

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

REALIZACE ÚZKOPÁSMOVÝCH PLC MODEMŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

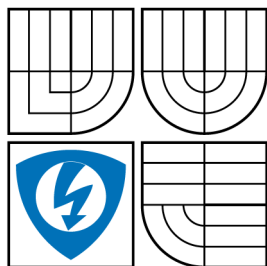
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ KUBÍČEK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

REALIZACE ÚZKOPÁSMOVÝCH PLC MODEMŮ REALIZATION OF THE NARROWBAND PLC MODEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

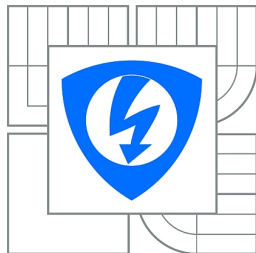
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. LUKÁŠ KUBÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN KOUTNÝ, PH.D.

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunikační a informační technika

Student: Bc. Lukáš Kubíček
Ročník: 2

ID: 100281
Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Realizace úzkopásmových PLC modemů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte úzkopásmovou technologii PLC. Provéřte základní členění hardwarových prostředků pro realizaci úzkopásmového modemu PLC. Dle vybraného řídicího obvodu navrhnete a realizujete dva modemy PLC. Ověřte funkčnost těchto modemů realizací jednoduchého měřicího pracoviště. Toto pracoviště se bude sestávat z realizovaných modemů jako prostředku pro vzdálenou komunikaci, wattmetru, který bude sloužit jako zdroj dat a jednoduché aplikace na stolním serveru, která bude tyto hodnoty zaznamenávat a patřičně reprezentovat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] CARCELLE, Xavier . Power Line Communications in Practice. : Artech House, 2009. 370 s. ISBN 978-1596933354.
[2] DOSTERT, Klaus. Powerline Communications. Upper Saddle River, NJ 07458 : Prentice Hall PTR, 2001. 338 s. ISBN 0-13-029342-3.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Martin Koutný, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, 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

Diplomová práce se věnuje úzkopásmové technologii přenosu dat el. sítí NN (PLC) a možnostem jejího využití v senzorových sítích. Zabývá se jak strukturou a základními vlastnostmi PLC standardu, tak možnostmi jeho uplatnění v praxi. Hlavní částí této práce je realizace PLC sítě pomocí IO ST7570 firmy STMicroelectronics. Jako příklad praktického využití PLC technologie je tato síť připojena k počítači, ve kterém jsou data ze senzoru (wattmetru) připojenému k PLC modemu ukládána pomocí aplikace do databáze a dále díky PHP skriptu prezentována na internetu. Při řešení tohoto problému byl kladen důraz především na jednoduchost a univerzálnost výsledných aplikací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Úzkopásmový PLC modem, sběr dat, komunikace, senzorová síť

ABSTRACT

This master's thesis deals with a narrowband power line communication technology (PLC) and focuses on the potential use in the sensor networks. This thesis addresses both the structure and basic properties of PLC standard and possible use of this application in practice. The main part of this work is implementation of the PLC networks with IC ST7570 of STMicroelectronics. As an example of practical use of PLC technology, this network is connected to the computer where the data from the sensor (meter) connected to a PLC modem, stored in a database using a PHP script as presented by the Internet. Problem solving in this thesis focuses primarily on the simplicity and universality of the resulting applications.

KEYWORDS

Narrowband power line communication modem, data acquisition, communication, sensor network

Kubáček L. *Realizace úzkopásmových PLC modemů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2012.
52 stran, 2 přílohy. Vedoucí práce byl Ing. Martin Koutný, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Realizace úzkopásmových PLC modemů“ 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 6 |
| 1 Přenos dat po silovém vedení – PLC | 7 |
| 1.1 Historie | 7 |
| 1.2 Struktura energetické sítě | 7 |
| 1.3 Základní požadavky na PLC | 8 |
| 1.4 Útlum | 8 |
| 1.5 Rušení | 9 |
| 1.6 Normy pro PLC | 10 |
| 1.7 Frekvenční pásma pro PLC | 11 |
| 1.7.1 Úzkopásmové PLC | 11 |
| 1.7.2 Širokopásmové PLC | 12 |
| 1.8 Modulace používané v úzkopásmovém PLC modemu | 12 |
| 2 Návrh úzkopásmového PLC modemu | 15 |
| 2.1 Zamýšlená PLC síť | 15 |
| 2.2 Výběr vhodného PLC procesoru pro realizaci modemů | 15 |
| 2.2.1 Požadavky na PLC procesor | 15 |
| 2.2.2 Společné vlastnosti vybraných IO | 16 |
| 2.2.3 AMIS – 49587 | 17 |
| 2.2.4 IT700 | 17 |
| 2.2.5 ST7538 | 18 |
| 2.2.6 ST7570 | 18 |
| 2.2.7 ST7590 | 19 |
| 2.3 Řídící obvod – PLC Modem ST7570 | 21 |
| 2.3.1 AFE (analogové rozhraní) | 21 |
| 2.3.2 Přehled funkcí | 22 |
| 2.4 Časování bitu | 24 |
| 2.5 Struktura rámce na fyzické úrovni | 24 |
| 2.6 Návrh PLC modemu | 25 |
| 2.6.1 Přenosový filtr | 25 |
| 2.6.2 Příjímací filtr a vazební obvod | 26 |
| 2.7 Přepětová ochrana | 29 |
| 3 Realizace prvků PLC sítě | 31 |
| 3.1 Popis jednotlivých bloků | 32 |
| 3.1.1 Wattmetr | 32 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.1.2 | PLC modem | 33 |
| 3.1.3 | Vývojový kit STM32VLDISCOVERY | 36 |
| 3.2 | Aplikační část | 37 |
| 3.2.1 | Aplikace pro externí procesor STM32 | 37 |
| 3.2.2 | Aplikace pro čtení dat ze sériového portu a zápis do DB | 39 |
| 3.2.3 | PHP skript pro prezentaci dat na internetu | 45 |
| | Závěr | 48 |
| | Reference | 49 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 51 |
| | Seznam příloh | 52 |
| A | PLC modem ST7570 | 53 |
| A.1 | Seznam součástek | 53 |
| A.2 | DPS a schéma: PLC modem, převodník USB/RS-232 | 55 |
| B | Wattmetr ADE7953 | 62 |
| B.1 | DPS a schéma: Wattmetr ADE7953 | 62 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Porovnání závislosti útlumu na frekvenci různých kabelů při měření páru N-L (nulový vodič-fázový vodič)[12] | 9 |
| 1.2 | Zjednodušené schéma možných zdrojů rušení působících na přenosové cestě PLC | 10 |
| 1.3 | Některé modulace používané pro úzkopásmovou PLC | 14 |
| 2.1 | Blokové schéma plánované sítě | 16 |
| 2.2 | Blokový diagram IO ST7570 [5] | 21 |
| 2.3 | Blokový diagram přijímacího obvodu [5] | 22 |
| 2.4 | Blokový diagram vysílacího obvodu [5] | 22 |
| 2.5 | Seznam vrstev a funkcí zabudovaných v ST7570 | 23 |
| 2.6 | Časování bitů pro frekvenci 50 Hz | 24 |
| 2.7 | Struktura rámce na fyzické úrovni | 24 |
| 2.8 | Schéma zapojení přenosového filtru. | 26 |
| 2.9 | Frekvenční charakteristiky přenosového filtru | 27 |
| 2.10 | Schéma přijímacího filtru s vazebním členem | 27 |
| 2.11 | Frekvenční charakteristika přijímacího filtru | 29 |
| 2.12 | Ochrana proti „špičkám“ v síti | 30 |
| 3.1 | Blokové schéma vysílací části | 31 |
| 3.2 | Schéma propojení bloků pro příjem dat – datalogger | 32 |
| 3.3 | 3D náhled wattmetru (vytvořený pomocí aplikace Eagle a POV-Ray) | 34 |
| 3.4 | Blokové schéma IO ADE7953 [1] | 34 |
| 3.5 | Popis I/O pinů a napájení PLC modem-ST7570 | 35 |
| 3.6 | Sekvence zpráv při konfiguraci modemu | 36 |
| 3.7 | Formát rámce CMD WriteDBRequest | 36 |
| 3.8 | Popis využitých pinů STM32VLDISCOVERY | 37 |
| 3.9 | Vývojový diagram aplikace pro STM32VLDISCOVERY – inicializace | 40 |
| 3.10 | Vývojový diagram aplikace pro STM32VLDISCOVERY – „nekonečná“ smyčka | 41 |
| 3.11 | Vývojový diagram – cyklus zápisu dat z COM portu do databáze | 44 |
| 3.12 | Aplikace pro čtení dat ze sériového portu | 45 |
| 3.13 | Struktura stránek | 46 |
| 3.14 | Formulář pro zobrazení grafu | 47 |
| A.1 | DPS: Osazení součástek | 55 |
| A.2 | DPS PLC modem: Strana součástek | 56 |
| A.3 | DPS PLC modem: Strana spojů | 57 |
| A.4 | DPS USB-RS232 | 60 |
| B.1 | Foto: Wattmetr s IO ADE7953 | 62 |

| | | |
|-----|--|----|
| B.2 | DPS: Wattmetr – strana součástek | 65 |
| B.3 | DPS: Wattmetr – strana spojů | 66 |
| B.4 | DPS: Wattmetr – osazovací plán | 67 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Přehled frekvenčních pásem pro úzkopásmové PLC [14] | 12 |
| 2.1 | Přehled vybraných parametrů IO pro PLC modem | 20 |
| 2.2 | Nastavení přenosové rychlosti pro UART pomocí bitů BR0 a BR1 | 23 |

ÚVOD

Technologie PLC (Power Line Communication) je používána už od 50. let 20. století, ale teprve v posledních letech se začíná více prosazovat. Jedná se o přenos dat po silovém vedení. Jako hlavní výhodu PLC můžeme uvést využití stávající rozvodné sítě středního (SN), či nízkého napětí (NN), není tedy třeba pokládat další kabeláž. Využít PLC tedy mohou jak poskytovatelé elektrické energie, tak její odběratelé. Diplomová práce se zabývá návrhem úzkopásmového PLC modemu.

V první části této práce (kapitola 1) je představena technologie PLC. Jsou zde popsány základní požadavky na PLC. Dále je probrána problematika útlumu a rušení signálu. Zmíněny jsou i příslušné normy, přidělená frekvenční pásma a použitelné modulace. Pozornost je věnována především úzkopásmové technologii PLC.

V druhé části (kapitola 2) je představena zamýšlená PLC síť. Dále jsou popsány vlastnosti několika dostupných IO určených k realizaci úzkopásmového PLC modemu. Vybraný obvod je probrán podrobněji. Je popsáno jeho analogové rozhraní, přehled funkcí, časování bitů a struktura rámce na fyzické vrstvě. Pro vybraný IO bude na základě doporučení výrobce navrženo kompletní schéma zapojení včetně potřebných filtrů. Vlastnosti těchto filtrů (přijímací, vysílací a vazební obvod) jsou ověřeny pomocí simulace v programu Micro-Cap9.

Praktickou částí je kapitola 3. Cílem této práce je realizace úzkopásmových PLC modemů a sítě z nich složené. Úlohou této sítě bude sběr dat a jejich zápis na COM port počítače. Tyto data budou zapsána pomocí aplikace v počítači do databáze a dále prezentována formou grafů a tabulek na internetu.

1 PŘENOS DAT PO SILOVÉM VEDENÍ – PLC

Hlavní výhodou přenosu po silovém vedení je využití stávající rozvodné sítě středního (SN), či nízkého napětí (NN), není tedy třeba pokládat další kabeláž. Ovšem primární využití těchto rozvodů je přenos elektrické energie s frekvencí 50 Hz. Tato skutečnost přináší řadu problémů např. silné rušení, rozdílné impedance vedení, potřeba dodržení elektromagnetické kompatibility.

Princip přenosu spočívá v použití některé z úzkopásmových či širokopásmových modulací, kdy jsou data určená k přenosu namodulována na signál stávající, tedy na nosnou frekvenci 50 Hz. Takto přenesený signál je na straně příjemce pomocí vazebního obvodu (frekvenční filtr) oddělen od nosné frekvence, čímž dostaneme v ideálním případě (bez rušení) zpět původní datový signál.

1.1 Historie

Princip PLC není novinkou. Již v roce 1897 je zapsán první patent pro dálkové ovládání přes elektrické vedení. V roce 1950 byl navržen první PLC systém, známý jako HDO (hromadné dálkové ovládání) a poté nasazen na rozvodnou síť středního a nízkého napětí. Nosná frekvence byla mezi 100 Hz a 1 kHz. Tím bylo umožněno např. dálkové zapnutí a vypnutí veřejného osvětlení.

Dnes jsou PLC systémy využitelné nejen v automatizaci, ale při použití širokopásmové modulace je možné je využít např. pro propojení několika LAN sítí, přístup k Internetu, či pro některé služby vyžadující QoS (Quality of Services), jako např. VoIP [15].

1.2 Struktura energetické sítě

Síť pro distribuci elektrické energie můžeme rozdělit na části podle napěťové úrovně. V ČR se dnes užívají přenosové trojfázové soustavy s následujícím normalizovaným napětím.

- Velmi vysoké napětí (VVN): 110 kV, 220 kV a 400 kV – používá se k propojení velkých oblastí, případně pro největší odběratele. Toto vedení umožňuje přepravu energie na velké vzdálenosti. Obvykle se jedná o nadzemní kabely.
- Vysoké napětí (VN, někdy také SN): 6 kV, 10 kV, 22 kV a 35 kV – používá se pro zásobování menších oblastí, měst, případně velkých průmyslových podniků. Vzdálenosti jsou podstatně menší než u VVN. Pro VN sítě se používají nadzemní i podzemní kabely.

- Nízké napětí (NN): 230 V, 400 V a 500 V – používá se pro dodávku energie koncovým uživatelům. Délka těchto sítí bývá několik set metrů. Ve městech se jedná převážně o podzemní kabely, ve venkovských i nadzemní. Navrhovaný modem bude určen ke komunikaci přes tuto část elektrorozvodné sítě [17].

1.3 Základní požadavky na PLC

Hlavní požadavky na přenos pomocí PLC modemu:

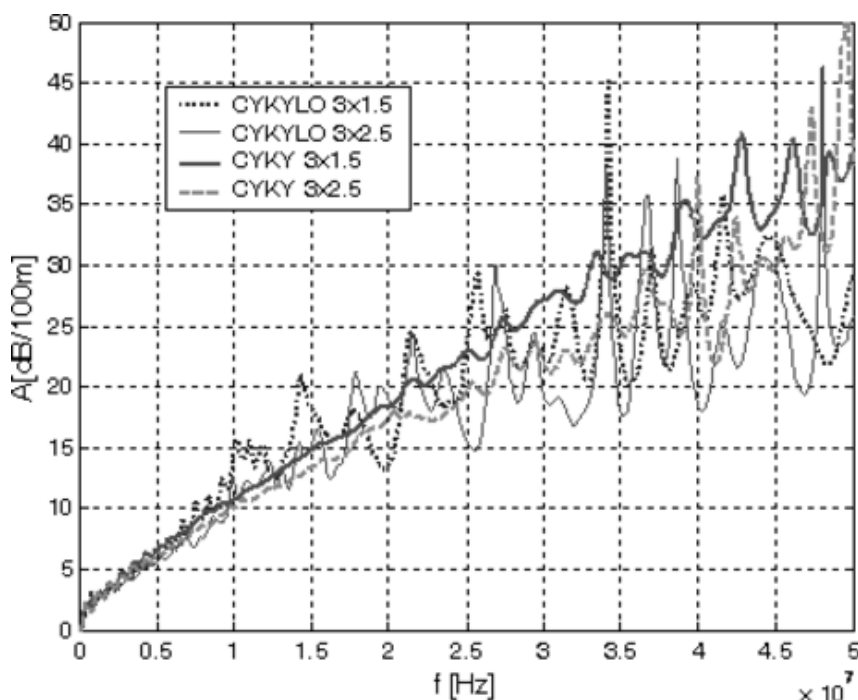
- neovlivnění původní funkce elektrických rozvodů – přenos el. energie,
- elektromagnetická kompatibilita (EMC) – zajistit, aby nedocházelo k nepřípustnému rušení ostatních zařízení a zároveň se vyrovnat s rušením od jiných zařízení,
- co možná největší přenosová rychlost,
- vyhovět normám – v Evropě především CENELEC EN 50065 [18].

Mají-li být splněny tyto body je potřeba znát vlastnosti elektrických rozvodů a jevů ke kterým na nich v běžném provozu dochází. Dále je třeba být obeznámen s příslušnými normami.

1.4 Útlum

Primární úkol silového vedení, pro který bylo navrženo, je rozvod elektrické energie na kmitočtu 50 Hz. Zde narážíme na problém, kdy pro vysokorychlostní datové přenosy potřebujeme přenášet vysoké frekvence. Útlum vedení je přibližně konstantní od 10 Hz do 150 kHz a jeho hodnota je kolem 3 dB. Jak je patrné z grafu (obr. 1.1) s rostoucí frekvencí útlum vedení roste. Tento graf je uveden jako příklad možného útlumu na vedení délky 100 m. Útlum užitečného signálu závisí na impedanci vedení (včetně impedance připojených zařízení). Obdobně rostoucí charakter v závislosti na frekvenci má i křivka absolutní hodnoty impedance. Z měření která proběhla na 86 komerčních distribučních sítích v Evropě i USA vyplývá, že impedance při frekvenci 100 kHz může nabývat hodnot v rozsahu 1,5 až 100 Ω [13].

K útlumu signálu nedochází pouze na elektrickém vedení. Ale samozřejmě i na přístrojích, které se běžně nachází v rozvodech elektrické energie, jako např. transformátory, jističe, elektroměry, rozbočení vedení. . . Transformátor na rozdíl od jističů a elektroměrů bývá společný pro více objektů, ale pokud jde o „běžný“ transformátor je pro datový signál takřka nepřekonatelnou překážkou. Řešením může být přemostění výkonového transformátoru jiným („datovým“) transformátorem, který



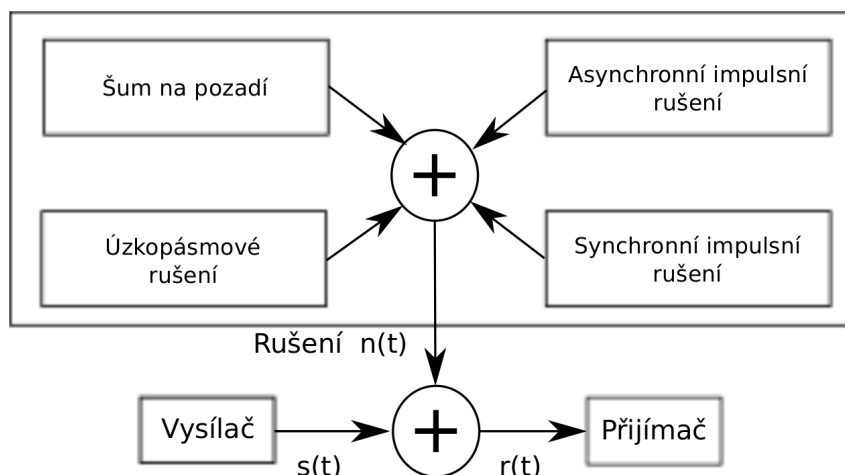
Obrázek 1.1: Porovnání závislosti útlumu na frekvenci různých kabelů při měření páru N-L (nulový vodič-fázový vodič)[12]

má mnohem lepší parametry pro přenos na vyšších frekvencích a je oddělen od rozvodu pomocí filtru typu DP (dolní propust) případně PP (pásmová propust). Hodnota útlumu pro různé frekvence a konkrétní prvky se může značně lišit. Stejně tak útlum trasy kolísá i v závislosti na čase (odpojení či připojení spotřebičů).

1.5 Rušení

Při přenosu VF signálu přes elektrické vedení se z vedení v podstatě stává anténa. Dochází tedy k vyzařování do okolí. Stejně jako u jiných technologií i v případě PLC lze problematiku rušení rozdělit na dva případy. Jednak může být zařízení PLC rušeno jinými zařízeními, nebo je samo zdrojem rušení ostatních zařízení v blízkém okolí. Při přenosu informace prostřednictvím silového vedení se samozřejmě nevyhneme rušení užitečného signálu. Zdroje rušení, které působí na přenosové vedení PLC lze rozdělit podle charakteristického rozložení spektrální výkonové hustoty (PSD-Power Spectral Density) následujícím způsobem.

