, schopného zastávať riadenie udalostí v domácnosti integrovaním Raspberry Pi 4 Compute Modul do zapojenia modemu. S využitím dát o šumovej charakteristike prenosového kanálu, ktoré dokáže modem v1.1 vyčítať je možné spracovaním pomocou strojového učenia detegovať druh zariadenia pripojeného v blízkosti BPL modemu.

Literatúra

- [1] ČSN EN 62488-1: *Komunikační systémy po elektrickém vedení pro aplikace v energetických společnostech - Část 1: Plánování analogových a digitálních systémů přenosu po elektrickém vedení provozovaných v elektrických sítích ZVN/VVN/VN*, 2013. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a sátní zkušebnictví.
- [2] IEEE. *1901.2-2013 - IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications* [online]. 2013 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: doi:10.1109/IEEESTD.2013.6679210
- [3] MLYNEK, Petr, Martin KOUTNY, Jiri MISUREC a Zdenek KOLKA, 2014. Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for Street Lighting Control. *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications* [online]. IEEE, 2014, 238-243 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-1-4799-4980-9. Dostupné z: doi:10.1109/ISPLC.2014.6812318
- [4] G3-PLC ALLIANCE. *Narrowband OFDM PLC specifications for G3-PLC networks* [online]. 2021 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://g3-plc.com/download/90/specifications/2579/g3-plc_alliance_-_g3-plc_specifications_-_cenelec_-_arib_-_fcc_-_revision__2021_with_track_changes.pdf
- [5] HOMEGRID FORUM. *Converging Technologies - Moving from HomePNA to G.hn: A Guide for Service Providers* [online]. 2013 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://homegridforum.org/wp-content/uploads/2018/09/hKg8.pdf>
- [6] MLÝNEK, Petr, Martin RUSZ, Lukáš BENEŠL, Ján SLÁČIK a Petr MUSIL. Possibilities of Broadband Power Line Communications for Smart Home and Smart Building Applications. *Sensors 2021* [online]. 2021, **21**(1), 240 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: doi:10.3390/s21010240
- [7] BERGER, Lars Torsten, Andreas SCHWAGER a J. Joaquín ESCUDERO-GARZÁS, 2013. Power Line Communications for Smart Grid Applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering* [online]. **2013**, 1-16 [cit. 2022-12-04]. ISSN 2090-0147. Dostupné z: doi:10.1155/2013/712376
- [8] G3-PLC ALLIANCE. *Overview Benefits: G3-PLC* [online]. [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://g3-plc.com/g3-plc/>

- [9] *ITU-T G.9903 (08/2017): Narrowband orthogonal frequency division multiplexing power line communication transceivers for G3-PLC networks* [online]. 2017 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/13333>
- [10] CHAUVENET, Cedric, Gerard ETHEVE, Mohamed SEDJAI a Manu SHARMA, 2017. G3-PLC based IoT sensor networks for SmartGrid. *2017 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)* [online]. IEEE, 2017, 1-6 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-1-5090-2389-9. Dostupné z: doi:10.1109/ISPLC.2017.7897113
- [11] *HomePlug AV Specification: Version 2.1* [online]. 2014 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: https://docbox.etsi.org/Reference/homeplug_av21/homeplug_av21_specification_final_public.pdf
- [12] HOMEPLUG POWERLINE ALLIANCE. *HomePlug AV2 Technology: Raising the Bar for Sustained High-Throughput Performance and Interoperability for Multi-stream Networking Using Existing Powerline Wiring in the Home* [online]. 2013 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://content.codico.com/fileadmin/media/download/datasheets/powerline-communication/homeplug-av-av2/homeplug-av2-whitepaper.pdf>
- [13] *ITU-T G.9960 (11/2018): Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - System architecture and physical layer specification* [online]. 2018 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/13775>
- [14] CORTES, Jose Antonio, Francisco Javier CANETE, Matias TORIL, Eduardo MARTOS-NAYA, Javier PONCELA, Luis DIEZ a Alicia GARCIA, 2021. Feasibility Study of Power Line Communications for Backhauling Outdoor Small Cells. *IEEE Access* [online]. **9**, 30135-30153 [cit. 2022-12-04]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2021.3059418
- [15] *ČSN EN 50561-1: Zařízení pro komunikaci po vedení používaná v instalacích nízkého napětí - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření - Část 1: Zařízení pro domácí použití*, 2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a sátní zkušebnictví.
- [16] *ČSN EN 50561-3: Zařízení pro komunikaci po vedení používaná v instalacích nízkého napětí - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření - Část 3: Zařízení pracující nad 30 MHz*, 2016. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a sátní zkušebnictví.

- [17] *ITU-T G.9960 (11/2018): Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - System architecture and physical layer specification* [online]. 2018 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/13775>
- [18] *ITU-T G.9961 (11/2018): Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - Data link layer specification* [online]. 2018 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/13776>
- [19] *ITU-T G.9962 (11/2018): Unified high-speed wire-line based home networking transceivers - Management specification* [online]. 2018 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/13777>
- [20] *ITU-T G.9963 (11/2018): Unified high-speed wireline-based home networking transceivers - Multiple input/multiple output specification* [online]. 2018 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <http://handle.itu.int/11.1002/1000/13778>
- [21] *ITU-T G.9964 (12/2011): Unified high-speed wireline-based home networking transceivers — Power spectral density specification* [online]. 2011 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://handle.itu.int/11.1002/1000/11406>
- [22] DEVOLO. *G.hn: New performance dimensions for the home network of the future* [online]. 2022 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.devologlobal.com/technology/ghn>
- [23] *G.hn 2400 Mbps Wave 2 Powerline Pass-thru Gigabit Ethernet Adapter: PLA6456* [online]. 2022 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: <https://www.zyxel.com/global/en/products/powerline/ghn-2400-mbps-wave-2-powerline-pass-thru-gigabit-ethernet-adapter-pla6456>
- [24] SEDLÁČEK, Jiří a Juraj VALSA, 2021. *ELEKTROTECHNIKA II*. Brno, 186 s. Dostupné tiež z: https://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=19315
- [25] CHELANGAT, F., T. J. O. AFULLO a M. MOSALAOSI, 2018. Impedance Modelling, Profiling and Characterisation of the Powerline Communication Channel. *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)* [online]. IEEE, 2018, 2165-2171 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-4-8855-2316-8. Dostupné z: doi:10.23919/PIERS.2018.8597841
- [26] ANTONIALI, Massimo a Andrea M. TONELLO, 2014. Measurement and Characterization of Load Impedances in Home Power Line Grids. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [online]. **63**(3), 548-556 [cit. 2022-12-04]. ISSN 0018-9456. Dostupné z: doi:10.1109/TIM.2013.2280490

