

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2020

Bc. Martin Rusz



# 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

## INTEGROVANÝ ZÁSUVKOVÝ MODUL

SMART MODUL INTEGRATED IN POWER PLUG

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Rusz

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

BRNO 2020



# Diplomová práce

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

Ústav telekomunikací

**Student:** Bc. Martin Rusz

**ID:** 186173

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Integrovaný zásuvkový modul

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem práce je návrh a vývoj funkčního vzorku modulu s integrací do zásuvkové krabice s integrovanou PLC/BPL komunikací. Cílem bude návrh řešení HW a DPS malé velikosti pro integraci do zásuvkové krabice. Výstupem je funkční vzorek - PLC/BPL modem, integrovatelný do zásuvkové krabice a základní ověření komunikace.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] VRBA, K.; HANÁK, P. Vybrané problémy konstrukce elektronických přístrojů pro integrovanou výuku VUT a VŠB- TUO. Technická 12, 616 00 Brno: Vysoké učení technické v Brně, FEKT, UTKO, 2015. s. 1-110. ISBN: 978-80-214-5071- 4.

[2] VRBA, K.: Konstrukce elektronických zařízení, elektronická skripta, VUT v Brně, 2017.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
předseda oborové rady

**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**

Cílem této práce je seznámení se s technologií Powerline Communication a výběr vhodného typu širokopásmového integrovaného obvodu pro integraci širokopásmového komunikačního modulu do elektroinstalační krabice. V úvodu této práce je podrobně rozebrána technologie Powerline Communication, princip komunikace, jednotlivé typy technologie, faktory ovlivňující kvalitu přenosu, současné možnosti a vytyčení cílů nutných pro návrh modulu. Výsledkem je miniaturizovaný funkční prototyp plně integrovaného širokopásmového PLC modemu v elektroinstalační krabici.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

BPL, elektrická síť, frekvenční pásmo, HomePlug, integrace, kódování, miniaturizace, modulace, PLC, zásuvková krabice

## **ABSTRACT**

The aim of this work is focus on Powerline Communication technology and select a suitable type of broadband integrated circuit for the integration of a broadband communication module into an electrical installation box. In the introduction of this work, the Powerline Communication technology, the principle of communication, individual types of technology, factors influencing the quality of transmission, current possibilities and setting goals necessary for the design of the module are analyzed in detail. The result is a miniaturized functional prototype of a fully integrated broadband PLC modem in a wiring box.

## **KEYWORDS**

BPL, electrical network, frequency band, HomePlug, integration, coding, miniaturization, modulation, PLC, electrical box

RUSZ, Martin. *Integrovaný zásuvkový modul*. Brno, 2020, 70 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Integrovaný zásuvkový modul“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Petru Mlýnkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci a společnosti MEG-A-Měřicí Energetické Aparáty, a.s. za poskytnuté vybavení pro testování a oživování konstruovaného zařízení.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Power Line Communication</b>	<b>13</b>
1.1 Princip technologie	13
1.2 Faktory ovlivňující kvalitu přenosu	15
1.3 Základní rozdělení PLC technologie	17
1.3.1 Širokopásmové PLC	17
1.3.2 Úzkopásmové PLC	18
1.4 Modulační techniky a kódování	18
1.4.1 OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing	19
1.4.2 Modulační/Kódovací technika ROBO	19
1.4.3 Modulační technika BPSK	20
1.4.4 Modulační technika M-QAM	21
1.5 Normy a standardy BPL technologie	22
1.5.1 Standard HomePlugAV	22
1.6 Zabezpečovací mechanismy standardu HomePlug	23
<b>2 Praktická část práce</b>	<b>25</b>
2.1 Přehled BPL obvodů	25
2.2 Qualcomm Atheros AR7420	27
2.3 Elektroinstalační komponenty	28
2.3.1 Elektroinstalační krabice	28
2.3.2 Elektrické zásuvky	30
2.4 Elektrické bezpečnostní požadavky	31
2.5 Blokové schéma modulu	32
2.6 Schéma návrhu dílčích částí DPS	33
2.6.1 Zdrojová část	33
2.6.2 Napěťové větve 3,3 V a 12 V	35
2.6.3 Vazební člen	39
2.6.4 Výstup pro modul LX200V30 a Ethernet	40
2.7 DPS integrovaného BPL/PLC modulu	41
2.7.1 Zhotovené prototypy v1.0 a v2.0	44
2.7.2 Cenová kalkulace sestrojeného prototypu v2.0	45
2.7.3 Porovnání energetické spotřeby sestrojených prototypů	46
2.7.4 Orientační měření teploty s instalovanými prototypy v2.0	47
2.8 Konfigurační software AVitar	48
2.9 Základní ověření komunikace	50

2.10	Testování komunikace sestrojeného prototypu v2.0 . . . . .	52
2.10.1	Porovnání přenosových rychlostí na aplikační vrstvě . . . . .	53
2.10.2	Porovnání přenosových rychlostí na fyzické vrstvě . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Závěr</b>	<b>58</b>
	<b>Literatura</b>	<b>60</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>63</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>Fotografie z průběhu vývoje BPL modemů</b>	<b>65</b>
A.1	Testování spínaného zdroje 12 V/5 W . . . . .	65
A.2	Sestrojené prototypy integrovaných BPL modemů . . . . .	66
A.2.1	Prototyp integrovaného BPL modemu v2.0 . . . . .	66
A.3	Schématické zapojení navržených prototypů . . . . .	67
<b>B</b>	<b>Zdrojové soubory programu Eagle v9.5.0</b>	<b>70</b>

# Seznam obrázků

1.1	Princip přenosu signálu PLC. . . . .	14
1.2	Znázornění přímého a nepřímého připojení PLC modemu. . . . .	15
1.3	Blokový digram PLC přenosu. . . . .	17
1.4	Princip OFDM modulace [9]. . . . .	19
1.5	Princip QPSK modulace [11]. . . . .	20
1.6	Princip QAM modulace. . . . .	21
2.1	Blokové schéma vnitřní struktury chipsetu AR7420 [23]. . . . .	27
2.2	Rozměry jednotlivých typů zásuvek. . . . .	30
2.3	Polozapuštěná dvojnásobná zásuvka Swing. . . . .	31
2.4	Zjednodušené blokové schéma zásuvkového modulu. . . . .	32
2.5	Prvotní návrh lineárního zdroje $230 V_{AC}/5 V_{DC}$ . . . . .	33
2.6	Modul spínaného zdroje $230 V_{AC}/12 V_{DC}$ . . . . .	34
2.7	Schéma spínaného zdroje $230 V_{AC}/12 V_{DC}$ . . . . .	35
2.8	Schématické zapojení napěťových větví. . . . .	36
2.9	Průběh napětí zdroje a odebíraného proudu. . . . .	37
2.10	Upravené zapojení napěťových větví. . . . .	38
2.11	Schéma zapojení s využitím spínaného DC/DC měniče. . . . .	39
2.12	Schématické zapojení vazebního členu. . . . .	40
2.13	Schématické zapojení výstupu komunikačního modulu a Ethernetu. . . . .	41
2.14	a) Návrh DPS v1.0 v programu Eagle b) Vyrobená DPS v1.0 . . . . .	42
2.15	a) Návrh DPS v2.0 v programu Eagle b) Vyrobená DPS v2.0 . . . . .	43
2.16	Zhotovený prototyp v1.0 a)čelní pohled b)boční pohled. . . . .	44
2.17	Zhotovený prototyp v2.0 a)čelní pohled b)boční pohled. . . . .	44
2.18	Soupis součástek pro 2 kusy integrovaného PLC modulu verze 2.0 . . . . .	45
2.19	Porovnání spotřeby energie jednotlivých BPL modemů. . . . .	46
2.20	Orientační měření teploty ve třech scénářích. . . . .	47
2.21	Konfigurační rozhraní AVitar . . . . .	49
2.22	Výsledky měření v programu Iperf3. . . . .	50
2.23	Schéma zapojení jednotlivých měření. . . . .	51
2.24	Přenosové rychlosti na fyzické vrstvě. . . . .	52
2.25	Schéma zapojení topologie pro testování prototypu v2.0. . . . .	52
2.26	Porovnání přenosových rychlostí na aplikační vrstvě. . . . .	53
2.27	Výsledky měření parametru jitter testovaných modemů. . . . .	54
2.28	Porovnání přenosových rychlostí na fyzické vrstvě. . . . .	55
2.29	Porovnání hodnot SNR testovaných modemů. . . . .	56
2.30	ToneMapy vybraných subnosných frekvencí. . . . .	57
A.1	Testování modulu spínaného zdroje s variabilní zátěží. . . . .	65

A.2	Reostat Metra $87\ \Omega$ , 2 A. . . . .	65
A.3	a) Sestrojený prototyp v1.0 b) Sestrojený prototyp v2.0 . . . . .	66
A.4	a) Instalace modemu do zásuvkové krabice b) Pohled na instalovaný modul . . . . .	67
A.5	Osazená deska plošného spoje. . . . .	67
A.6	Výsledné zapojení všech dílčích částí DPS integrovaného modulu v1.0.	68
A.7	Výsledné zapojení všech dílčích částí DPS integrovaného modulu v2.0.	69

## Seznam tabulek

2.1	Souhrn základních parametrů popsaných BPL chipsetů . . . . .	26
2.2	Test modulu spínaného zdroje . . . . .	36
2.3	Praktická měření pro ověření komunikace. . . . .	51

# Úvod

Při budování domácích, firemních nebo lokálních sítí lze v dnešní době vybírat z celé řady možností, ať už se jedná o kabelovou technologii, mezi kterou patří kupříkladu ethernet, či optické vlákno nebo bezdrátovou technologii jako například Wi-Fi. Alternativou k těmto variantám je stále se rozvíjející technologie PLC (Power Line Communication), která využívá jako přenosové médium stávající elektrickou síť. Jejími hlavními výhodami je především snadná instalace, cenová dostupnost a jednoduchá rozšiřitelnost.

Dnes nejběžnější a komerčně nejrozšířenější jsou zařízení, která se zapojují přímo do elektrické zásuvky a zabírají tak možnost připojení jiného zařízení nebo varianty s průchozí zásuvkou. Integrace širokopásmového PLC modulu do elektroinstalační krabice nabízí velice elegantní řešení, které nikterak neovlivní vzhled, či možnosti připojení k samotné zásuvce. Takovéto zařízení by bylo možné využít v celé škále aplikací. Například jako alternativa pro budování lokálních domácích, či malých firemních sítí, využití v prostředí Smart Building pro docílení energetické úspornosti, Smart Grid sítí nebo IoT.

První část se zaměřuje především na teoretický rozbor technologie PLC, její princip, rozdělení, základní parametry daného typu technologie, standardy a podrobněji pak rozbor použité širokopásmové technologie. Praktická část zahrnuje výběr chipsetů, stručný popis jejich parametrů a dostupnosti. Na základě tohoto rozboru je vybráno konkrétní řešení pro tuto práci, které je pak popsáno podrobněji. Následně jsou popsány parametry elektroinstalačních krabic a zásuvek, díky kterým bude možno rozhodnout, za jakých okolností by mohl být integrovaný PLC modul aplikován do běžně dostupných elektroinstalačních prvků a jaké bezpečností požadavky musí splňovat.

Hlavní částí je pak samotný návrh desky plošného spoje, který je nejprve přehledně popsán na blokovém schématu a poté podrobněji rozepsán na schématickém zapojení dílčích částí, včetně zdůvodnění použití jednotlivých komponent. U jednotlivých dílčích celků je podrobně popsán také postupný vývoj, který byl zapotřebí pro návrh funkčního prototypu. Jsou zde uvedeny základní výpočty účinnosti, energetické spotřeby nebo tepelného vyzařování konkrétních prvků obvodu. Nedílnou součástí je také část s podrobným popisem cenových nákladů jednotlivých komponent a výsledného zařízení, měření energetické spotřeby sestrojeného prototypu a orientační měření teploty uvnitř zásuvkové krabice s instalovaným integrovaným modulem. Poslední část se zaměřuje na základní ověření komunikace vývojový kitů, které slouží především k ověření parametrů vybraného typu integrovaného obvodu a také na srovnání přenosových parametrů sestrojených prototypů. Jsou zde srovnány přenosové rychlosti na aplikační i fyzické vrstvě a kvalitativní parametry pře-

nosu SNR, jitter a tónové mapy.

Závěr této práce obsahuje shrnutí dosažených výsledků, jejich porovnání a zhodnocení. Na základě zhodnocení výstupu této práce bude diskutováno její možné rozšíření, či doplnění pro práci navazující.

# 1 Power Line Communication

Technologií označovanou jako PLC (Power Line Communication) nebo někdy také jako PLT (Power Line Telecommunication) lze označit veškeré sdělovací systémy využívající pro přenos informací elektrickou přenosovou a rozvodnou síť.

Z počátku byla tato technologie využita především pro signalizaci a řízení energetické soustavy. Jednou z prvních a dodnes zachovalou technologií, kterou lze označit jako PLC, je hromadné dálkové ovládání HDO, které slouží například pro spínání elektronických zařízení. S rostoucí potřebou monitorování energetické sítě v podobě odečítání elektroměrů, povelování nebo tarifkace byla technologie PLC nasazována stále častěji.

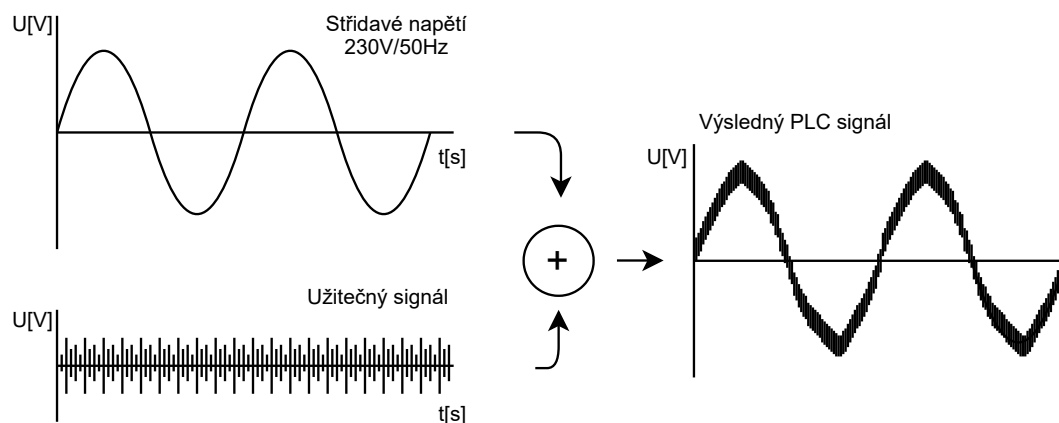
Technologie PLC je založena na přenosu dat po elektrické síti nízkého napětí 230 V, 400 V (NN), vysokého napětí 22 kV (VN), či velmi vysokého napětí 110-220 kV (VVN). Tento typ komunikace umožňuje budování přenosové infrastruktury a využít tak stávající rozvod elektrické sítě jako možnou alternativu k optickému, kabelovému či bezdrátovému přenosu dat.

Princip komunikace spočívá v injektování signálu do elektrické sítě, která z pravidla pracuje na řádově vyšším napětí, než je použito v telekomunikačních a datových systémech.

## 1.1 Princip technologie

Pro využití elektrické rozvodné sítě, jakožto přenosového média pro komunikaci je potřeba přenášet vysokofrekvenční signál na nosné signálu elektrické přenosové soustavy 400 kV, 220 kV, 22 kV, 230 VAC 50 Hz nebo jiném střídavém napětí v závislosti na konkrétní aplikaci. Platí, že injektovaný vysokofrekvenční signál má mnohonásobně vyšší frekvenci a nižší amplitudu, než signál elektrické přenosové soustavy. Princip přenosu znázorňuje obrázek 1.1.

Na síťové napětí je přiveden užitečný signál, který je nejprve pomocí OFDM nebo některé z dalších modulací používaných v rámci technologie PLC rozdělen na jednotlivé subnosné v rámci dostupného frekvenčního spektra. Dané subnosné jsou dále modulovány jednou z dostupných modulací s ohledem na kvalitu přenosového kanálu. Na straně přijímače je užitečný signál oddělen pomocí oddělovacího PLC transformátoru nebo vazební cívky a vhodného filtru od síťového napětí a následně demodulován. Během přenosu PLC modem nikterak nezabezpečuje spolehlivý přenos a opakované vysílání rámců. Tento úkol připadá protokolům vyšších vrstev implementovaných v rámci komunikujících stanic [1], [2].



Obr. 1.1: Princip přenosu signálu PLC.

### Vazební člen

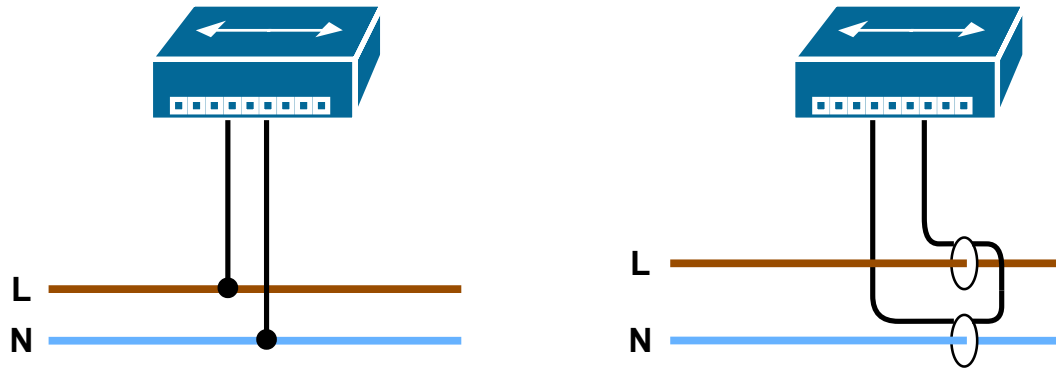
Vazební člen slouží ke galvanickému oddělení komunikačního zařízení od elektrického napětí, např. 230 V/50 Hz tak, aby neexistovalo přímé spojení mezi sítovým napětím, ale zároveň byl schopen komunikační modul přenášet signál. Připojení samotného PLC modemu pak může být provedeno přímým nebo nepřímým připojením [3].

V případě přímého připojení PLC modemu je potřeba podotknout, že součástí vnitřního zapojení PLC modemu musí být vazební člen, který oddělí sítové napětí od napětí zařízení. Pokud vnitřní zapojení touto vazbou nedisponuje, je zapotřebí využití externího vazebního členu. Jednou z nevýhod může být nutnost vypnutí elektrické sítě například v případě připojování v místech rozvodných silnoproudých sítí, přičemž připojení standardních domácích PLC modemů vypnutí napájecí sítě nevyžaduje. Tento způsob připojení je v praxi nejpoužívanější.

Nepřímé připojení je pak realizováno vazební cívkou, která je tvořena feritovým kroužkem, který lze často rozevírat. Tyto cívky jsou pak umístěny tak, aby jimi procházely dva sítové vodiče (fázový a nulový). V případě připojení třífázového obvodu pak cívkou prochází všechny fázové vodiče a vodič nulový. Výdou tohoto připojení je především jednoduchost instalace bez nutnosti vypínání sítě. Nevýhodou je pak zpravidla nižší úroveň injektovaného a přijímaného PLC signálu. Oba typy zapojení znázorňuje obrázek 1.2.

Nejčastěji používanou variantou je oddělení pomocí transformátoru [4]. Využívá se zde elektromagnetické indukce mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru. Injektování signálu je pak zajištěno např. sériovým rezonančním obvodem LC, jehož rezonanční frekvenci můžeme spočítat podle vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.1)$$



Obr. 1.2: Znázornění přímého a nepřímého připojení PLC modemu.

## 1.2 Faktory ovlivňující kvalitu přenosu

Pro vysokorychlostní PLC přenos je důležité popsat možný výskyt různorodého rušení vyskytující se na přenosovém kanále. Při přenosu informace po elektrickém vedení se objevují faktory ovlivňující parametry přenosu v podobě rušení, které mohou ovlivnit přenosovou rychlost, spolehlivost či dosah komunikace. Toto rušení je nejčastěji způsobeno zařízeními připojených k elektrické síti.

Na rozdíl od jiných komunikačních kanálů, nelze klasifikovat rušení na elektrickém vedení pouze jako aditivní bílý gaussovský šum (AWGN). Standard IEEE definuje 5 typů rušení/šumu vyskytujících se na přenosovém kanálu elektrického vedení. Mezi ně patří šum na pozadí (colored background noise), úzkopásmový šum (narrowband noise), periodický impulsní šum asynchronní (periodic impulsive noise asynchronous), periodický impulsní šum synchronní (periodic impulsive noise synchronous) a asynchronní impulsní šum (asynchronous impulsive noise). Při přenosu informace se na přenosový kanál spolu se signálem indukuje i šum. Jednotlivě jsou tyto typy rušení popsány níže dle publikací [5], [6] a [7].

### Šum na pozadí

Jedná se o šum složený z více zdrojů bílého šumu s rozdílnou amplitudou a rozdílných frekvenčních pásem. Vyznačuje se především nižší výkonovou spektrální hustotou (PSD). Velikost výkonové spektrální hustoty se zmenšuje s rostoucí frekvencí. Nejvyšších hodnot pak dosahuje v rozmezí frekvence elektrické sítě 50 Hz až 20 kHz. Zdrojem tohoto šumu mohou být například televizní stanice, stmívače, světelné zdroje, či různé typy elektrických motorů. Tento typ šumu lze popsat rovnicí:

$$A_{BN}(f) = A_{\infty} + A_0 \cdot e^{-\frac{f}{f_0}}, \quad (1.2)$$

proměnná  $A_{\infty}$  pak udává spektrální výkonovou hustotu pro frekvence  $f \rightarrow \infty$  a  $A_0$  je rozdíl mezi  $A_{\infty}$  a  $A_0$ .

## Úzkopásmové rušení

Tento typ rušení se projevuje v úzkém spektru kmitočtového pásma, ale s velkou PSD (Power Spectral Density). Úzkopásmové rušení má tvar ostrých špiček s vysokou amplitudou. Nejčastěji se tento typ rušení projevuje v pásmu mezi 1-22 MHz a je způsobován například rádiovým širokopásmovým vysíláním.

Na nižších frekvencích je pak toto rušení nejčastěji spojeno se spínáním elektronických zařízení jako jsou televizní stanice, zdroje nebo monitory. Lze si jej tedy představit jako rušení na přenosovém kanále způsobené interferencí mezi dvěma zařízeními, jejichž komunikace probíhá v rozdílných kmitočtových pásmech, avšak část signálu prvního zařízení (vysílače), proniká do užitečné šířky pásma druhého zařízení (přijímače), např. vlivem nadměrné intenzity signálu nebo vzájemné vzdálenosti. Úzkopásmové rušení (UR) lze charakterizovat jako součet několika sinusových průběhů, které se však vzájemně liší. Lze jej popsat rovnicí:

$$n_{UR}(t) = \sum_{i=1}^N A_i(t) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_i \cdot t + \varphi_i), \quad (1.3)$$

proměnná  $N$  pak udává počet sinusových průběhů lišících se frekvencí  $f_i$ , amplitudou signálu  $A_i(t)$  a fází  $\varphi_i$ .

## Periodické impulsní rušení synchronní

Hlavním zdrojem tohoto periodicky se opakujícího rušení je především spínání ve spínaných zdrojích stejnosměrného napětí nebo také stmívací prvky, které způsobují rušení synchronní s kmitočtem síťového napětí. Charakteristickým rysem tohoto rušení jsou velmi krátké impulzy v řádech  $\mu\text{s}$  a výkonovou spektrální hustotou klesající s rostoucím kmitočtem.