- Šum na pozadí – přítomen v síti stále, jedná se o součet velkého počtu zdrojů rušení s malou intenzitou, jeho parametry nejsou v čase konstantní. PSD s rostoucí frekvencí klesá – vysoké hodnoty je možné naměřit přibližně v rozsahu



Obrázek 1.2: Zjednodušené schéma možných zdrojů rušení působících na přenosové cestě PLC

desítek Hz až 20 kHz, kolem 150 kHz je hodnota PSD řádově tisíckrát nižší, na vyšších frekvencích lze již mluvit o tzv. bílém šumu.

- Úzkopásmové rušení – vysoká hodnota PSD je soustředěna do úzkých frekvenčních pásem. Na frekvencích do 150 kHz je zdrojem např. televize, monitor, zářivka, či spínané procesy. Pro vyšší frekvence je zdrojem především rozhlasové vysílání na středních a krátkých vlnách. Úroveň PSD se během dne mění.
- Impulsní rušení – jedná se o krátké napěťové špičky trvající od jednotek μs až po jednotky ms s úrovní PSD běžně o 10 dB vyšší než u šumu na pozadí. Impulsní rušení pochází např. od spínaných zdrojů, tyristorových regulátorů či kolektorových elektromotorů. Můžeme jej dále rozdělit.
 - Asynchronní – generují ho spínací prvky v distribuční síti.
 - Synchronní – běžně jej generují napěťové konvertory či stmívače. Rušivé špičky se periodicky opakují a v závislosti na délce trvání mohou způsobit ztrátu jednoho či více bitů [19].

1.6 Normy pro PLC

Evropský výbor pro elektrotechnickou normalizaci CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) vydal následující normy pro PLC po silovém vedení NN.

- EN50065-1 definuje obecné požadavky týkající se frekvenčních pásem a elektromagnetického rušení.

- EN50065-4-2 týká se nízkonapěťových oddělovacích filtrů a bezpečnostních požadavků.
- EN50065-7 zabývá se impedancí připojených zařízení.

Z nich vychází česká norma ČSN EN 50065 s názvem „signalizace v instalacích nízkého napětí v kmitočtovém rozsahu od 3 kHz do 148,5 kHz“. Rozdělení frekvenčních pásem je znázorněno v tabulce 1.1

Protokol přístupu dle normy ČSN EN 50065-1

Pro komunikaci je možné použít libovolný komunikační protokol, pokud je dodržen protokol přístupu dle normy ČSN EN 50065-1. Tato norma popisuje způsob signalizace v použitém pásmu 125 – 140.

- Vysílač nesmí bez přerušení vysílat déle než 1 s a před dalším vysíláním musí vyčkat alespoň 125 ms. (pozn. za vysílání se považuje za řadu signálů, ve kterých není mezera větší než 80 ms).
- Všechny systémy musí použít frekvenci 132,5 kHz k upozornění, že vysílání pokračuje.
- K umožnění detekce použitého pásma musí přístroj vysílat svůj signál se spektrálním rozložením v souladu s přílohou B této normy.
- Přístroj může vysílat, jestliže pásmo není využito po dobu náhodně zvolenou (rovnoměrně rozloženou mezi 85 ms a 115 ms s alespoň sedmi možnými hodnotami v tomto pásmu).
- Vysílač musí být vybaven detektorem signálu, který detekuje, že je pásmo používáno [18].

1.7 Frekvenční pásma pro PLC

PLC modemy můžeme rozdělit podle frekvenčního pásma, které je použito pro přenos informace na úzkopásmové a širokopásmové.

1.7.1 Úzkopásmové PLC

Úzkopásmový systém používá k vysílání frekvenční rozsah v Evropě definovaný normou CENELEC EN 50065-1. Ta definuje frekvenční rozsah pro přenos od 3 do 148 kHz, který je rozdělen do 5 tříd. Toto rozdělení je znázorněno v tabulce níže (tabulka 1.1).

Při dodržení norem CENELEC je možné dosáhnout přenosové rychlosti maximálně několika kilobitů za sekundu na vzdálenost až 1 km bez použití opakováčů. Vzhledem k relativně nízké přenosové rychlosti je úzkopásmová technologie odolnější vůči rušení. Tyto vlastnosti ji předurčují pro využití především v automatizaci, např:

- domácí automatizace (např. vrata, rolety, regulace teploty a klimatizace),
- automatizovaný odečet z měřících přístrojů (AMR),
- průmyslová automatizace (např. tovární monitorování a kontrola).

Tabulka 1.1: Přehled frekvenčních pásem pro úzkopásmové PLC [14]

| Pásmo | Šířka pásma [kHz] | Max. amplituda signálu [V] | Poznámka |
|-------|----------------------|-------------------------------|--|
| – | 3 – 9 | – | pro dodavatele el. energie |
| A | 9 – 95 | 1 – 5 | pro dodavatele el. energie, po jejich souhlasu i pro odběratele |
| B | 95 – 125 | 1,2 | pro odběratele, nevyžaduje protokol přístupu dle normy |
| C | 125 – 140 | 1,2 | pro odběratele, vyžaduje protokol přístupu dle normy |
| D | 140 – 148,5 | 1,2 | pro odběratele, nevyžaduje protokol přístupu dle normy |

1.7.2 Širokopásmové PLC

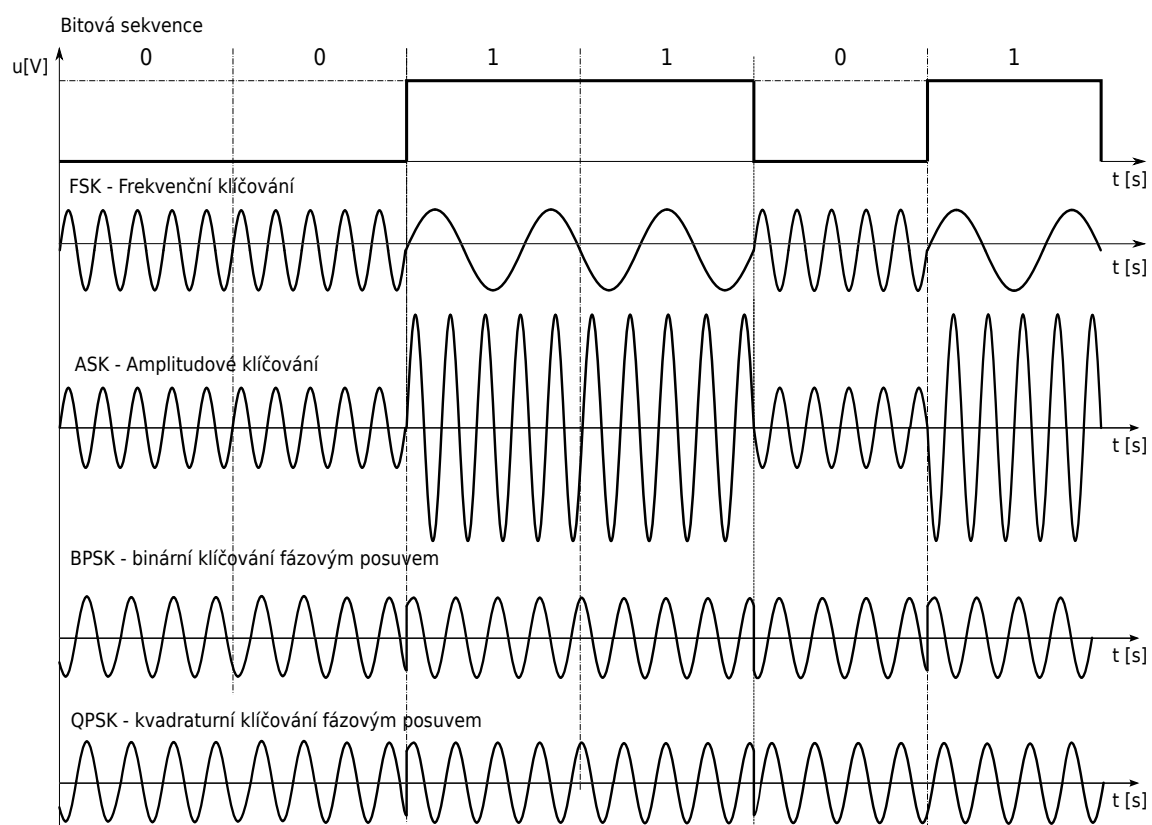
Širokopásmové systémy vyžadují daleko širší frekvenční pásmo, okolo 30 MHz za použití širokopásmové modulace. Tím je umožněn přenos dat rychlostí více než 60 Mb/s. Vzhledem k vysokým frekvencím je náročnější dodržet podmínky elektromagnetické kompatibility s okolními zařízeními. Tato technologie je určena především pro vysokorychlostní přenos dat. K našemu záměru není tato technologie nejvhodnější, proto v této práci nebude podrobněji probírána.

1.8 Modulace používané v úzkopásmovém PLC modemu

Užitečný digitální signál je přes silové vedení přenášen pomocí vhodné modulační techniky. Jedná-li se o modem určený k přenosu relativně malého množství dat např.

pro účely automatizace je ideální zvolit některou z úzkopásmových modulací. Pro PLC se používají např. následující spojitě digitální modulace.

- FSK (Frequency Shift Keying) – jedná se o dvou stavovou modulaci. Jedna frekvence je přiřazena logické 1 a jiná logické 0. Zároveň je zařízeno, aby nedocházelo ke změně fáze. Tato technika je jednoduchá a odolnější proti rušení než modulace ASK (Amplitude Shift Keying). Z tohoto důvodu je velmi rozšířená (např. PLC modem ST7538, AS5501/02 [11]).
- ASK – je založena na přiřazení rozdílné amplitudy pro log 1 a log 0. Pro častou chybovost využívána zřídka. Např. PLC modem TDA5051.
- BPSK (Binary Phase Shift Keying) – Při této modulaci dochází ke změně fáze nosného signálu. Jsou možné dva stavy fázového posuvu, 0 a π . Obdobou je DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying), kdy nedochází k nastavení fáze na určitou hodnotu jako v předešlém případě, ale fáze je posunuto oproti poslední hodnotě o π . Tím je zamezeno chybám při nechtěné změně fáze vzniklé přenosem přes komunikační kanál. Např. PLC modem ST7580/90)
- QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – je obdobou BPSK, rozdíl je v počtu možných stavů. Jedná se o 4 stavovou modulaci ($0, \pi/2, \pi$ a 2π), kdy každý stav zastupuje určitou kombinaci dvou bitů modulovaného signálu. Na stejném principu existují i vícestavové modulace jako 8PSK i rozdílové mod modulace DQPSK. Např. PLC modem ST7580/90.
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) – Používána spíše pro širokopásmové PLC. Tato modulace je relativně náročná, ale velmi odolná proti rušení. Této odolnosti je dosaženo rozdělením přiděleného pásma na dílčí pásma, které jsou od sebe vzdáleny tak, aby nedocházelo k jejich překryvu. V každém dílčím pásmu je použita některá z předchozích modulací (např. QPSK). Např. PLC modem ST7590.



Obrázek 1.3: Některé modulace používané pro úzkopásmovou PLC

2 NÁVRH ÚZKOPÁSMOVÉHO PLC MODEMU

2.1 Zamýšlená PLC síť

Jeden z příkladů praktického a zároveň perspektivního využití PLC je sestavení sítě určené ke sběru dat z různých zařízení (PC, měřicí přístroje, průmyslové stroje, lékařské přístroje, různé senzory atd.). Jde o situaci, kdy jedna centrální jednotka přijímá informace od jiných jednotek a ukládá je do databáze nebo jinak zpracovává. Konkrétním příkladem je potřeba společností, které rozvádějí elektrickou energii (nebo plyn, vodu, teplo), mít přehled jak nad spotřebou vlastních zařízení v rozvodné síti, tak i nad spotřebou jednotlivých odběratelů. Protože se většinou jedná o velmi rozsáhlé rozvodné soustavy, je odečet z jednotlivých měřících přístrojů, prováděný pracovníky osobně, velmi časově i finančně náročný. A samozřejmě tak nelze získat aktuální informace o spotřebě v celém systému současně, což je důležité pro optimalizování provozu rozvodné sítě. Proto se tyto společnosti snaží automatizovat odečet hodnot z měřících přístrojů. V některých případech je však velmi nepraktické a nákladné instalovat kabelové sítě mezi měřícími přístroji. K tomuto účelu se jeví jako ideální využití stávajícího vedení rozvodné el. sítě pomocí PLC.

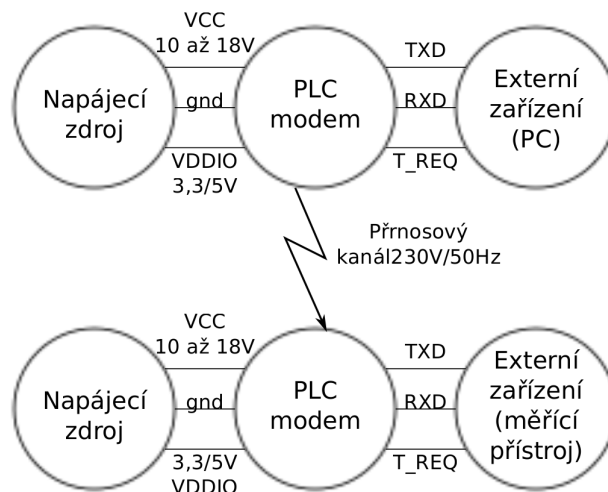
V rámci diplomové práce budou realizovány dva úzkopásmové PLC modemy. Každý modem bude schopen přenášet přes síť NN data přijatá od externího procesoru. Komunikace mezi PLC modemem a externím procesorem bude probíhat přes rozhraní UART. Externí zařízení (v našem případě wattmetr založený na IO ADE7953) bude měřit napětí, proud a příkon el. spotřebičů. Naměřené hodnoty budou na jedné straně zakódovány a odeslány do sítě NN prostřednictvím PLC modemu. Na druhé straně proběhne opačný postup (příjem, dekódování a zobrazení). Jedná se tedy o síť umožňující dálkový odečet příkonu el. spotřebičů připojených k wattmetru.

2.2 Výběr vhodného PLC procesoru pro realizaci modemů

Vzhledem k tomu, že technologie PLC je ve vývoji již řadu let je na trhu mnoho integrovaných obvodů určených k realizaci PLC modemu. Z tohoto důvodu bylo potřeba definovat základní požadavky.

2.2.1 Požadavky na PLC procesor

- Modem pro úzkopásmové PLC,



Obrázek 2.1: Blokové schéma plánované sítě

- cena,
- malé rozměry výsledného řešení,
- spolehlivost,
- bezpečnost,
- dobrá technická dokumentace,
- dostupnost (některé procesory je možné objednat pouze ve velkém množství).

Po prostudování dokumentace k třinácti procesorům (určeným k realizaci úzkopásmového PLC modemu) se do užšího výběru, na základě požadavků, dostalo pět níže popsaných.

2.2.2 Společné vlastnosti vybraných IO

- PLC modem pro 50 a 60 Hz,
- obousměrný přenos dat typu Half-Duplex,
- splňují příslušné Evropské normy,
- nabízí kompletní řešení MAC, kromě ST7538,
- pracovní rozsah okolní teploty -40°C až +80°C,
- synchronizován s napětím v rozvodné síti.

2.2.3 AMIS – 49587

Tento obvod od ON Semiconductor vychází z osvědčené řady AMIS-30585 [10]. Zahrnuje jak řadu funkcí pro zajištění fyzické komunikace (MAC) i 32 b ARM procesor. Díky tomu je zajištěna lepší kvalita přenosu i na zarušených síťových vedeních.

Základní vlastnosti

- Programovatelná nosná frekvence od 9 do 95 kHz s korkem 10 Hz,
- volitelná přenosová rychlost: 300, 600, 1200 a 2400 b/s (pro 50 Hz),
- kódování/dekódování signálů prostřednictvím integrovaného 32 b jádra ARM,
- SCI komunikační rozhraní pro spojení s nadřazeným systémem,
- 3 I/O porty,
- volitelná komunikační rychlost s nadřazeným systémem: 4,8; 9,6; 19,2; 34,4 kb/s,
- max. spotřeba v režimu příjmu/vysílání 80 mA,
- jediné napájecí napětí 3,3 V,
- použitá modulace – spread-FSK (S-FSK),
- dostupný v pouzdře PLCC28 určeném pro povrchovou montáž a v QFN52 8x8 [9].

2.2.4 IT700

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

Základní vlastnosti

- Programovatelná nosná frekvence od 9 do 95 kHz (CENELEC pásmo A), od 95 do 125 kHz (CENELEC pásmo B), od 100 do 400 kHz (FCC/ARIB),
- volitelná přenosová rychlost: 625, 2500 b/s (pro CENELEC pásmo A, B),
- UART komunikační rozhraní pro spojení s nadřazeným systémem,

- 3 I/O porty,
- max. spotřeba 500 mA,
- jediné napájecí napětí 3,3 V,
- použitá modulace – DCSK,
- šifrování AES 128,
- dostupný v pouzdře QFN56 [8].

2.2.5 ST7538

ST7538 je nástupce obvodu ST7537HS1 [2] a přináší tedy jistá vylepšení. Jedná se IO firmy SGS-THOMSON Microelectronics stejně jako následující dva obvody. Určený pro asynchronní/synchronní přenos dat po domovní elektrické síti.

Základní vlastnosti

- Volba z osmi nosných frekvencí,
- přenosová rychlost až 4 800 b/s,
- Sériové asynchronní/synchr. komunikační rozhraní pro spojení s nadřazeným systémem (s nastavitelnými parametry),
- nižší spotřeba než u ST7537, z 30 mA na 5 mA,
- jediné napájecí napětí 7,5 až 12,5 V,
- použitá modulace – FSK,
- dostupný v pouzdře TQFP44 [4].

2.2.6 ST7570

Oproti předchozímu modelu ST7538 již obsahuje plně integrovanou vrstvu PHY (PHY procesor) a částečně i MAC (protokol kontrolér). Nevýhodou může být potřeba dvou rozdílných napájecích napětí.

Jedná se, ale o novější obvod, který byl i přesto pro jednoduchost výsledného řešení, dobrou dokumentaci, cenu a dostupnost vybrán k realizaci PLC modemu a bude blíže popsán v následující části 2.3.

Základní vlastnosti

- Programovatelná nosná frekvence od 9 do 148,5 kHz,
- volitelná přenosová rychlost: 1200 a 2400 b/s (pro 50 Hz),
- UART komunikační rozhraní pro spojení s nadřazeným systémem,
- I/O port,
- volitelná komunikační rychlost s nadřazeným systémem: 9,6; 19,2; 38,4; 57,6 kb/s,
- max. spotřeba v režimu příjmu/vysílání 0,5/30 mA,
- napájecí napětí 3,3 až 5 V a 8 až 18 V,
- použitá modulace – spread-FSK (S-FSK),
- dostupný v pouzdře VFQFPN48 [5].

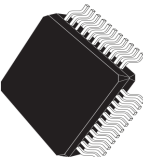
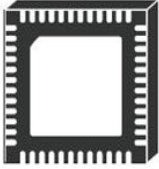
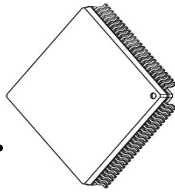
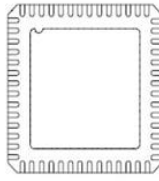
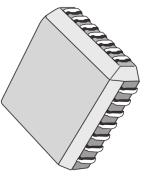
2.2.7 ST7590

Na rozdíl od ST7570 má některá vylepšení, která ovšem nejsou nikterak zásadní pro námi zamýšlenou aplikaci. Jedná se také o relativně nový model o kterém není tolik informací.