- [27] DE PIANTE, Marco a Andrea M. TONELLO, 2016. On Impedance Matching in a Power-Line-Communication System. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* [online]. **63**(7), 653-657 [cit. 2022-12-04]. ISSN 1549-7747. Dostupné z: doi:10.1109/TCSII.2016.2530218
- [28] ANTONIALI, Massimo, Andrea M. TONELLO a Fabio VERSOLATTO, 2013. A Study on the Optimal Receiver Impedance for SNR Maximization in Broadband PLC. *Journal of Electrical and Computer Engineering* [online]. **2013**, 1-11 [cit. 2022-12-04]. ISSN 2090-0147. Dostupné z: doi:10.1155/2013/635086
- [29] MAHÚT, Michal, MUSIL, Petr, ed. Impact of devices connected to powerline on selected BPL topologies. In: NOVÁK, Vítězslav. *Proceedings I of the 28th Conference STUDENT EEICT 2022* [online]. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2022, s. 307-310 [cit. 2022-12-04]. ISBN 978-80-214-6029-4. Dostupné z: https://www.eeict.cz/eeict_download/archiv/sborniky/EEICT_2022_sbornik_1_v2.pdf
- [30] *PLC Stamp 1200 micro Datasheet* [online], 2018. Lipsko: I2SE [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://chargebyte.com/assets/Downloads/plc_stamp_1200_micro_datasheet_rev6.pdf
- [31] Xingtera Co.Ltd, 2020. *MOD923 Communication Controller Module: Datasheet V2.3*. Šanghaj.
- [32] Xingtera Co.Ltd, 2021. *MOD957 Gigabit Communication Controller Module: Datasheet V1.5*. Šanghaj.
- [33] Xingtera Co.Ltd, 2020. *MOD957 Reference Design V1.0: SCH-00033-01A*. Šanghaj.
- [34] MALČEK, Ladislav, MUSIL, Petr, MLÝNEK, Petr ed. Evaluation of broadband couplers for noise injection into powerlines. In: NOVÁK, Vítězslav. *Proceedings I of the 28th Conference STUDENT EEICT 2022* [online]. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2022, s. 227-280 [cit. 2023-03-05]. ISBN 978-80-214-6029-4. Dostupné z: https://www.eeict.cz/eeict_download/archiv/sborniky/EEICT_2022_sbornik_1_v2.pdf

Zoznam symbolov a skratiek

AC	Alternating Current – striedavý prúd
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard – symetrická bloková šifra
BPL	Broadband Over Power Lines – širokopásmový prenos po silnoprúdom vedení
BPSK	Binary-Phase Shift Keying – binárne fázové klúčovanie
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique – Európsky výbor pre normalizáciu v elektrotechnike
ČSN	Česká technická norma
DC	Direct Current – jednosmerný prúd
EMC	Electromagnetic compatibility – elektromagnetická kompatibilita
EMI	Electromagnetic interference – elektromagnetické rušenie
EN	European Standards – Európske technické normy
ETH	Ethernet – technológia počítačových sietí
Ethernet	Ethernet – technológia počítačových sietí
EU	European Union – Európska únia
FCC	Federal Communications Commission
FM	Frequency Modulation – frekvenčná modulácia
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Inštitút pre elektrotechnické a elektronické inžinierstvo
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol – internetový protokol
GND	Ground – zem, referenčný bod pre všetky signály
ITU-T	International Telecommunication Union – Medzinárodná telekomunikačná únia