## Periodické impulsní rušení asynchronní

Jedná se o periodicky se opakující rušení v rozmezí kmitočtů 50 až 200 kHz s délkou impulzu v řádech  $\mu\text{s}$  až  $\text{ms}$ . Hlavním zdrojem jsou spínací prvky vyskytující se v distribuční soustavě.

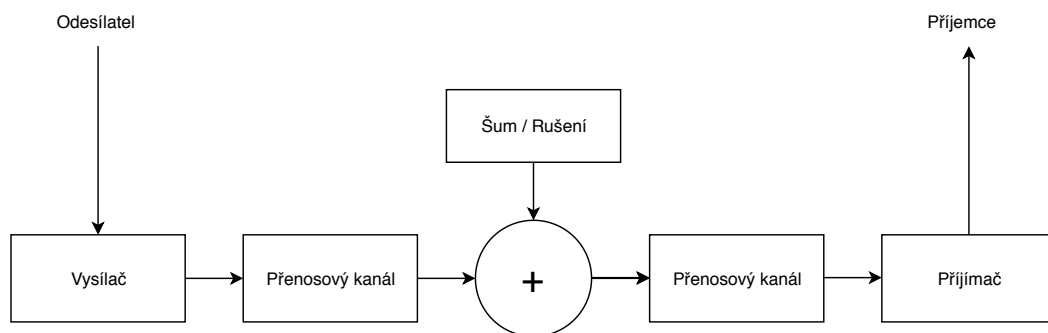
## Asynchronní impulsní rušení

Tento typ rušení je způsobován přechodovými jevy v elektrické síti. Typické impulzy tohoto typu rušení mají délku trvání od několika mikrosekund až po několik milisekund.

Jelikož je výskyt tohoto typu rušení zcela náhodný a může se objevovat v dávkách, způsobuje problémy především při vysokorychlostním přenosu PLC signálu.

Z tohoto důvodu byly zavedeny robustní modulační techniky a kódování, které snižují rychlost samotného přenosu, ale jejich robustnost zvyšuje pravděpodobnost úspěšného přenosu. Spektrální hustota výkonu může v některých případech vystoupat až nad úroveň okolního šumu, což způsobuje zvýšenou chybovost samotného přenosu.

První tři typy rušení můžeme společně chápat jako šum na pozadí. Jejich výskyt je v dlouhodobém měřítku téměř neměnný nebo opakující se s určitou periodou. Zatímco výskyt posledních dvou zmíněných typů je zcela náhodný a můžeme je tak shrnout jako rušení impulsní. Blokový diagram PLC přenosu po elektrickém vedení s indukovaným rušením lze vidět na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: Blokový digram PLC přenosu.

## 1.3 Základní rozdělení PLC technologie

PLC technologii vzhledem k jejímu využití můžeme rozdělit na dva základní typy, které budou v této části podrobněji popsány. Jedná se o širokopásmové PLC, úzkopásmové PLC s nízkou datovou rychlostí (Low Data Rate) a úzkopásmové PLC s vysokou datovou rychlostí (High Data Rate). Jednotlivé typy se liší především v počtu nosných použitých pro přenos a s tím související přenosovou rychlostí, užitečnou šířkou pásma, odolností proti rušení a modulačními technikami. Tato kapitola se podrobně věnuje výhodám a nevýhodám jednotlivých technologií, jejich standardům a příkladem použití v současných komunikačních technologiích.

### 1.3.1 Širokopásmové PLC

Širokopásmové PLC našlo využití především v aplikacích AMI (Advanced Metering Infrastructure) a HAN (Home Area Network), kde je kladen důraz na přenos většího

množství dat s minimální chybovostí na vzdálenosti od stovek metrů do několika kilometrů. Tento typ technologie využívá přenosové kmitočtové pásmo v řádech desítek MHz (2-86 MHz) v závislosti na výrobci hardwaru a standardu, který má splňovat. Přenosové rychlosti na fyzické vrstvě se pohybují nejčastěji od desítek Mbps (HomePlug Green) až po 2Gbps (HomePlug AV2).

Pro tento typ technologie bylo využito velké množství modulačních technik. Nejčastěji používanou se stala modulace OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), která je uznána v rámci standardů HomePlug a ITU G.hn a dále pak nestandardizované modulační techniky DMT (Discrete Multi-Tone) a SS (Spread-Spectrum), které v některých svých zařízeních používají výrobci Yitran a Xeline Corporation. Zařízení využívající DMT a SS nejsou vzájemně kompatibilní. Vzhledem k popsaným vlastnostem této technologie se jedná o možnou alternativu k bezdrátovým či kabelovým sítím [8], [10].

### 1.3.2 Úzkopásmové PLC

Základní vlastností této technologie je především použití mnohem užšího frekvenčního přenosového pásma, díky kterému lze dosáhnout přenosu v řádech stovek metrů až desítek kilometrů a vysoké odolnosti vůči parazitnímu rušení. Oproti širokopásmové technologii však nedosahuje tak vysokých přenosových rychlostí. Obvyklé přenosové rychlosti se pohybují okolo desítek až stovek kbit/s v závislosti na konkrétním zařízení. Jednotlivá přenosová pásma udává norma EN 50065-1 převzata pro českou republiku a rozděluje kmitočtové pásmo 9 až 148,5 kHz na 4 subpásma A až D. Díky svým vlastnostem našla úzkopásmová technologie uplatnění především v průmyslovém odvětví například pro odečítání stavu elektroměrů, centrální sběr dat ze snímačů, propojení spotřebičů a jejich centrální ovládání.

## 1.4 Modulační techniky a kódování

Jak již bylo zmíněno, elektrická rozvodná síť nebyla primárně uvažována pro pro přenos dat a proto není nikterak přizpůsobena. Jedná se tedy o přenosový kanál, který není z hlediska rušení, útlumu, elektromagnetické kompatibility a dalších parametrů příliš vhodný pro komunikaci samotnou. K řešení tohoto problému byly využity zkušenosti z vývoje radiokomunikačních, telefonních a dalších komunikačních systémů. Na základě těchto zkušeností byly použity pokročilé kódové a modulační techniky, které umožňují přizpůsobit kmitočtové pásmo a nosný užitečný signál pro přenos po elektrické rozvodné síti.

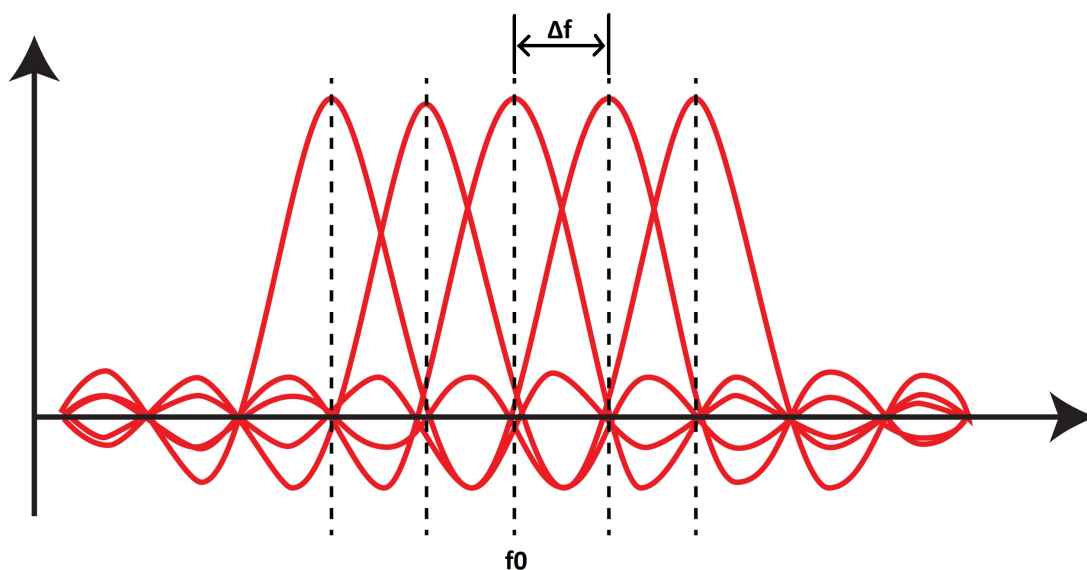
### 1.4.1 OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

Principiálně vychází z modulace FDM (Frequency Division Multiplexing). OFDM je širokopásmová modulace využívající dělení frekvenčního přenosového kanálu na větší počet subnosných, například pro standard HomePlug AV až 1155 subnosných. Jednotlivé subnosné jsou vzájemně ortogonální, což znamená, že se jednotlivé nosné nijak neovlivňují. Princip lze vidět na obrázku 1.4. Tento princip lze popsat zjednodušeně rovnicí:

$$B_t = (N + 1) \cdot v_m \cong N \cdot v_m, \quad (1.4)$$

kde  $B_t$  je celková šířka dostupného přenosového pásma,  $N$  je počet nosných frekvencí, na které je kmitočtové pásmo rozděleno a  $v_m$  je počet bitů závislý na použité modulaci.

Po rozdělení se subnosné dále moduluje v závislosti na dané aplikaci. Používanými technikami pro modulaci subnosných jsou ROBO, BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM a 4096-QAM. Výběrem vhodné modulace jsme schopni optimalizovat přenos po přenosovém kanále vzhledem k rušení a dalším parametrům.



Obr. 1.4: Princip OFDM modulace [9].

### 1.4.2 Modulační/Kódovací technika ROBO

Je robustní modulační/kódovací technika, která se využívá především pro spolehlivý přenos. Nedosahuje vysokých přenosových rychlostí, ale je velmi odolná vůči rušení. Je založena na modulaci DBPSK/BPSK a jejím opakovaném přenosu pro dosažení

co největší robustnosti. S rostoucím počtem opakování roste robustnost a zároveň klesá teoretická rychlost přenosu.

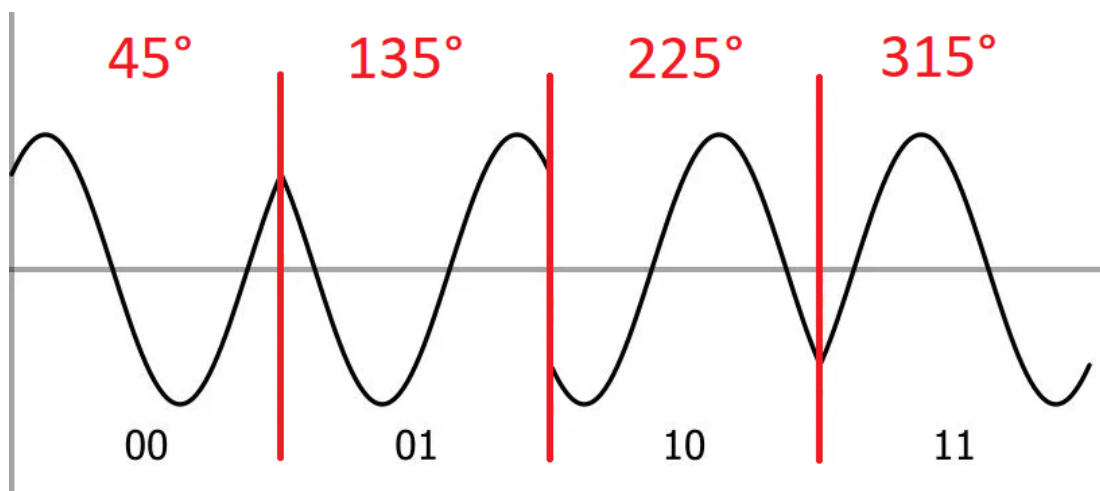
Ve standardu HomePlug je například používána při všesměrovém přenosu klíčových informací v rámci celé sítě. Tímto způsobem je zajištěno, aby byly potřebné informace dostupné pokud možno všem komunikujícím stanicím v silně zarušeném prostředí. Dalším užitečným využitím kódovací techniky ROBO je také přizpůsobení přenosového kanálu mezi stanicemi.

### 1.4.3 Modulační technika BPSK

BPSK nebo-li Binary Phase-Shift Keying je digitální modulační technika využívající k rozlišení jednotlivých bitových sekvencí změnu fáze referenčního signálu. Konstelční digram definovaný jednotlivými bitovými stavy je reprezentován stejným počtem fázových posuvů. V případě relativně robustní modulační BPSK se jedná o stavy 1 a 0. Tyto stavy jsou pak vyjádřeny jako fázový posuv  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

Alternativou je modulační DBPSK, která pro přenos nevyužívá fázový posuv jednotlivých stavů, ale rozdíl aktuální a předchozí změny fáze, jejich rozdíl pak vyjadřuje přenášenou bitovou sekvenci. Dalšími variantami digitální modulační DBPSK je například QPSK, která je schopna přenášet dva bity v jediném stavu se vzájemným posuvem  $90^\circ$ , jak ukazuje obrázek 1.5.

Existují také vícestavové PSK modulační, jako jsou 8PSK, 16PSK a další, avšak s rostoucím počtem stavů je zapotřebí dekodér s větší rozlišovací schopností a je zde také možnost větší bitové chybovosti způsobené rušením a zkreslením přijímaného signálu.

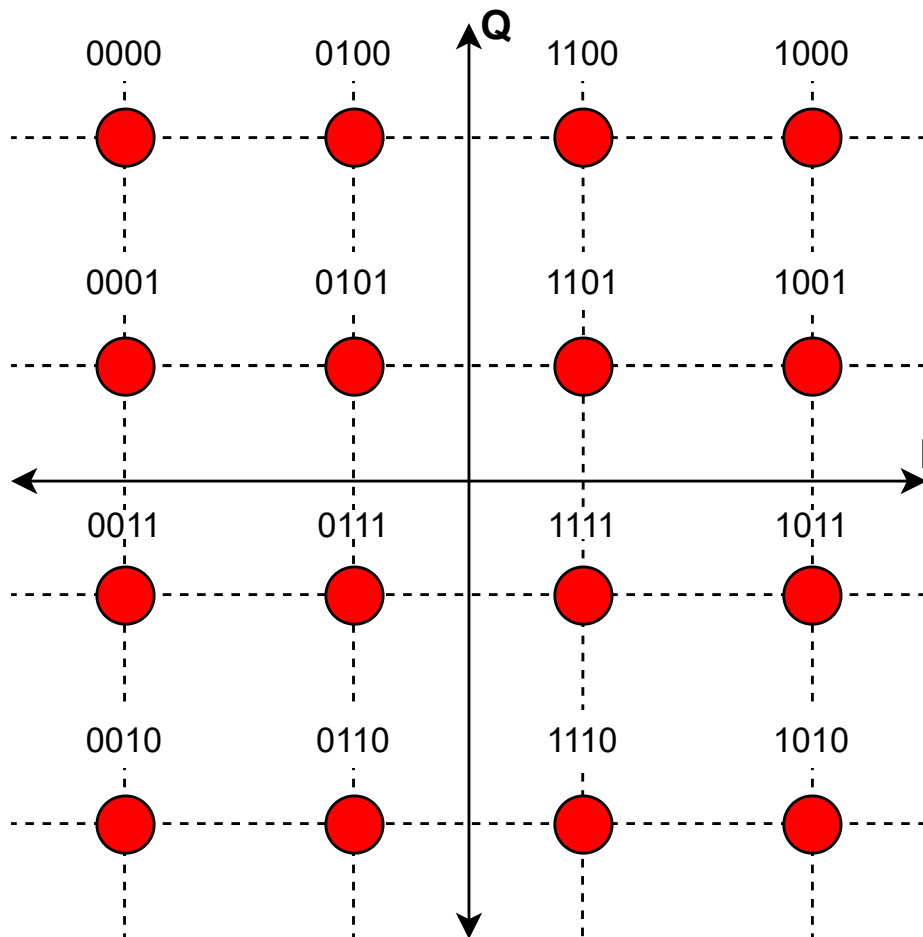


Obr. 1.5: Princip QPSK modulační [11].

### 1.4.4 Modulační technika M-QAM

Jedná se o digitální modulaci, která k přenosu informace využívá jak modulaci amplitudy, tak modulaci fáze nosné signálu. Využívá se zejména při vyšším počtu stavů, které je potřeba rozlišit. Jednotlivé signálové bity lze přehledně znázornit pomocí konstelačního diagramu. Diagram je tvořen reálnou osou I (In Phase) a imaginární osou Q (Quadrature) [12].

Pro vícestavové modulace a jejich bezchybný přenos je zapotřebí vyšší odstup signálu od šumu (Signal to Noise Ratio, SNR). V konstelačním digramu, který lze vidět na obrázku 1.6 jsou jednotlivé prvky vždy ideální. V reálném prostředí s přítomným šumem se jejich poloha však může lišit, což může mít za následek, že se jednotlivé stavy začnou vzájemně ovlivňovat. Toto ovlivňování pak způsobuje zvýšení celkové chybovosti přenosu. Mezi nejpoužívanější patří 8-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, 1024-QAM a 4096-QAM.



Obr. 1.6: Princip QAM modulace.

## 1.5 Normy a standardy BPL technologie

Normalizací a standardizací v rámci širokopásmové PLC technologie se zabývá celá řada organizací jako např. UPA, OPERA, CEPCA, IEEE, ITUT-T (G.hn) a HomePlug Powerline Alliance. Například standard IEEE 1901-2010 definuje širokopásmovou PLC technologii s frekvencemi pod 100 MHz se zaměřením na efektivní využití přenosových kanálů, zabezpečení či možnou zpětnou kompatibilitu mezi zařízeními splňujícími tento standard. Konkrétně pak specifikuje podvrstvu MAC (Media Access Control) a fyzickou vrstvu PHY (Physical Layer) [13].

Obecně lze říci, že veškeré zmíněné organizace a jejich standardy popisují velice podobné principy. Nejčastější rozdíly bývají především v metodách přístupu ke sdílenému médiu, způsobech a robustnosti šifrování dat. Naopak použitá frekvenční pásma, modulace a injektování užitečného signálu do elektrické sítě jsou napříč standardy téměř shodné. Podrobněji se tedy zaměříme pouze na standard HomePlug, na jehož základě byl vytvořen chipset Qualcomm AR7420, který je použit v rámci této práce.

### 1.5.1 Standard HomePlugAV

Jedná se o standard vyvinut organizací HomePlug Powerline Alliance definující specifikace pro širokopásmovou technologii PLC, zaměřující se především na výkonnostní rozdělení, koexistenci a kompatibilitu mezi zařízeními využívající některý ze standardů rodiny HomePlug [3],[17]. Specifické aplikace pak mohou mít díky použitému standardu rozdílné vlastnosti.

**HomePlug 1.0** - jedná se o první představenou specifikaci v rámci rodiny HomePlug. Poprvé byl představen v roce 2001 a definoval přenosovou rychlost na fyzické vrstvě až 14 Mbit/s. Jednalo se tak o první definovaný multimegabitový standard využívaný v PLC aplikacích. Přístup k přenosovému médium byl realizován pomocí CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) a velikosti přenášených rámců 46 až 1500 B. Použité frekvenční pásmo 4,5 až 21 MHz a OFDM modulace rozděluje toto pásmo na 84 subnosných pásem. Zabezpečení dat bylo realizováno pomocí Viterbiho algoritmu a Reed-Solomonova kódu. Šifrování samotného přenosu pak 56 bitovým DES algoritmem.

**HomePlug AV** - tato specifikace rodiny HomePlug standardů byla představena v roce 2005. Využívá frekvenční pásmo 2 až 28 MHz a modulaci OFDM rozděluje toto pásmo až na 1155 subnosných. Dosahuje rychlostí 200 Mbit/s na fyzické vrstvě a až 80 Mbit/s na vrstvě linkové. Přístup ke sdílenému médiu řešen pomocí TDMA

a CSMA/CA a šifrování přenosu pomocí 128 bitového AES algoritmu. Některé zařízení založeny na integrovaných obvodech společnosti Qualcomm Atheros dosahují rychlosti na fyzické vrstvě až 500 Mbit/s s využitím širšího přenosového frekvenčního pásma. Zařízení využívající standard HomePlug AV jsou kompatibilní se standardem 1.0 [14].

**HomePlug AV2** - byl poprvé představen v roce 2012 a je kompatibilní s předchozími standardy rodiny HomePlug. Využívá přenosové pásmo 2 až 86 MHz a modulaci OFDM s 3455 subnosnými v daném pásmu. Na rozdíl od předešlých standardů HomePlug, tento standard implementuje pro přenos na fyzické vrstvě kromě fázového a nulového vodiče také vodič ochranný. Díky tomu standard podporuje plné MIMO (Multiple Input Multiple Output) a rychlost na fyzické vrstvě až 1300 Mbps [15].

**HomePlug Green PHY** - je specifický standard, který analogicky vychází ze standardu HomePlug AV a byl navržen pro SmartGrid aplikace. Primární využití je například v inteligentních elektroměrech, domácích spotřebičích nebo nabíjecích stanicích pro elektromobily. Rychlost na fyzické vrstvě dosahuje 10 Mbit/s. Používá se vždy nejrobustnější modulace a kódování pro zajištění stabilního přenosu. Hlavními kritérii jsou především spolehlivost, cena, velikost a energetická náročnost zařízení, která je u tohoto standardu až o 75 % menší než v případě standardu HomePlug AV [16].

## 1.6 Zabezpečovací mechanismy standardu HomePlug

Jelikož je technologie Power Line Communication založena na všesměrovém vysílání signálu skrze napěťovou soustavu, která může být velice snadno odposlouchávána, je nezbytná implementace vhodných zabezpečovacích mechanismů. Standard HomePlug AV umožňuje vytvořit vzájemně oddělené virtuální lokální sítě nazvané AV Logical Networks (AVLNs).

Cílem AVLNs je co nejvíce se přiblížit vlastnostem standardní privátní sítě, která by měla splňovat několik základních pravidel. Stanice (STAs) v rámci jedné AVLN jsou schopny vzájemné zabezpečené komunikace a zároveň by tato komunikace neměla být rozpoznatelná jiným zařízením vně konkrétní AVLN. Zároveň by stanice neměla být schopna připojit se k existující AVLN bez vědomí uživatele spravujícího danou AVLN a nakonec by správce měl mít možnost jednoduše odebrat danou STA z AVLN.

Ve standardu HomePlug AV jsou použity celkem 4 základní klíče a každý z nich má svůj specifický účel. Stanice komunikující v rámci jedné virtuální sítě sdílejí

specifický klíč, tzv. Network Membership Key (NMK), který umožňuje stanici autentizaci pro danou AVLN. Na základě klíče NMK je následně distribuován periodicky se měnící klíč NEK (Network Encryption Key), který je přidělen každé stanici v AVLN. NEK slouží pro šifrování datového přenosu mezi stanicemi v rámci AVLN a kde je využíván standardizovaný šifrovací algoritmus AES-128. Pro možnost vzdálené konfigurace stanice v dané síti je možnost nastavit na stanici Device Access Key (DAK), který umožní ostatním zařízením se znalostí DAK připojit se ke stanici vzdáleně. Posledním typem klíče je TEK (Temporary Encryption Key), který je generován a využíván při distribuci výše zmíněných klíčů [18].

## 2 Praktická část práce

Tato kapitola bude podrobněji popisovat výsledky cílů diplomové práce. Nejprve je zde podrobně popsán výběr použitého hardwaru, poté následuje rozbor problematiky spojený s integrací širokopásmového modulu do elektroinstalační krabice, jako jsou rozměry, materiály a normy jednotlivých komponent. Jako další je zde popsán návrh desky plošného spoje nutného pro samotnou aplikaci do zásuvkové krabice s popsánými dílčími celky celého návrhu. Poslední část část pak popisuje základní ověření komunikace vybraného hardwaru v několika scénářích včetně popisu použitého softwaru pro testování.

### 2.1 Přehled BPL obvodů

Tato část se zaměřuje na výběr BPL/PLC chipsetu vhodného pro realizaci. Pro uvažovanou aplikaci v prostředí Smart Grids, Smart Buildings a v trendu kybernetické bezpečnosti bude pro návrh uvažována pouze BPL technologie s minimální požadovanou přenosovou rychlostí alespoň 1 Mbit/s.