Základní vlastnosti

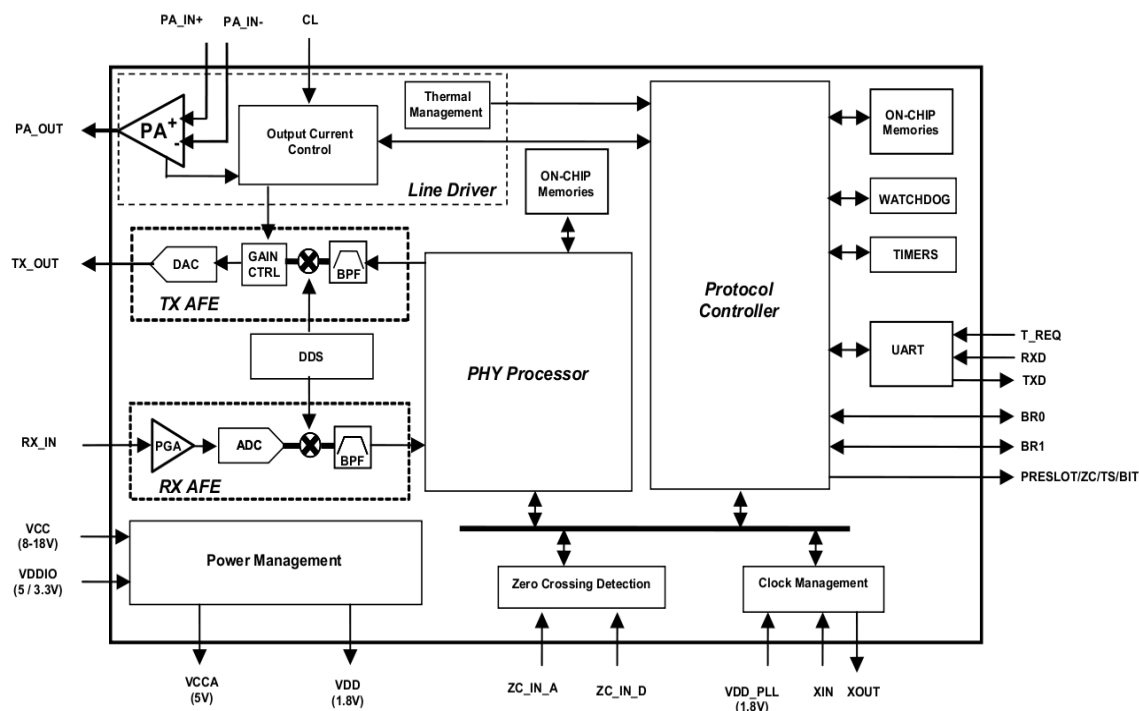
- Programovatelná nosná frekvence, 97 subkanálů v pásmu CENELEC A,
- obsahuje DSP (digitální signální procesor),
- integrovaný mikroprocesor 8051,
- možnost připojit externí FLASH a SRAM paměť
- vrstva PHY odpovídá požadavkům PRIME,
- šifrování AES 128,
- volitelná přenosová rychlost: až 128 kb/s,
- I/O port (UART/SIPO), GPIO (General Purpose Input/Output)
- použitá modulace – OFDM,
- dostupný v pouzdře QFN48 7x7 a TQFP100 14x14 [7].

Tabulka 2.1: Přehled vybraných parametrů IO pro PLC modem

| IO | ST7538 | ST7570 | ST7590 | IT700 | AMIS – 49587 |
|----------------------|--|--|--|---|--|
| Výrobce | SGS-THOMSON Microelectronics | | | Yitran | ON Semiconductor |
| Modulace | FSK | S-FSK | OFDM | DCSK | S-FSK |
| Přenosová rychlost | až 2 400 b/s | | až 128 000 b/s | 625 – 7500 b/s | 300 – 2 400 b/s |
| Přenos | poloduplexní | | | | |
| Frekvence nosné | 132,45 kHz | až 148,5 kHz | 97 sub-kanálů v CENELEC A band | 9 – 400 kHz | 9 – 95 kHz |
| Komunikační rozhraní | Sériové asynchr./synchron. | UART | UART, SPI, I2C, JTAG | UART, SPI, I2C, JTAG | UART |
| Cena | 7,24 \$ | 6,05 \$ | 10,25 \$ | 10,20 \$ | 8,22 \$ |
| Norma | EN50065-1, FCC | EN50065-1, FCC part 15, IEC61334-5-1 | EN50065-1, FCC part 15, IEC61334-4-32 | EN50065-1, FCC, ARIB, | EN 50065-1, IEC 61334-5-1 |
| Pouzdro | TQFP-44  | VFQFPN-48  | TQFP-100  | QFN-56  | PLCC-28  |

2.3 Řídicí obvod – PLC Modem ST7570

Pro realizaci úzkopásmového PLC modemu byl vybrán tento IO. Vzhledem k tomu, že všech 5 zmíněných IO se k realizaci modemu hodí, bylo přihlédnuto především k dostupnosti, velikosti výsledného řešení a dostupné dokumentaci, za těchto okolností se jako nejvhodnější jevil tento obvod, který bude dále popsán podrobněji. Na obrázku 2.2 můžeme vidět blokové schéma obvodu ST7570[5].



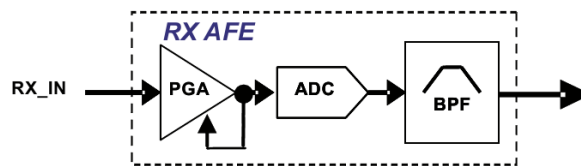
Obrázek 2.2: Blokový diagram IO ST7570 [5]

2.3.1 AFE (analogové rozhraní)

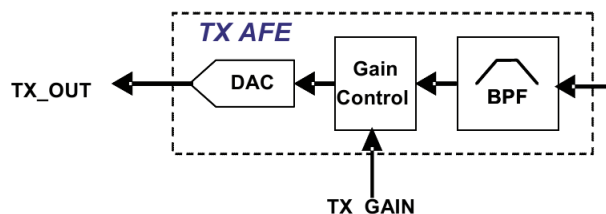
Přijímací obvod

Blokové schéma přijímacího obvodu (obrázek 2.3) se skládá z následujících částí.

- Vstupní analogový zesilovač s programovatelným zesílením (PGA). Zesílení závisí na velikosti vstupního napětí. Zisk se pohybuje v rozmezí -18 dB až 30 dB s krokem 6 dB.
- Analogově digitální převodník (ADC).
- Pásmová propust (BPF-Band Pass Filter).



Obrázek 2.3: Blokový diagram přijímacího obvodu [5]



Obrázek 2.4: Blokový diagram vysílacího obvodu [5]

Vysílací obvod

Blokové schéma vysílacího obvodu (obrázek 2.4) se skládá z následujících částí.

- Digitálně analogový převodník (DAC), který je schopen generovat lineární signál v celém jeho výstupním rozsahu.
- Blok řízení zesílení (gain control) zajišťuje, aby velikost výstupního signálu odpovídala požadované úrovni pro přenos. Amplitudu přenášeného signálu lze nastavit s krokem 32, v logaritmickém měřítku prostřednictvím parametru TX_GAIN, útlum lze nastavit v rozsahu 0 až -31 dB.
- Pásmová propust (BPF-Band Pass Filter).

PA (Power amplifier)

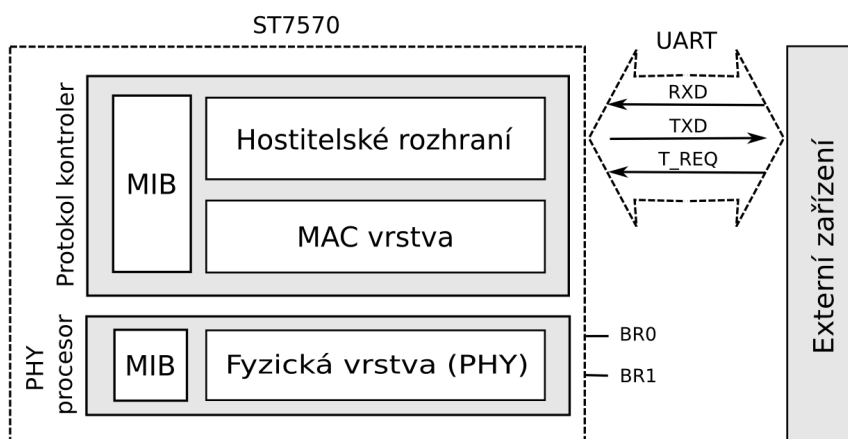
Integrovaný výkonový zesilovač se vyznačuje velmi vysokou linearitou, musí být v souladu s různými mezinárodními předpisy (CENELEC, FCC atd.) Všechny piny zesilovače jsou přístupné, k vytvoření aktivního filtru, který zvyšuje linearitu výstupního signálu.

2.3.2 Přehled funkcí

ST7570 má plně integrovanou fyzickou vrstvu (PHY), částečně i vrstvu Media Access Control (MAC) a služby v souladu s otevřeným standardem IEC61334-5-1, určené především pro tzv. „smart metering“ aplikace.

Následuje seznam vrstev a funkcí zabudovaných v ST7570 (obrázek 2.5).

- Fyzická vrstva – implementována v procesoru PHY. Stará se o všechny základní funkce uvedené v mezinárodní normě IEC61334-5-1, plus dodatečné služby pro konfiguraci, správu signalizace, odhad amplitudy signálu a šumu, detekci fáze, statistické informace.
- MAC vrstva – implementována v protokol kontroleru. Stará se o všechny základní funkce uvedené v mezinárodní normě IEC61334-5-1.
- MIB (Management Information Base) – informační databáze se všemi údaji potřebnými pro správnou konfiguraci systému (jak u PHY tak u MAC vrstvy).
- Rozhraní UART – určeno ke komunikaci s externím zařízením. Všechny služby PHY, MAC a MIB jsou poskytnuty externímu zařízení přes sériový port.



Obrázek 2.5: Seznam vrstev a funkcí zabudovaných v ST7570

UART – výběr přenosové rychlosti

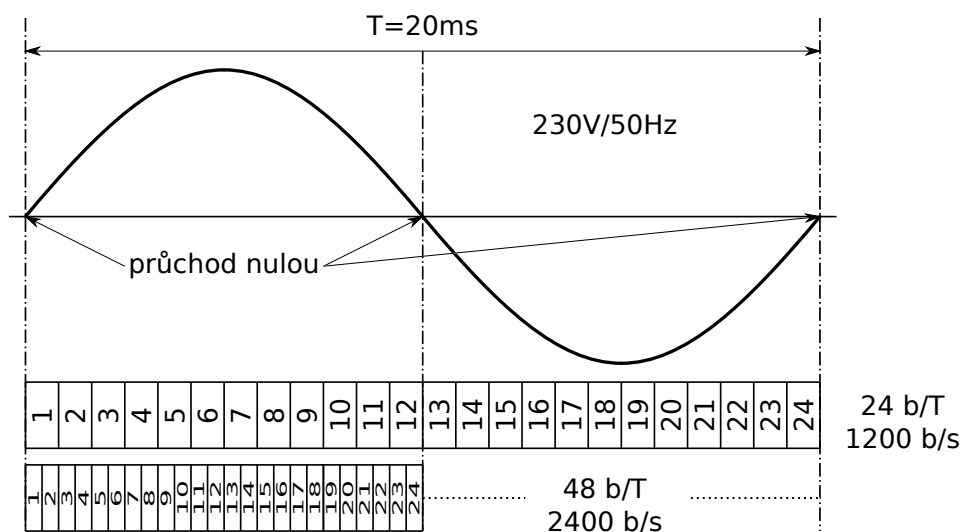
BR0 a BR1 – dva bity určené k nastavení přenosové rychlosti pro rozhraní UART.

Tabulka 2.2: Nastavení přenosové rychlosti pro UART pomocí bitů BR0 a BR1

| BR1 | BR0 | Přenosová rychlost [kb/s] |
|-----|-----|---------------------------|
| 0 | 0 | 9,6 |
| 0 | 1 | 19,2 |
| 1 | 0 | 38,4 |
| 1 | 1 | 57,6 |

2.4 Časování bitu

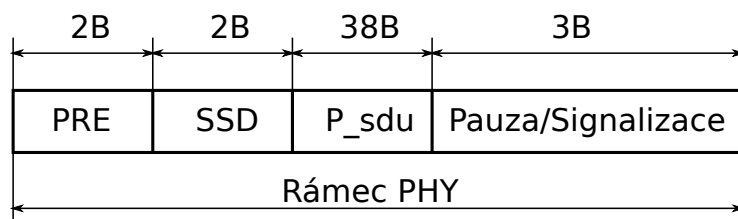
Datová komunikace je synchronizována s frekvencí elektrorozvodné sítě (v Evropě 50Hz) pomocí integrované smyčky fázového závěsu (PLL – Phase Locked Loop). Časování bitů je dynamicky upraveno tak, aby bylo vždy 24 nebo 48 bitů v každé periodě síťového cyklu, v závislosti na požadovaném nastavení (obrázek 2.6). Výsledná bitová rychlost je tedy závislá na okamžité frekvenci sítě. S frekvencí 50 Hz je výsledná přenosová rychlost 1200 b/s v případě 24 bitů / T, nebo 2400 b/s pro 48 bitů / T.



Obrázek 2.6: Časování bitů pro frekvenci 50 Hz

2.5 Struktura rámce na fyzické úrovni

Rámec na fyzické úrovni je v souladu s normou IEC61334-5-1 a skládá se z 45 bytů (360 bitů).



Obrázek 2.7: Struktura rámce na fyzické úrovni

- 2 B preamble (PRE)(AAAAh),

- 2 B oddělovač – start subframe delimiter (SSD)(54C7h),
- 38 B přenášená data – physical service data unit (P_sdu),
- 3 B pro pauzu nebo signalizaci.

Bajty jsou zasílány od nejvýznamnějšího bajtu (MSB) po nejméně významný bajt (LSB). Bity uvnitř bajtu jsou uspořádány ve stejném pořadí [5].

2.6 Návrh PLC modemu

Kompletní schéma PLC modemu včetně návrhu DPS je v příloze A.2. Návrh vychází z doporučeného zapojení modemu ST7570 [6].

Důležitou částí PLC modemu jsou filtry. Pro správnou funkci PLC modu jsou zapotřebí tři filtry, které podle účelu můžeme nazvat: přenosový, přijímací filtr a vazební obvod. Hodnoty součástek uvedené v následujících schématech (obr. 2.8 a 2.10) jsou vypočteny pro případ kdy pro vysílání logické 0 použijeme frekvenci 74 kHz a pro log 1 frekvenci 63,3 kHz.

2.6.1 Přenosový filtr

Před aktivním filtrem typu dolní propust (DP) je předřazen ještě jednoduchý RC článek (taktéž DP) složený z rezistoru R12 a kondenzátoru C9. Tento filtr je nastaven na mezní frekvenci téměř 80 kHz (první odfiltrování nežádoucích harmonických složek signálu TX_OUT). Hodnota jeho mezní frekvence se určí ze vztahu:

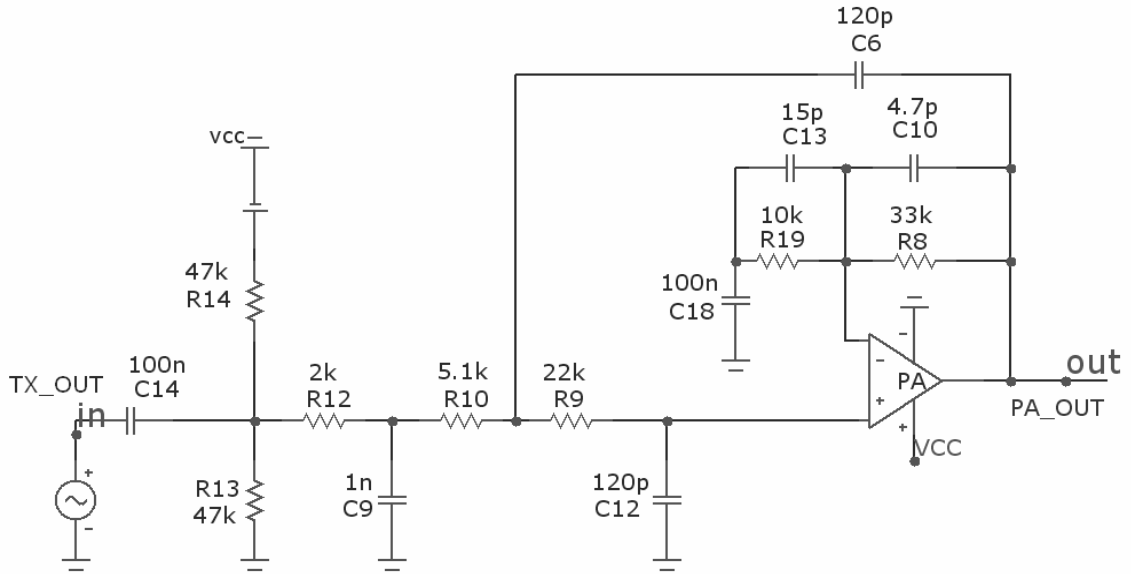
$$f_{C1} = \frac{1}{2\pi R_{12}C_9} \doteq 80 \text{ kHz}. \quad (2.1)$$

Hodnoty všech uvažovaných součástek lze vyčíst ze schématu na obrázku 2.8. Dále následuje aktivní filtr 2. řádu (Sallen-Key), který je postaven na zesilovači PA (Power Amplifier integrovaný v ST7570). A složený z rezistorů R9, R10 a kondenzátorů C6, C12.

Vzhledem k tomu, že OZ vyžaduje symetrické napájení a je napájen nesymetricky, je použit napěťový dělič (tvořen rezistory R13 a R14 stejných hodnot). Přivedením napájecího napětí na tento dělič je vytvořeno potřebné předpětí (polovina napájecího napětí).

Přenosové funkce pásmové propusti 2.řádu Sallen-Key je:

$$A(s) = \frac{A_u}{\frac{s^2}{\omega_C^2} + \frac{s}{\omega_C \cdot Q} + 1}. \quad (2.2)$$



Obrázek 2.8: Schéma zapojení přenosového filtru.

Kde A_u je hodnota zesílení neinvertujícího OZ nastavená pomocí rezistorů R19 a R8, k těmto jsou připojeny kompenzační kondenzátory C13 a C10. Celé schéma je zobrazeno na obrázku 2.8.

$$A_u = \left(1 + \frac{R_8}{R_{19}}\right) = \left(1 + \frac{33 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) = 4,3 \doteq 12,7 \text{ dB.} \quad (2.3)$$

Mezní frekvence a jakost přenosového aktivního filtru vypočteme podle následujících rovnic.

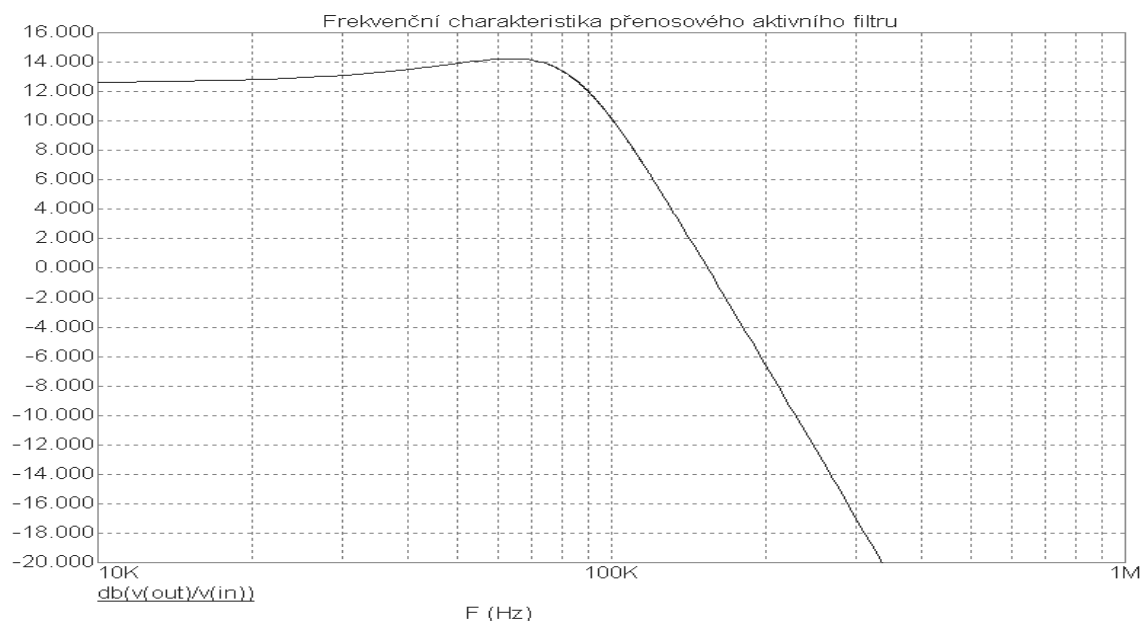
$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_9 \cdot R_{10} \cdot C_6 \cdot C_{12}}} \doteq 125 \text{ kHz.} \quad (2.4)$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_9 \cdot R_{10} \cdot C_6 \cdot C_{12}}}{R_{10}C_{12} + R_9C_6 + R_{10}C_6(1 - A_u)} \doteq 1,03. \quad (2.5)$$

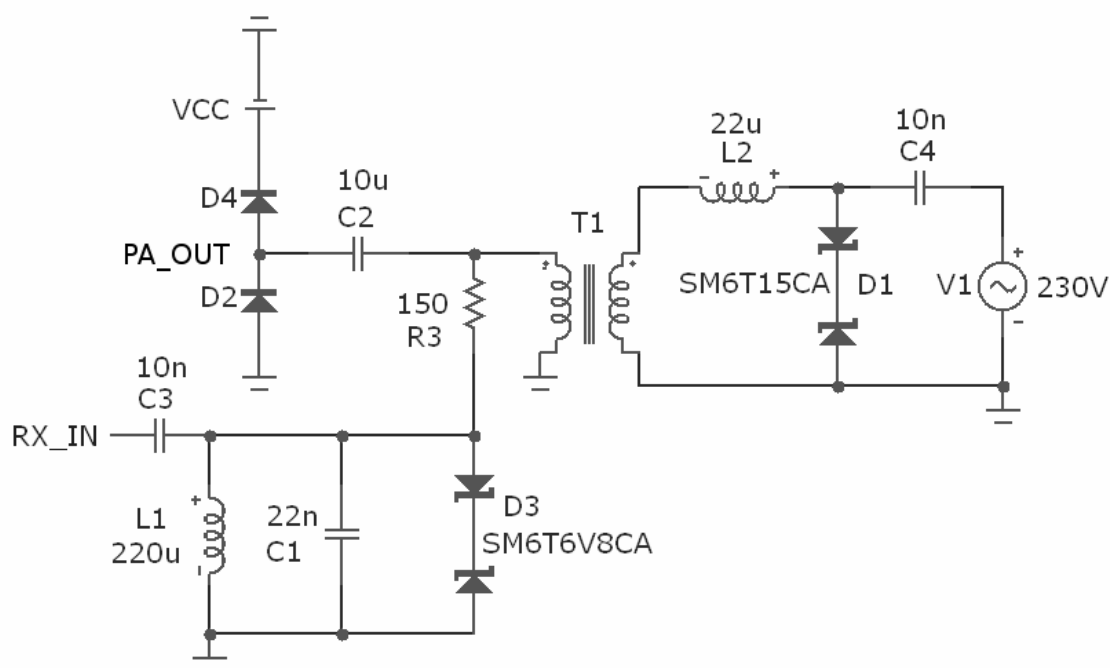
Na následujícím obrázku 2.9 je znázorněna frekvenční charakteristiky tohoto filtru (simulace pomocí programu Micro-Cap 9). Z grafu je patrné že nejvyšší hodnota přenosu (kolem 14 dB) vychází právě pro vysílané frekvence (od 60 do 70 kHz).