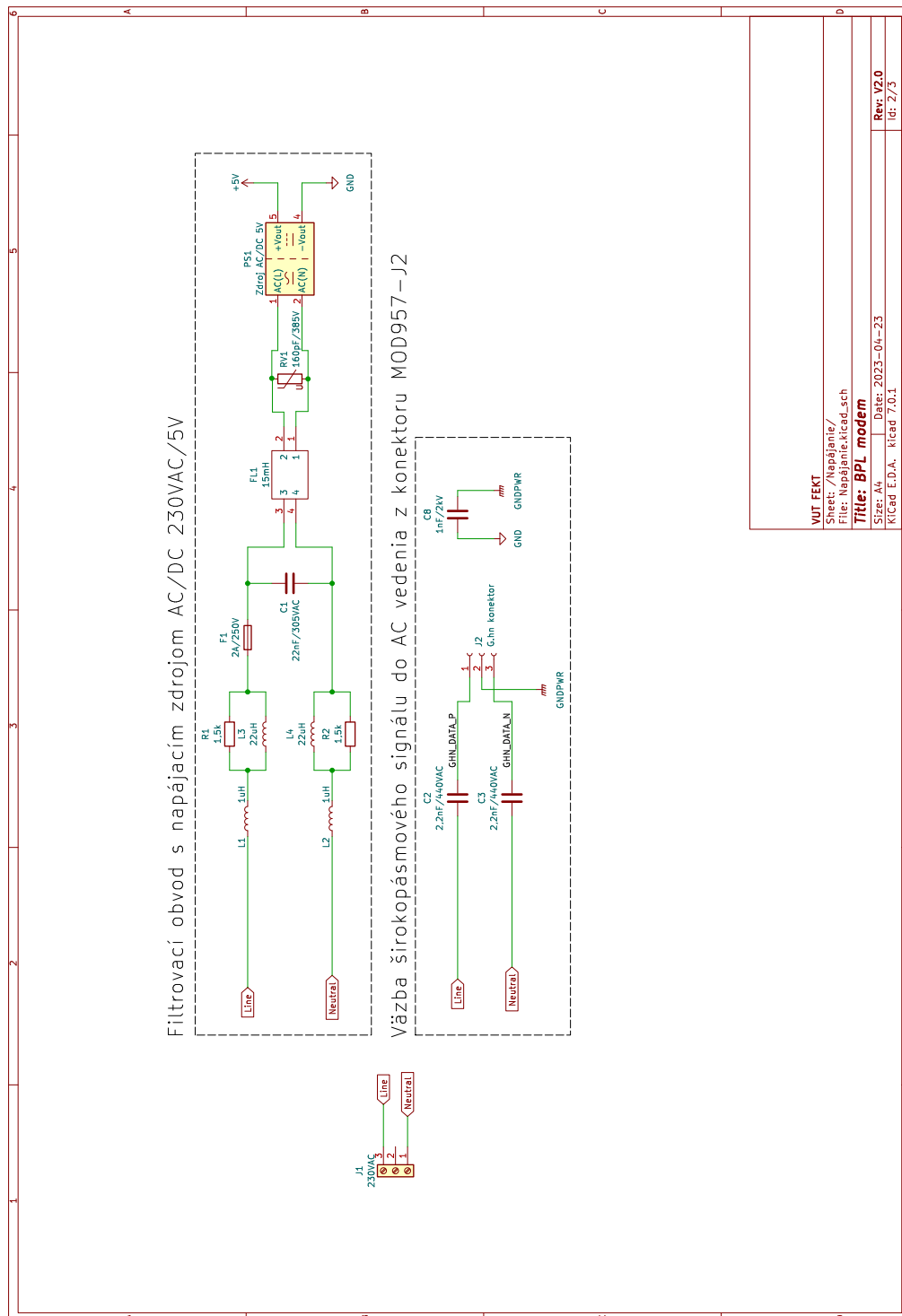
LED	Light Emitting Diode
IPv6	Internet Protocol version 6 – internetový protokol verzie 6
MAC	Medium Access Control
MDI	Medium Independent Interface
MIMO	Multiple Input Multiple Output – viac vstupov viac výstupov
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – ortogonálny multiplex s frekvenčným delením
PC	Personal Computer – osobný počítač
PHY	Physical Layer – fyzická vrstva
PLC	Power-line Communication – komunikácia po silnoprúdom vedení
RGMII	Reduced Gigabit Media Independent Interface
RMII	Reduced Media Independent Interface
SISO	Single Input Single Output – jeden vstup a jeden výstup
SMD	Surface Mount Device – súčiastky na povrchovú montáž
SNR	Signal to Noise Ratio – pomer signálu a šumu
TCP	Transmission Control Protocol – spoľahlivý protokol transportnej vrstvy
THT	Through Hole Technology
TVS	Transient Voltage Suppression – ochrana na potlačenie prechodného napätia
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter – zbernica na asynchrónny sérový prenos dát
UDP	User Datagram Protocol – nespoľahlivý protokol transportnej vrstvy
VDSL	Very High Speed DSL
QAM	Quadrature amplitude modulation – kvadratúrna amplitúdová modulácia