Na trhu je velké množství firem zabývajících se touto technologií, a proto je zde také velký počet dostupných chipsetů, z nichž několik zde bude detailněji popsáno. Velkou prioritou při výběru chipsetu byla především podpora ze strany výrobce či distributora zejména v oblasti dostupných knihoven, firmwaru, schémat zapojení, datasheetu, konfiguračních nástrojů a podobně. Dalším důležitým aspektem byla samotná dostupnost a možnost zakoupení testovacích kusů, která výsledný výběr zásadně ovlivnila.

#### **QCA7000**

Našel uplatnění především pro řízení v energetice, např. chytré nabíječky pro elektromobily. Možnost komunikace po elektrické síti se střídavým napětím 230 V, 120 V, 24 V nebo stejnosměrných vedeních. Komunikace založena na robustní OFDM modulaci s přenosovou rychlostí na fyzické vrstvě 4-10 Mbps. Podporuje standardy HomePlug Green PHY 1.1, HomePlugAV a IEEE 1901. Dostupný na komunikačním modulu dLAN Green Phy firmy Devolo. Podrobnější informace v datasheetu [19].

#### **ST2100**

Integrovaný obvod ST2100 vyvinut pro komunikaci po silnoproudém vedení. Je založen na 32 bitovém procesoru ARM926EJ-S s frekvencí až 333 MHz. Využíván především při budování malých domácích sítí HAN, průmyslových a SmartGrid aplikacích. Podporuje standardy HomePlug Green PHY, HomePlugAV a 1.0. Disponuje celou řadou periférií, možností konfigurace pomocí rozhraní JTAG a vestavěným

AFE (Analog Front-End). Pro prvotní testování dostupný na modulu Universal Development Kit(IoT) [20].

### **BCM60321**

PLC chipset BCM60321 podporuje standardy HomePlugAV 1.1 a IEEE1901 pro vysokorychlostní přenos po elektrickém vedení. Přenosová rychlost až 200 Mbps na fyzické vrstvě. Nízká spotřeba, možnost vzdáleného ovládní, rozhraní FastEthernet a dosah až 300 m. Používán při budování domácích či malých firemních sítí. Další informace jsou dostupné v datasheetu [21].

### **BCM60500**

Chipset BCM60500 firmy Broadcomm podporuje nejnovější standard HomePlugAV2 spolu se standardem IEEE1901 a je optimalizován pro přenos multimediálních aplikací ve vysokém rozlišení. Princip komunikace pomocí OFDM modulace s teoretickou rychlostí na fyzické vrstvě je až 1.5 Gbps. Disponuje gigabitovým Ethernetovým rozhraním, AFE a 128 bitovým AES šifrováním [22].

### **AR7420**

Integrovaný PLC obvod založený na standardech HomePlug AV a IEEE 1901, dosahující rychlost na fyzické vrstvě až 500 Mbps, komunikace pomocí OFDM modulace, 128 bitové AES šifrování, podpora QoS, rozhraní FastEthernet, integrovaný AFE a řídicí linkový mikroprocesor ARM1540. Firma RAKwireless nabízí chipset AR7420 na svém vývojovém kitu WisPLC Pro [23].

Tab. 2.1: Souhrn základních parametrů popsaných BPL chipsetů

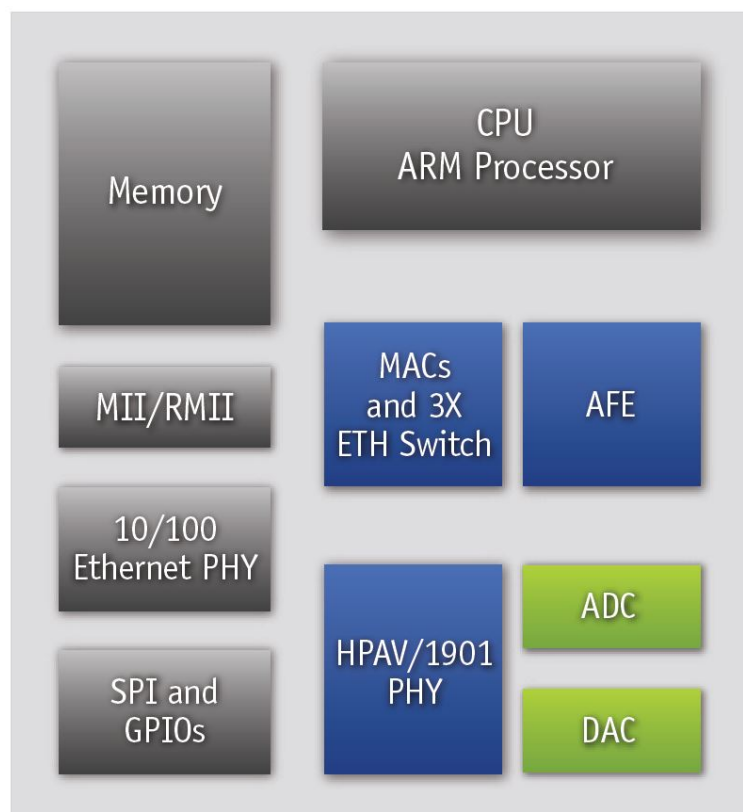
<b>Typ:</b>	<b>Standard:</b>	<b>Přen. rychlost fyzická vrstva:</b>	<b>Šifrování:</b>	<b>Dosah:</b>
QCA7000	HomePlug AV, PHY	10 Mbit/s	AES-128	300 m
ST2100	HomePlug AV, 1.0, PHY	200 Mbit/s	AES-128	-
BCM60321	HomePlug AV, 1.0	200 Mbit/s	AES-128	300 m
BCM60500	HomePlug AV2, 1.0	1.5 Gbit/s	AES-128	300 m
AR7420	HomePlug AV, 1.0, PHY	500 Mbit/s	AES-128	300 m

Na základě zhodnocení dostupných informací byl pro návrh vybrán integrovaný obvod AR7420, který poskytuje dostatečné přenosové rychlosti a další parametry vhodné pro účely této aplikace. Byla zakoupena vývojová deska WisPLC-Pro společnosti RAKWireless s komunikačním modulem LX200V30, který je postaven na architektuře chipsetu AR7420. Celá vývojová sada má velice kompaktní rozměry a výběr této sady byl především z důvodu dobré dostupnosti a příznivé ceny. V rámci

výběru byly uvažovány i jiné alternativy vývojových sad a chipsetů, ale bohužel zde nebyla možnost zakoupení menšího množství kusů ze strany dodavatele pro účely této diplomové práce.

## 2.2 Qualcomm Atheros AR7420

Qualcomm Atheros AR7420 je jedním z posledních integrovaných obvodů navržených v rámci standardu HomePlug AV. Přímo vychází z modelu AR7400, ale nabízí menší pouzdro o velikosti 10\*10 mm oproti 15\*15 mm. Základní informace o tomto integrovaném obvodu byly popsány výše, proto se tato část zaměřuje na bližší popis vnitřní struktury, kterou lze vidět na obrázku 2.1 v podobě blokového schéma.



Obr. 2.1: Blokové schéma vnitřní struktury chipsetu AR7420 [23].

### MII/RMII

MMI (Media Independent Interface) a RMII (Reduced Media Independent Interface) jsou rozhraní pro komunikaci a režii přenosu v rámci standardu IEEE 802.3u FastEthernet. Zajišťují spojení mezi linkovou vrstvou, respektive podvrstvou řízení přístupu k médiu (MAC) a vrstvou fyzickou (PHY).

## **10/100 Ethernet PHY**

Umožňuje implementaci rozhraní FastEthernet, které poskytuje přenosové rychlosti až 100 Mbit/s. Reálné přenosové rychlosti však zpravidla nedosahují 100 Mbit/s, neboť část dostupné přenosové kapacity je využita na režii celého přenosu (synchronizace, hlavičky zdroje a cíle, kontrolní součty).

## **SPI a GPIO**

Tento blok umožňuje připojení sériového periferního rozhraní (SPI) a univerzálního vstupně/výstupního rozhraní (GPIO). Díky implementaci GPIO je možné k tomuto obvodu připojit, a pomocí vhodného spínacího prvku ovládat elektronická zařízení, vyčítat data z měřících zařízení a další podobné operace.

## **AR1540**

Součástí integrovaného obvodu AR7420 je také integrovaný obvod linkového ovladače AR1540. Jeho úkolem je řízení komunikace na fyzické vrstvě a zajišťuje také plnění potřebných specifikací v rámci standardů HomePlug AV a IEEE 1901. V neposlední řadě plní funkci Analog Front-Endu (AFE). AFE je rozhraní mezi vstupně/výstupní analogovou částí obvodu, která v tomto případě představuje elektrickou síť a digitální části obvodu. Je tvořen A/D, D/A převodníky, vysílacími filtry a programovatelnými obvody vysílacího výkonu.

## **2.3 Elektroinstalační komponenty**

Jelikož je cílem práce integrace širokopásmového PLC modulu do zásuvkové krabice, budou v této části podrobněji popsány parametry používaných typů zásuvkových a rozvodných elektroinstalačních krabic a také elektrických zásuvek nízkého napětí. Nejdůležitějším parametrem pro tuto aplikaci jsou především rozměry použitých komponentů, díky kterým lze určit, kde všude bude možno sestrojený BPL modul použít nebo zda-li bude vhodnějším řešením vlastní návrh celé sestavy, tedy zásuvky s již integrovaným modulem, která by šla jednoduše nahradit za zásuvku stávající.

Varianta vlastního návrhu by z části řešila i problém spojený s chlazením prostoru za zásuvkou, jelikož by zásuvka mohla být částečně odvětrávána skrze otvory navržené tak, aby zároveň neumožňovaly styk s živými částmi elektrického vedení.

### **2.3.1 Elektroinstalační krabice**

Krabice musí splňovat požadavky ČSN EN 60 670-1 čl.16 odolnost proti nadměrnému teplu a hoření žhavou smyčkou s teplotou 850 °C, ČSN EN 13 501-1 montáž do stavebních hmot třídy reakce na oheň A1 až C, případně další normy podle specifické

aplikace. Běžně používané krabice jsou určeny pro elektrické rozvody s jmenovitým napětím do 400 V a proudem maximálně 16 A. Vyrábí se ze samozhášivého polyvinylchloridu (PVC), polypropylenu (PP), polyethylenu (PE), polykarbonátu (PC), polyfenylenoxidu (PPO) či hliníku. Nejčastěji udávanými parametry jsou vnější průměr a hloubka, rozteč montážních otvorů, hmotnost, materiál, stupeň krytí, stupeň hořlavosti a teplotní rozsah použití. Elektroinstalační krabice lze z hlediska použití rozdělit na několik základních typů:

**Univerzální** - nejčastěji používaný typ, umístění pod omítku i na stěnu, disponuje množstvím montážních prvků, lze použít jako odbočnou, přístrojovou nebo rozvodnou. Vhodná pro většinu běžných elektroinstalací.

**Odbočné** - disponují množstvím výřezů pro přivedení kabeláže, větší rozměry, používají se pro vedení kabelových tras. Obvykle zakončeny krycím víkem. Zpravidla neobsahují montážní svorky pro uchycení zásuvek, vypínačů či jiných elektroinstalačních zařízení.

**Přístrojové** - přístrojové krabice slouží především k montáži elektrických a elektronických zařízení jako jsou zásuvky, vypínače, termostaty, stmívače či televizní a datové výstupy. Možnost vícenásobného provedení nebo možnost spojování samostatných krabic do libovolných celků.

**Rozvodné** - krabice osazeny svorkovnicí pro rozvod kabelové trasy k dalším přístrojům či jiným prvkům elektroinstalace.

Jak již bylo zmíněno výše, zásadními parametry pro návrh modulu jsou především rozměry elektroinstalačních krabic, proto zde budou popsány v praxi používané typy a následně zhodnoceno, kde bude možné vytvořený modul nasadit. Válcové instalační krabice pod omítku se standardně vyrábějí ve dvou základních vnějších průměrech 72 mm a 103 mm. V domácích a firemních elektroinstalacích je nejpoužívanějším typem 72x43 mm, pro oddělovací příčky rozměr 72x30 mm a pro potřeby rozsáhlejších instalací do širokých nosných stěn pak provedení 72x66 mm. Zmíněný větší průměr 103 mm s hloubkou 50 mm se používá především pro rozvodné a odbočné krabice.

Další variantou jsou elektroinstalační krabice s umístěním na stěnu ve tvaru kvádru. Jejich standardní rozměry jsou nejčastěji 82x82 mm, 105x81 mm nebo 151x82 mm s hloubkou 16 až 28 mm. Pro integraci modulu je malá hloubka těchto provedení velmi limitující. Existují však univerzální krabice s umístěním na stěnu např. LKM45 s rozměry 98x98x45 mm, které by umístění modulu umožňovala.

### 2.3.2 Elektrické zásuvky

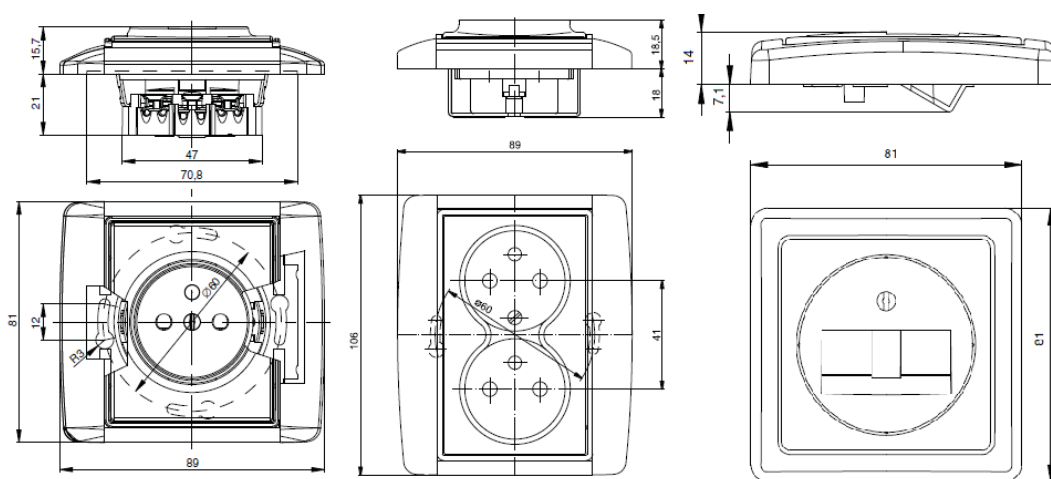
Elektrické zásuvky musí splňovat několik všeobecných požadavků. Základním požadavkem je, že ochranný kolík musí být připojen na ochranný vodič. Zásuvky musí být voleny vhodně podle napěťové a proudové soustavy a zároveň při použití více napěťových soustav musí být zásuvky nezaměnitelné. Musí vyhovět normě ČSN EN 60309-1 ed.3 a zásuvky s maximálním proudem nepřesahujícím 16 A musí odpovídat normě vzoru zásuvek pro danou zemi dle IEC-TR 60083:2006. Pro účely této práce budou popsány nejčastěji používané zásuvky a elektronické přístroje s montáží do elektroinstalačních krabic, jak ukazuje obrázek 2.2. Podklady byly převzaty z kompletního katalogu s technickými údaji firmy ABB [24].

**Zásuvka nn jednonásobná** - nejrozšířenější typ zásuvky, svorkovnice s ochranným kolíkem pro montáž do zásuvkových krabic s roztečí montážních otvorů 50 mm. Hloubka svorkovnice zasahující do přístrojové krabice je nejčastěji 22 mm.

**Zásuvka nn dvojnásobná** - zásuvka umožňující připojit současně dva přístroje, svorkovnice se dvěma vzájemně propojenými ochrannými kolíky. Existují také varianty s pootočeným horním vstupem o 45° pro současné připojení vidlic s ochranným vodičem. Hloubka svorkovnice zasahující do přístrojové krabice je obvykle 18 mm.

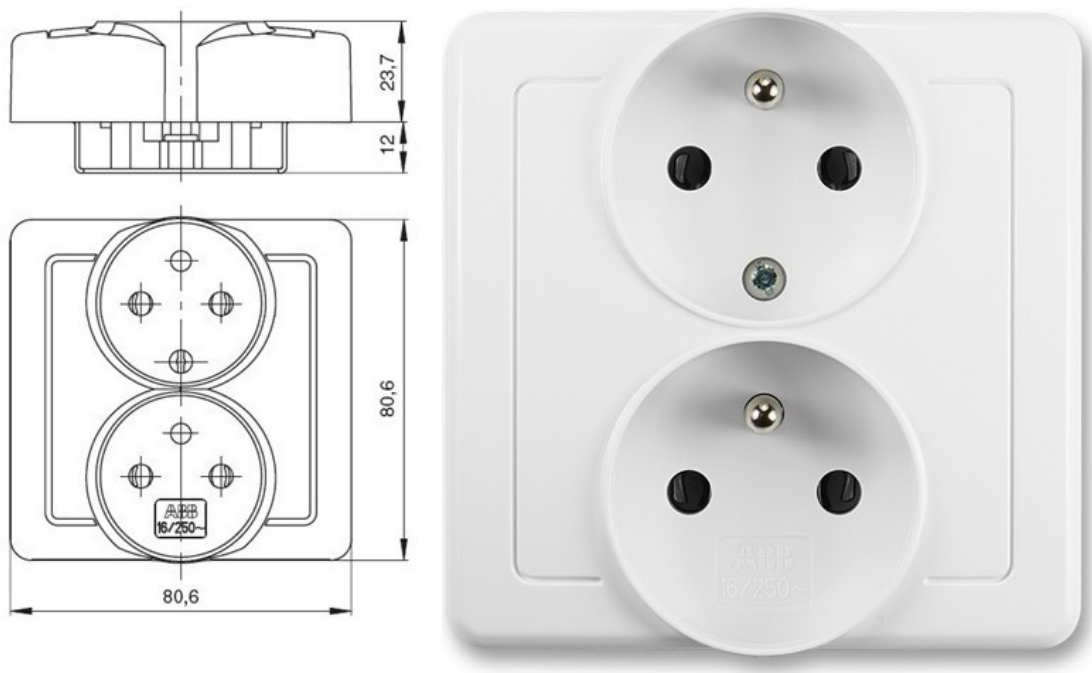
**Zásuvka nn dvojnásobná polozapuštěná** - obdoba předchozí varianty, liší se především hloubkou svorkovnice zasahující do přístrojové krabice, která je v tomto případě pouze 12 mm na úkor vyššímu vnějšímu rámečku zásuvky.

**Zásuvka komunikační** - zásuvka pro připojení telefonních a datových kabelů RJ-11 nebo RJ-45 pomocí keystone konektorů. Rámeček ani svorkovnice téměř vůbec nezasahují do elektroinstalační krabice.



Obr. 2.2: Rozměry jednotlivých typů zásuvek.

Pro sestavení prototypu integrovaného BPL modemu byla vybrána polozapuštěná zásuvka Swing společnosti ABB, kterou lze vidět na obrázku 2.3. Výhodou této zásuvky je velmi malý přesah svorkovnice do elektroinstalační krabice, který činí pouhých 12 mm. Po instalaci komunikačního modulu na zadní stranu svorkovnice tak vznikne dostatečný prostor pro montáž a vedení kabeláže. Rámeček zásuvky s výškou 23,7 mm umožní snadnější vyvedení ovládacích a indikačních prvků integrovaného modulu, jako jsou tlačítka, indikační diody a konektor RJ-45 pro připojení koncového zařízení.



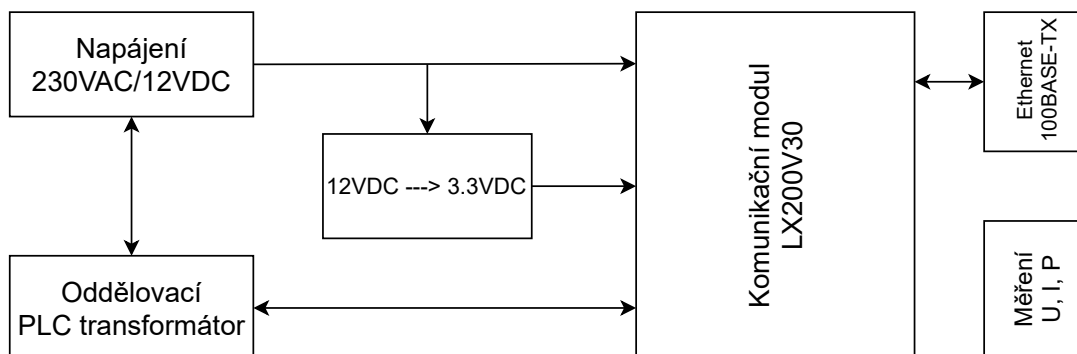
Obr. 2.3: Polozapuštěná dvojnásobná zásuvka Swing [24].

## 2.4 Elektrické bezpečnostní požadavky

Jelikož je při instalaci navrženého zařízení nevyhnutelný styk s živými částmi elektroinstalace, je zapotřebí uvést několik bezpečnostních požadavků. Elektrické instalace a elektrické spotřebiče musí být navrženy tak, aby je mohli užívat osoby bez elektrotechnické kvalifikace a nemohlo dojít k neúmyslnému dotyku živé části a s tím spojenou ujmu na zdraví či škodě na majetku. Takovéto opatření jsou obsažena v normě ČSN 33 1310 ed. 2:2009.

## 2.5 Blokové schéma modulu

Na obrázku 2.4 můžeme vidět zjednodušené schéma širokopásmového komunikačního modulu se zdrojovou deskou. Pro komunikační modul LX200V30, který je použit v této práci, byla navržena nová zdrojová deska s přesnými rozměry a potřebnými dílčími částmi.



Obr. 2.4: Zjednodušené blokové schéma zásuvkového modulu.

Nejdříve bylo zapotřebí zajistit napájení celého modulu, které bylo v původní sestavě řešeno stejnosměrným napětím  $12 V_{DC}$  z externího zdroje nebo napětím  $5 V_{DC}$  z microUSB vstupu. Nově vytvořená deska bude však umístěna v elektroinstalační krabici za zásuvkou, kde nebude možnost toto řešení použít. Proto bylo potřeba využít elektrické vedení  $230 V_{AC}/50 \text{ Hz}$ , které bude sloužit pro komunikaci i napájení pomocí implementovaného spínaného zdroje  $230 V_{AC}/12 V_{DC}$ . Výhodou spínaného zdroje jsou především kompaktní rozměry. Prvotní návrhy uvažovaly využití lineárního zdroje napětí, avšak rozměry výsledného zařízení by byly nevhodné pro integraci do elektroinstalační krabice vzhledem k velikosti potřebných komponentů, především pak zdrojového transformátoru s pracovní frekvencí  $50 \text{ Hz}$ . Pro možnost zapnutí či vypnutí modulu a indikaci jeho stavu byla přidána indikační led dioda a vypínač, které budou vyvedeny na vnější stranu zásuvky. Z komunikačního modulu je možné využít také stavových led diod (PLC, ETH) indikujících samotnou komunikaci na dané lince. Ze svorkovnice pro připojení fázového vodiče L a nulového vodiče N je vyveden také oddělovací transformátor vazebního členu.

Komunikační modul LX200V30 vyžaduje napěťové větve  $3,3 V_{DC}$  a  $12 V_{DC}$ , které jsou realizovány pomocí integrovaných měničů napětí, které je potřeba vhodně dimenzovat vzhledem k proudovému zatížení. Z větve  $3,3 V_{DC}$  bude napájena také indikační led dioda. Chipset modulu může být opatřen pasivním chladičem pro odvod nežádoucího tepla do okolí.