2.6.2 Přijímací filtr a vazební obvod

Vzhledem k tomu, že modem je připojen na síťové napětí 230 V/50 Hz a pro přenos dat používáme frekvence v řádu kHz, je zapotřebí účinně potlačit frekvence kolem 50 Hz aniž by došlo k potlačení užitečného signálu a zajistit dostatečné oddělení od napětí 220 V. K tomuto účelu použijeme přijímací filtr a vazební obvod, které jsou na obrázku 2.10).



Obrázek 2.9: Frekvenční charakteristiky přenosového filtru



Obrázek 2.10: Schéma přijímacího filtru s vazebním členem

Přijímací filtr

Schéma filtr můžete vidět na obrázku 2.10, kde jsou opět i hodnoty všech uvažovaných součástek. Je tvořen sériovým spojením rezistoru R3 s paralelním rezonančním obvodem LC. Jedná se tedy o pásmovou propust 2. řádu a jeho přenosová funkce je:

$$A(s) = \frac{\frac{s \cdot L_1 + R_L}{R_3 L_1 C'_1}}{s^2 + \frac{R_3 L_1 C'_1}{R_3 L_1 C'_1} \cdot s + \frac{R_3 + R_L}{R_3 L_1 C'_1}}, \quad (2.6)$$

kde

- R_L je parazitní odporu cívky L_1 (kolem 2Ω).
- C'_1 je parazitní kapacita transilu $D3$ (kolem 2nF).

Střední frekvenci a činitel jakosti filtru můžeme spočítat jako:

$$f_C = \frac{\omega_C}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{R_3 + R_L}{R_3 L_1 C'_1}} \cong \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 (C'_1 + C_1)}}. \quad (2.7)$$

Zanedbáme-li parazitní veličiny můžeme psát:

$$f_C \cong \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_4}} \doteq 72 \text{ kHz}, \quad (2.8)$$

$$Q = \frac{R_3 L_1 C'_1}{R_3 R_L C'_1 + L_1} \cdot \omega_C \doteq 1, 4. \quad (2.9)$$

Je zřejmé, že činitel jakosti a selektivita filtru závisí nejen na hodnotě R_3 , ale také na R_L . Vyšší hodnota R_L vede k nižší selektivitě, zatímco vyšší hodnota R_3 naopak k větší selektivitě.

Filtr byl opět simulován v prostředí Micro-Cap9 a jeho v frekvenční charakteristika je na obrázku 2.11. Z grafu je patrné, že nejvyšší hodnota přenosu je nastavena na frekvenci, kde je očekáván příjem užitečného signálu (pro frekvence od 60 do 70 kHz neklesne pod hodnotu 1 dB).

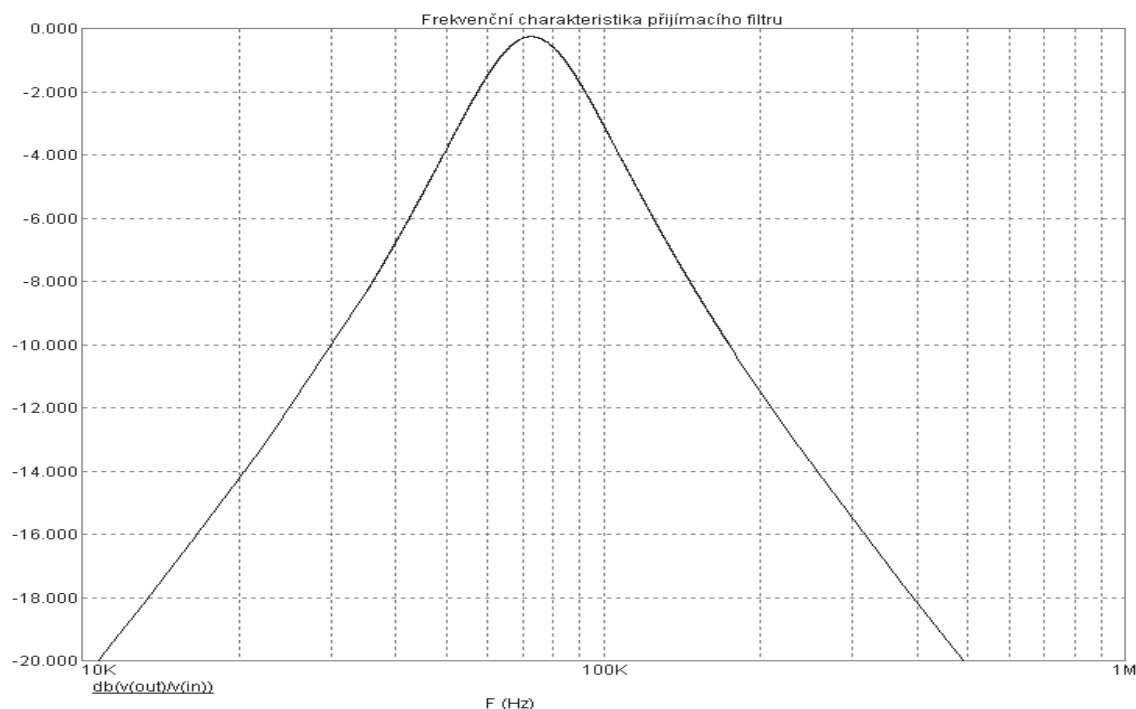
Vazební obvod

Kondenzátor C_2 je použit pro odstranění případné stejnosměrné složky signálu. Signálový transformátor T_1 slouží ke galvanickému oddělení PLC modemu od energetické sítě a jeho přenos je 1:1.

Dioda D_1 (transil) sníží napětí z 230 V na 15 V.

Výkonová cívka L_2 a kondenzátor C_4 tvoří sériový rezonanční obvod nastavený na frekvenci přibližně 72 kHz. Zanedbáme-li indukčnost transformátoru, můžeme rezonanční frekvenci spočítat jako:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_2 C_4}} \doteq 72 \text{ kHz}. \quad (2.10)$$



Obrázek 2.11: Frekvenční charakteristika přijímacího filtru

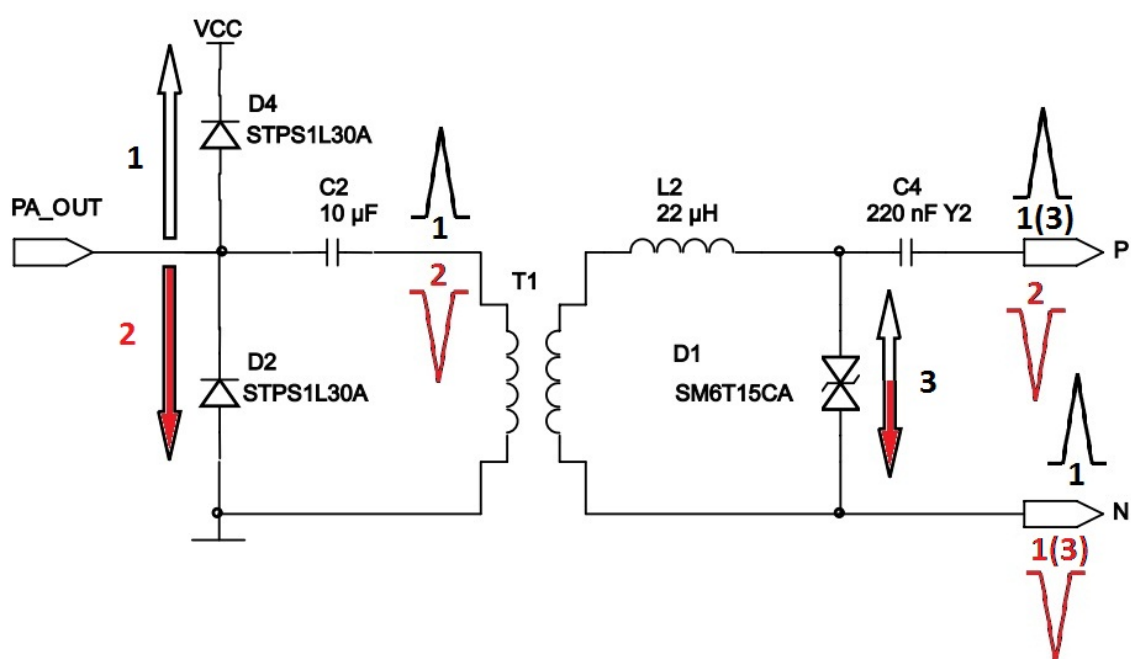
2.7 Přepěťová ochrana

Protože PLC modem může pracovat v různých podmínkách, kromě obytných prostor i ve venkovním či průmyslovém prostředí. Je třeba vstupně-výstupní obvody modemu chránit proti možnému přepětí v síti. Požadavky na odolnost PLC modemu pro měření spotřeby (metering application) ve frekvenčním pásmu 9-95kHz, jsou uvedeny v evropské normě EN50065-2-3, která odkazuje na normy EN61000 a ENV50204. Tyto standardy zahrnují požadavky na přepěťové testy, jak v běžném, tak v diferenčním režimu ($U_{max} \pm 4kV$, rise time $t_R = 1,2\mu s$, hold time $t_H = 50\mu s$) a pro kratší pulzy ($U_{max} \pm 2kV$, $t_R = 5ns$, $t_H = 50ns$, frekvence opakování $5kHz$) [6].

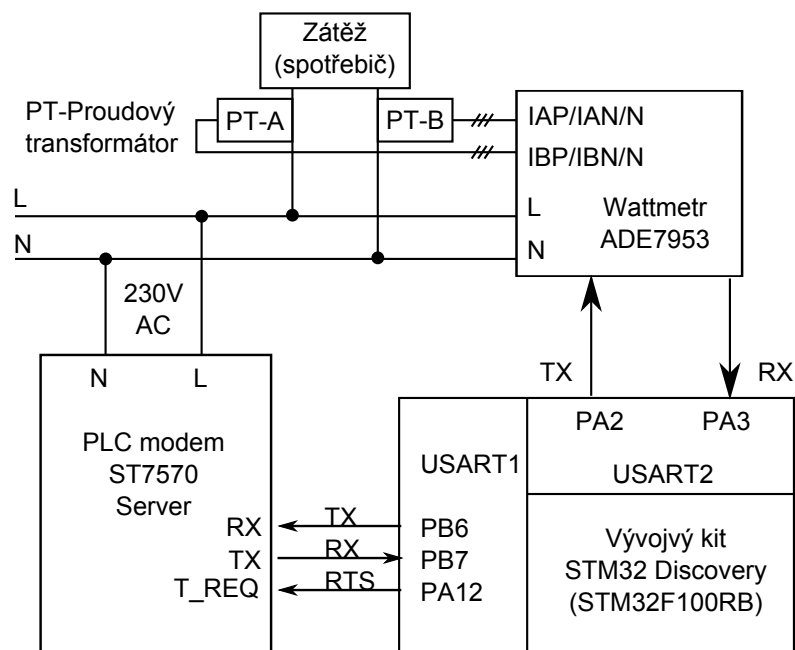
Pro tak vysoké hodnoty přepětí je třeba použít kondenzátor C4 v provedení Y2, určený pro pulzy až $5kV$).

Na obrázku 2.12 je vidět ochrana proti „špičkám“ v síti. Schottkyho diody D2 a D4 jsou schopné vstřebat rychlé přechodné poruchy (přepětí v síti znázorněné v obr. 2.12 pulzy s čísly 1 a 2).

V případě, kdy je charakter rušení diferenciální a rozdíl napětí je vyšší než $15V_{pp}$, zareaguje obousměrná Transil dioda D1. Jedná se o robustní ochranu, která je schopna absorbovat většinu rušení v síti (v obr. 2.12 pulzy s čísly 3).



Obrázek 2.12: Ochrana proti „špičkám“ v síti



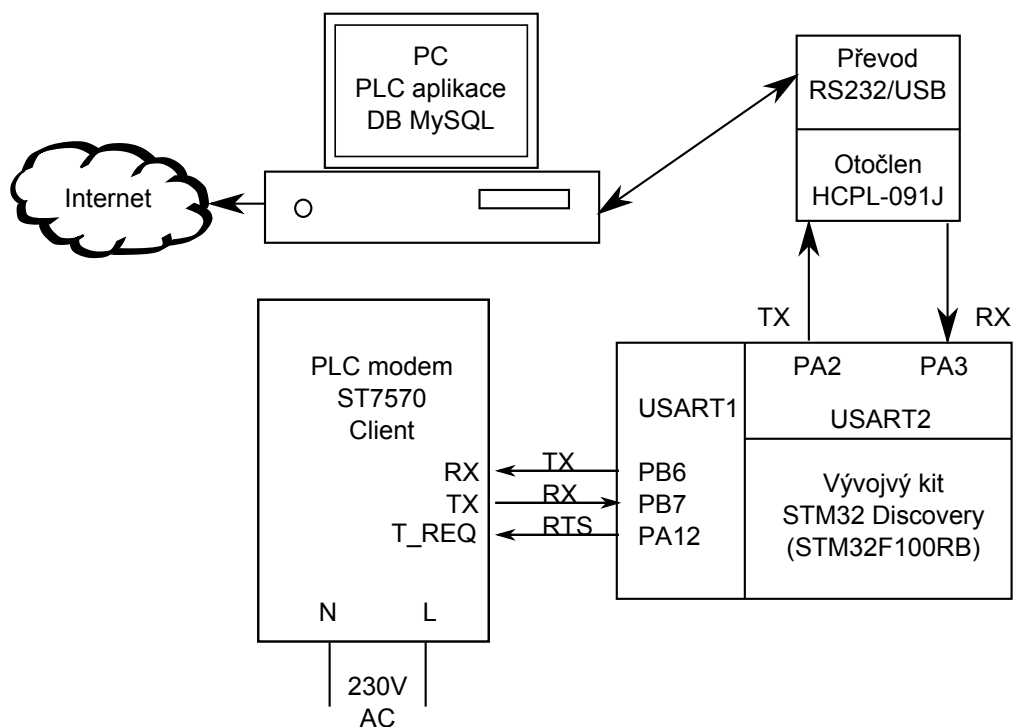
Obrázek 3.1: Blokové schéma vysílací části

3 REALIZACE PRVKŮ PLC SÍTĚ

Vzhledem k náročnosti konstrukce celého zařízení byla zvolena modulární architektura sestavená z PLC modemu, wattmetru nebo PC, vývojového kitu STM32 VLDISCOVERY, optického oddělení, převodníku RS232/USB a napájecího zdroje. Rozdělení na bloky (samostatné DPS) sice přináší i nevýhody, jako je větší velikost zařízení, vyšší cena a nutnost propojování vodičů. Podstatnou výhodou je však možnost „oživování“ jednotlivých bloků samostatně (snazší hledání případných chyb), jednoduchá záměna bloku v případě změny v návrhu, nebo při jeho zničení. Rozdělení na bloky je tedy vhodné pro výrobu prototypu. V následující části budou popsány jednotlivé moduly využívané při realizaci PLC modemů a wattmetru.

Vysílací část Na obrázku 3.1 je znázorněno zjednodušené blokové schéma (bez napájecího zdroje) vysílací části. Pro řízení je využit vývojový kit firmy STMicroelectronics, konkrétně STM32VLDISCOVERY. Slouží k vyčítání hodnot, prostřednictvím rozhraní USART, z registrů wattmetru ADE7953 (IO firmy Analog Devices) a předání těchto dat PLC modemu v režimu server, který je pomocí S-FSK modulace umožňuje přenést sítí NN k přijímacímu PLC modemu.

Přijímací část Na obrázku 3.2 je zjednodušené blokové schéma (bez napájecího zdroje) přijímací části. Pro řízení je využit stejný vývojový kit jako v případě vysílací části. Slouží k vyčítání hodnot, prostřednictvím rozhraní USART, z PLC modemu



Obrázek 3.2: Schéma propojení bloků pro příjem dat – datalogger

v režimu klient a následnému předání těchto dat do počítače kde jsou uloženy do databáze MySQL a sdíleny prostřednictvím internetu. Zde je nutné kromě převodníku z RS232 na USB (např. s IO FT232BM) hlavně použít optické oddělení (optočlen s OZ např. HCPL-091J, tranzistor má příliš dlouhou dobu přechodu z log1 na log0).

3.1 Popis jednotlivých bloků

V následující části budou popsány jednotlivé části použité při realizaci PLC sítě.

3.1.1 Wattmetr

Modul wattmetru je postaven na IO ADE7953, dle doporučeného zapojení výrobce. Na obrázku 3.4 je znázorněno jeho blokové schéma. K návrhu layoutu DPS pro wattmetr i PLC modem byl použit editoru plošných spojů Eagle 6.0.0. Výsledný (realizovaný) návrh je na obrázku 3.3.

Na tomtéž obr. 3.3 je znázorněno připojení potřebných vodičů. Na svorky N a L se připojuje síťové napětí NN, které slouží k určení fázového posuvu mezi proudem a napětím, k synchronizaci průchodu nulou a k měření okamžité hodnoty napětí v síti (maximální hodnota měřeného napětí je 500V RMS - efektivní, lze upravit napěťovým děličem). Dále je třeba připojit proudové transformátory, případně jiný

prvek převádějící proud na napětí. Na vstupních svorkách IAP a IBP by mělo být maximální střídavé napětí napětí 500mV RMS. Rozsah měřeného proudu tedy záleží na použitém převodníku proud/napětí (případně by se dal rozsah upravit i děličem napětí). Při použití proudového transformátoru (AC1010 firmy Talema) vychází maximální proudový odběr měřeného spotřebiče 5A RMS.

Napájecí napětí je stabilizované pomocí IO LM1117 na 3V3 a je tedy možné použít 5 až 10V. Všechny jumpery kromě červeně vyznačených jsou v běžném režimu otevřeny.

Z konektoru MLW10 je možné vyvést volitelný frekvenční výstup, ten je třeba nastavit zápisem do registru na adrese 0x107 (např. hodnota 0x90 nastaví závislost frekvence výstupu CF1 na součet aktivního příkonu kanálu A+B a CF2 na příkonu kanálu A). Pro optimální nastavení wattmetru je doporučeno vždy po jeho zapnutí zapsat hodnotu 0xAD do registru na adrese 0xFE (povolení zápisu do reg. 0x120) a 0x30 do reg. na adrese 0x120. Více informací o nastavení registrů a způsobu komunikace (časování, formát zpráv pro čtení a zápis do reg.) je možné zjistit v datashetu ADE7934 [1].