QPSK Quaternary Phase Shift Keying – štvorstavové klúčovanie s fázovým zdvihom

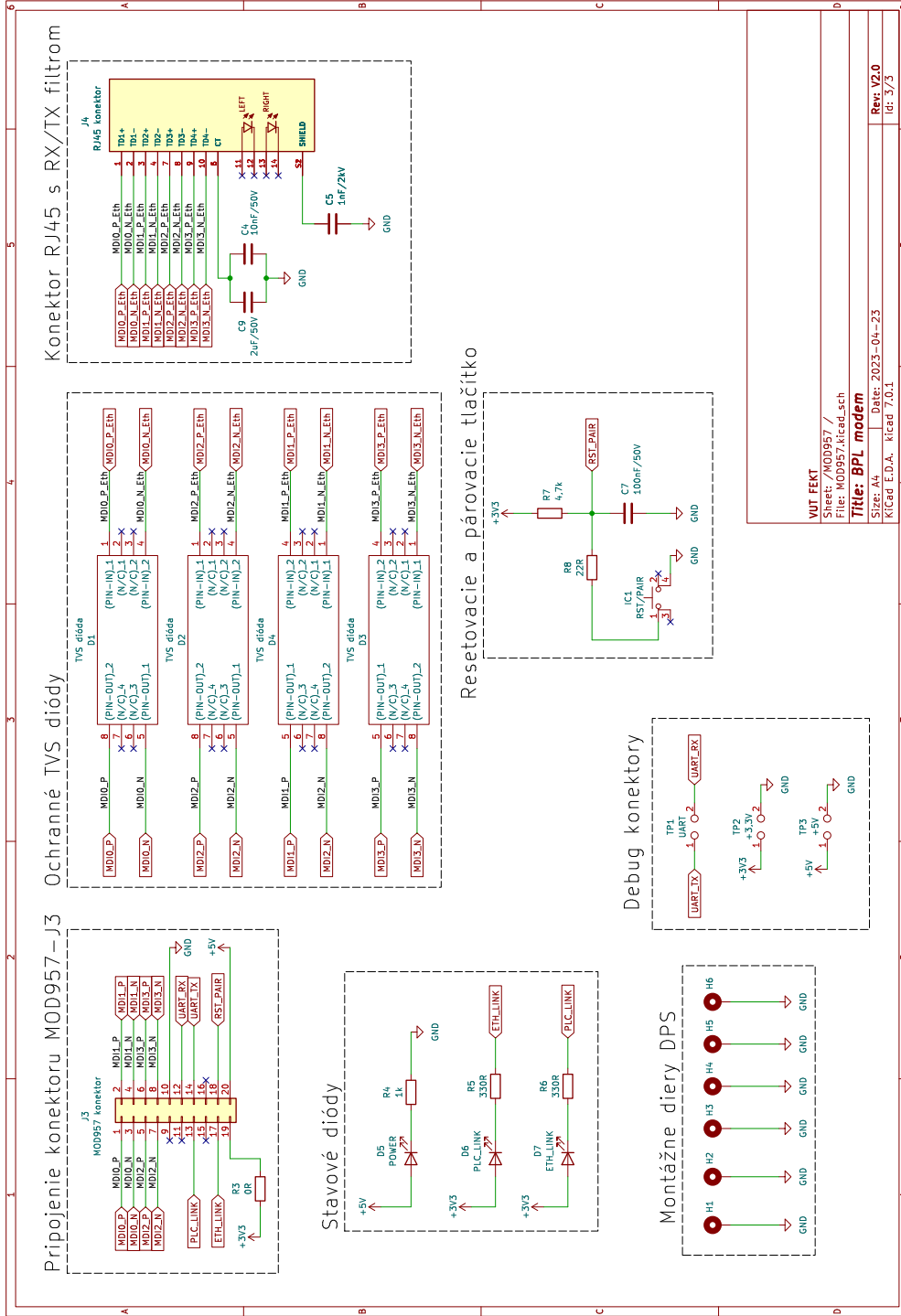
Zoznam príloh

A	Schéma zapojenia BPL modemu v1.1	59
B	Technický výkres 3D modelu krabičky	61
C	Fotografická dokumentácia procesu práce	62
D	Fotografie zostrojeného BPL modemu v1.1	66
E	Obsah elektronickej prílohy	68

A Schéma zapojenia BPL modemu v1.1

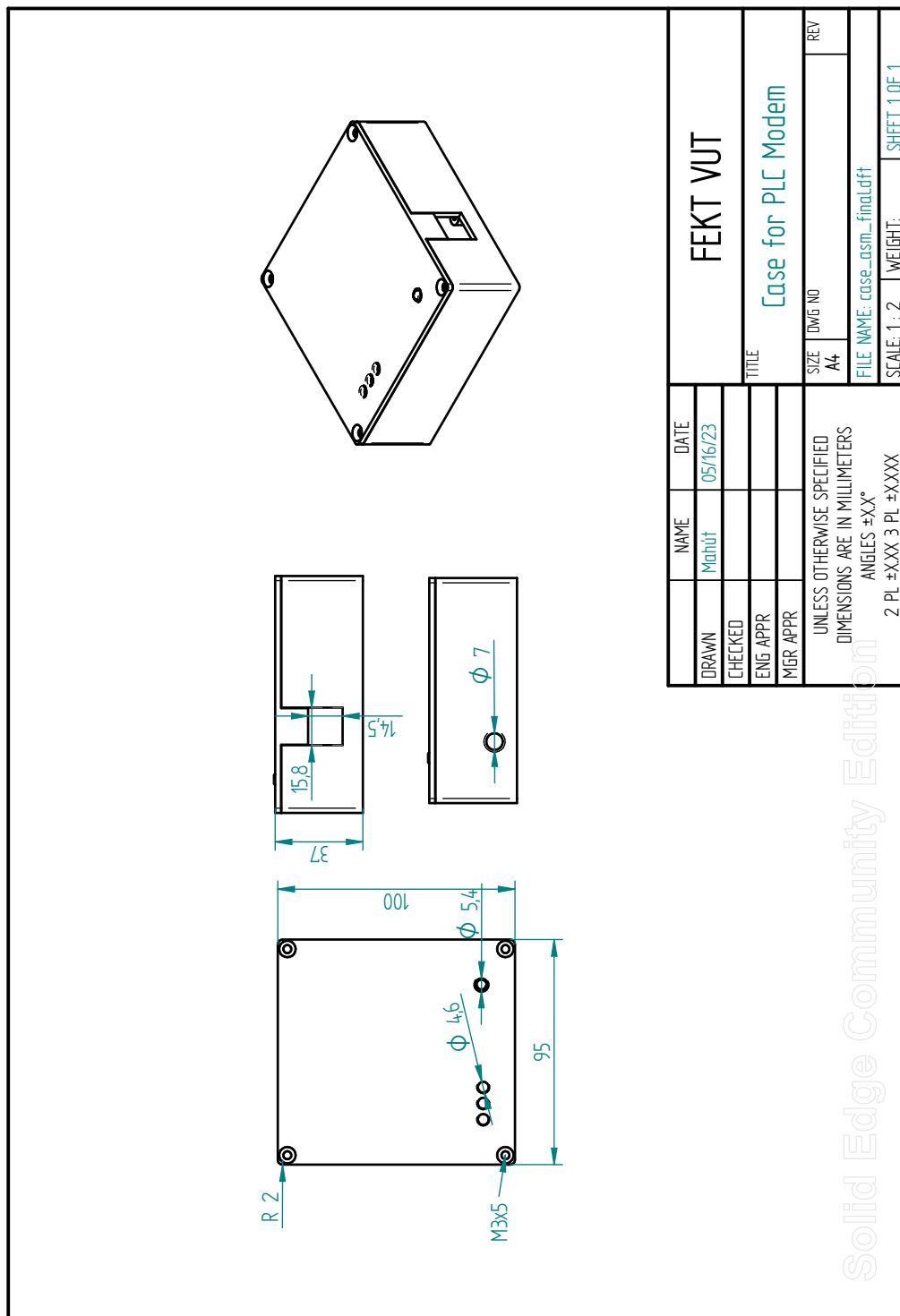


Obr. A.1: Schéma zapojenia napájacej a väzbovej časti.