Ethernetové rozhraní bude vyvedeno na desce formou připravených pájecích ploch, ze kterých povede standardní kroucená dvoulinka typu UTP, která bude na

vnější straně zásuvky zakončena konektorem pro připojení standardního ethernetového rozhraní RJ-45. Pro možné rozšíření je zde uveden také blok pro měření proudu a napětí, díky kterému bude možno vypočítat například aktuální výkon na dané zásuvce. Tento krok však vyžaduje úpravu továrního firmwaru a použití vhodných funkcí.

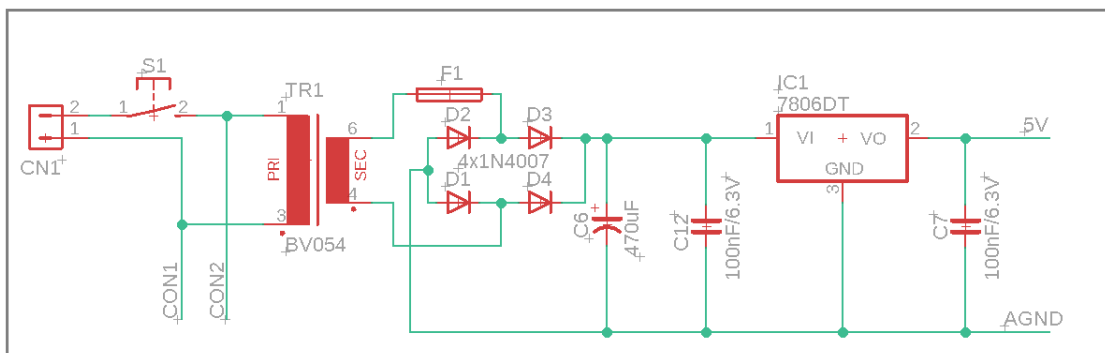
## 2.6 Schéma návrhu dílčích částí DPS

V této části jsou podrobně popsány dílčí úkony návrhu DPS realizované v rámci této práce. Vzhledem k postupnému vývoji prototypů jsou zde podrobně popsány kroky celého návrhu od prvotních schémat zapojení po finální verzi DPS. Také jsou zde blíže specifikovány jednotlivé komponenty a důvod jejich použití. Na konci této části je pak uveden celkový finální návrh a jeho zhodnocení. Realizováno bylo několik návrhů lišících se především použitými komponenty a jejich účinností.

### 2.6.1 Zdrojová část

#### První návrh zdrojové části

Hlavní částí desky je zdrojová část, jejíž prvotní návrh můžeme vidět na obrázku 2.5. Jelikož je modul umístěn v místě, kde není možno jej napájet externím zdrojem, bylo zapotřebí navrhnout samostatný zdroj přímo na desce plošného spoje.



Obr. 2.5: Prvotní návrh lineárního zdroje  $230 V_{AC}/5 V_{DC}$ .

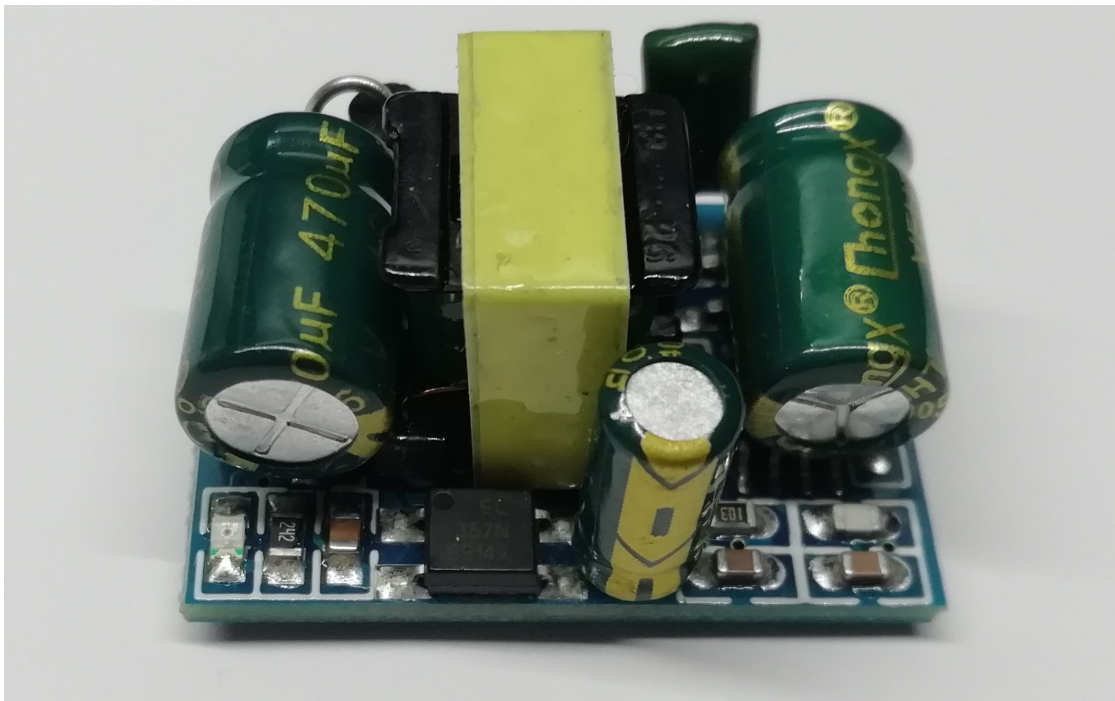
Základem zdroje jsou vstupní svorky pro přivedení síťového napětí  $230 V_{AC}/50 \text{ Hz}$ . Pro možnost vypnutí či zapnutí je deska opatřena pájecími ploškami pro instalaci vypínače, který rozpojí kontakt fázového vodiče a tím přeruší napájení modulu. Vstupní napětí je následně přivedeno na transformátor  $230 V_{AC}/5 V_{DC}$ .

Střídavé napětí  $5 V_{AC}$  je usměrněno pomocí Graetzova můstku tvořeného čtyřmi diodami 1N4007. Výstupem je takzvané pulzující stejnosměrné napětí, které je potřeba vyhladit pomocí elektrolytického kondenzátoru  $470 \mu F$  na hladký průběh stejnosměrného napětí. Následně je pomocí lineárního regulátoru IC-7805 s kondenzátory C12 a C7 napětí stabilizováno na  $5 V$ .

### Upravený návrh zdrojové části

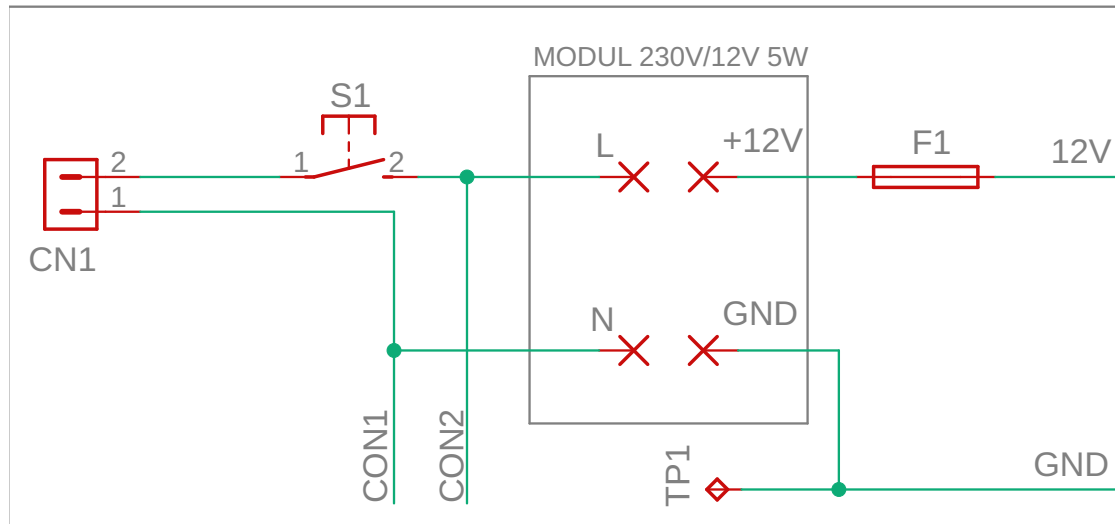
Prvotní návrh zdrojové části však obsahoval transformátor TR1 s pracovní frekvencí  $50 \text{ Hz}$ , jehož rozměry jsou příliš velké pro integraci výsledného zařízení do elektroinstalační krabice. Proto byl návrh upraven a lineární zdroj napětí byl nahrazen spínaným zdrojem. Výhodou spínaného zdroje je především jeho velikost vzhledem k požadovanému výkonu. Využit byl modul spínaného zdroje  $230 V_{AC}/12 V_{DC}$  s maximálním výkonem  $5 \text{ W}$ , který zobrazuje obrázek 2.6.

Základ modulu tvoří vysokofrekvenční transformátor a řídicí integrovaný obvod THX208. Vstupní napětí je usměrněno pomocí usměrňovacího můstku MB6S. Dále je modul osazen elektrolytickými kondenzátory  $4,7 \mu F/400 \text{ V}$  na vstupu,  $22 \mu F/50 \text{ V}$  u napájení THX208 a  $470 \mu F/16 \text{ V}$  na výstupu. Regulace výstupního napětí je řízena pomocí tranzistorového optočlenu EL357. Pro připojení vstupního síťového napětí a výstupního napětí  $12 V_{DC}$  jsou na desce vyvedeny pájecí plochy s prokovy o šířce  $1 \text{ mm}$ . Signalizaci zapnutého modulu zajišťuje indikační led dioda.



Obr. 2.6: Modul spínaného zdroje  $230 V_{AC}/12 V_{DC}$ .

Pro znázornění spínaného zdroje ve schématu zapojení, byly využity schématické značky pájecích otvorů s vhodným označením vstupů (L, N) a výstupů (12V, GND) modulu. Z původního zapojení lineárního zdroje byla ponechána pouze tavná pojistka F1 na výstupu zdroje. Návrh byl rozšířen o testovací pin TP1 spojený se zemí pro jednodušší měření požadovaných napětí výsledného zařízení. Upravené schéma zobrazuje obrázek 2.7.



Obr. 2.7: Schéma spínaného zdroje 230 V<sub>AC</sub>/12 V<sub>DC</sub>.

## 2.6.2 Napěťové větve 3,3 V a 12 V

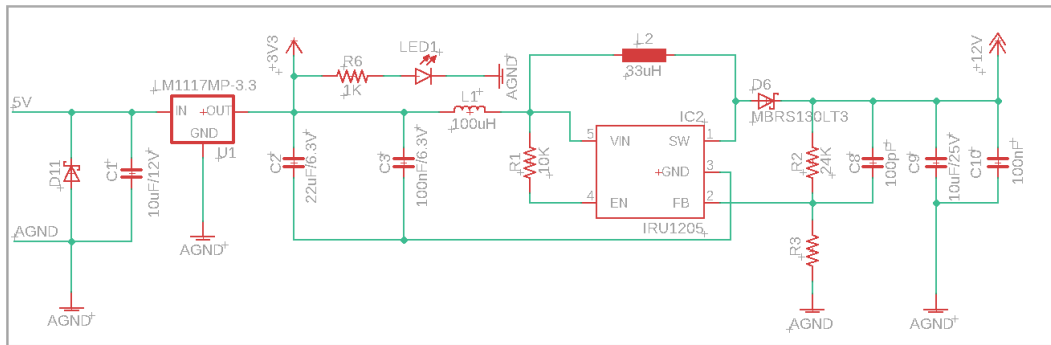
### První návrh napěťových větví

Použitý komunikační modul LX200V30 vyžaduje dvě vstupní napěťové větve 3,3 V<sub>DC</sub> a 12 V<sub>DC</sub>. V prvotním návrhu, který zobrazuje obrázek 2.8, bylo využito zapojení z vývojového kitu WisPLC Pro společně s lineárním zdrojem, jehož návrh je popsán výše.

Součástí je nejprve ochrana proti přepólování realizovaná diodou D11, následně je napětí přivedeno na regulátor napětí LM1117MP-3.3, který ze vstupního napětí 5 V<sub>DC</sub> vytvoří výstupní napětí 3,3 V<sub>DC</sub>. Kondenzátory C1 a C2 byly navrženy podle zapojení udávaného výrobcem vývojového kitu. Napěťová větev 3,3 V<sub>DC</sub> je určena pro napájení indikační diody LED1 s předřadným odporem R6 a zároveň jako vstupní napětí pro modul LX200V30.

Napětí 3,3 V<sub>DC</sub> je následně přivedeno na lineární regulátor napětí AME5130, který zvýší napětí na 12 V<sub>DC</sub>. Součástí tohoto zapojení jsou rezistory R2 a R3 sloužící jako děliče napětí, ochranná dioda D6, filtrační tlumivky L1 a L2, vysokofrekvenční

filtrační kondenzátory C3 a C10 a kondenzátory C2, C8 a C10 sloužící jako stabilizační kondenzátory napětí. Parametry jednotlivých součástek byly navrženy dle informací výrobce měniče AME5130.



Obr. 2.8: Schématické zapojení napěťových větví.

Jelikož bylo toto zapojení navrženo původně pro vývojový kit s možností napájení externím zdrojem  $12\text{ V}_{DC}$  nebo micro USB vstupem s napětím  $5\text{ V}_{DC}$ , je zde použito několik stabilizátorů či step-up měničů napětí. V zapojení s původně uvažovaným lineárním zdrojem napětí by celý obvod vykazoval velké výkonové ztráty, které by se projevily především tepelnými ztrátami napříč obvodem. Vzhledem k výše popsaným problému bylo navrženo nové schéma obvodu s využitím modulu spínaného zdroje.

### Upravený návrh napěťových větví

Základem upraveného schématu je vstup  $12\text{ V}_{DC}$  z modulu spínaného zdroje. Vstupní napětí je následně přivedeno na lineární stabilizátor napětí 78M12, který je v obvodu implementován pro případ případného kolísání napětí ze zdroje. Spínaný zdroj však při testech se zátěží dodával velice přesné napětí s minimálním kolísáním, jak lze vidět z tabulky 2.2 a obrázku 2.9, proto je možné tento stabilizátor zanedbat a nahradit propojem.

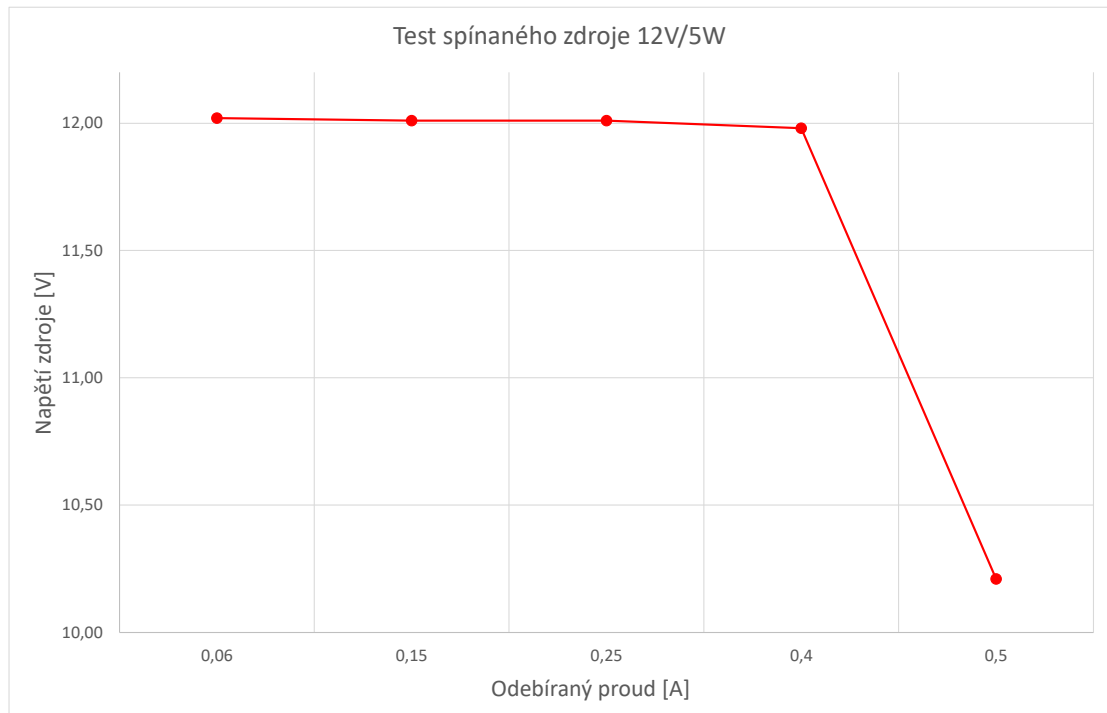
Tab. 2.2: Test modulu spínaného zdroje

<b>Napětí zdroje [V]</b>	12,02	12,01	12,01	11,98	10,21
<b>Odebíraný proud [A]</b>	0,06	0,15	0,25	0,4	0,5
<b>Výkon zdroje [W]</b>	0,721	1,802	3,003	4,792	5,105

Testování spínaného zdroje bylo provedeno s využitím laboratorního reostatu. Modul zdroje byl nejdříve připojen k oddělovacímu transformátoru  $230\text{ V}_{AC}/50\text{ Hz}$  pro případ možné poruchy. Po nastavení hodnoty proudu byl zdroj ponechán několik minut v zátěži a následně byla změřena hodnota napětí zdroje. Výjimkou bylo

jen měření krajní hodnoty, mimo udávané maximum zdroje, které bylo měřeno jen krátkodobě. Napětí zdroje  $12\text{ V}_{DC}$  udávané výrobcem vykazovalo jen velmi malé odchylky až do maximální možné hodnoty odebíraného proudu  $0,4\text{ A}$  dle technických specifikací. Tato hodnota odpovídala výkonu  $4,792\text{ W}$ . S vyšší hodnotou odebíraného proudu už napětí zdroje klesalo velice výrazně.

Pro účely napájení integrovaného modulu s maximálním odebíraným výkonem nepřesahujícím  $3\text{ W}$  jsou tyto hodnoty více než dostatečné.



Obr. 2.9: Průběh napětí zdroje a odebíraného proudu.

Dále je v obvodu stabilizátor TS1117 s fixním výstupem  $3,3\text{ V}_{DC}$ , který slouží jako zdroj pro komunikační modul a indikační led diodu. Schéma je doplněné o několik testovacích bodů. Testovací ploška TP2 slouží pro měření napětí spínaného zdroje, TP3 pro výstup za stabilizátorem 78M12 a TP4 pro sledování napětí na výstupu TS1117. Výsledné zapojení lze vidět na obrázku 2.10.

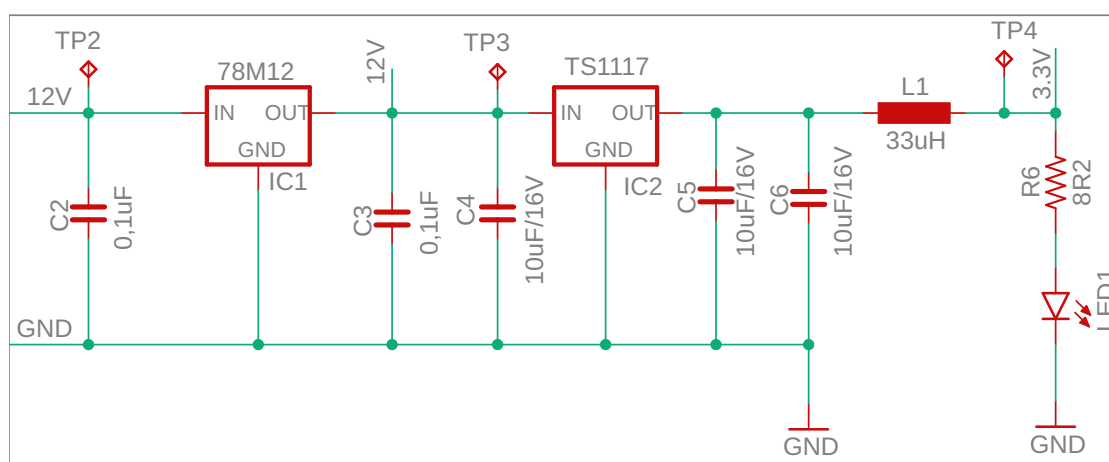
Lineární regulátory napětí jsou však značně neefektivní. Při regulaci je poměrně velká část energie vyzářena v podobě tepla, což má za následek větší spotřebu energie a rostoucí teplotu lineárního regulátoru, která pak zahřívá celou desku plošného spoje. Rovnice 2.1 popisuje výpočet výkonu parazitního tepla na lineárním regulátoru TS1117.

$$(V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_{OUT} = P_{HEAT} \rightarrow (12 - 3,3) \cdot 0,180 = 1,56\text{ W} \quad (2.1)$$

Platí, že čím větší je rozdíl mezi vstupním a výstupní napětím regulátoru, tím větší jsou také ztráty v podobě narůstajícího tepla. Stejný princip platí také o rostoucím odebraném proudu na výstupu regulátoru. Celkovou účinnost lze pro konkrétní případ spočítat podle rovnice 2.2.

$$\eta = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{IN} \cdot I_{IN}} \cdot 100 \rightarrow \eta = \frac{3,3 \cdot 0,18}{12 \cdot 0,12} \cdot 100 = 41,25 \% \quad (2.2)$$

Účinnost lineárního regulátoru tedy činí 41,25 %. Pro zvýšení celkové účinnosti, spotřeby energie a snížení vyzařovaného tepla bylo navrženo také schéma napěťových větví s využitím spínaného DC/DC měniče napětí.



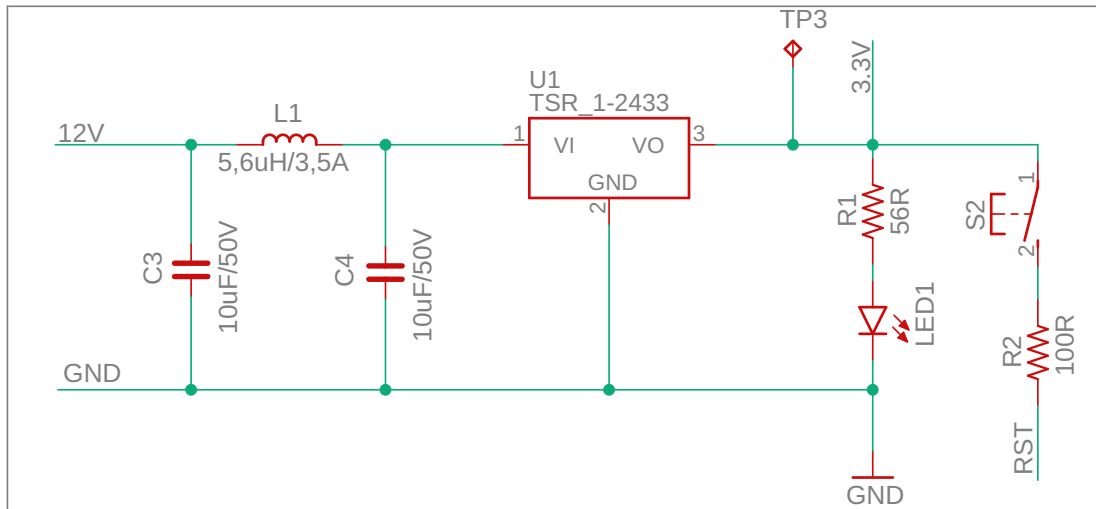
Obr. 2.10: Upravené zapojení napěťových větví.

### Návrh napěťových větví s využitím spínaného DC/DC měniče

Vzhledem k výše popsaným nevýhodám lineárních regulátorů napětí byl v tomto návrhu použit spínaný step-down DC/DC měnič TSR 1-2433 firmy Traco Power. Z předchozího návrhu byl odebrán stabilizátor 78M12, neboť měření prokázaly, že výstupní napětí spínaného zdroje je dostatečně stabilní v požadovaném výkonovém rozmezí.