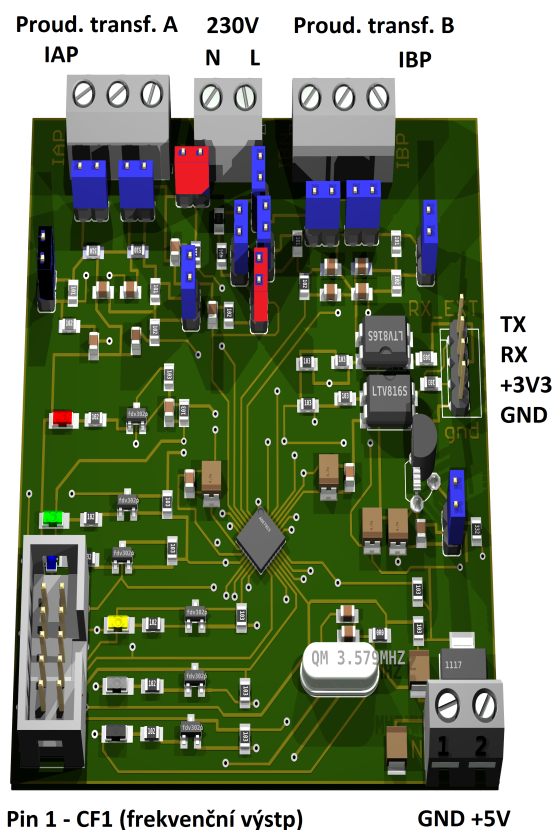
Poslední konektor (jednořadá lišta) slouží k připojení externího procesoru, v našem případě STM32F100RB. Pozor, pokud bychom chtěli připojit vývojový kit k PC a zároveň k wattmetru je nutné tento spoj opticky oddělit (svorka N je propojena červeným jumperem na svorku GND! Opět je nutné použít optočlen s OZ (po dlouhém hledání chyby při neúspěšné komunikaci s wattmetrem jsem zjistil, že data jsou za obyčejným optočlenem s tranzistorem kvůli pomalému rozpínání tranzistoru reprezentována chybně.

3.1.2 PLC modem

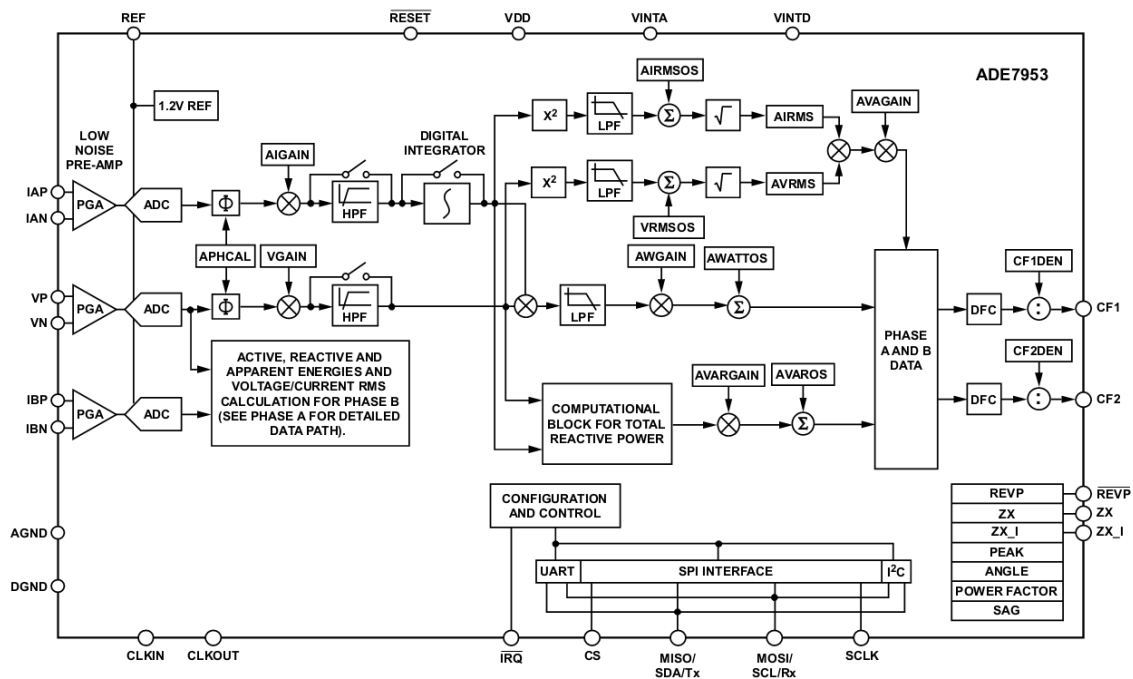
Realizovaný PLC modem a popis jeho připojení do sítě je znázorněno na obrázku 3.5. Vzhledem k připojení síťového napětí 230V/50Hz je opět na místě připomenout nutnost optického oddělení při připojení k PC. Všechny jumpery jsou při běžném režimu uzavřeny.

Tří-pinový konektor slouží k připojení napájecího zdroje. Lze použít i běžný spínaný zdroj, ale výrobce doporučuje např. zdroj ALTAIR04-900, který minimalizuje zavádění dalšího šumu do sítě (díky spínání v širokém rozsahu frekvencí), další doporučení se týká zařazení EMI filtru na vstup modemu (dvě tlumivky s hodnotou 470uH, jedna na svorce N a druhá na L).

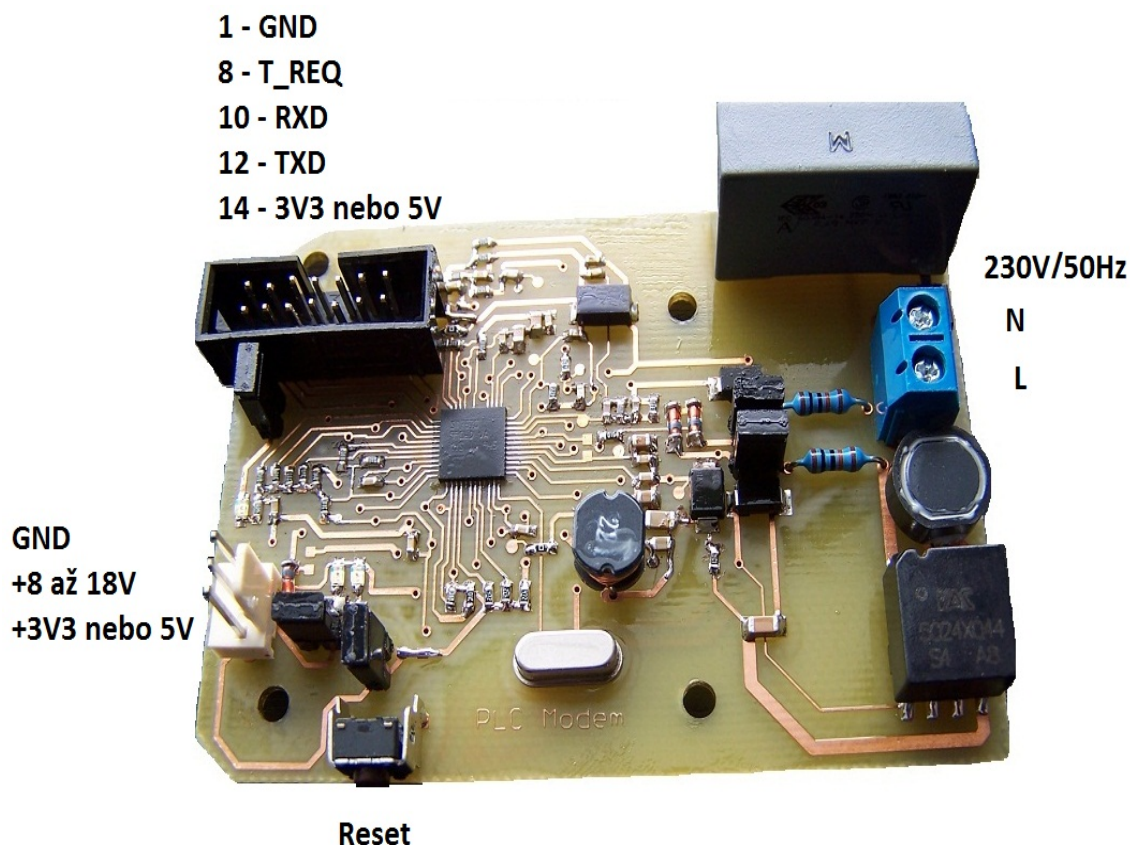
Konektor LMW14 se připojuje přes optočlen a případně převodník RS232/USB k PC. Pro ověření správné funkce modemu slouží aplikace od výrobce modemu: EVAL7570-1 graphic user interface. Pomocí které je možné nastavit veškeré parametry modem (uskutečnit testovací přenos dat). Dále je možné nastavit modem



Obrázek 3.3: 3D náhled wattmetru (vytvořený pomocí aplikace Eagle a POV-Ray)



Obrázek 3.4: Blokové schéma IO ADE7953 [1]



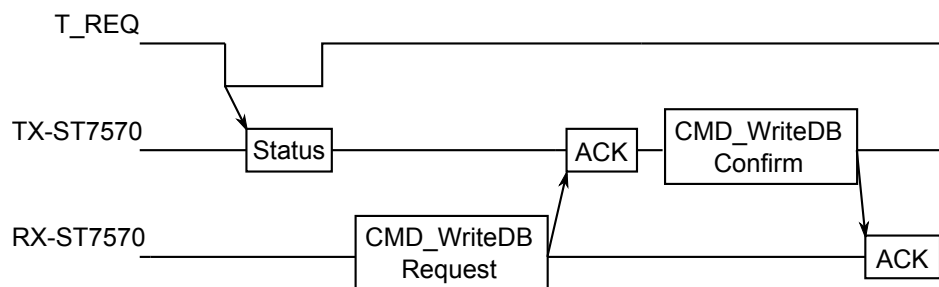
Obrázek 3.5: Popis I/O pinů a napájení PLC modem-ST7570

do testovacího režimu, kdy vysílá na výstup (do sítě) frekvenci reprezentující log0, log1, či obě současně, to nám umožňuje pomocí osciloskopu zjistit tvar a amplitudu sinusovky použité při modulaci S-FSK.

Inicializace modemu

Modem je v továrním nastavení v režimu „Idle“ (nečinný). Při odpojení napájení se opět vrací do základního nastavení a je vždy nutné zopakovat úvodní inicializaci při které se nastavují důležité parametry přenosu. Hlavní nastavení se provádí zápisem do MIB (Management Information Base) s indexem 0xA1.

Na obrázku 3.6 je znázorněna posloupnost zápisu (obdobným způsobem probíhá veškerá komunikace s modemem, bližší informace naleznete v uživatelském manuálu [6]). Začátek komunikace vždy začíná signálem RTS (Requist To Send – externí procesor oznamuje zahájení vysílání stažením pinu T_REQ do log0). Následuje odpověď modemu zprávou status (oznamuje připravenost/nepřipravenost modemu k příjmu). Je-li modem připraven a zpráva od externího procesoru má v pořádku CRC, tak ji modem potvrdí zasláním ACK (0x06) a dále odpoví zprávou CMD_WriteDBConfirm (totožná jako přijatá zpráva CMD_WriteDBRequest, pouze s jiným kódem příkazu



Obrázek 3.6: Sekvence zpráv při konfiguraci modemu

| STX | Délka | Kód příkazu | Data | | | | | | | | | CRC |
|------|-------|-------------|-----------|-----|----|----------|----|----|-----|-------|------|-----|
| | | | MIB index | Mód | ZC | Zesílení | f0 | f1 | PAD | Layer | Ctrl | |
| 0x02 | 0x13 | 0x41 | 2B | 1B | 1B | 1B | 3B | 3B | 3B | 1B | 1B | 2B |

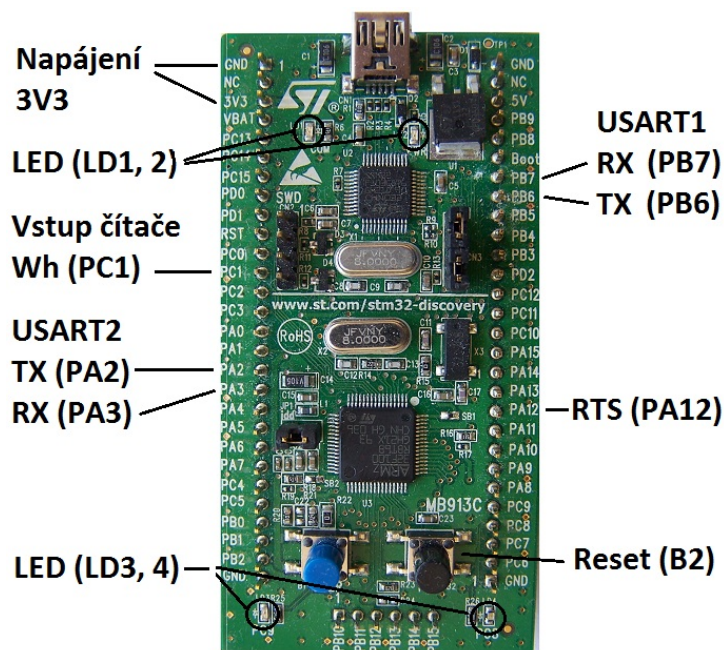
Obrázek 3.7: Formát rámce CMD WriteDBRequest

a přepočteným CRC). Proběhne-li inicializace v pořádku rozsvítí se červená LED indikující připravenost modemu k příjmu dat. Struktura rámce `CMD_WriteDBRequest` pro úvodní inicializaci modemu je na obrázku 3.7.

Význam jednotlivých polí inicializačního rámce: První bajt STX je vždy 0x02. Délka v bajtech od pole kód až po CRC včetně). Existují 3 typy příkazového kódu: žádosti od externího procesoru (Request commands), potvrzení/chyba (Confirm/Error commands - zasílá modem jako odpověď) a nevyžádané příkazy zasílané modemem externímu procesoru (Indication commands). Například pro přístup do MIB se používá kód příkazu 0x41. MIB index určuje kterému objektu patří následující data. V případě konfigurace základních parametrů je MIB index 0xA1. Následuje volba módu (klient/server/monitor... a volba přenosové rychlosti 1200/2400 kb/s), ZC (zero-crossing) závisí na frekvenci v síti NN 50/60 Hz. Dalším důležitým parametrem je zesílení (-31 až 0 dB), frekvence použitá pro vysílání log0 a log1, layer (volba mezi využitím vrstvy MAC nebo pouze fyzické vrstvy) a ctrl umožňuje povolit/zakázat řízení omezení výstupního výkonu. Každý rámec končí polem kontrolního součtu (součet od pole délka až po poslední bajt dat).

3.1.3 Vývojový kit STM32VLDISCOVERY

Ke komunikaci s PLC modemem a wattmetrem je třeba použít externí procesor. Vhodnou variantou je například STM32F100RB, který je (za přijatelnou cenu) k dostání osazený na DPS, jako vývojový kit i s programátorem ST-Link. K nahrání aplikace do procesoru a debugování slouží USB kabel a vývojové prostředí Keil uVision4.



Obrázek 3.8: Popis využitých pinů STM32VLDISCOVERY

Procesor STM32F100RB disponuje pamětí Flash 128 kB, RAM 8 kB v 64-pinovém pouzdře LQFP a vyžaduje napájecí napětí 3V3.

3.2 Aplikační část

Pro úspěšnou komunikaci mezi zařízeními bylo třeba vytvořit aplikaci pro procesor řídící PLC modem i wattmetr, dále vyřešit příjem dat, jejich ukládání a prezentování pomocí PC. Aplikace, které toto řeší jsou popsány v následující části.

3.2.1 Aplikace pro externí procesor STM32

Aplikace je psána ve vývojovém prostředí Keil uVision4 a umožňuje sestavení sítě pro sběr dat. V našem případě se jedná o síť složenou ze 2 uzlů (server a klient). Zdrojové kódy jsou shodné pro klienta i server, před přeložením programu je tedy třeba zvolit režim PLC modemu. Ve zdrojovém kódu odkomentujeme jednu z funkcí (`init_server` nebo `init_client()`). K přepínání mezi režimy by bylo možné využít i některé z vstupně/výstupních pinů a použít dip-switch. Po zapnutí jednotky dochází k inicializaci hardwaru a síťových parametrů.

Jedná-li se o klienta, tak po inicializaci vysílá zprávu „slot synchronization“ (povoluje serveru vysílat). Dále čeká na zprávu od serveru, pokud nepřijde do 1

minuty zasílá synchronizační zprávu znovu. Jakmile dorazí zpráva od serveru ihned ji předává PC ke zpracování.

V případě směrovače opět proběhne inicializace HW a sítě. Po úspěšném přihlášení do sítě (přijetí zprávy „slot synchronization“ od klienta) jsou data z registrů wattmetru ve zvoleném intervalu čtena a odeslána klientovi.

Struktura aplikace

V následující části bude popsána hlavní funkce aplikace `main(void)` a její struktura. Na obrázku 3.9 je znázorněn vývojový diagram inicializační části aplikace. Tato část se provádí pouze při zapnutí/restartu vývojového kitu. Vývojový diagram hlavní („nekonečné“) smyčky je na obr. 3.10.

Po zapnutí/restartu jednotky probíhají tyto funkce:

- HW inicializační funkce – dojde k inicializaci potřebných HW prostředků jako jsou signalizační LED, USART, externí přerušování, řízení přerušování, časovač. `HW_init()`, `USART_init()`, `TIMER_HW_Init_Systick()`, `EXTI_Configuration()`, `NVIC_Configuration_PLM()`, .
- `init_client()` nebo `init_server()` – výběr režimu PLC modemu jako klient/server. Dojde k nastavení potřebných proměnných dle zvoleného režimu. V případě, že je zvolen režim server, tak zároveň inicializuje přes USART2 potřebné registry wattmetru.
- `CMD_WriteDBRequest(0xA1)` – Přes USART1 nastaví MIB objekt 0xA1 – konfigurace modemu. Pokud je zpráva `CMD_WriteDBRequest` PLC modemem akceptována odpoví potvrzovací zprávou ACK a pokračuje se na další f-ci. V opačném případě probliknou LED LD3 (zelená) a LD4 (modrá) a opět se odešla zpráva s údaji pro konfiguraci modemu.
- `CMD_WriteDBRequest(0x01)` – Přes USART1 nastaví MIB objekt 0x01 – MAC adresu modemu

Dále následuje („nekonečná“) smyčka, to znamená že se počítá se společným napájením externího procesoru, PLC modemu a případně wattmetru. Pokud odpojíme od napájení pouze modem, musíme po jeho připojení provést reset procesoru STM32, jinak nedojde k potřebné inicializaci zařízení.

Server

Je-li jednotka v režimu server pak prostřednictvím rozhraní USART2 vyšle žádost o čtení z příslušných registrů wattmetru (`watt_read()`). Pokud wattmetr odpoví,

tak jsou tyto data uložena do vyrovnávací paměti (`buffer()`), přepočítá se kontrolní součet rámce (CRC) a přes USART1 je odeslán rámec `CMD_Data Request` (`CMD_snd_MAC_DataRequest()`). Při každém příjmu dat přes USART blikne zelená a při vysílání modrá LED.

Server má navíc propojen I/O pin PC1 s pinem wattmetru CF1, který je nastaven na generování pulzů s frekvencí závislou na příkonu připojeného spotřebiče el. energie. Společně s hodnotou okamžitého proudu a okamžitým příkonem spotřebiče posíláme ve zprávě `CMD_Data Request` i počet přijatých pulzů. Dorazí-li data od PLC modemu (USART1) a MAC adresa příjemce obsažená v rámci se shoduje s adresou přijímací jednotky (server), kontroluje se obsah dat rámce a obsahuje-li kód RST, dojde k vynulování čítače spotřebované energie ve watthodinách. Nakonec procesor „čeká“ ve zpoždovací smyčce 1 sekundu a celý cyklus se opakuje.