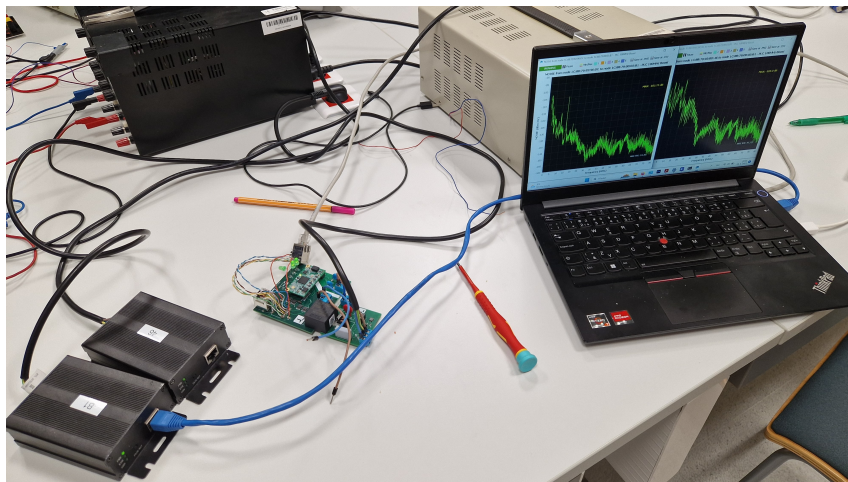
Obr. A.2: Schéma zapojenia signálovej časti.

B Technický výkres 3D modelu krabičky

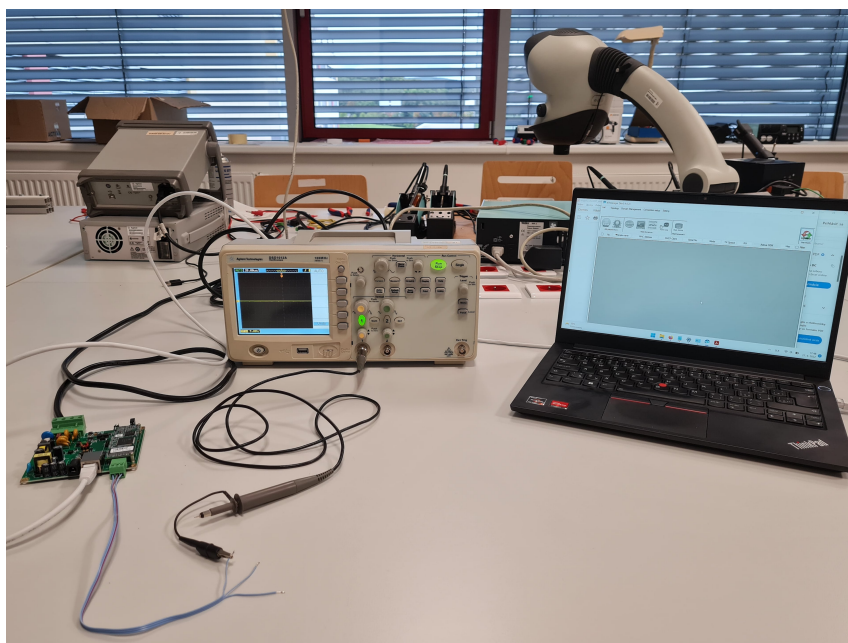


Obr. B.1: Technický výkres 3D modelu krabičky.

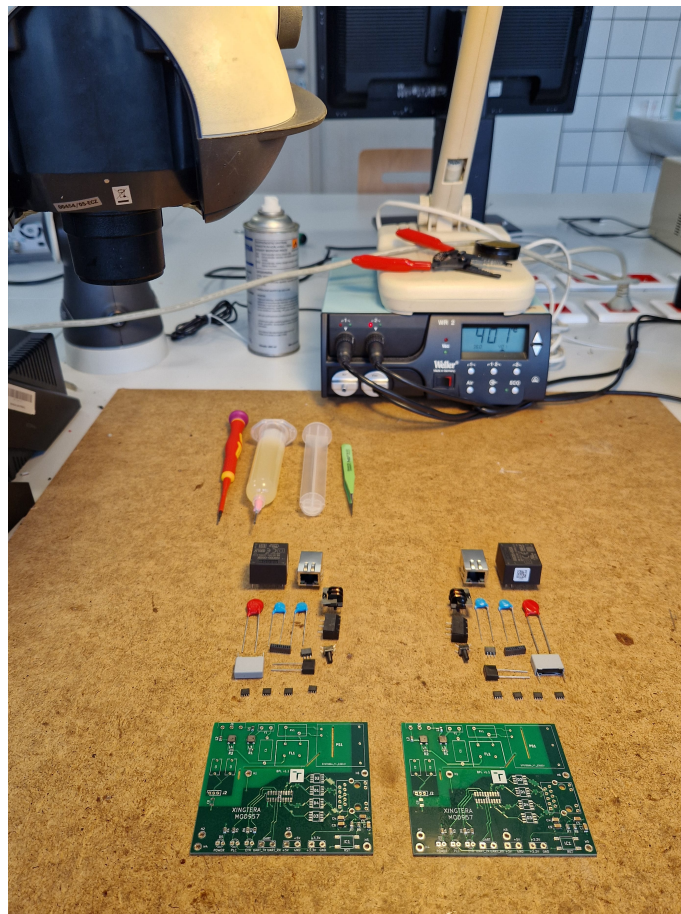
C Fotografická dokumentácia procesu práce