TSR 1-2433 je velmi kvalitní měnič napětí s účinností až 91 % v závislosti na velikosti vstupního napětí. V případě tohoto návrhu byla účinnost 85 %. Maximální výstupní proud je 1 A, což při napětí 3,3 V<sub>DC</sub> na výstupu poskytuje celkový výkon 3,3 W. V technickém listu tohoto měniče je uvedeno také doporučené schématické zapojení vstupního LC filtru splňující normu EN55032, která udává požadavky na emisi elektromagnetického rušení multimediálních zařízení. LC filtr je tvořen tlumivkou L1 s indukčností 5,6 uH a dvojicí paralelně zapojených keramických kondenzátorů C3 a C4 s kapacitou 10 uF a maximálním napětím 50 V.

V rámci návrhu byl implementován také programovatelný spínač, jehož zapojení bylo převzato z vývojového kitu WisPLC Pro. Pomocí přiloženého softwaru lze tomtuto spínači přiřadit několik funkcí, z nichž nejdůležitější je možnost softwarového resetu komunikačního modulu LX200V30 a rychlého párování s ostatními zařízeními v rámci jedné AVLN (AV Logical Networks). Výsledný návrh s využitím DC/DC měniče lze vidět na obrázku 2.11.

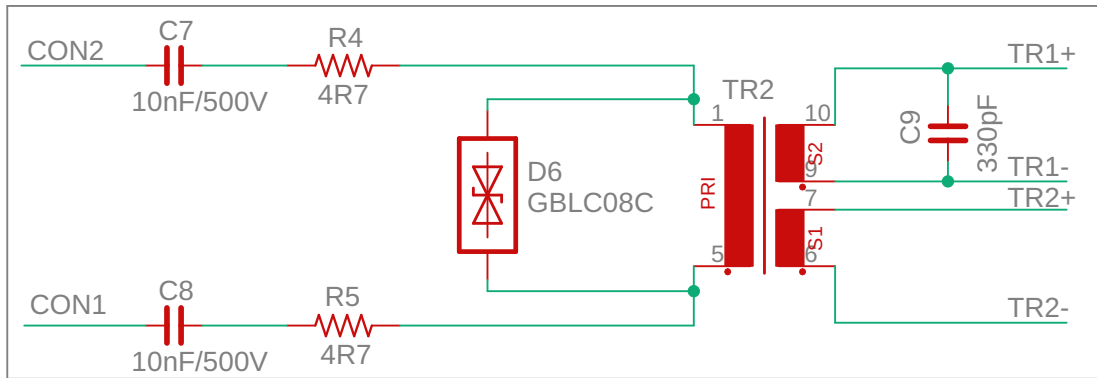


Obr. 2.11: Schéma zapojení s využitím spínaného DC/DC měniče.

### 2.6.3 Vazební člen

Schéma zapojení vazebního členu je zobrazeno na obrázku 2.12. Pro galvanické oddělení modulu od síťového napětí je zde transformátor TR2, který zároveň umožňuje injektovat signál na elektrické vedení pomocí rezonančního obvodu umístěného na komunikačním modulu LX200V30.

Transformátor disponuje jedním primárním vinutím, které je připojeno na společné vstupní svorky CN1 a dvěma sekundárními vedeními, které jsou vyvedeny na konektor J2. Součástí zapojení je také kondenzátor C11 a na primární části pak sériové zapojení kondenzátoru C7 a rezistoru R4 (respektive C8 a R5) sloužící jako vysokofrekvenční filtr. Primární část transformátoru disponuje také paralelně zapojenou bipolární diodou GBLC08C. Jedná se o malou pasivní součástku, která chrání zařízení před rychlými přechodnými jevy v podobě strmých a řádově vyšších napěťových špiček nebo elektrostatickými výboji.



Obr. 2.12: Schématické zapojení vazebního členu.

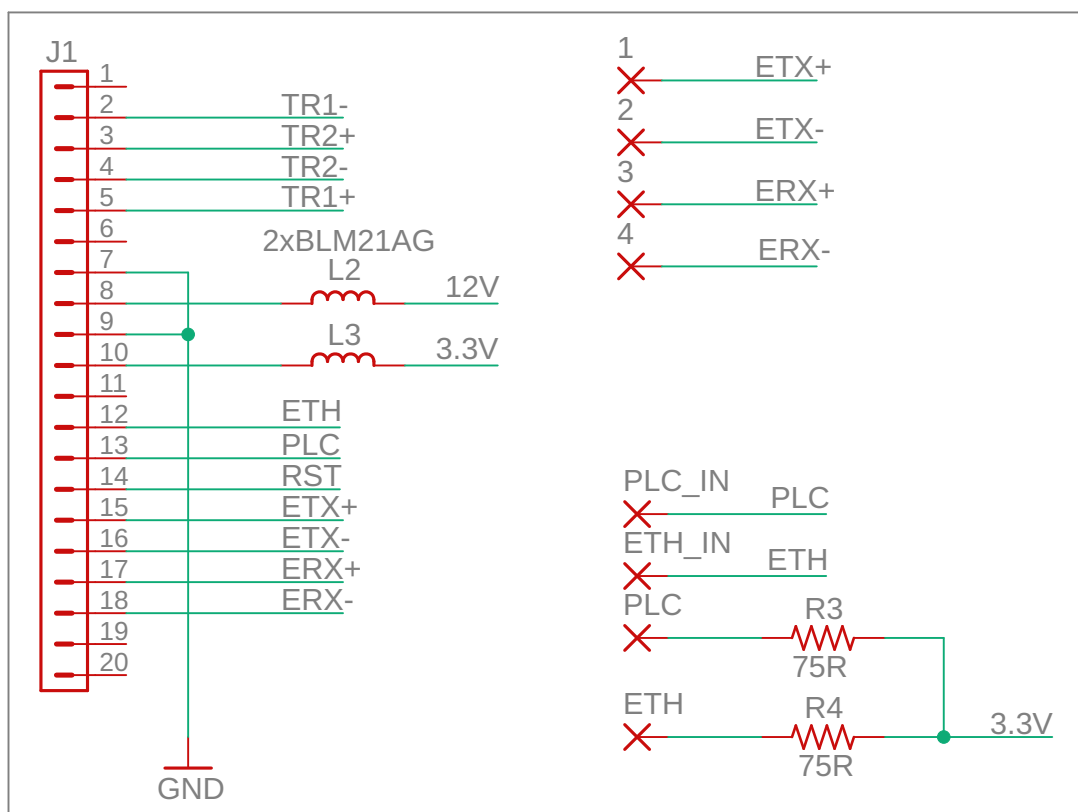
## 2.6.4 Výstup pro modul LX200V30 a Ethernet

Na obrázku 2.13 lze vidět schéma zapojení pro Ethernet a výstupní část pro komunikační modul LX200V30. Konektor J2 byl pro potřeby připojení komunikačního modulu ponechán, ačkoli je zde větší množství nepřipojených pinů. Realizován byl prostřednictvím dutinkové lišty BTK120 s roztečí mezi jednotlivými piny 2 mm.

Pro ethernetové rozhraní 100BASE-TX, které je implementováno v integrovaném obvodu AR7420, nemohl být vzhledem k rozměrům použit standardní konektor RJ-45 pro montáž na DPS, proto se v rámci návrhu přistoupilo k variantě pájecích otvorů, do kterých budou jednotlivé vodiče připájeny a následně vyvedeny na rámeček zásuvky. V rámci standardu 100BASE-TX se využívá pro přenos signálů pouze dvou párů, zbylé dva páry kroucené dvoulinky zůstanou nepřipojeny.

Při osazování bylo dbáno na to, aby jednotlivé páry byly vedeny krouceně co nejbližší k pájecím otvorům a co nejvíce se tak zamezilo přeslechům a možnému indukovaní elektromagnetického rušení. Kroucená dvoulinka bude od DPS vedena na zadní stěnu rámečku zásuvky, kde se připojí ke konektoru RJ-45, pro který bude na rámečku připraven otvor. Keystone konektor, běžně používaný při realizaci klasické ethernetové zásuvky, je však příliš rozměrný pro umístění pod zásuvku, proto bude použit konektor RJ-45 pro desky plošných spojů, který poskytuje vhodné rozměry pro danou aplikaci. Pro samotné propojení desky a konektoru je nejvhodnější plochý patch kabel, který lze tvarovat jednodušeji než standardní kabel UTP.

Pro indikaci stavu ethernetové a PLC linky byly na desku vyvedeny pájecí otvory PLC (PLC-IN) a ETH (ETH-IN) s předřadnými odpory R3 a R4 pro instalaci stavových led diod na čelní panel zásuvky.



Obr. 2.13: Schématické zapojení výstupu komunikačního modulu a Ethernetu.

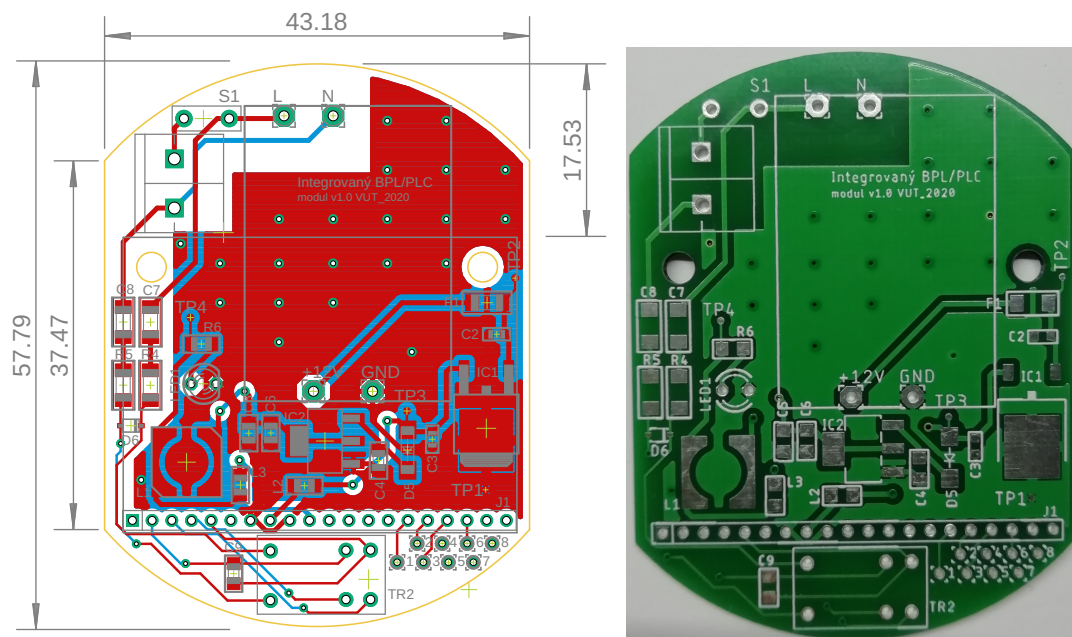
## 2.7 DPS integrovaného BPL/PLC modulu

Návrh desky plošného spoje byl realizován v programu Eagle ve verzi 9.5.0. Při jeho vytváření byl kladen důraz na co možná největší využití dostupného místa elektroinstalační krabice, proto byl zvolen atypický zaoblený tvar s šířkou nepřesahující 44 mm a výškou v nejvyšším bodě zaoblení 57,79 mm. Tento tvar přímo kopíruje použitelný vnitřní prostor krabice s rezervou 5 mm pro snadnější instalaci výsledného zařízení.

Většina součástí byla vybrána z dostupných knihoven programu Eagle či do datečně importovaných knihoven dostupných na internetových stránkách výrobců. Některé specifické součástky, jako jsou transformátory, svorkovnice nebo konektory, však bylo potřeba navrhnut jako zcela nové objekty podle technických parametrů udávaných výrobcem, a to především kvůli specifickým roztečím mezi jednotlivými vývody, jejich průměru a doporučené šířce pájecích ploch. Pro zjednodušení návrhu byly použity schématické značky již hotových součástí a změněny byly jejich vývody.

Rozmístění jednotlivých komponentů na desce bylo realizováno v pomyslných blocích (napájení, komunikace, oddělovací transformátor vazebního členu, napěťové větve). Napájecí část pak byla umístěna co nejdále od části komunikační z důvodu minimalizace možného vzniku rušení. Při rozmístění součástek musel být brán zřetel také na použitý modul LX200V30 s rozměry 40x30 mm, který je umístěn v konektoru J2 a překrývá značnou část desky. Aby bylo možné pod komunikační modul umístit spínaný zdroj, který je v návrhu vyznačen obdélníkem ve střední části desky, byl konektor J2 zdvojen zapojením dvou konektorů do sebe. Tímto zapojením vznikla dostatečná mezera mezi deskou a modulem LX200V30 pro připojení zdroje. Deska je opatřena otvory pro montáž distančních sloupků, které zvýší celkovou integritu osazeného modulu. Výsledný návrh DPS prototypu verze 1.0 v programu Eagle zobrazuje obrázek 2.14a.

Výroba desek plošných spojů pro prototyp verze 1.0 byla realizovaná čínskou firmou JLCPCB, a to především z důvodu možnosti vyrobit pouze několik kusů (minimálně však 5), cenové dostupnosti a rychlému dodání. Deska byla vyrobená v tloušťce 2 mm oproti běžně tloušťce 1,6 mm z důvodu větší pevnosti a pro vodivou vrstvu byl zvolen materiál splňující platnou Evropskou směrnici RoHS omezující použití nebezpečných látek v elektrických a elektronických přístrojích. První prototyp vyrobené DPS zobrazuje obrázek 2.14b.

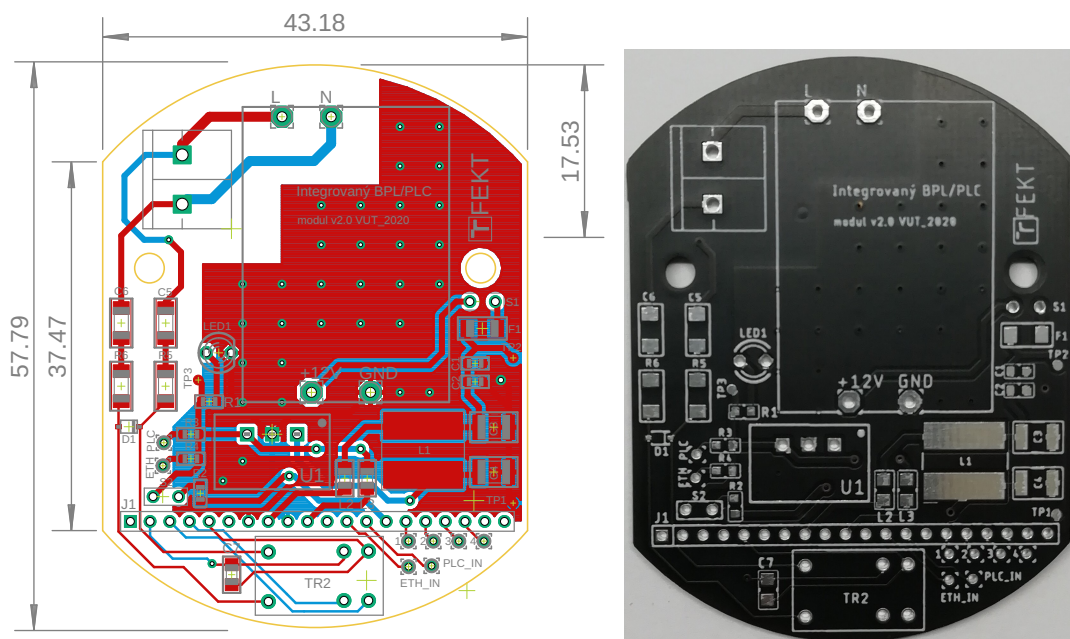


Obr. 2.14: a) Návrh DPS v1.0 v programu Eagle b) Vyrobená DPS v1.0

Pro závěrečný upravený návrh verze 2.0 s využitím spínaného DC/DC měniče byla navržena také nová DPS, kterou lze vidět na obrázku 2.15a. Tvar i rozměry desky byly ponechány, neboť se v prvotním návrhu velmi dobře osvědčily.

Největší změna nastala především u částí se síťovým napětím  $230\text{ V}_{AC}/50\text{ Hz}$ , u kterých byly znatelně zvětšeny izolační vzdálenosti clearance (vzdálenost mezi dvěma vodivými částmi vzduchem) a creepage (vzdálenost mezi dvěma vodivými částmi na povrchu desky). Pro napětí  $230\text{ V}_{AC}$  je obecně udávána vzdálenost clearance  $4\text{ mm}$  a creepage vzdálenost  $6\text{ mm}$ . Liší se však v závislosti na typu napětí (AC, DC), materiálem DPS, materiálem nepájivé masky nebo prostředím ve kterém bude zařízení provozováno [25]. U vstupní svorkovnice CN1 a vstupní části spínaného zdroje byly tyto vzdálenosti dodrženy, avšak u propoje mezi oddělovacím transformátorem TR2 a svorkovnicí již byly nedostatečné. Řešením tohoto problému by mohla být například frézovaná drážka mezi vodiči a celková změna rozmístění součástek. Vyřešení izolačních vzdáleností je jedním z hlavních problémů, který by mohl být rozpracován v rámci budoucího rozšíření této práce.

Nepájivá maska byla vyvedena v černé barvě, aby byl sjednocen desing komunikačního modulu a navržené desky plošného spoje. Vyrobenou DPS verze 2.0 zobrazuje obrázek 2.15b.

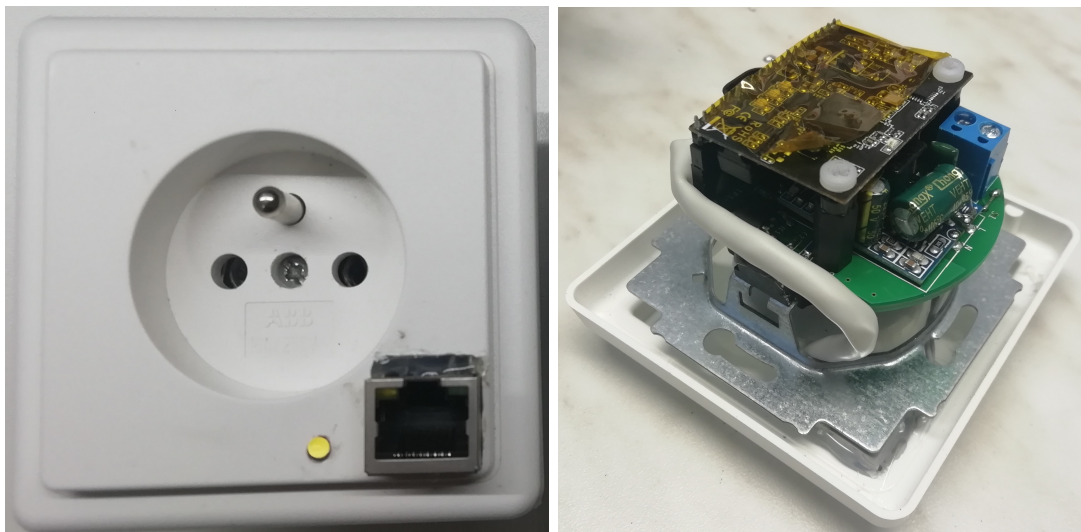


Obr. 2.15: a) Návrh DPS v2.0 v programu Eagle b) Vyrobená DPS v2.0

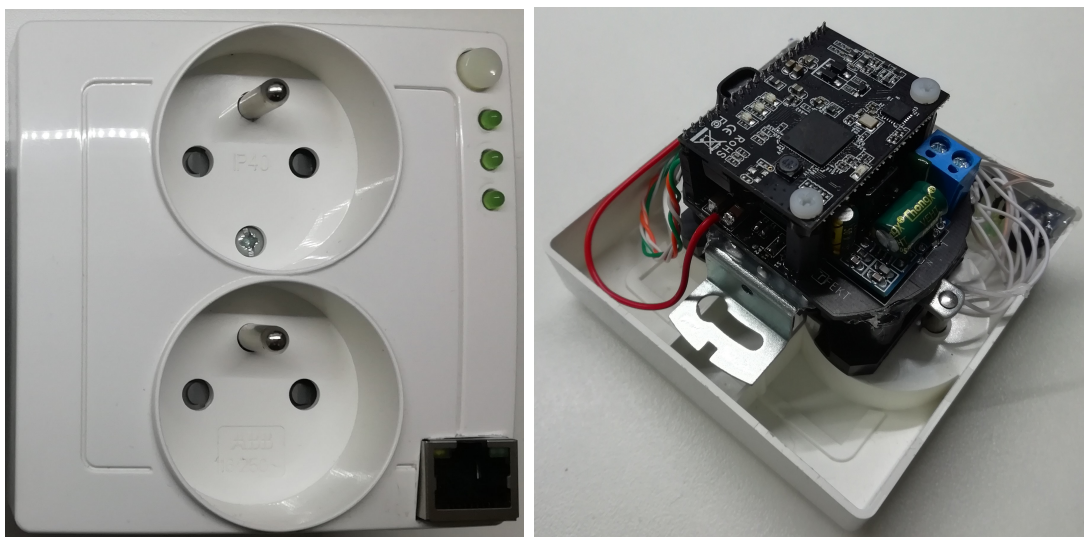
Oba návrhy DPS, popsané výše, byly realizovány jako dvouvrstvé desky v páté konstrukční třídě. Šablona pro automatickou kontrolu návrhových pravidel (Design Rule Check) byla převzata z internetových učebních materiálů předmětu BKEZ. Kompletní schématická zapojení všech dílčích částí návrhu obou variant jsou dostupná v příloze této práce na obrázcích A.6 a A.7 spolu s podrobnými obrázky sestrojených prototypů A.3a a A.3b. Pro přehlednost jsou prototypy zobrazeny také v následující podkapitole.

### 2.7.1 Zhotovené prototypy v1.0 a v2.0

Zhotovené prototypy lze vidět na obrázku 2.16 a 2.17. Pro podrobnější testování, které je součástí této práce, byl vybrán pouze prototyp v2.0. Dílčí testy zhotovených prototypů v2.0 jsou obsahem následujících kapitol.



Obr. 2.16: Zhotovený prototyp v1.0 a)čelní pohled b)boční pohled.



Obr. 2.17: Zhotovený prototyp v2.0 a)čelní pohled b)boční pohled.

## 2.7.2 Cenová kalkulace sestrojeného prototypu v2.0

Pro sestrojený prototyp v2.0 byla sestavena také celková cenová kalkulace, kterou lze vidět na obrázku 2.18. Výrazně nejdražší položkou celého návrhu byl jednoznačně komunikační modul LX200V30. Dalšími výraznými položkami jsou pak také spínaný DC/DC měnič TSR 1-2433, konektor RJ-45 s pouzdem obsahující oddělovací transformátory a také dvojnásobná zásuvka Swing společnosti ABB. Samotná výroba DPS v zahraničí vycházela cenově velice příznivě a zpracování desek bylo na velice dobré úrovni.

Celková cena za komponenty na výrobu jednoho kusu integrovaného modulu byla přibližně 1500 Kč. Důležité je ovšem podotknout, že do ceny za jednotlivé položky nebyla zahrnuta cena dopravy, která se v závislosti na rychlosti dodání velmi výrazně lišila.