Klient

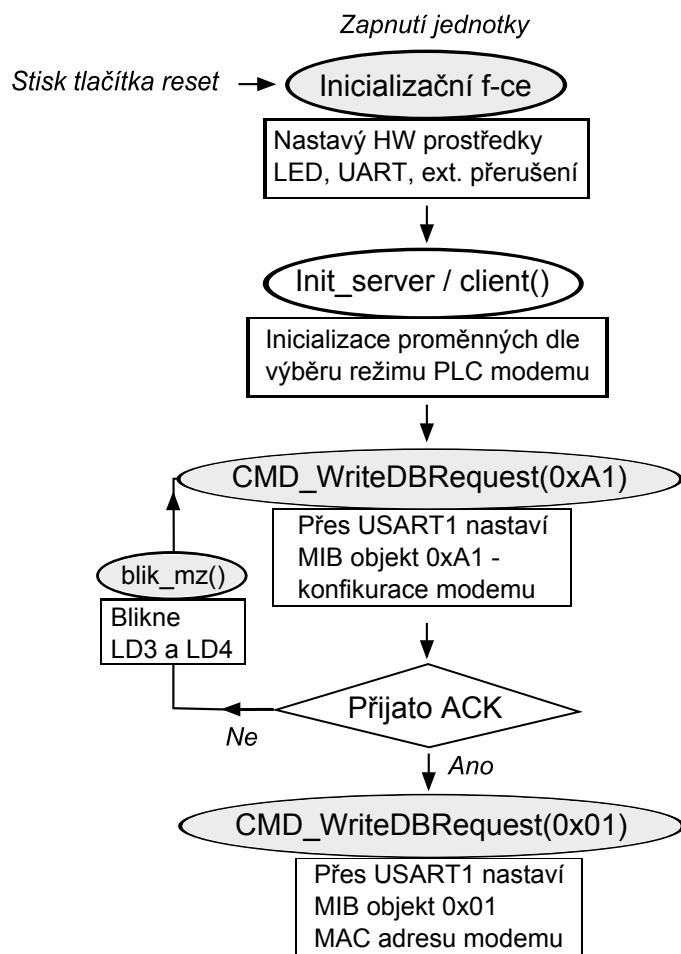
V případě, že je nastaven režim klient, se také kontroluje jestli přišla nějaká data na USART2, ale v tomto případě zde není připojen wattmetr, ale PC a přijatá data (instrukce pro jednotku serveru) se opět předají v rámci `CMD_Data Request` PLC modemu (USART1). Při příchodu dat z PLC Modemu dojde k jejich přeposlání do PC. Pokud nejsou přijata žádná data déle než minutu, tak je znovu serveru poslán rámec synchronizace. Smyčka opět končí vteřinovým čekáním a celý cyklus se opakuje.

3.2.2 Aplikace pro čtení dat ze sériového portu a zápis do DB

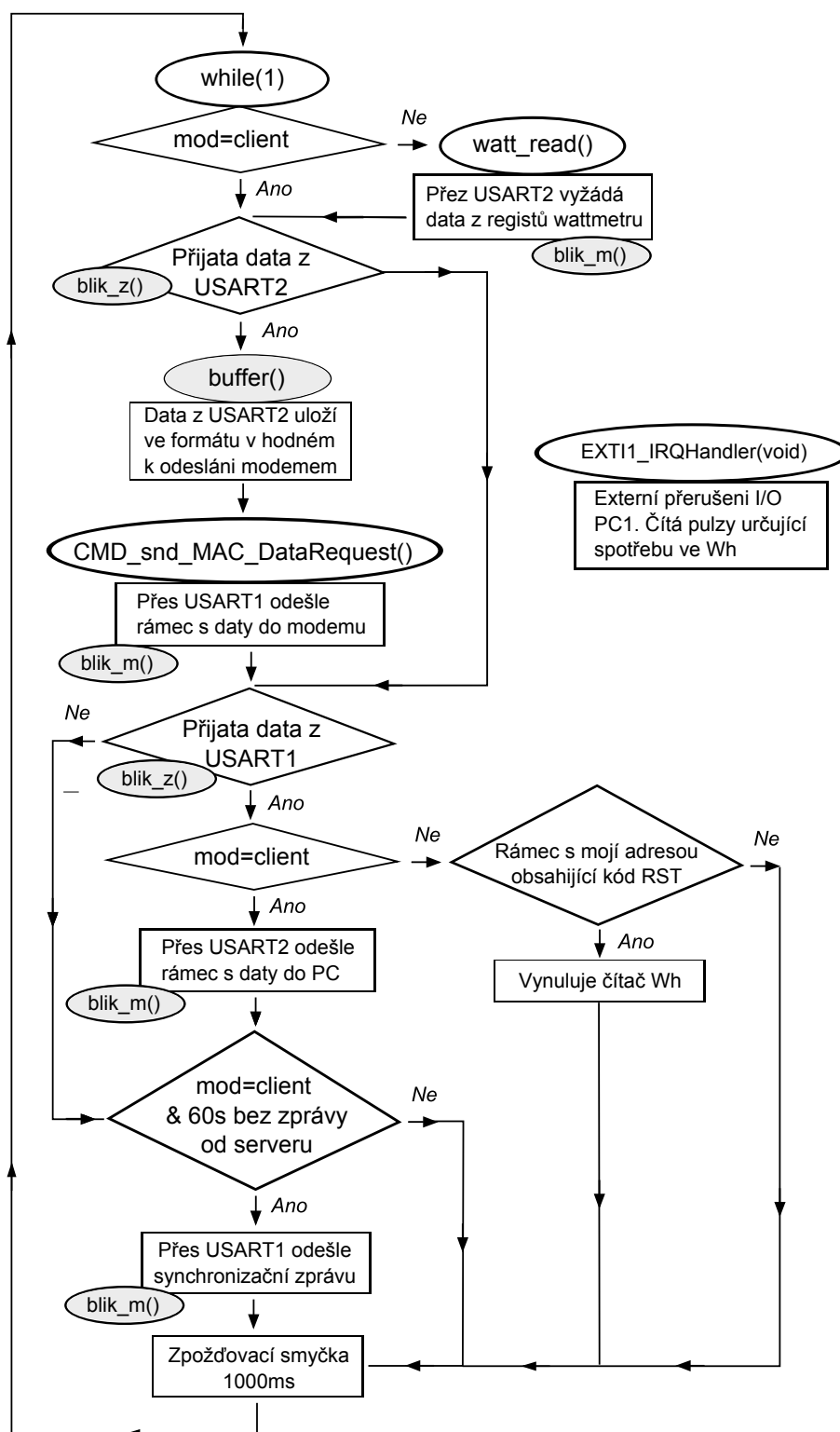
Chceme-li data z jednotlivých PLC modemů uchovávat a dále zpracovávat, je zřejmě nejvhodnější použít nějakou databázi. Jedním z nejpoužívanějších – a pro nekomerční účely volně šiřitelným – je databázový server MySQL. Výhodou MySQL databázového serveru je i jeho velmi snadné nasazení do internetu, které je z velké části realizováno prostřednictvím scriptovacího jazyku PHP působícího na straně serveru. K instalaci je možné použít balíček XAMPP 1.7.0 ¹, vhodný ke zprovoznění testovacího serveru, obsahuje mimo jiné instalace: Apache 2.2.11, MySQL 5.1.30 (Community Server), PHP 5.2.8. Bylo tedy třeba vytvořit databázi s názvem `wattplc` a čtyřmi tabulkami: `senzor1-senzor4` do kterých budeme ukládat potřebná data (čas, proud, ...).

Tato aplikace je psána ve vývojovém prostředí Delphi 7.0 verze Enterprise, které je z velké části založeno na použití komponent.

¹ Dostupné z URL: <http://www.apachefriends.org/en/xampp-windows.html>



Obrázek 3.9: Vývojový diagram aplikace pro STM32VLDISCOVERY – inicializace



Obrázek 3.10: Vývojový diagram aplikace pro STM32VLDISCOVERY – „nekonečná“ smyčka

Řešení příjmu dat pomocí COM portu

První problém, který bylo třeba řešit, byl přístup k sériovému rozhraní, ke kterému se dá přistupovat i bez pomocných komponent přes Windows API funkce (v případě OS Windows XP). Je to ale dost složité. K našemu účelu se hodí freewarový balíček TMS Async32 (další často používané balíčky: Varian Async 32, Comport, CiaComPort), který obsahuje nevizuální komponentu *VaComm*². Ta umožňuje mimo jiné přijímat data ze sériového portu, a to takovým způsobem, že nemusíme opakovaně testovat, zda nějaká data přišla, ale při příchodu dat vyvolá událost `VaComm1RxChar()`.

Instalace balíčku TMS Async32

Stačí zkopírovat soubory komponenty do zvoleného adresáře. Přidání komponenty do vývojového prostředí se provede otevřením souboru s příponou `dpk`, ve kterém se nachází veškeré potřebné informace o balíčku. Otevře se nové okno s informacemi a možnostmi nastavení balíčku, klikneme na `Install`. Poté přidáme cestu k souborům balíčku. Záložka `Tools / Environment Options / záložka Library` a zde doplníme cestu do `Library path`.

Použití komponenty *VaComm*

Po vložení komponenty `VaComm` na formulář nastavíme její vlastnosti následujícím způsobem:

- `AutoOpen = False`,
- `Baudrate = 4200` (přenosová rychlost = 4200 kb/s),
- `Databits = db8` (počet datových bitů v jednom rámci = 8),
- `DeviceName = COM6` (číslo portu = COM6),
- `Parity = paNone` (nastaví paritu, v tomto případě žádná),
- `Stpbits = sb1` (počet stop bitů = 1).

V této aplikaci je po spuštění otevřen port COM1, výběr jiného portu (COM1-COM4) se provádí pomocí komponenty `ComboBox`. Pokud je port obsazen nebo neexistuje, vypíše se chybové hlášení ošetřené procedurou `UsetreniVyjimiek()`.

Přijatá data jsou ukládána do vyrovnávací paměti (bufferu). Ke zpracování dat se jako nejvhodnější ukázalo použít metodu `VaComm1.ReadText` uvnitř události `VaComm1.RxChar()`, která načte veškerá data z bufferu, vrátí je jako řetězec (string) a buffer vymaže. Událost `VaComm1RxChar()` nastane vždy při doručení rámce. Nastane-li

²Ke stažení zde: <http://www.tmssoftware.com/TMSA32.ZIP>.

událost `VaComm1RxChar()`, uloží se řetězec délky x znaků (x = tolik znaků, kolik obsahuje jedna kompletní zpráva poslaná PLC modemem) do proměnné `SerPort`. Máme tedy k dispozici potřebná data ve vhodném formátu k dalšímu zpracování.

Práce s databází MySQL

Delphi 7 obsahuje databázovou knihovnu `dbExpress` (DBX), která pracuje jak pod OS Linux, tak pod Windows. `dbExpress` – nabízí zjednodušený přístup a nevyžaduje téměř žádnou konfiguraci počítačů koncových uživatelů. Dá se použít pro řadu databází: např. Oracle, DB2, Interbase, MySQL, MSSQL (pro všechny je program použitelný téměř bez změn). Přístup je možný pouze k SQL serverům, nemá žádnou vyrovnávací paměť a zajišťuje jen jednosměrný přístup k datům. Potřebujeme-li vytvořit uživatelské rozhraní pro úpravu dat, máme možnost využít komponenty `ClientDataSet` a `Provider`, které zajišťují obsluhu vyrovnávací paměti a zpracování SQL dotazů.

Pro přístup a práci s databází jsou použity následující komponenty z knihovny `dbExpress`:

- `SQLConnection` – umožňuje navázat spojení se vzdáleným SQL serverem – např. MySQL, MSSQL a nastavuje ovladač pro `dbExpress`. Hlavní vlastnost je `Params` (zde nastavujeme typ SQL serveru/login/databáze/heslo). Po nastavení vlastnosti `Connected` v object-inspectoru ihned proběhne připojení k serveru. Nastavením vlastnosti `LoginPrompt` na `false` je možno vypnout přihlašovací dialog.
- `SQLQuery` – slouží k vytváření SQL dotazů.

Aby bylo možné v programu zobrazovat aktuální hodnoty uložené v MySQL databázi, je potřeba navázat na výše zmíněné komponenty ještě další komponenty z knihovny `DataAccess`:

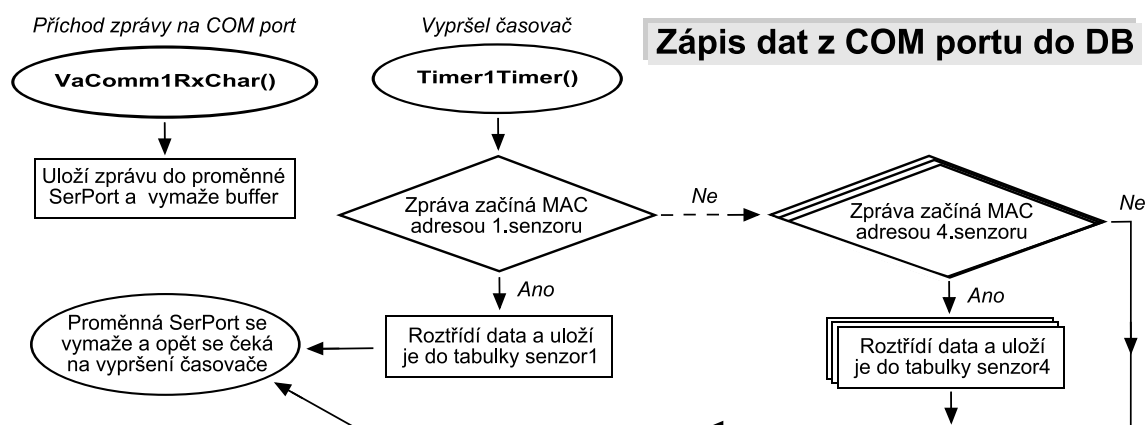
- `DataSetProvider` – v podstatě serverem, spojujícím komponenty `SQLQuery` a `ClientDataSet` (vlastnost `DataSet`).
- `DataSource` – zajišťuje „spojení“ mezi komponentami pro přístup do databáze (`Query`) a komponentami pro uživatelské rozhraní (`DBGrid`).
- `ClientDataSet` – prostředník pro data z MySQL serveru, zpřístupňuje data uložená v paměti vizuálním komponentám. Při použití nástroje `dbExpress`, neprovádí komponenty pro přístup k datům ukládání do paměti cache, o což se stará právě `ClientDataSet`.

Další komponenty jsou již vizuální a nacházejí se v knihovně **Data Controls**:

- **DBGrid** – datová mřížka (tabulka) sloužící ke zobrazování a editaci databázových tabulek (v našem případě pouze ke zobrazování).
- **DBNavigator** – používá se ve spojení s **DBGrid**, umožňuje listovat databází, vložit další záznam (v našem případě pouze listování)...
- **DBChart** – slouží ke zobrazování grafů, po propojení s komponentou **Query** umožňuje vykreslit grafy v závislosti na zvolených hodnotách z databáze [3].

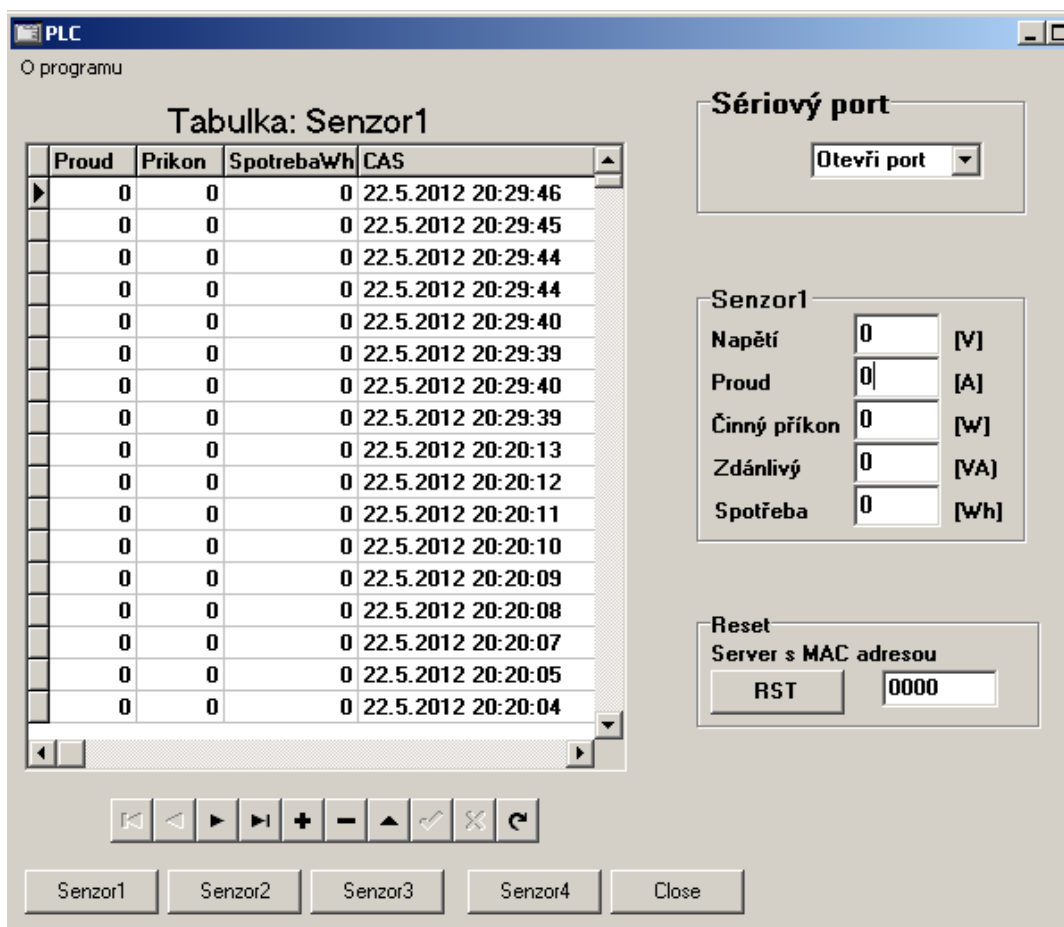
Stačí tedy správně nastavit parametry komponenty **SQLConnection**(typ SQL serveru/login/databáze/heslo), nastavit její vlastnost **Connected** na **true**, propojit s ní komponentu **SQLQuery** (vlastnost **SQLConnection**), aktivovat ji (vlastnost **Active=true**) a již můžeme zasílat MySQL serveru SQL příkazy. Další komponenty jsou použity ke zobrazení dat z databáze.

Hlavní smyčka



Obrázek 3.11: Vývojový diagram – cyklus zápisu dat z COM poru do databáze

Hlavní část programu, tedy roztřídění a uložení dat načtených ze sériového portu do databáze, se opakuje ve smyčce každou sekundu. To je zařízeno díky komponentě **Timer**, jejíž vlastnost **interval** je nastavena na 1000. Každou vteřinu dojde tedy k vyvolání události **Timer1Timer()**, kde se zjistí mají-li data správný formát, roztřídí se a uloží do patřičné tabulky a sloupce v databázi **wattplc**. Vzhledem k tomu, že občas se stávalo, že zpráva (asi jedna zpráva ze sta) byla načtena do paměti ve špatném formátu a následně chybná data uložena do databáze, jsou do zprávy přidány další znaky kromě užitečných dat, které zajišťují synchronizaci. Zkontroluje se tedy, jsou-li všechny značky na svém místě a teprve pak jsou data uložena do databáze.



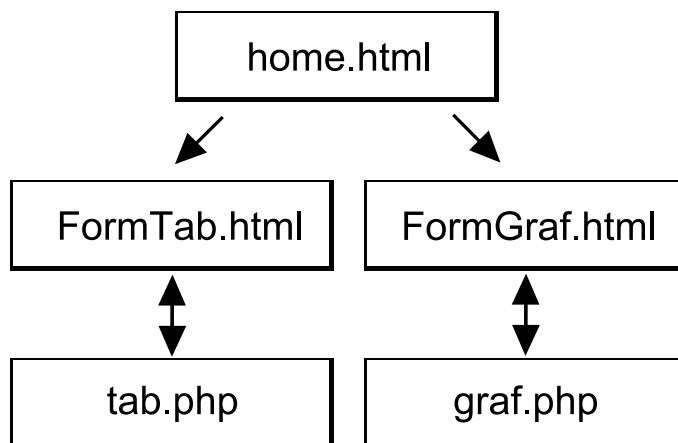
Obrázek 3.12: Aplikace pro čtení dat ze sériového portu

3.2.3 PHP skript pro prezentaci dat na internetu

Nyní tedy máme funkční senzorovou PLC síť a data z jednotlivých senzorů ukládáme do databáze. Dalším krokem je možnost tyto data nějak přehledně prezentovat na internetu. Výsledkem jsou minimalisticky pojaté internetové stránky, které umožňují zobrazit tabulky z databáze ZigBee a taktéž graf závislosti proudu (nebo příkonu či spotřeby) na čase. Komunikace s MySQL serverem je zajištěna pomocí PHP skriptu, ve kterém jsou použity potřebné SQL příkazy.