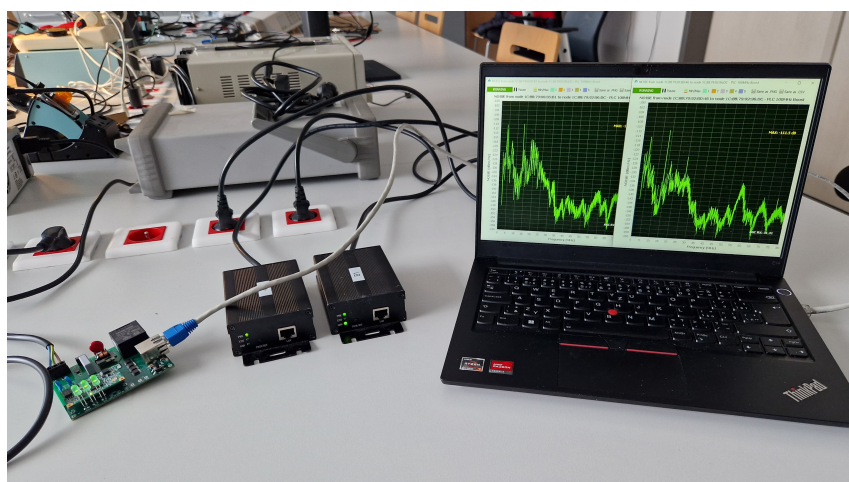
Obr. C.1: Testovanie prenosu prototypu v0.1.



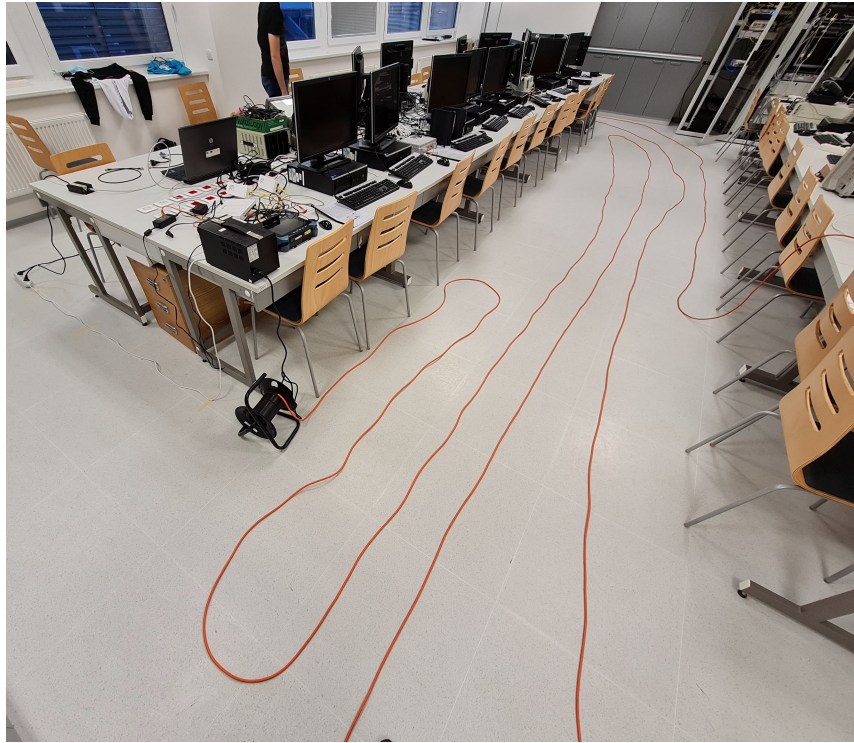
Obr. C.2: Testovanie zapojenia DPS.



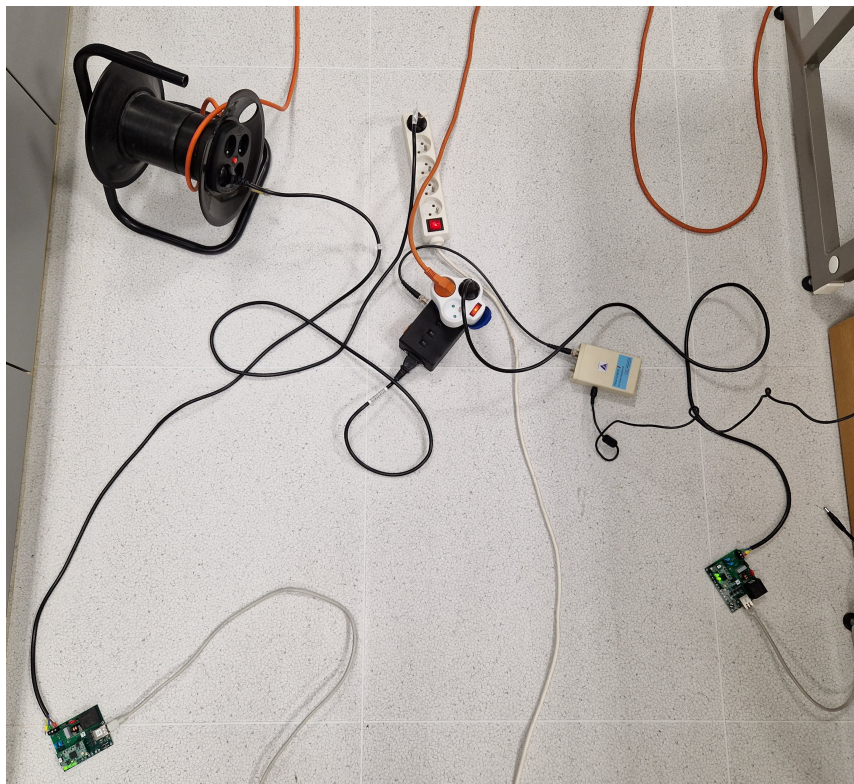
Obr. C.3: Osadzovanie prototypu v1.1.