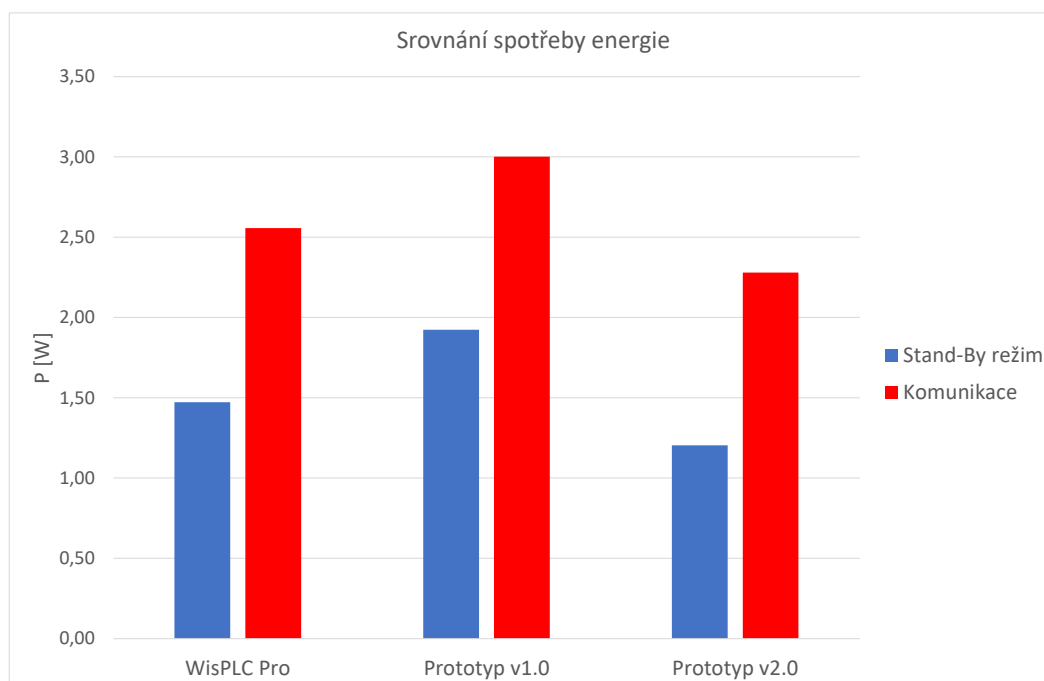
Seznam součástek pro 2 kusy: PLC modul verze 2.0						
Označení:	Typ:	Název:	Dodavatel:	Kusů:	Kč/Kus:	Cena:
ZDROJ	ZDROJ	Modul 230V/12V 5W	Arduino	2	123,24 Kč	246,48 Kč
S1	PŘEPÍNAČ	2-pólový	GME	2	7,90 Kč	15,80 Kč
HMATNÍK	HMATNÍK	Hmatník zipy	GME	2	5,90 Kč	11,80 Kč
F1	POJISTKA	FSFF 1A SMD 1206	GME	2	20,00 Kč	40,00 Kč
CN1	SVORKOV.	Svorkovnice DPS ARK300V-2P	GME	2	3,90 Kč	7,80 Kč
/	KONEKTOR	RJ-45	Farnell	2	85,00 Kč	170,00 Kč
R3, R4	REZISTOR	75R, 0603	GME	4	1,20 Kč	4,80 Kč
TR2	TRANSFOR.	PLC transformator	RAK	2	28,00 Kč	56,00 Kč
C1, C2	KONDENZ.	0,1uF 50V keramický, 0603	GME	4	2,50 Kč	10,00 Kč
U1	DC/DC	TSR 1-2433	Farnell	2	177,00 Kč	354,00 Kč
L1	TLUMIVKA	5,6uH/3.5A	Farnell	2	15,00 Kč	30,00 Kč
C3, C4	KONDENZ.	10uF 50V keramický, 1210	GME	4	12,00 Kč	48,00 Kč
LED1	LED DIODA	3mm zelená, 40mcd	GME	6	2,90 Kč	17,40 Kč
R1	REZISTOR	56R, 0603	GME	2	2,90 Kč	5,80 Kč
S2	PŘEPÍNAČ	1-pólový	GME	2	12,00 Kč	24,00 Kč
R2	REZISTOR	100R, 0603	GME	2	2,90 Kč	5,80 Kč
D1	DIODA TVS	ESD obousměrná	Farnell	2	10,00 Kč	20,00 Kč
C5, C6	KONDENZ.	1nF 500V, keramický, 1206	GME	4	3,20 Kč	12,80 Kč
C7	KONDENZ.	330pF 50V, keramický, 0805	GME	2	2,50 Kč	5,00 Kč
R5, R6	REZISTOR	4R7, 1206	GME	4	3,50 Kč	14,00 Kč
L2, L3	TLUMIVKA	BLM21AG121SN1D, 0805	GME	4	4,50 Kč	18,00 Kč
J1	KONEKTOR	Dutinková lišta BTK120 2mm	GME	4	8,40 Kč	33,60 Kč
	ZÁSUVKA	Dvojnásobná zásuvka Swing	DEK	2	89,00 Kč	178,00 Kč
	K. MODUL	LX200V30	RAK	2	800,00 Kč	1 600,00 Kč
	DPS	DPS dvouvrstvá	JLCPCB	2	37,30 Kč	74,60 Kč
					<b>Celkem:</b>	<b>3 003,68 Kč</b>

Obr. 2.18: Soupis součástek pro 2 kusy integrovaného PLC modulu verze 2.0

### 2.7.3 Porovnání energetické spotřeby sestrojených prototypů

Na obrázku 2.19 lze vidět graf srovnání energetické spotřeby sestrojených prototypů a také původního vývojové kitu. Měření probíhalo ve dvou rozdílných scénářích. Prvních z nich byl Stand-By režim, kdy byly zařízení připojeny do elektrické sítě, ale na žádné z linek (PLC, ETH) neprobíhala komunikace. Jedinou možnou komunikací mohla být vzájemná výměna režijních zpráv o stavu linky a připojených zařízeních. Druhý scénář simuloval maximální vytížení BPL modemů. Pomocí testovacího softwaru iPerf byla nastavena komunikace mezi stanicemi s maximální možnou šířkou frekvenčního pásma po dobu 10 minut. U obou scénářů byly výsledné hodnoty spotřeby energie odečítány až ve chvíli, kdy byly modemy v ustáleném stavu a zamezilo se tak zkreslení výsledků vlivem proudových špiček při nabíhání modemů a podobným přechodným stavům.

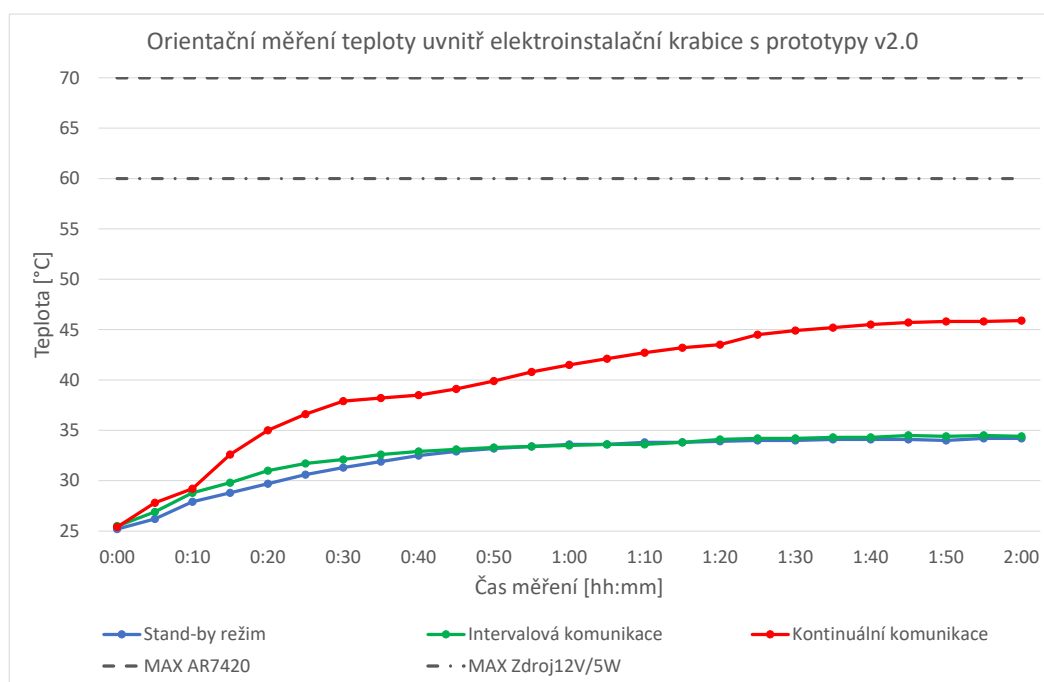
Vývojový kit WisPLC Pro vykazoval spotřebu ve Stand-By režimu 1,47 W a během komunikace pak 2,55 W. Prototyp v1.0 dosáhl nejvyšší spotřeby ze všech tří testovaných zařízení, konkrétně 1,92 W ve Stand-By a 3 W během probíhající komunikace. Vyšší spotřeba byla způsobena především použitím lineárních regulátorů napětí s nízkou účinností. Nejlepších výsledků ze všech testovaných modemů dosáhl prototyp v2.0 se spínaným DC/DC měničem, který během Stand-By režimu spotřeboval 1,21 W a se spuštěnou komunikací 2,28 W, což je o 24 % menší spotřeba energie během komunikace než v případě prototypu v1.0.



Obr. 2.19: Porovnání spotřeby energie jednotlivých BPL modemů.

## 2.7.4 Orientační měření teploty s instalovanými prototypy v2.0

V rámci testování sestrojeného prototypu v2.0 bylo realizováno také orientační měření teploty uvnitř elektroinstalační krabice. Pro zjednodušení měření byl modul instalován do elektroinstalační krabice, která nebyla umístěna přímo ve zdi. Po instalaci prototypu byla celá krabice utěsněna a dovnitř krabice byla umístěna teplotní sonda. K měření byl využit digitální teploměr Huttermann HT-02C s deklarovanou přesností 1 °C a rozsahem teplot -50 °C až 110 °C. Měření teploty probíhalo ve třech odlišných scénářích po dobu dvou hodin a jejich výsledek lze vidět na obrázku 2.20.



Obr. 2.20: Orientační měření teploty ve třech scénářích.

Prvním z nich je Stand-By režim, který simuluje zapnutý modul bez probíhající komunikace. V tomto režimu byly naměřené teploty nejnižší a maximální naměřená teplota byla 34,2 °C. Dalším scénářem byla intervalová komunikace. Tento scénář simuluje komunikaci v rámci Smart Grids a Smart Cities představující řízení, ovládnání nebo odečty stanovených veličin. Každých 5 minut probíhala desetivteřinová komunikace mezi koncovými zařízeními. Průběh narůstající teploty uvnitř elektroinstalační krabice byl srovnatelný s režimem Stand-by a nejvyšší naměřená hodnota byla 34,4 °C. Posledním scénářem byla kontinuální komunikace mezi koncovými zařízeními po dobu dvou hodin. Tento scénář simuloval využití BPL modemu pro stálou komunikaci, jako je například připojení k internetu a zprostředkování multimediálního obsahu. Nárůst teploty byl zřetelně vyšší než v předchozích případech a maximální naměřená teplota byla 45,9 °C.

Pro přehlednost jsou v grafu zobrazeny také maximální provozní teploty prostředí deklarované výrobcem modulu zdroje a komunikačního modulu LX200V30 s integrovaným chipsetem AR7420. Je důležité zmínit, že teploty uvnitř elektroinstalačních krabic s instalovanými prototypy v2.0 se budou lišit v závislosti na velikosti prostoru v krabici, použitém konstrukčním materiálu a dalších aspektech.

## 2.8 Konfigurační software AVitar

Pro konfiguraci komunikačního modulu LX200V30 poskytuje výrobce volně dostupný software AVitar. Software je založen na open source knihovnách Qualcomm Atheros Powerline Toolkit, které společnost Qualcomm poskytla v podobě databáze na stránkách github [26]. Na základě těchto knihoven funkcí lze vytvořit libovolný konfigurační nástroj nebo v operačním systému Linux nainstalovat a otevřít celý balík funkcí, které pak lze libovolně volat z příkazové řádky terminálu. Tato část popisuje jednotlivé možnosti konfigurace v programu AVitar.

Na obrázku 2.21 můžeme vidět konfigurační rozhraní a následně v bodě číslo jedna můžeme vidět použitý integrovaný obvod firmy Qualcomm. V tomto případě konkrétně QCA7420. V rozbalovacím okně Device Selection můžeme vybrat lokálně připojený modem nebo jiný modem v rámci jedné virtuální sítě (AVLN), který chceme konfigurovat. Jednotlivé modemy jsou definované fyzickou (MAC) adresou. Rozbalovací lišta níže pak umožňuje zvolit požadované síťové rozhraní, ke kterému je modem připojen. Poslední důležitým údajem je verze firmwaru, který je uveden vedle adresy vybraného modemu.

Bod číslo dvě zobrazuje možnosti PIB Open, Save, Read a Write. PIB Open umožňuje otevřít předdefinovaný konfigurační soubor, který je vhodný zejména při nastavování většího množství zařízení najednou. Pro nahrání konfiguračního souboru slouží PIB Save. PIB Read slouží k načtení aktuální konfigurace příslušného modemu. Při změně modemu v sekci Device Selection je nutné provést načtení konfigurace znovu. Tlačítkem PIB Write je potřeba potvrdit jakoukoliv změnu, která je provedena během konfigurace zařízení v rámci softwaru AVitar.

Bod číslo tři zahrnuje možnost nahrání nového firmwaru pomocí tlačítka Load Firmware, možnost vrátit zařízení do továrního nastavení a také softwarový restart zařízení, který je vhodný zejména tehdy, kdy je zapotřebí provést restart na vzdáleném zařízení. V sekci Device Personalization, která je zahrnuta v bodě čtyři a pět, je možnost nastavit v poli User HFID pojmenování modemu a dále také změnit MAC adresu zařízení a heslo sítě do které má zařízení patřit.

Poslední bod zobrazuje další záložky, ve kterých je možno nastavit nespočet dalších parametrů. Pro přehled je níže uveden stručný popis několika důležitých záložek.

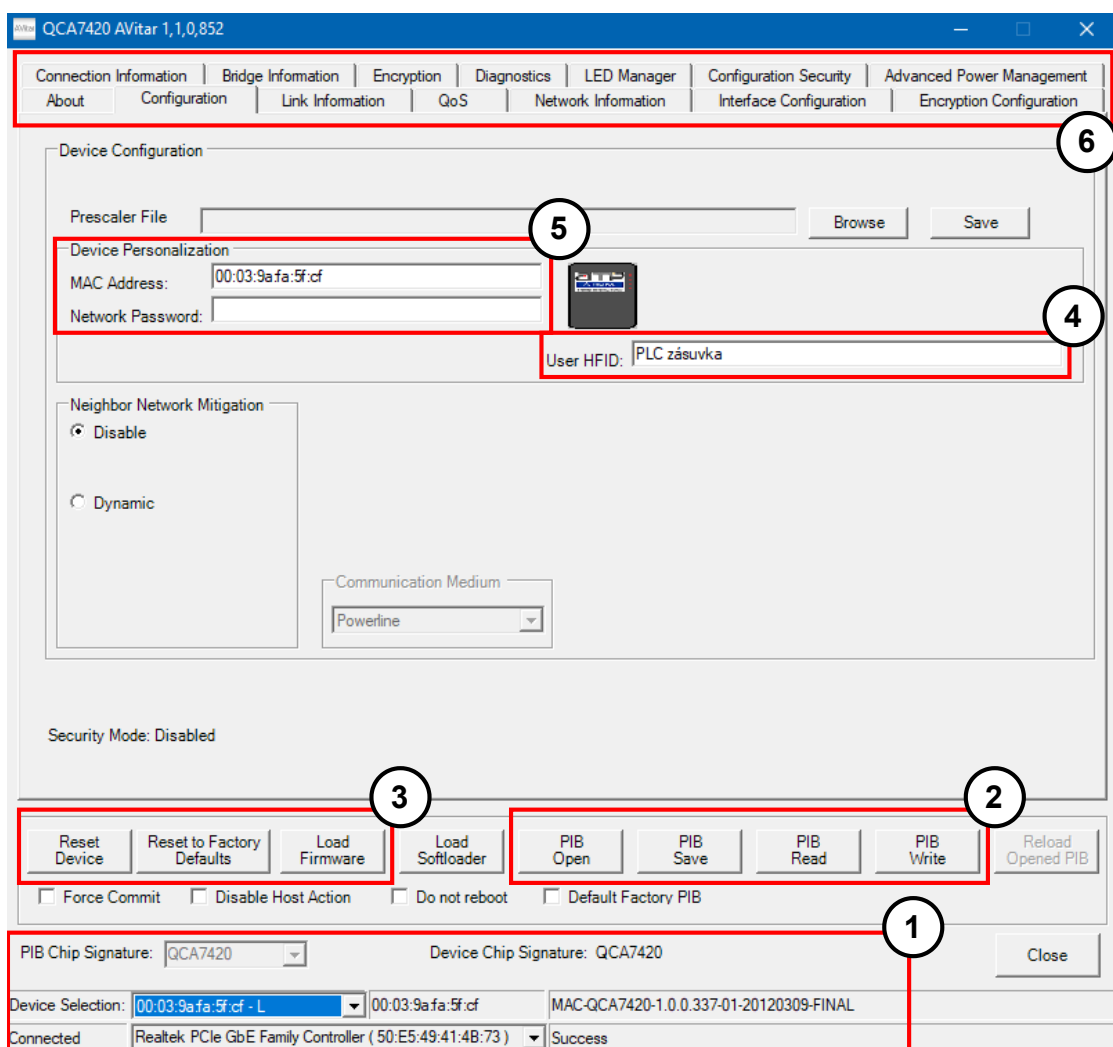
**Link Information** - zobrazení statistik mezi zdrojovým modemem a jiným libovolným modemem v rámci jedné virtuální sítě. Zobrazuje také dostupné ethernetové rozhraní na zdrojovém a cílovém modemem.

**Network Information** - přehledné zobrazení celé topologie virtuální sítě. Informace o centrálním modemem sítě a připojených staticích. Možnost nastavení identifikačního čísla sítě (Network ID, NID), identifikačního čísla podsítě (Sub-Network ID, SNID) a čísla terminálu (Terminal Equipment Identifier, TEI).

**Diagnostics** - vytvoření souboru s aktuální konfigurací ve formátu xlog.

**Encryption** - možnost nastavení hesla virtuální sítě na lokálním modemem nebo vzdáleném modemem s použitím vhodného klíče DAK příslušného modemem.

**Bridge Information** - přehled MAC adres zařízení, které jsou připojeny ke konkrétnímu síťovému mostu (PLC modemem).



Obr. 2.21: Konfigurační rozhraní AVitar

## 2.9 Základní ověření komunikace

Pro účely této práce byla realizována také sada měření na vývojové desce WisPLC-Pro pro ověření parametrů udávaných výrobcem. Výsledky těchto měření budou následně použity jako srovnání mezi vývojovou sadou WisPLC-Pro a deskou navrženou v rámci této práce.

Pro měření byl využit nástroj Iperf3 dostupný pro Windows, Linux, Android, OpenBSD a další platformy. Testování je založeno na principu komunikace klient-server. Jedno zařízení se tedy nastaví do režimu server, který naslouchá na příslušném portu použitého protokolu a další zařízení pak do režimu klient.

Výhodou tohoto nástroje je široká škála možností nastavení režimů klient i server. Komunikaci je možno zachytávat přímo do konzole příkazového řádku nebo do externího souboru. Příklad základního nastavení:

```
server --> C:\iperf>iperf3.exe -s
client --> C:\iperf>iperf3.exe -c 192.168.10.100 -t60
```

Obrázek 2.22 zobrazuje výsledky komunikace pro zapojení na vzdálenost nepřesahující 1 m pomocí dvoužilového kabelu bez síťového napětí z pohledu serveru. Nejprve server naslouchá na portu 5201 (TCP), následuje potvrzení komunikace směřující na server ze strany klienta, který vysílá ze své IP adresy a portu 4998, následuje komunikace s intervalem zadaným klientem (10 s) a na závěr je zobrazena statistika komunikace s celkovým množstvím přenesených dat a průměrnou propustností linky.

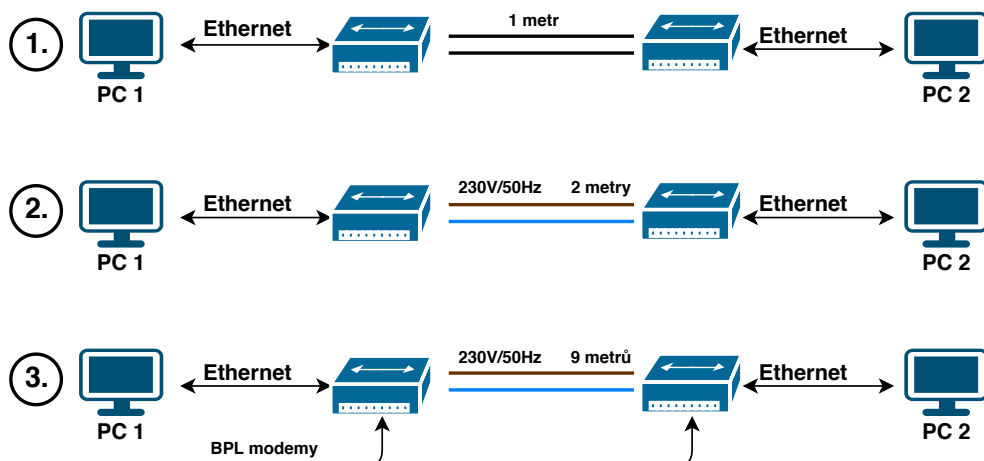
```
C:\Users\minig\Desktop\iperf>iperf3.exe -s
-----
Server listening on 5201
-----
Accepted connection from 192.168.10.100, port 49988
[ 5] local 192.168.10.102 port 5201 connected to 192.168.10.100 port 49989
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 5]  0.00-1.00      sec    10.2 MBytes  85.8 Mbits/sec
[ 5]  1.00-2.00      sec    10.7 MBytes  89.9 Mbits/sec
[ 5]  2.00-3.00      sec    11.1 MBytes  93.3 Mbits/sec
[ 5]  3.00-4.00      sec    11.0 MBytes  92.6 Mbits/sec
[ 5]  4.00-5.00      sec    11.1 MBytes  93.4 Mbits/sec
[ 5]  5.00-6.00      sec    11.3 MBytes  94.6 Mbits/sec
[ 5]  6.00-7.00      sec    11.2 MBytes  93.6 Mbits/sec
[ 5]  7.00-8.00      sec    11.2 MBytes  94.0 Mbits/sec
[ 5]  8.00-9.00      sec    11.0 MBytes  92.4 Mbits/sec
[ 5]  9.00-10.00     sec    11.3 MBytes  94.7 Mbits/sec
[ 5] 10.00-10.06     sec     727 KBytes  92.4 Mbits/sec
-----
[ ID] Interval           Transfer     Bandwidth
[ 5]  0.00-10.06     sec     0.00 Bytes  0.00 bits/sec      sender
[ 5]  0.00-10.06     sec    111 MBytes  92.4 Mbits/sec      receiver
```

Obr. 2.22: Výsledky měření v programu Iperf3.

Tabulka 2.3 zobrazuje sadu tří vzorových měření realizovaných na vývojových deskách WisPLC-Pro s intervalem 60 s. Pro přehlednost je na obrázku 2.23 uvedeno také schématické zapojení. Prvním z nich je přímé propojení pomocí dvoužilového kabelu bez síťového napětí s délkou propoje 1 m, kde průměrná propustnost dosáhla 93,4 Mbit/s, což je téměř maximální možná propustnost standardu 100BASE-TX, který je implementován v rámci použitého integrovaného obvodu AR7420. V druhém měření jsou obě zařízení připojena na síťové napětí 230 V/50 Hz s délkou propoje menší než 2 metry. Pokles propustnosti byl způsoben především rušením vyskytujícím se na přenosovém médiu. Třetí měření ukazuje propojení skrze elektroinstalaci mezi dvěma místnostmi, kde byl další pokles propustnosti způsoben větší vzdáleností mezi zařízeními. Znatelný pokles přenosové rychlosti ve dvou posledních měřeních byl způsoben především velkým množstvím rušení, odboček a impedancí, které byly do obvodu mezi komunikující modemy zařazeny záměrně.