Struktur stránek

Jak je vidět na obrázku 3.13, je struktura stránek velmi jednoduchá. Na domovské stránce (home.html) si vybereme formulář (FormTab.html nebo FormFraf.html) po jehož vyplnění a odeslání se zobrazí buď tabulky nebo graf. Poté, co formulář vyplníme a potvrdíme tlačítkem odeslat, jsou data poskytnuta php skriptu, na straně serveru jsou data zpracována a následně zobrazena opět na stránce s formulářem.



Obrázek 3.13: Struktura stránek

Graf

Graf je vykreslen pomocí knihovny PHPGraphLib 2.02³. K jejímu použití není třeba žádná instalace stačí vložit na začátek php skriptu `include("phpgraphlib.php")` (v případě, že je knihovna uložena ve stejném adresáři jako náš skript). Po připojení k databázi a uložení potřebných dat do proměnné typu pole (array) se toto pole použije pro vykreslení grafu.

³Ke stažení z <http://www.ebrueggeman.com/phpgraphlib/downloads.php>

Časový interval zobrazených dat

| | Od | | Do |
|---------|---------------------------------|---|---------------------------------|
| Rok: | <input type="text" value="9"/> | - | <input type="text" value="12"/> |
| Měsíc: | <input type="text" value="6"/> | - | <input type="text" value="6"/> |
| Den: | <input type="text" value="17"/> | - | <input type="text" value="18"/> |
| Hodina: | <input type="text" value="19"/> | - | <input type="text" value="20"/> |
| Minuta: | <input type="text" value="40"/> | - | <input type="text" value="0"/> |

Na osu x vynést

- Proud [A] ☒
- Příkon [W] ☐
- Spotřebu [Wh] ☐
-

Velikost grafu a rozsah hodnot

Velikost osy x: [px]

Velikost osy y: [px]

Rozsah hodnot osy x: - [podle zvolené veličiny]

Zvolit rozsah osy x automaticky: ☒

Limit hodnot na ose y:

(zobrazí maximálně zvolený počet hodnot, počínaje prvním záznamem)

PLC modem

- Senzor 1: ☒
- Senzor 2: ☐
- Senzor 3: ☐
- Senzor 4: ☐
-

Obrázek 3.14: Formulář pro zobrazení grafu

ZÁVĚR

V první části této práce (kapitola 1) jsou popsány základní vlastnosti technologie PLC. Krátce je zmíněna její historie a požadavky na PLC. Dále je probrána problematika útlumu a rušení signálu. Zmíněny jsou i příslušné normy, přidělená frekvenční pásma a použitelné modulace. Dle zadání je pozornost věnována především úzkopásmové technologii PLC.

V druhé části (kapitola 2) je představena zamýšlená PLC síť. Dále jsou popsány základní vlastnosti několika dostupných IO určených k realizaci úzkopásmového PLC modemu. Vybraný obvod je probrán podrobněji. Je popsáno jeho analogové rozhraní, přehled funkcí, časování bitů a struktura rámce na fyzické vrstvě. Nakonec je pro vybraný IO na základě doporučení výrobce navrženo kompletní schéma zapojení včetně potřebných filtrů. Vlastnosti těchto filtrů (přijímací, vysílací a vazební obvod) byly ověřeny v simulačním prostředí Micro-Cap 9.

Poslední část práce (kapitola 3) se věnuje realizaci ukázkové PLC sítě. V rámci práce byl podle zadání vybrán vhodný integrovaný obvod k realizaci úzkopásmového PLC modemu. Na základě technické dokumentace výrobce [6] bylo navrženo kompletní schéma PLC modemu s IO ST7570. Dále proběhl návrh desky plošného spoje v aplikaci Eagle 6.0.0. Navržené schéma i DPS jsou zobrazeny v příloze A.2 včetně seznamu součástek A.1. Po samotné realizaci PLC modemů a ověření jejich funkčnosti byl v rámci práce navržen a realizován také modul wattmetru, který slouží jako zdroj dat v rámci senzorové sítě. Pro řízení modemu i wattmetru je nutný externí procesor. Jako řídicí modul byl zvolen vývojový kit STM32 VLDISCOVERY. Ve vývojovém prostředí Keil uVision4 byla tedy napsána aplikace umožňující přenést naměřené hodnoty z wattmetru prostřednictvím sítě NN k přijímacímu modemu a zaslat je na COM port počítače. Zde jsou data pomocí aplikace (psané v prostředí Delphi 7) roztrženy a uloženy do databáze MySQL. Posledním krokem bylo data uložená v DB přehledně prezentovat na internetu prostřednictvím tabulek a grafů. K tomuto účelu byly vytvořeny jednoduché stránky obsahující formulář navázaný na PHP skript, který údaje zadané ve formuláři vyhodnotí a přehledně zobrazí data přijatá z wattmetru.

REFERENCE

- [1] Data Sheet ADE7953 – Single Phase, Multifunction Metering IC with Neutral Current Measurement, *Analog Devices*, 2011. 68 s. Dostupné z URL: <<http://www.analog.com>>.
- [2] ST7537HS1 – HOME AUTOMATION MODEM, *STMicroelectronics*, 1995. 9 s. Dostupné z URL: <<http://www.datasheetcatalog.com>>.
- [3] CANTÚ, Marco: *Myslíme v jazyku Delphi 7: knihovna zkušeného programátora*. GRADA, 2003. 580 s. ISBN 80-247-0694-6.
- [4] ST7538 – Power line FSK transceiver, *STMicroelectronics*, 2003. 30 s. Dostupné z URL: <<http://www.datasheetcatalog.com>>.
- [5] ST7570 – S-FSK power line networking, *STMicroelectronics*, 2010. 27 s. Dostupné z URL: <<http://www.datasheetpro.com>>.
- [6] ST7570 S-FSK power line networking system-on-chip, *STMicroelectronics*, 2010. 64 s. Dostupné z URL: <<http://www.st.com>>.
- [7] ST7590 – Narrow-band OFDM power line networking, *STMicroelectronics*, 2009. 9 s. Dostupné z URL: <<http://www.st.com>>.
- [8] IT700 – Powerline Communication Modem, *Yitran*, 2008. 15 s. Dostupné z URL: <<http://www.yitran.com>>.
- [9] AMIS-49587 – Power Line Carrier Modem, *ON Semiconductor*, 2009. 55 s. Dostupné z URL: <<http://www.onsemi.com>>.
- [10] AMIS-30585 – S-FSK PLC Modem, *ON Semiconductor*, 2008. 17 s. Dostupné z URL: <<http://www.onsemi.com>>.
- [11] AS5501 / AS5502 – Multimode Powerline-Modem, *Austria Mikro Systeme International AG*, 2000. 25 s. Dostupné z URL: <www.datasheetcatalog.com>.
- [12] Vodrážka J.: *Modelování vlastností silových vedení*. Access server [online], poslední aktualizace 29. 01. 2006 [cit. 2. 12. 2010]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz>>.
- [13] Malack J.A., Engstrom J.R. : *RF Impedance of United States and European Power Lines*. IEEE Trans. Electromag. Compat. 1976.

- [14] Steinbauer P. : *Internet po elektrické síti*. [online], poslední aktualizace 12.12.2003 [cit. 4. 12. 2010]. Dostupné z URL: <<http://www.volny.cz/stei/studium/nm/>>.
- [15] Carcelle X. : *Power line communications in practice*. Artech house, 2006. 352 s. ISBN 13: 978-1-59693-335-4.
- [16] Ferreira H.C., Lampe L., Newbury J., Swart T.G. : *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power*. Wiley, 2010. 536 s. ISBN: 978-0-470-74030-9.
- [17] Procházka R.: *Úvod do problematiky přenosové soustavy*. [online], poslední aktualizace 21. 5. 2007 [cit. 4. 11. 2010]. Dostupné z URL: <<http://www.tzb-info.cz/4142-venkovni-vedeni-vvn-i>>.
- [18] CENELEC: *EN50065-1, Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz*. [online], poslední aktualizace 2010 [cit. 6. 11. 2010]. Dostupné z URL: <<http://www.cenelec.eu>>.
- [19] Vančata P.: *Standardizace širokopásmových systémů přenosu po energetickém vedení*. Access server [online], poslední aktualizace 05. 12. 2005 [cit. 1. 12. 2010]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz>>.
- [20] Xiong, F.: *Digital Modulation Techniques*. Artech House Publishers, 2000. 653s. ISBN: 9780890069707.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

PLC Přenos dat po silovém vedení – Power Line Communication, nebo Power Line Carriers

VN Vysoké napětí

VVN Velmi vysoké napětí

NN Nízké napětí

HDO Hromadné dálkové ovládání

QoS Quality of Services

EMC Elektromagnetická kompatibilita

DP Dolní propust

PSD Spektrální výkonová hustotaPower – Spectral Density

VF Vysoko frekvenční

CENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization

AMR Automatic Meter Reading

ASK Amplitude Shift Keying

FSK Frequency Shift Keying

BPSK Binary Phase Shift Keying

DBPSK Differential Binary Phase Shift Keying

QPSK Quadrature Phase Shift Keying

OFDM Orthogonal Frequency Division Multiplexing

UART Universal asynchronous receiver/transmitter

IO Integrovaný obvod

MAC Media Access Control

VoIP Voice over Internet Protocol

SEZNAM PŘÍLOH

| | |
|---|-----------|
| A PLC modem ST7570 | 53 |
| A.1 Seznam součástek | 53 |
| A.2 DPS a schéma: PLC modem, převodník USB/RS-232 | 55 |
| B Wattmetr ADE7953 | 62 |
| B.1 DPS a schéma: Wattmetr ADE7953 | 62 |

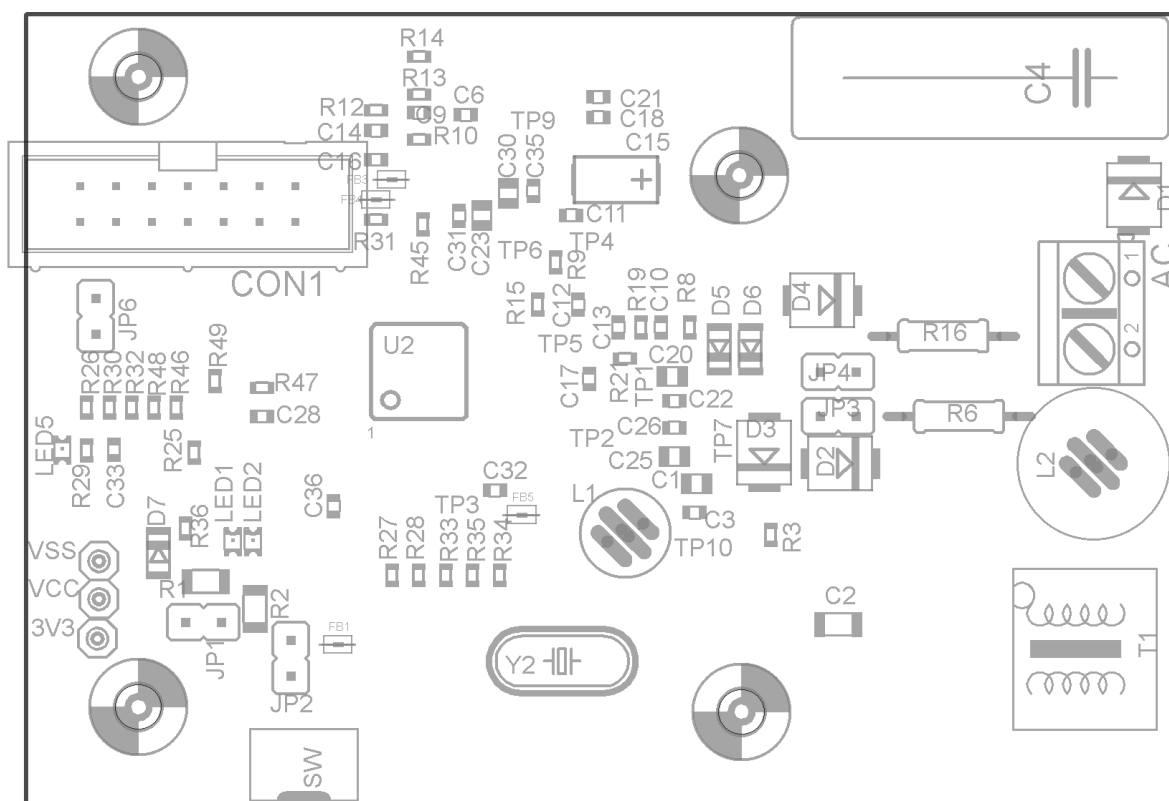
A PLC MODEM ST7570

A.1 Seznam součástek

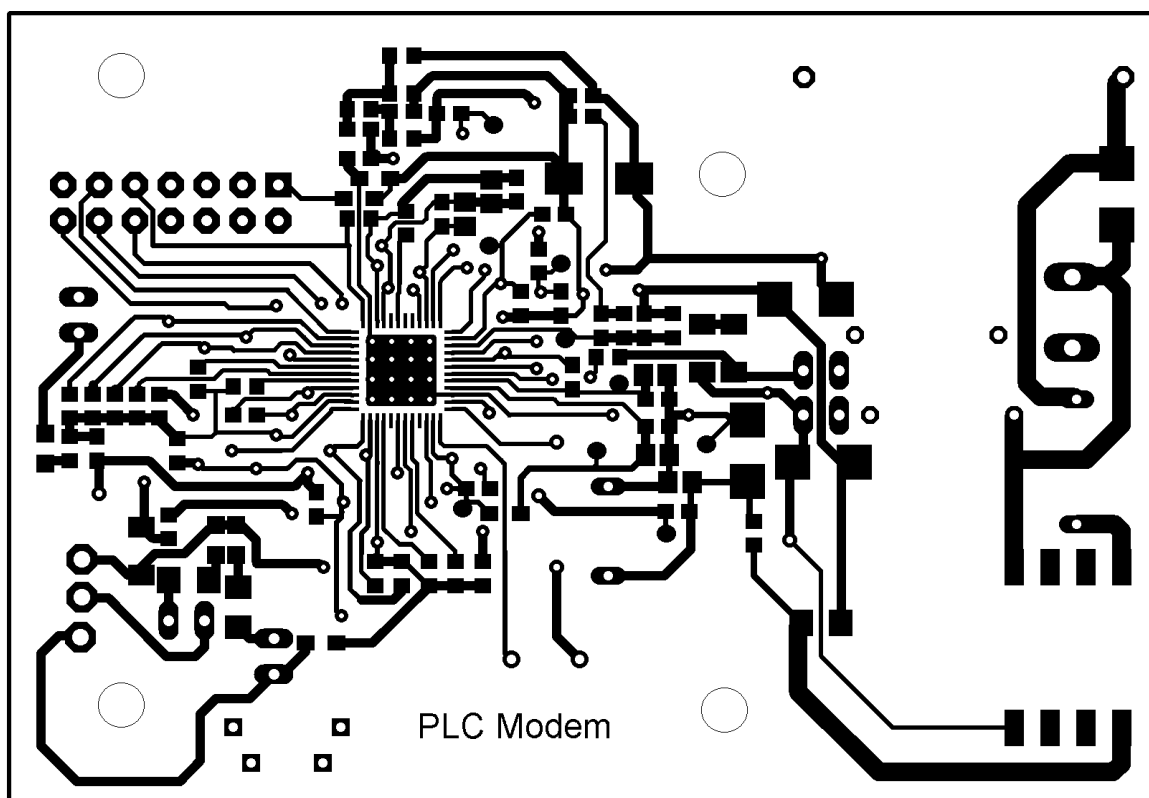
| Označení | Hodnota | Poznámka | Ks |
|--|--------------|--|----|
| CN1, CN2 | Konektor 2x1 | Molex KK 100, 3-pin, prvý úhel, p=2,54 mm (rozteč) | 2 |
| C1 | 22 nF | SMD 0805 X7R 50 V | 1 |
| C2 | 10 μ F | SMD 1206 X5R 25 V | 1 |
| C3 | 10 nF | SMD 0805 X7R 50 V | 1 |
| C4 | 220 nF | Y2 Epcos B32023- B3224K p=22,5 mm | 1 |
| C6, C12 | 120 pF | SMD 0603 NP0 50 V | 2 |
| C14, C18, C21, C22, C26, C28, C31 až C33, C35, C36 | 100 nF | SMD 0603 X7R 50 V | 13 |
| C9 | 1 nF | SMD 0603 X7R 50 V | 1 |
| C10 | 4,7 pF | SMD 0603 NP0 50 V | 1 |
| C11 | 100 pF | SMD 0603 NP0 50 V | 1 |
| C13 | 27 pF | SMD 0603 NP0 50 V | 1 |
| C15 | 47 μ F | SMD 6032 Tantal 16 V | 1 |
| C16, C17 | NC | SMD 0603 | 2 |
| C20, C23, C30 | 10 μ F | SMD 0805 X7R 10 V | 3 |
| C25 | 10 μ F | SMD 0603 X5R 6.3 V | 1 |
| DL1 | Zelená LED | SMD 0805 | 1 |
| DL2 | Žlutá LED | SMD 0805 | 1 |
| DL5 | Červená LED | SMD 0805 | 1 |
| D1 | SM6T15CA | Obousměrná Transil di- oda, SMB | 1 |
| D2, D4 | STPS1L30A | Schottkyho dioda, SMA | 2 |
| D3 | SM6T6V8CA | Obousměrná Transil di- oda, SMB | 1 |

| Označení | Hodnota | Poznámka | Ks |
|---|----------------------|---|----|
| D5, D6 | BZX79C4V7 | Zenerova dioda, SOD80 | 2 |
| D7 | BZX79C3V3 | Zenerova dioda, SOD80 | 1 |
| FB1, FB5 | BLM21PG331SN1 | Ferrite bead, 0805 | 2 |
| FB3, FB4 | 0 | Ferrite bead not mounted, 0805 | 2 |
| JP1, JP4, JP6 | Jumper | Close | 3 |
| J1 | Konektor 7x2 | Flexi konektor, samec, pravý úhel | 1 |
| L1 | 220 μ H | Epcos B82462-A4224K | 1 |
| L2 | 22 μ H | Epcos B82464-A4223K | 1 |
| R1 | 1,5 k Ω | SMD 1206 | 1 |
| R2 | 330 Ω | SMD 1206 | 1 |
| R3 | 150 Ω | SMD 0603 | 1 |
| R6, R7, R16, R17 | 100 k Ω | SMD 1206 1/4 W | 4 |
| R8 | 33 k Ω | SMD 0603 | 1 |
| R9 | 22 k Ω | SMD 0603 | 1 |
| R10 | 5,1 k Ω | SMD 0603 | 1 |
| R12 | 2 k Ω | SMD 0603 | 1 |
| R13, R14 | 47 k Ω | SMD 0603 | 2 |
| R15 | 130 Ω | SMD 0603 | 1 |
| R19, R25 až R28, R30 až R32, R45 až R49 | 10 k Ω | SMD 0603 | 17 |
| R21 | 100 k Ω | SMD 0603 | 1 |
| R33 až R35 | 4,7 k Ω | SMD 0603 | 3 |
| R29 | 820 Ω | SMD 0603 | 1 |
| R36 | NC | SMD 0603 | 1 |
| SW2 | Reset-tlačítko | Pravý úhel | 1 |
| T1A | Line transformer - A | VAC 5024-X044 | 1 |
| T1B | Line transformer - B | WE 750-510-231 / TDK SRW13EP-X05H002 | 1 |
| U2 | ST7570 | SoC, QFN48 | 1 |
| U3 | HCPL-091J | Optočlen, 16-pin SOIC | 1 |
| Y2 | 8 MHz | HC49U | 1 |