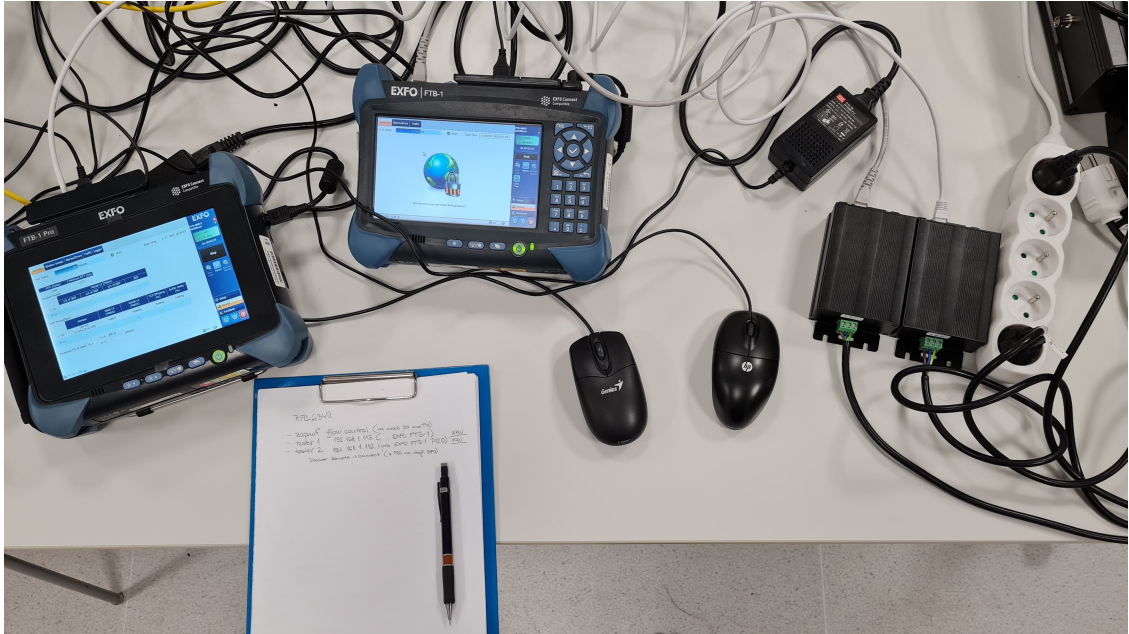
Obr. C.4: Testovanie prenosu prototypu v1.1.



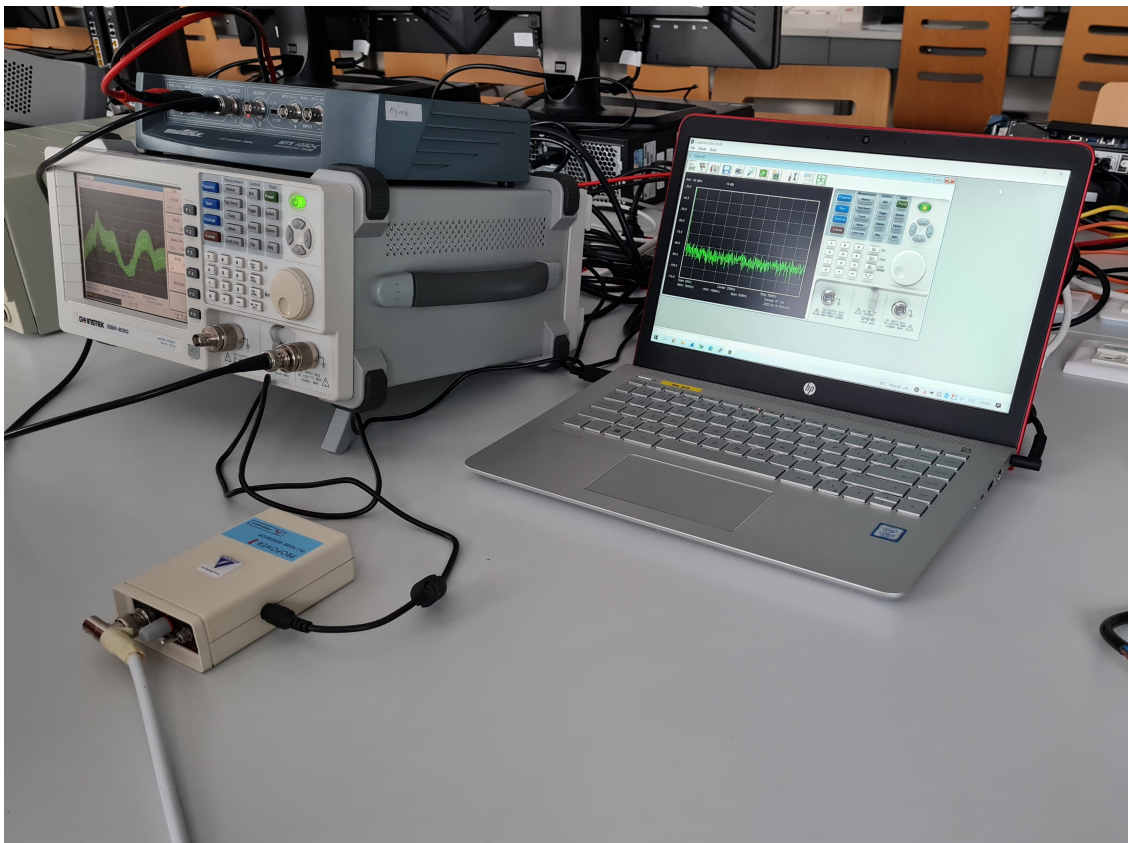
Obr. C.5: Zostavená 50 m topológia.