Tab. 2.3: Praktická měření pro ověření komunikace.

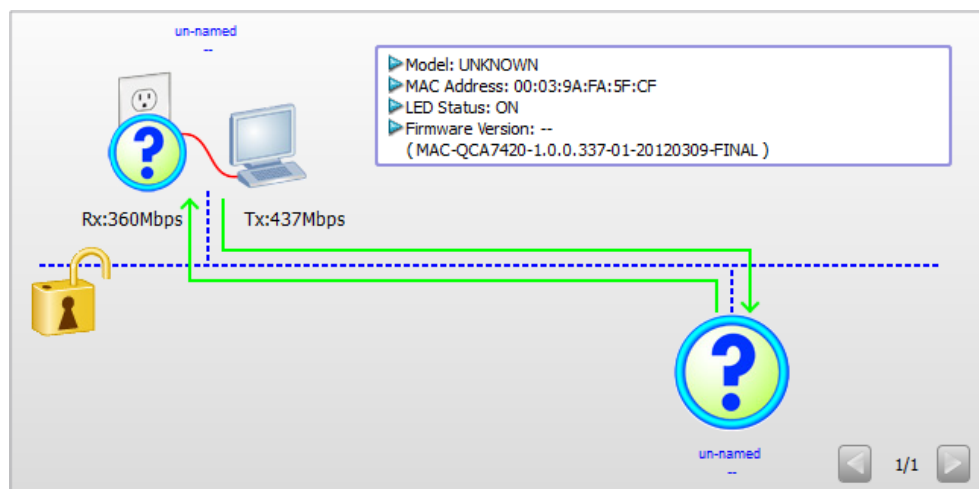
Měření	Protokol	Přenesená data [MB]	Průměrná propustnost [Mbit/s]
1	TCP	668	93,4
2	TCP	534	78,2
3	TCP	365	54,6



Obr. 2.23: Schéma zapojení jednotlivých měření.

Rychlost na fyzické vrstvě můžeme zobrazit například pomocí programu Netgear-Powerline, který byl navržen pro zařízení využívající AR7420. Maximální dosažená propustnost byla 437 Mbit/s jak ukazuje obrázek 2.24. Maximální uváděná rychlost na fyzické vrstvě je 500 Mbit/s s využitím kmitočtového pásma 2-68 MHz. Tato

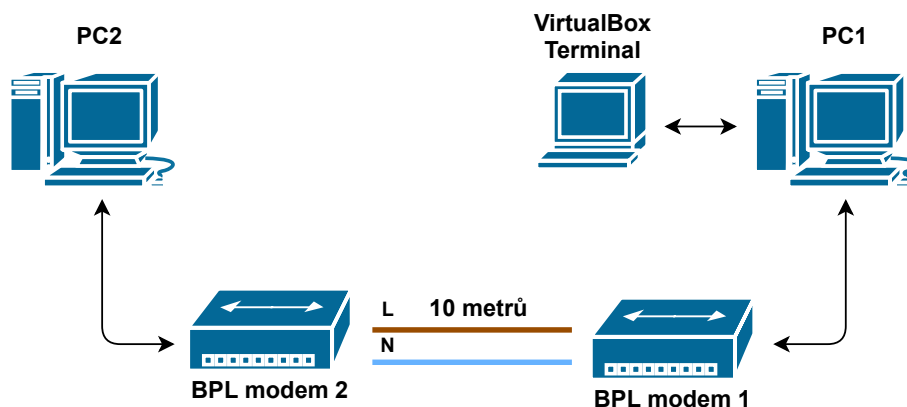
rychlost byla naměřena ve scénáři přímého propojení vývojových kitů na vzdálenost menší než jeden metr bez síťového napětí. Tento scénář simuloval ideální podmínky pro přenos. V reálných podmínkách by byla rychlost na fyzické vrstvě výrazně nižší.



Obr. 2.24: Přenosové rychlosti na fyzické vrstvě.

## 2.10 Testování komunikace sestrojeného prototypu v2.0

Pro závěrečné testování sestrojeného prototypu v2.0 byla navržena jednotná topologie, kterou lze vidět na obrázku 2.25.

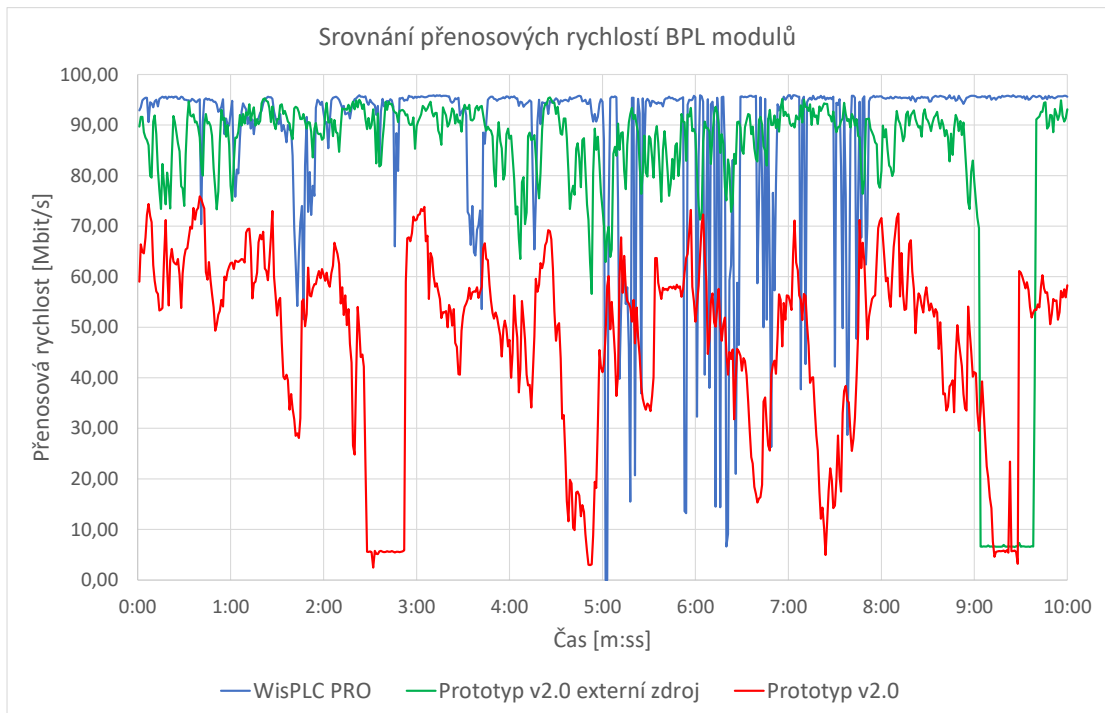


Obr. 2.25: Schéma zapojení topologie pro testování prototypu v2.0.

Topologii tvoří dvě koncové stanice (PC1, PC2), BPL modemy, z nichž modem 1 představuje vývojový kit a modem 2 představuje jeden z testovaných modemů. Na koncové stanici PC1 byl spuštěn také virtuální počítač s operačním systémem linux, který slouží pro zprovoznění otevřeného nástroje Qualcomm Atheros Powerline Toolkit. Vzdálenost mezi modemy činí 10 metrů na společné zásuvkové liště.

## 2.10.1 Porovnání přenosových rychlostí na aplikační vrstvě

Pro testování přenosové rychlosti na aplikační vrstvě byl využit program Iperf, stejně jako v předchozím základním ověření komunikace. Bylo provedeno měření po dobu desíti minut s maximálním dostupným přenosovým pásmem. Samotná komunikace probíhala prostřednictvím protokolu UDP, který umožňuje v programu Iperf zaznamenávat hodnotu jitter, která bude popsána níže. Výsledný graf provedeného testu lze vidět na obrázku 2.26.



Obr. 2.26: Porovnání přenosových rychlostí na aplikační vrstvě.

Nejprve byla testována komunikace mezi vývojovými kity WisPLC PRO. V měření dosahovaly vývojové kity největší průměrné přenosové rychlosti 88,96 Mbit/s. V průběhu testování se vyskytly krátkodobé poklesy přenosové rychlosti, které mohly být způsobeny impulsním, či jiným rušením na elektrické síti.

Následně bylo realizováno měření mezi vývojovým kitem a prototypem v2.0. Přenosové rychlosti dosahovaly v průměru 47,28 Mbit/s s občasnými krátkodobými výpadky. Pravděpodobnou hlavní příčinou tohoto poklesu přenosové rychlosti byl modul spínaného zdroje, který slouží k napájení prototypu v2.0. Z tohoto důvodu bylo provedeno také měření s prototypem v2.0 s odpojeným modulem zdroje a využitím externího zdroje napětí 12 V<sub>DC</sub>, které zobrazuje zelený průběh. Měření prokázalo, že hlavním zdrojem rušení, a s tím spojený pokles přenosové rychlosti, je

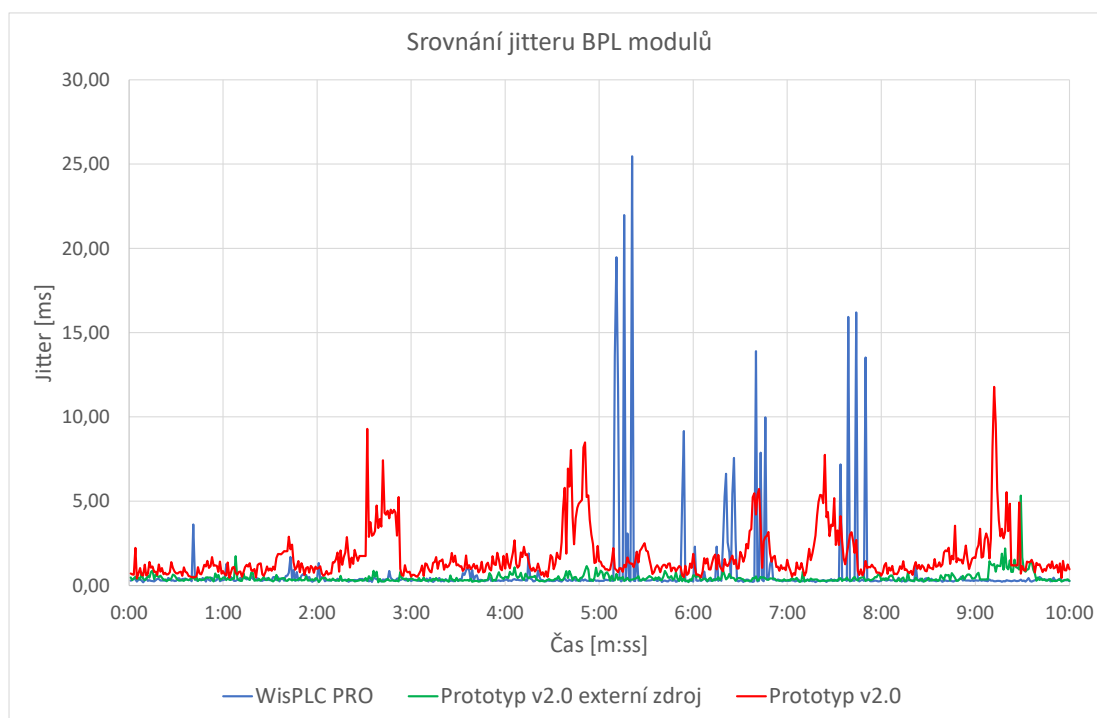
způsobem použitým spínaným zdrojem. S externím zdrojem dosahovaly přenosové rychlosti prototypu v2.0 v průměru 82,95 Mbit/s.

Následující měření, které byly provedeny v rámci této části, zahrnují srovnání stejných scénářů. Konkrétně tedy komunikaci WisPLC PRO-WisPLC PRO, WisPLC PRO-Prototyp v2.0 s externím zdrojem, WisPLC PRO-Prototyp v2.0.

### Srovnání jitteru testovaných modemů

Parametr jitter udává kolísání zpoždění mezi jednotlivými pakety. Čím větší je hodnota jitter, tím menší je také stabilita přenosu z pohledu zpoždění. U testovaných modemů v rámci stanovené topologie se průměrné zpoždění pohybovalo od jednotek ms až po desítky ms. Na obrázku 2.27 lze vidět krátkodobé prudké zvýšení hodnot jitteru, které přesně koresponduje s poklesy přenosových rychlostí vyobrazených na obrázku 2.26.

Tyto krátkodobé strmé špičky jsou způsobeny změnou přenosové rychlosti, respektive změnou modulačních schémat, která se mění v závislosti na kvalitě přenosového kanálu. Integrovaný obvod AR7420 na základě parametrů přenosového kanálu, které budou popsány níže, adaptivně mění modulační techniky pro zajištění co nejvyšší kvality a stability přenosu.



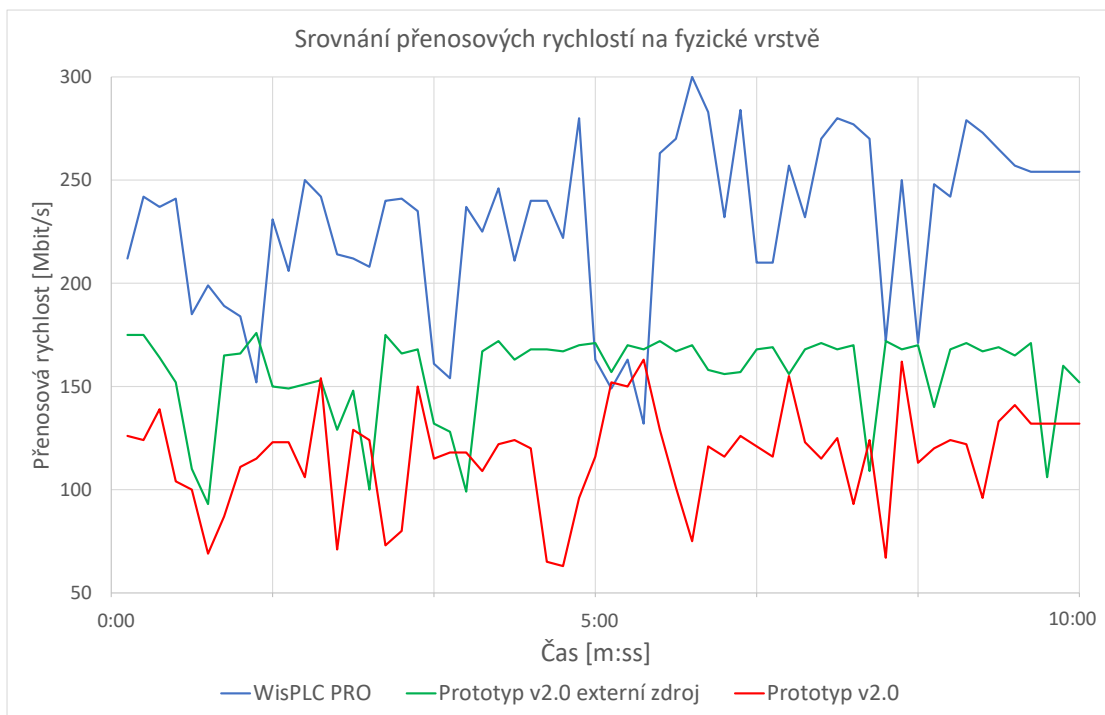
Obr. 2.27: Výsledky měření parametru jitter testovaných modemů.

## 2.10.2 Porovnání přenosových rychlostí na fyzické vrstvě

Pro měření parametrů na fyzické vrstvě byl využit otevřený nástroj Qualcomm Atheros Powerline Toolkit, který obsahuje soubor funkcí, pomocí nichž lze získat potřebné informace o použitém integrovaném obvodu a parametrech přenosu na úrovni fyzické vrstvy.

Na obrázku 2.28 lze vidět průběh přenosových rychlostí na fyzické vrstvě testovaných BPL modemů. Měření probíhalo totožně jako v případě měření rychlosti aplikační vrstvy. Doba trvání měření byla deset minut a každých 30s byla zapisována data s aktuální rychlostí. Největší přenosové rychlosti byly naměřeny mezi vývojovými kity v průměru 229,23 Mbit/s, následně u prototypu v2.0 s externím zdrojem v průměru 156,71 Mbit/s a nejmenší přenosová rychlost pak na prototypu v2.0 v průměru 116,41 Mbit/s.

Na základě tohoto měření bylo zjištěno, že dalším možným zdrojem rušení souvisejícím s prototypem v2.0 může být použitý DC/DC měnič TSR 1-2433. Jedná se o spínaný prvek, který obsahuje ve svém vnitřním zapojení výstupní filtr, avšak jeho použití pravděpodobně vyžaduje dodatečnou filtraci.

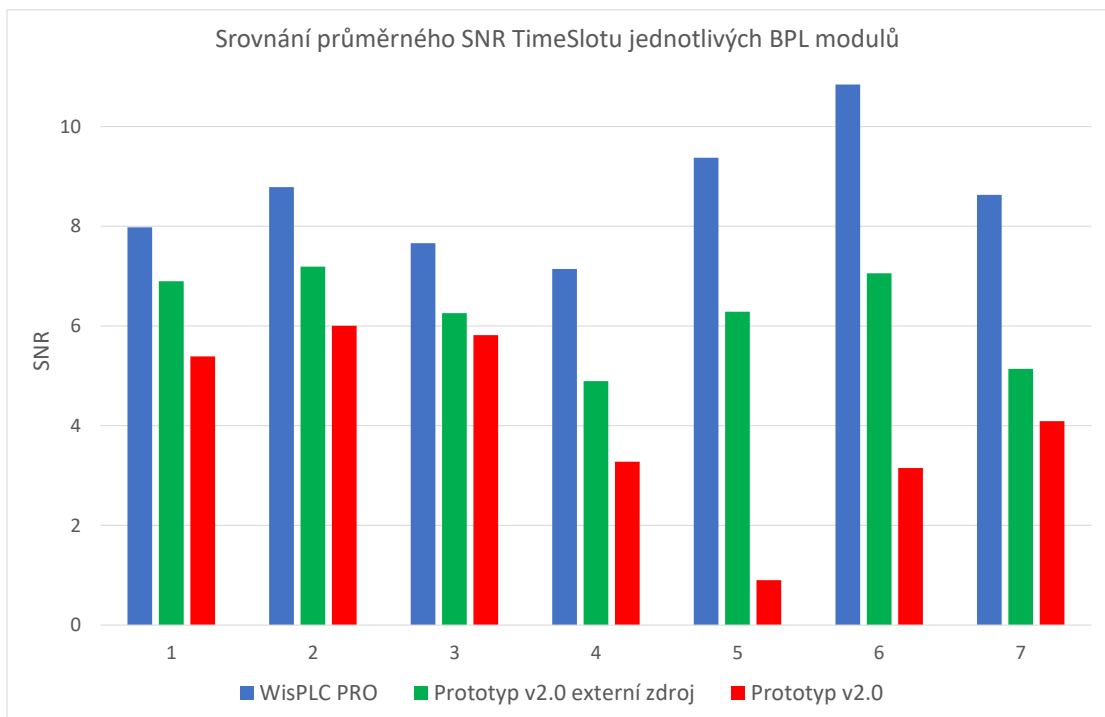


Obr. 2.28: Porovnání přenosových rychlostí na fyzické vrstvě.

## Porovnání hodnot SNR testovaných modemů

Další užitečnou funkcí otevřeného nástroje Powerline Toolkit je možnost zjištění hodnoty SNR. SNR (Signal-to-noise ration) neboli odstup signálu od šumu vyjadřuje podíl mezi užitečným signálem a okolním šumem a stanovuje tak kvalitu přenosového kanálu.

Na obrázku 2.29 lze vidět hodnotu SNR jednotlivých time slotů testovaných BPL modemů. Jelikož nástroj Powerline Toolkit nezobrazuje u tohoto parametru jednotky, lze výsledné hodnoty chápat jako poměr užitečného signálu k okolnímu šumu. Čím větší je hodnota parametru SNR tím lepší je i kvalita přenosového kanálu. Obecně platí, že se snižující se hodnotou SNR se mění i použitá modulační schémata a jsou nasazovány robustnější modulační techniky pro zajištění stabilního přenosu. Získané hodnoty SNR korespondují s předchozími měřeními a jen potvrzují jejich výsledky.

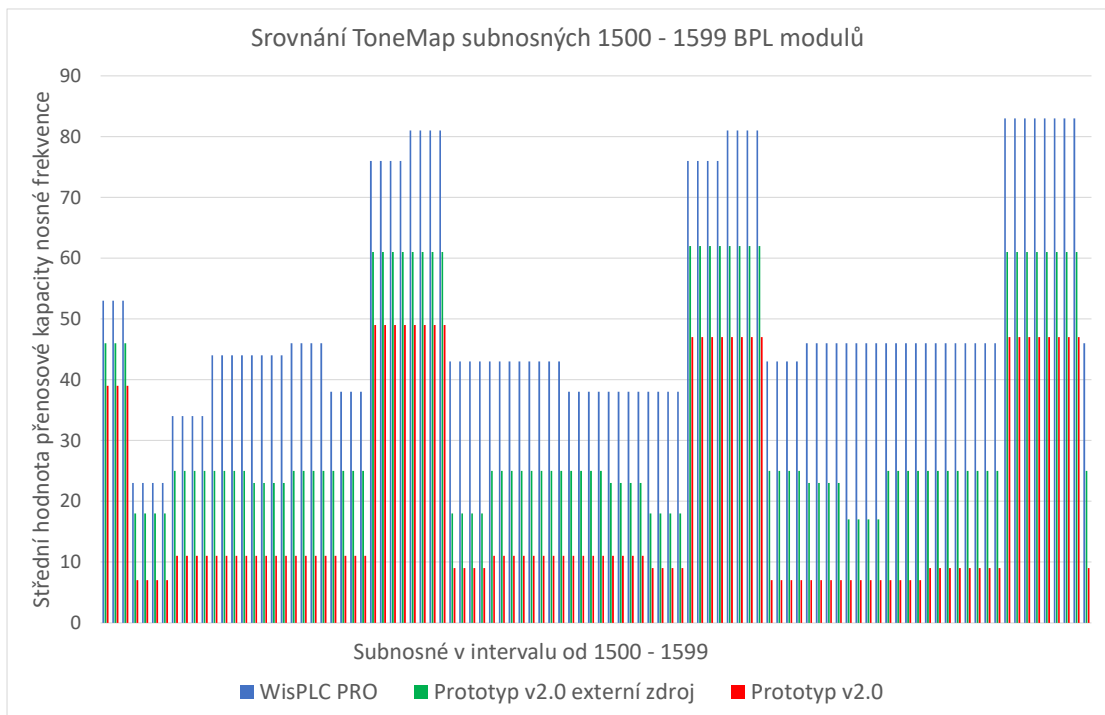


Obr. 2.29: Porovnání hodnot SNR testovaných modemů.

## Porovnání ToneMap testovaných modemů

Posledním z použitých nástrojů v rámci tohoto testování je funkce zobrazení Tone-Mapy. Jedná se o histogram středních hodnot timeslotu pro jednotlivé nosné. Hlavní výhodou této funkce je vizuální znázornění rušivých signálů v kmitočtovém pásmu, které se projevují jako strmé poklesy střední hodnoty daných subnosných frekvencí. Čím větší je střední hodnota kapacity nosné frekvence, tím větší je přenosová kapacita (množství přenesených dat) dané nosné a naopak.

Použitý integrovaný obvod AR7420 využívá kmitočtové pásmo 2-68 MHz, které je rozděleno až na 2700 subnosných. Pro přehlednější zobrazení výsledků, které lze vidět na obrázku 2.30, byly vybrány subnosné v intervalu 1500-1599.



Obr. 2.30: ToneMapy vybraných subnosných frekvencí.