Obr. C.6: Testovanie prototypov v1.1 na odolnosť voči šumu.

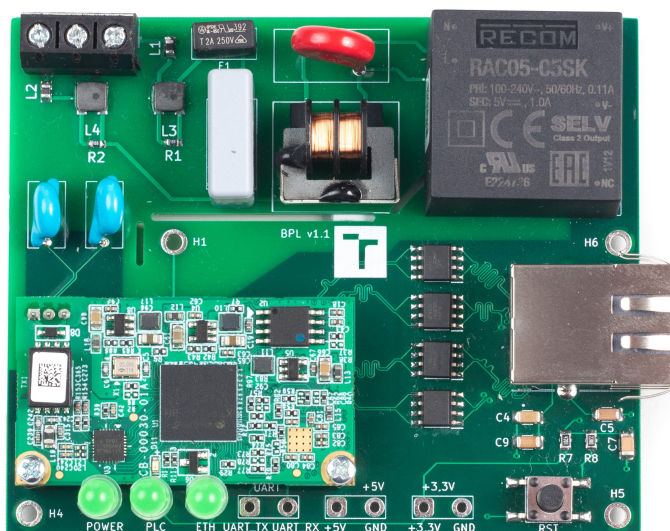


Obr. C.7: RFC testy BPL modemov.

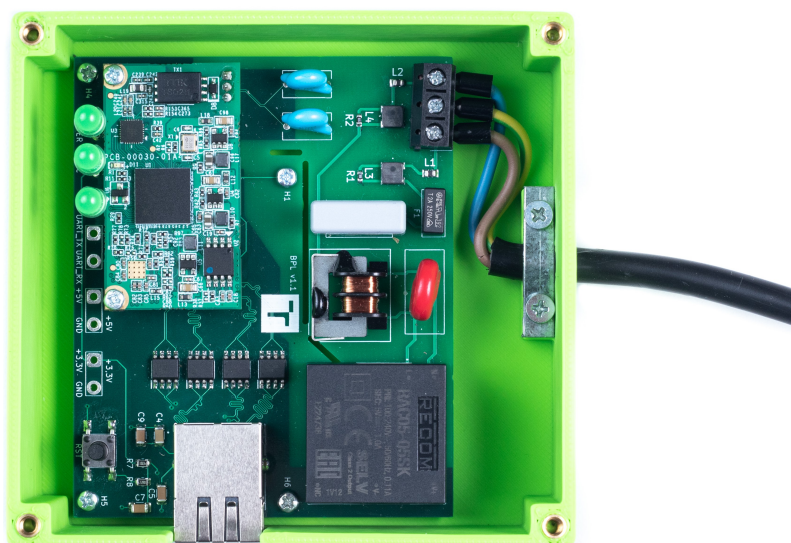


Obr. C.8: Meranie spektra PLC šumového generátoru.

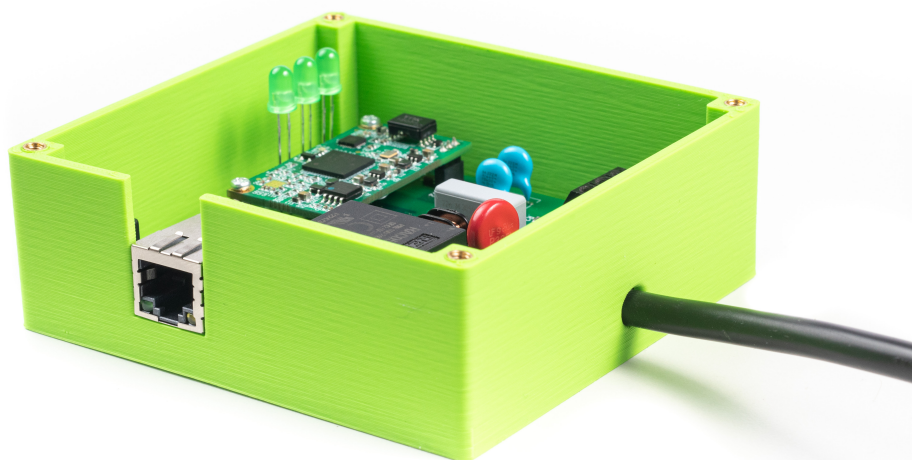
D Fotografie zostrojeného BPL modemu v1.1



Obr. D.1: Osadená DPS modemu v1.1.



Obr. D.2: Umiestnenie modemu v1.1 v krabičke.



Obr. D.3: Bočný pohľad na modem.



Obr. D.4: Zhotovený BPL modem v1.1.

E Obsah elektronickej prílohy

```
/.....koreňový adresár priloženého archívu
├── BPL_modem_KiCad.....zdrojové súbory návrhu DPS
│   ├── BPL_Modem.kicad_pcb
│   ├── BPL_Modem.kicad_pro
│   └── BPL_Modem.kicad_sch
├── Fotografie.....fotografie zostrojených prototypov
│   ├── bočný pohľad na modem.jpg
│   ├── bočný pohľad na prototyp v0.1.jpg
│   ├── osadená DPS prototypu v0.1.jpg
│   ├── osadená DPS prototypu v1.1.jpg
│   ├── umiestnenie modemu v1.1 v krabičke.jpg
│   ├── vrchný pohľad na krabičku s modemom.jpg
│   ├── vrchný pohľad na osadenú DPS prototypu v1.1.jpg
│   └── zhotovený BPL modem v1.1.jpg
├── Gerber_files_JLPCB.....podkladové súbory na výrobu DPS
└── BPL Modem.pdf .....schéma návrhu DPS
```