## 3 Závěr

Cílem této semestrální práce byl návrh řešení PLC/BPL komunikace a vytvoření desky plošného spoje PLC modulu integrovatelného do zásuvkové krabice. Dílčími úkoly byly průzkum dostupných integrovaných obvodů, rozbor problematiky elektroinstalačních krabic, zásuvkových řešení a ověření komunikace mezi sestrojenými moduly.

V teoretické části byl nejdříve rozebrán princip PLC komunikace, přičemž byl kladen důraz především na širokopásmovou technologii, u níž byly popsány použité modulace, standardy, přenosové rychlosti, frekvenční pásma a další parametry. Podrobně byla popsána rodina standardu HomePlug, konkrétně HomePlug AV, na kterém byl postaven výsledný návrh. Nedílnou součástí byl také detailní popis parazitních jevů ovlivňujících parametry PLC přenosu.

Praktická část nejprve popisuje vlastní rozbor dostupných řešení širokopásmových PLC integrovaných obvodů, přičemž je popsáno celkem pět různých variant napříč standardy. Na základě tohoto rozboru byl vybrán chipset AR7420 osazený na komunikačním modulu LX200V30, který je součástí vývojové desky WisPLC-Pro. Následně jsou popsány typy nejběžněji dostupných a používaných elektroinstalačních krabic a zásuvek, včetně použitých materiálů a norem, které musí splňovat. Pro možné nasazení navrhovaného zařízení byly vybrány krabice s hloubkou větší než 43 mm a vnější šířkou nejméně 72 mm s možností instalace pod omítku i na stěnu a zásuvky zasahující svou svorkovnicí maximálně 23 mm vně elektroinstalační krabice. Sestrojené prototypy integrovaných BPL modemů byly řešeny jako All in One zařízení pevně spojené se svorkovnicí zásuvky. Třetí část se věnuje samotnému návrhu desky plošného spoje, který byl realizován v programu Eagle. Jsou zde podrobně rozebrány dílčí části desky plošného spoje a jejich postupný vývoj, včetně zdůvodnění výběru jednotlivých komponentů. Tato část obsahuje také porovnání energetické spotřeby, přičemž výsledný integrovaný modul v2.0 vykazoval v porovnání s prvotním návrhem o 24 % menší spotřebu elektrické energie. Spotřeba prototypu v2.0 činila 2,28 W během probíhající komunikace. Celkové náklady na výrobu jednoho kusu byly vyčísleny na 1500 Kč. Do těchto nákladů však nejsou počítány náklady na dopravu.

Na závěr je realizováno základní ověření komunikace s využitím nástrojů Iperf, Netgear-Powerline a Powerline Toolkit. Dosažené výsledky vývojových kitů odpovídají hodnotám uváděných výrobcem. Realizovaný prototyp v2.0 vykazoval při měření propustnosti a dalších parametrů na aplikační i fyzické vrstvě horší výsledky než testované kity, avšak minimální požadovaná přenosová rychlost 1 Mbit/s byla splněna s dostatečnou rezervou přenosové kapacity. Hlavním důvodem zhoršení přenosových vlastností sestrojeného prototypu v2.0 byl především použitý spínaný zdroj

a spínaný DC/DC měnič. Vhodným odfiltrováním těchto komponent bude dosaženo výsledků srovnatelných s vývojovými kity WisPLC-Pro.

Návrh vhodných filtrů je dalším možným krokem v rámci vývoje těchto integrovaných BPL modemů. Možností dalšího rozšíření je například také využití bezdrátového modulu ESP8266, na kterém je možné realizovat webový server se statistikami přenosu pro navržený BPL/PLC modul, možnost měření parametrů síťového napětí, jako jsou napětí a proud, nebo ovládání konkrétní zásuvky. Výsledky této práce byly publikovány v rámci studentské soutěže EEICT 2020.

# Literatura

- [1] FERREIRA, Hendrik. *Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines*. Chichester: John Wiley, 2010, xxvii, 507 s. : il. ISBN 978-0-470-74030-9.
- [2] KHAN, Fahad, Atiq Ur REHMAN, Muhammad ARIF, Muhammad AFTAB a Baber Khan JADOON. A survey of communication technologies for smart grid connectivity. In: *2016 International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube)* [online]. IEEE, 2016, s. 256-261 [cit. 2020-03-29]. DOI: 10.1109/ICECUBE.2016.7495234.
- [3] SVOBODA, Jaroslav *Využívání silnoproudých vedení a sítí pro přenos zpráv*. V Praze: Vydavatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05168-9.
- [4] Modem - opakovač pro úzkopásmovou komunikaci technologií PLC. *Diplomová práce* Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [online]. 2014 [cit. 05. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/33038/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>>
- [5] IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks. *Medium Access Control and Physical Layer Specifications* [online]. [cit. 05. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5678772>>
- [6] Techniques for Broadband Power Line Communications: Impulsive Noise Mitigation and Adaptive Modulation. *Dissertation* RMIT University. [online]. 2011 [cit. 25. 04. 2020]. Dostupné z URL: <<https://core.ac.uk/download/pdf/15621931.pdf>>
- [7] Analýza a modelování datové komunikace po silnoproudém vedení. *Dizertační práce* Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [online]. 2013 [cit. 25. 04. 2020]. Dostupné z URL: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=59107](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59107)>
- [8] Communication Performance of Broadband PLC Technologies for Smart Grid *Broadband PLC* [online]. [cit. 12. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5764448>>
- [9] Interference in a crowded RF spectrum *OFDM* [online]. [cit. 26. 04. 2020]. Dostupné z URL: <<https://www.eenewseurope.com/news/>>

interference-crowded-rf-spectrum-why-it-occurs-and-what-do-about-it/  
page/0/1>

- [10] SONG, PAN, WU, YANG, LIU, ZHAO, LI, X. *Field trial of digital video transmission over medium-voltage powerline with time-domain synchronous orthogonal frequency division multiplexing technology*. In Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Pisa, Italy. [online]. [cit. 27. 04. 2020]. Dostupné z URL: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4231651>>
- [11] Understanding Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Modulation *QPSK* [online]. [cit. 12. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/quadrature-phase-shift-keying-qpsk-modulation/>>
- [12] Učebnice teorie rádiové komunikace VUT *Vícestavové modulace M-QAM* [online]. [cit. 26. 04. 2020]. Dostupné z URL: <[http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?%C8%EDslicov%E9\\_modulace:V%EDcestavov%E9\\_modulace:M-QAM](http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTRK/?%C8%EDslicov%E9_modulace:V%EDcestavov%E9_modulace:M-QAM)>
- [13] 1901-2010 - IEEE Standard. *Medium Access Control and Physical Layer Specifications* [online]. [cit. 12. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://standards.ieee.org/standard/1901-2010.html>>
- [14] AFKHAMIE, KATAR, YONGE, NEWMAN, R. *An overview of the upcoming HomePlug AV standard*. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (ISPLC), Vancouver, BC, Canada, 6–8 April 2005.
- [15] YONGE, ABAD, AFKHAMIE, GUERRIERI, KATAR, LIOE, PAGANI, RIVA, SCHNEIDER, SCHWAGER, A. *An overview of the HomePlug AV2 technology*. J. Electr. Comput. Eng. 2013, 892628. [cit. 23. 05. 2020] Dostupné z URL: <<https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/892628/>>
- [16] dLAN Green PHY Module *Datasheet*. [cit. 23. 05. 2020] Dostupné z URL: <[https://smartcharging.in-tech.com/wp-content/uploads/2017/10/devolo\\_dlan\\_green\\_phy\\_module\\_data\\_sheet\\_1216.pdf](https://smartcharging.in-tech.com/wp-content/uploads/2017/10/devolo_dlan_green_phy_module_data_sheet_1216.pdf)>
- [17] BERGER, SCHWAGER, PAGANI and Daniel M. SCHNEIDER *MIMO Power Line Communications*. Vydavatelství CRC Press. ISBN 978-1-4665-5752-9.
- [18] NEWMAN, YONGE, GAVETTE, ANDERSON *HomePlug AV Security Mechanisms*. [online]. [cit. 06. 04. 2020]. Dostupné z URL: <[https://www.cise.ufl.edu/~nemo/papers/ISPLC2007\\_AV\\_Security.pdf](https://www.cise.ufl.edu/~nemo/papers/ISPLC2007_AV_Security.pdf)>

- [19] QCA7000 HomePlug Green PHY Single Chip Solution. *QCA7000* [online]. [cit. 05. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.codico.com/fxdata/codico/prod/media/Datenblaetter/AKT/QCA7000%20Product%20Brief.pdf>>
- [20] Broadband powerline communication SoC optimized for audio/video streaming and consumer applications *ST2100* [online]. [cit. 05. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/st2100.pdf>>
- [21] Powerline Networking SoC *BCM60321* [online]. [cit. 05. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.broadcom.com/products/broadband/xpon/bcm60321>>
- [22] Next-Generation HomePlug Device for Whole-Home Connectivity *BCM60500* [online]. [cit. 05. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.broadcom.com/products/broadband/xpon/bcm60500>>
- [23] Powerline Communications transceiver IC *AR7420* [online]. [cit. 05. 11. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.codico.com/fxdata/codico/prod/media/Datenblaetter/AKT/AR7420+AR1540%20Product%20Brief.pdf>>
- [24] Domovní elektroinstalační materiál *ABB Katalog 2018* [online]. [cit. 07. 12. 2019]. Dostupné z URL: <<https://www.vypinac-zasuvka.cz/katalogy/abb.pdf>>
- [25] Návrh plošných spojů v Autodesk Eagle verze 9.5 *BKEZ* Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. [online]. [cit. 29. 04. 2020]. Dostupné z URL: <<https://moodle.vutbr.cz/course/view.php?id=210655>>
- [26] Qualcomm Atheros Open Powerline Toolkit. *open-plc-utils* [online]. [cit. 29. 04. 2020]. Dostupné z URL: <<https://github.com/qca/open-plc-utils>>

## Seznam symbolů, veličin a zkratk

<b>AES</b>	Advanced Encryption Standard
<b>AFE</b>	Analog Front-End
<b>AMI</b>	Advanced Metering Infrastructure
<b>AVLN</b>	AV Logical Network
<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>BPL</b>	Broadband Power Line
<b>CSMA/CA</b>	Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>DAK</b>	Device Access Key
<b>DMT</b>	Discrete Multi-Tone
<b>DPS</b>	Deska Plošného Spoje
<b>HAN</b>	Home Area Network
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>NEK</b>	Network Encryption Key
<b>NMK</b>	Network Membership Key
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>PHY</b>	Physical Layer
<b>PLC</b>	Power Line Communication
<b>PSD</b>	Power Spectral Density
<b>PSK</b>	Phase-Shift Keying
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QOS</b>	Quality of Service
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-shift keying
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio
<b>SS</b>	Spread-Spectrum
<b>TDMA</b>	Time Division Multiple Access

# Seznam příloh

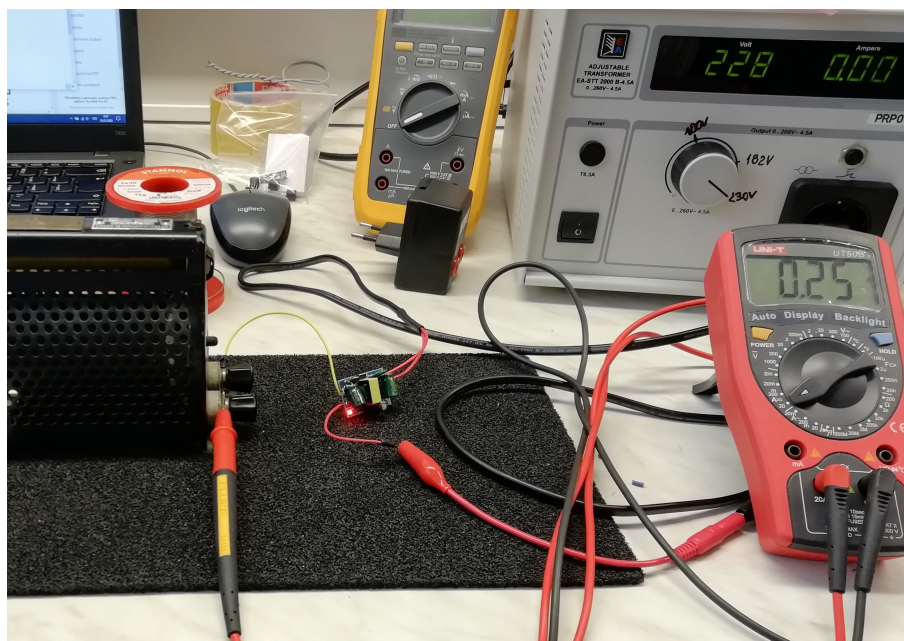
<b>A</b>	<b>Fotografie z průběhu vývoje BPL modemů</b>	<b>65</b>
A.1	Testování spínaného zdroje 12 V/5 W . . . . .	65
A.2	Sestrojené prototypy integrovaných BPL modemů . . . . .	66
A.2.1	Prototyp integrovaného BPL modemu v2.0 . . . . .	66
A.3	Schématické zapojení navržených prototypů . . . . .	67
<b>B</b>	<b>Zdrojové soubory programu Eagle v9.5.0</b>	<b>70</b>

# A Fotografie z průběhu vývoje BPL modemů

Příloha této diplomové práce obsahuje několik fotografií z průběhu vývoje integrovaného BPL modemu. Každá fotografie je doplněna krátkým informačním popisem.

## A.1 Testování spínaného zdroje 12 V/5 W

Obrázky A.1 a A.2 znázorňují testování zdroje s využitím laboratorního reostatu. Měření probíhalo v laboratoři firmy MEG A-Měřicí Energetické Aparáty, a.s.



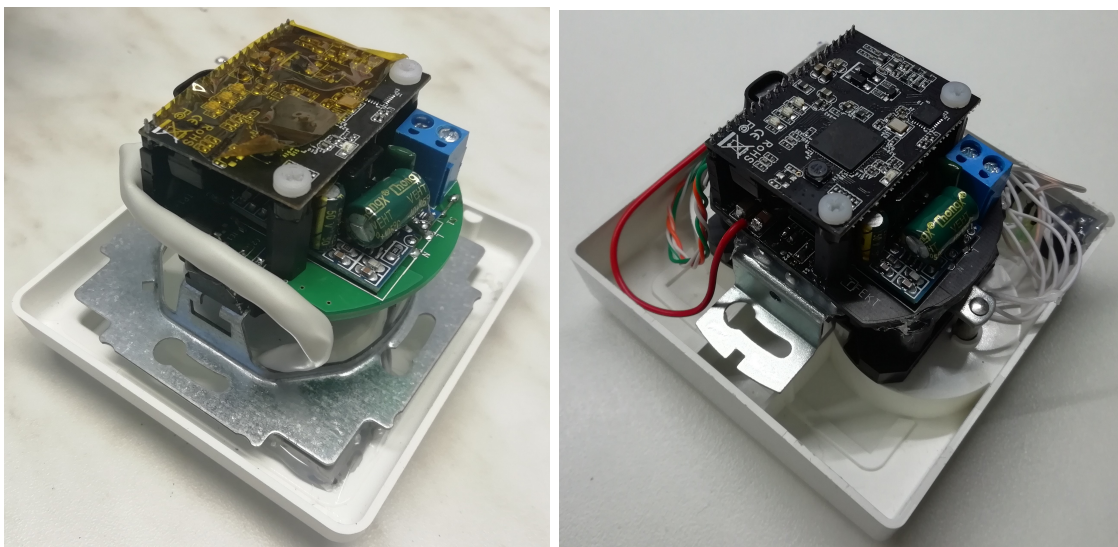
Obr. A.1: Testování modulu spínaného zdroje s variabilní zátěží.



Obr. A.2: Reostat Metra 87 Ω, 2 A.

## A.2 Sestrojené prototypy integrovaných BPL modemů

V rámci této práce byly sestrojeny dva typy integrovaného BPL modemu. Sestrojení prototypu verze 1.0, obrázek A.3a, prokázalo možnost integrace BPL modemu do elektroinstalační krabice. Jeho energetická spotřeba, rozměry a množství vyzařovaného tepla vedly k sestrojení energeticky úspornějšího a menšího zařízení verze 2.0, obrázek A.3b.



Obr. A.3: a) Sestrojený prototyp v1.0 b) Sestrojený prototyp v2.0

### A.2.1 Prototyp integrovaného BPL modemu v2.0

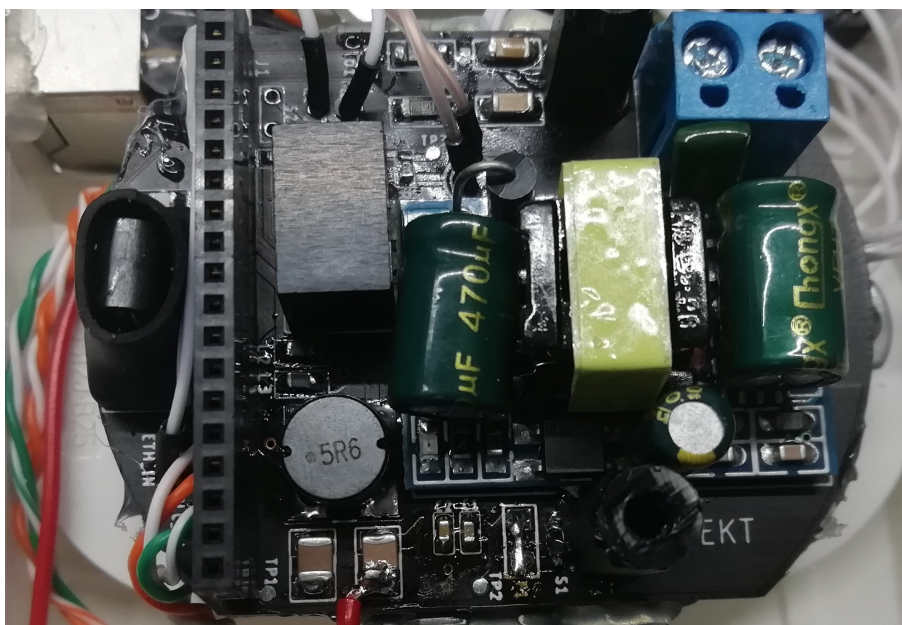
Obrázek A.4a zobrazuje způsob instalace celého zařízení do zásuvkové krabice. Aby byla montáž celého zařízení co nejjednodušší, bylo zapotřebí zvolit vhodnou délku propojovacích kabelů mezi rámečkem zásuvky a výstupem pinů z desky plošného spoje. Nejdříve se od rámečku zásuvky odpojí svorkovnice zásuvky, která je k rámečku připevněna pomocí šroubu. Na zadní straně svorkovnice je již připevněn BPL modul. Po připojení fázového a nulového vodiče na svorkovnici a následného propojení svorkovnice zásuvky s modulem je zařízení připraveno k instalaci do krabice. Po připevnění svorkovnice dovnitř zásuvkové krabice je možno nasadit zpět rámeček zásuvky.

Na obrázku A.4b lze vidět boční pohled na instalované zařízení. Mezi integrovaným modulem a spodní stranou vnitřní stěny zásuvkové krabice je mezera přibližně 1,2 cm pro vedení vodičů stávající elektroinstalace.



Obr. A.4: a) Instalace modemu do zásuvkové krabice b) Pohled na instalovaný modul

Na obrázku A.5 lze vidět desku plošného spoje osazenou všemi potřebnými součástkami. Pro větší integritu celého zařízení byla deska opatřena také distančními sloupky, které slouží jako opora desky komunikačního modulu.

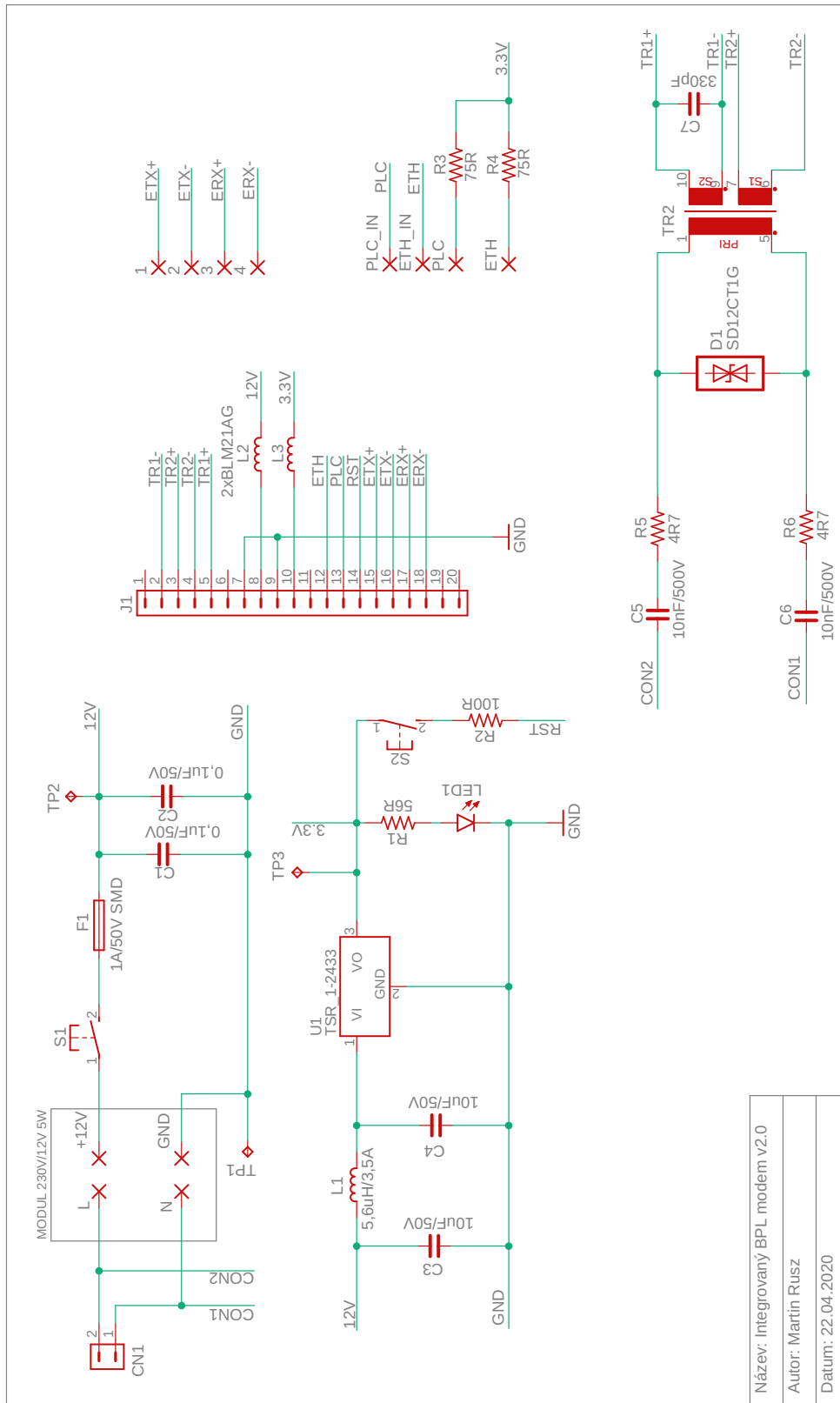


Obr. A.5: Osazená deska plošného spoje.

### A.3 Schématické zapojení navržených prototypů

Obrázky A.6 a A.7 zobrazují kompletní zapojení všech dílčích částí navržených prototypů, které byly jednotlivě podrobně popsány v rámci této práce.





Obr. A.7: Výsledné zapojení všech dílčích částí DPS integrovaného modulu v2.0.

## **B Zdrojové soubory programu Eagle v9.5.0**

Součástí této přílohy budou zdrojové soubory návrhu z programu Autodesk Eagle 9.5.0, které obsahují schématické zapojení, návrh desky plošného spoje a vygenerované výstupní Gerber soubory obou sestrojených prototypů.

Všechny tyto soubory pak budou dostupné v elektronické podobě.