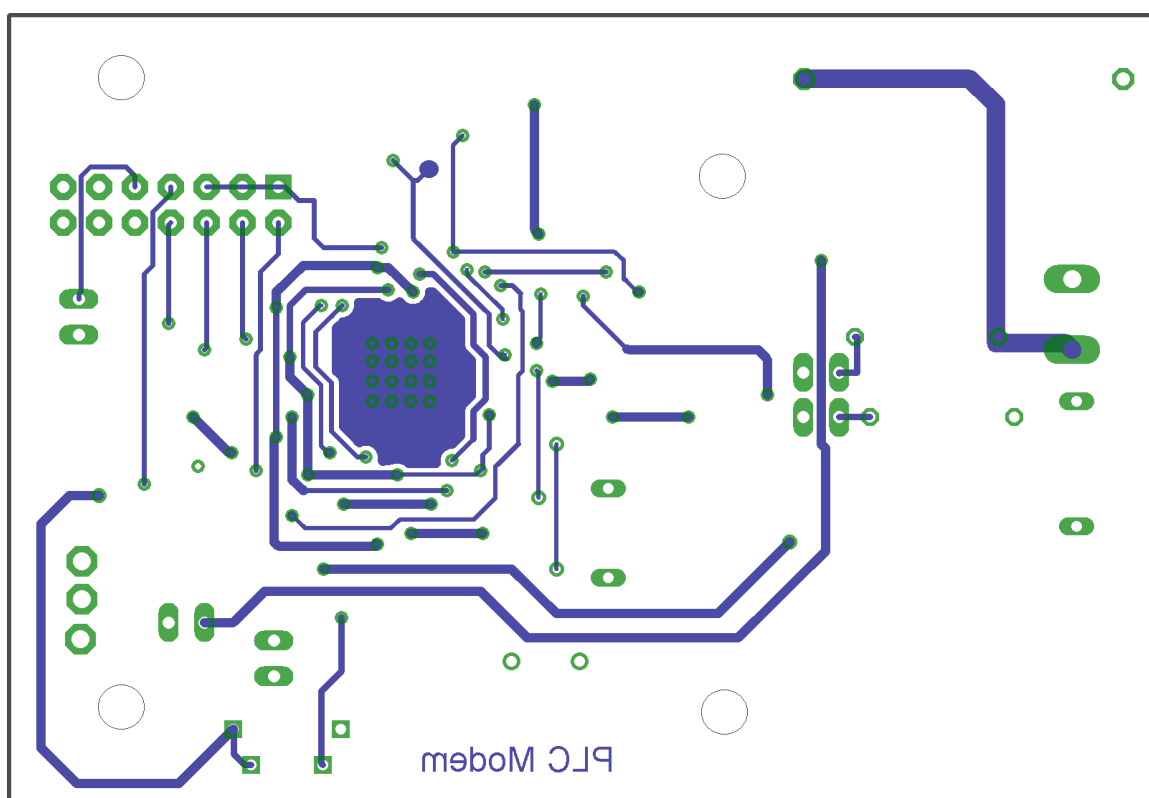
A.2 DPS a schéma: PLC modem, převodník USB/RS-232



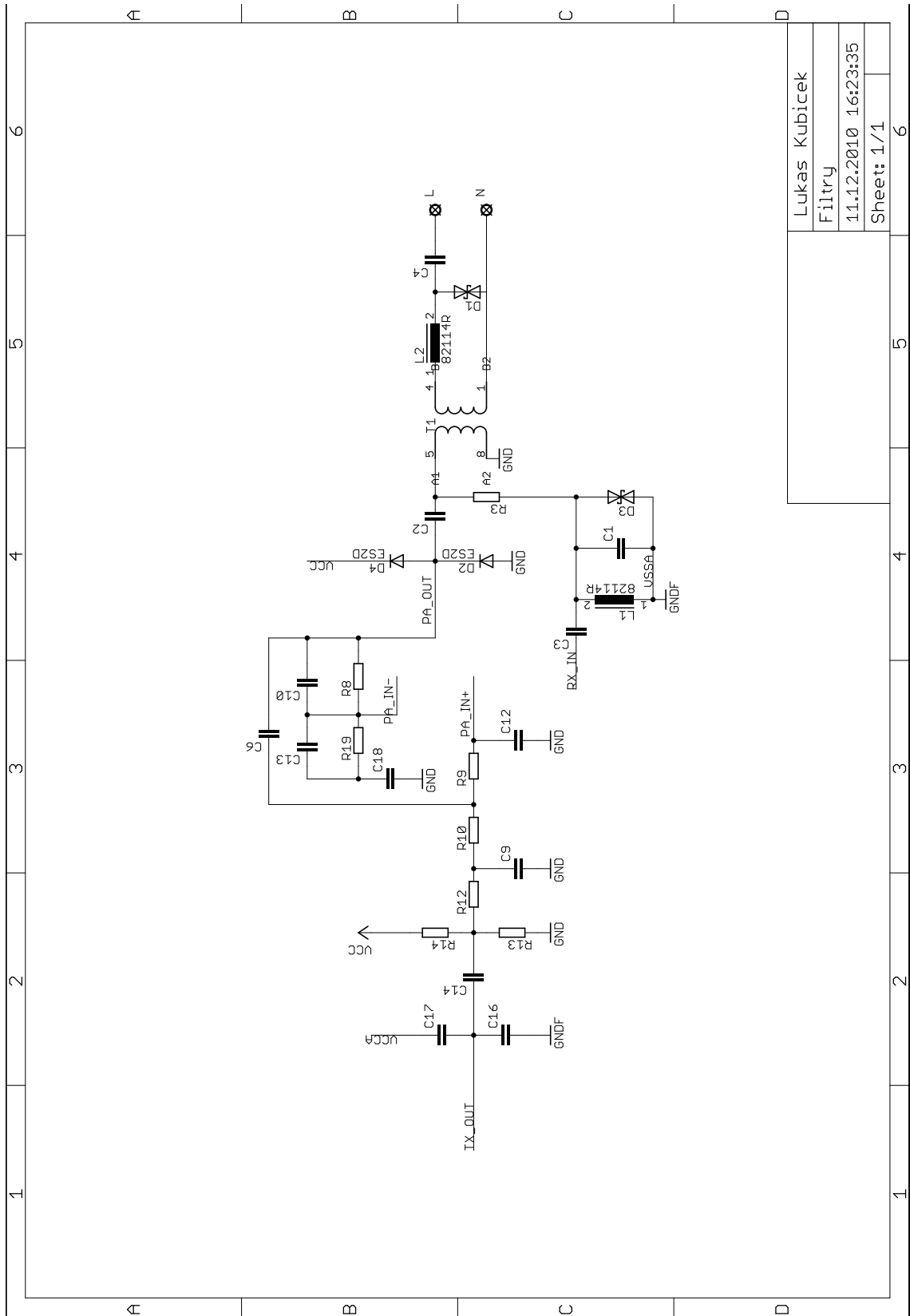
Obrázek A.1: DPS: Osazení součástek

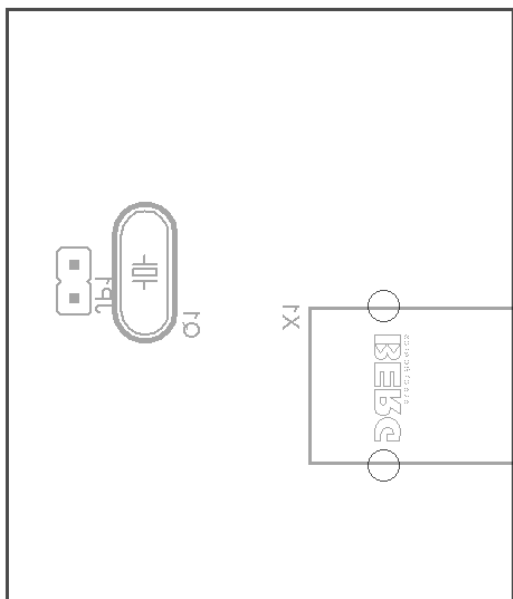


Obrázek A.2: DPS PLC modem: Strana součástek

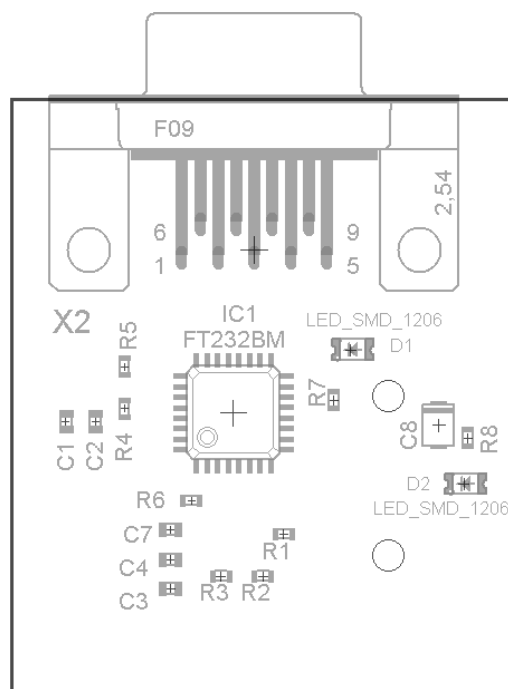


Obrázek A.3: DPS PLC modem: Strana spojů

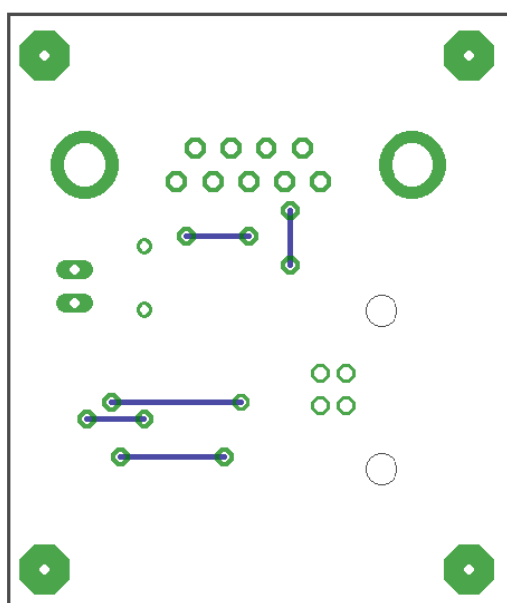




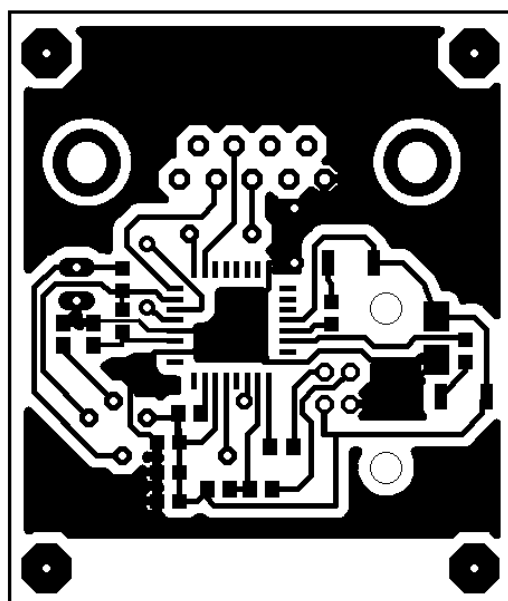
Osazení součástek
Strana součástek



Osazení součástek
Strana spojů

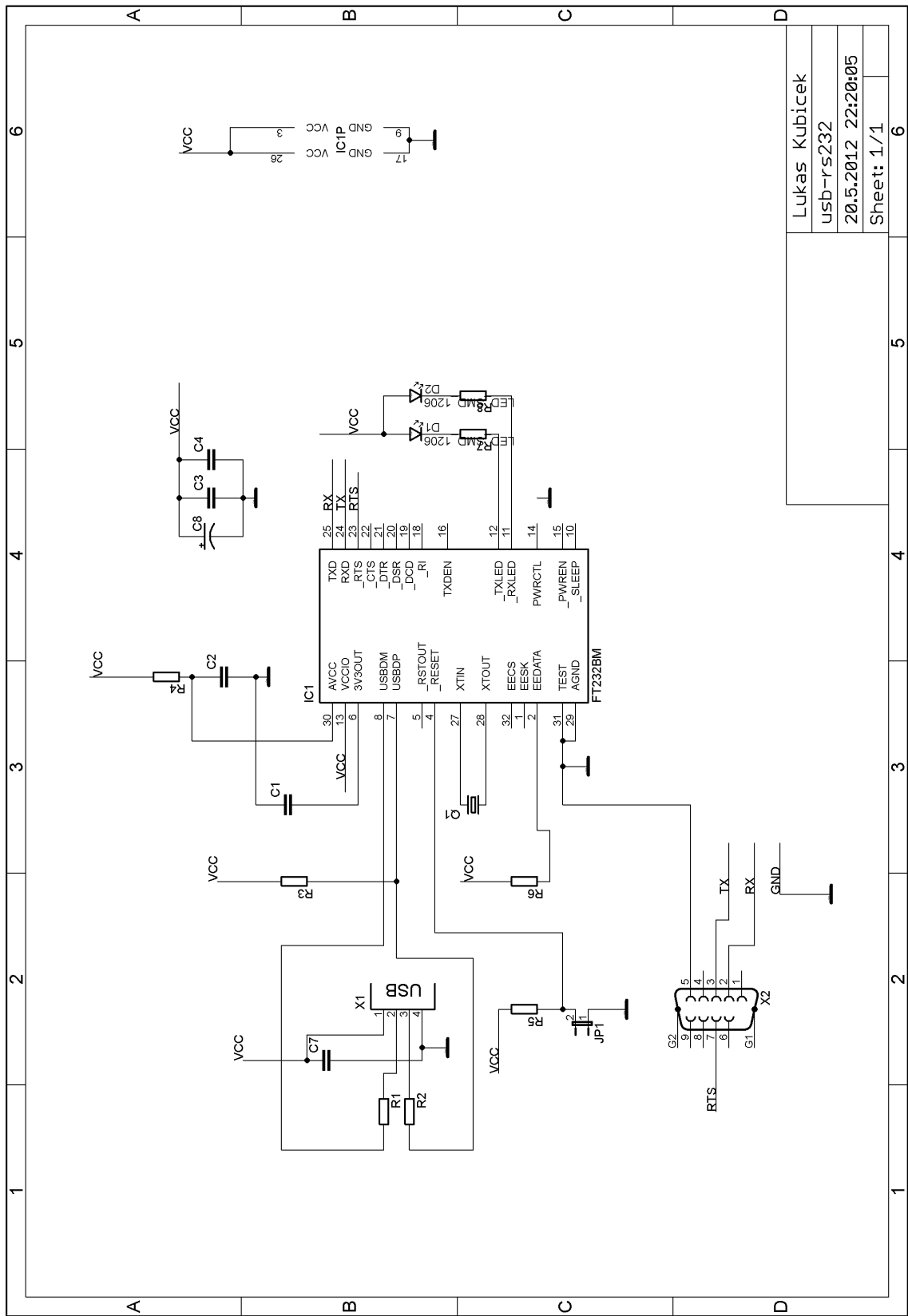


DPS
Strana součástek

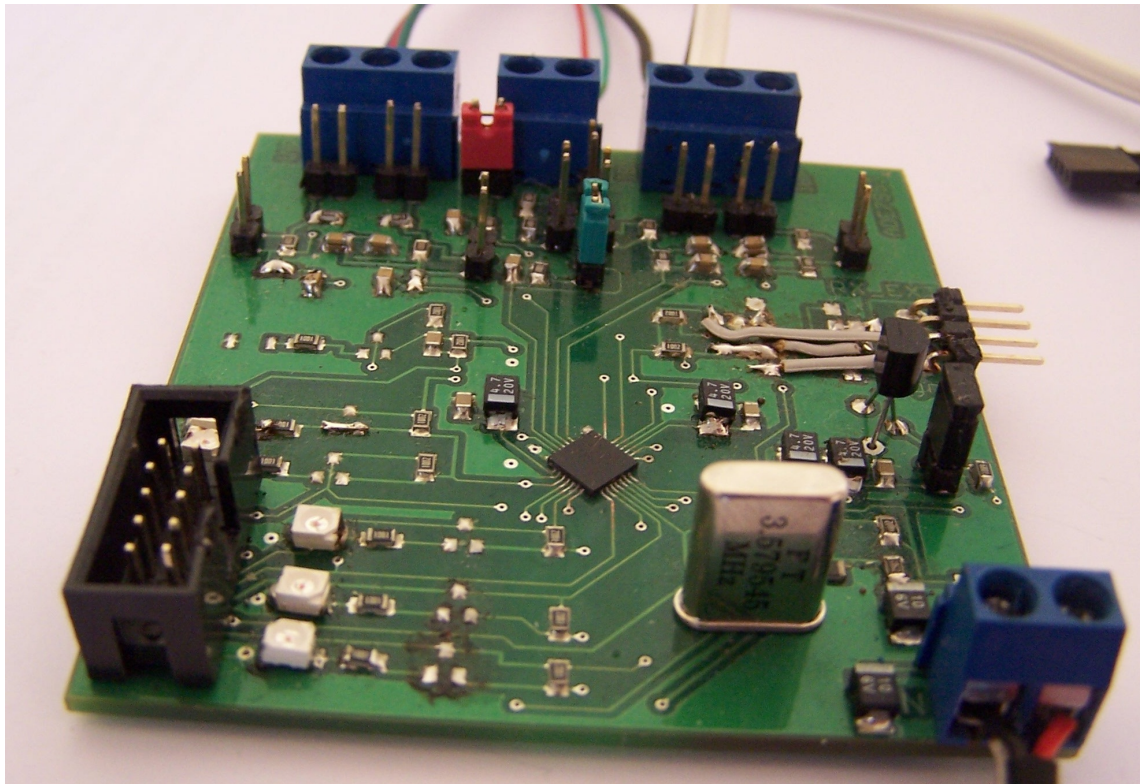


DPS
Strana spojů

Obrázek A.4: DPS USB-RS232

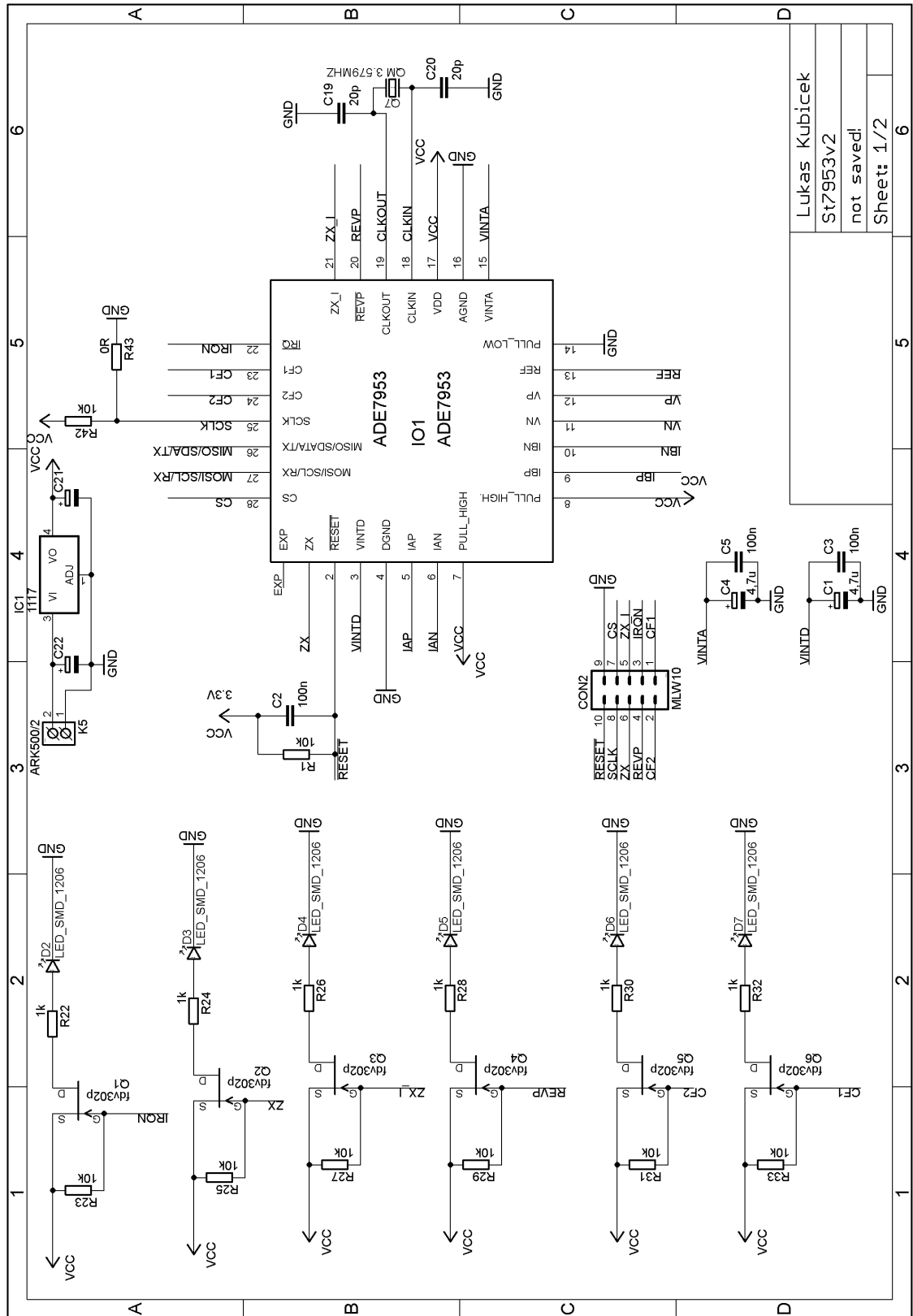


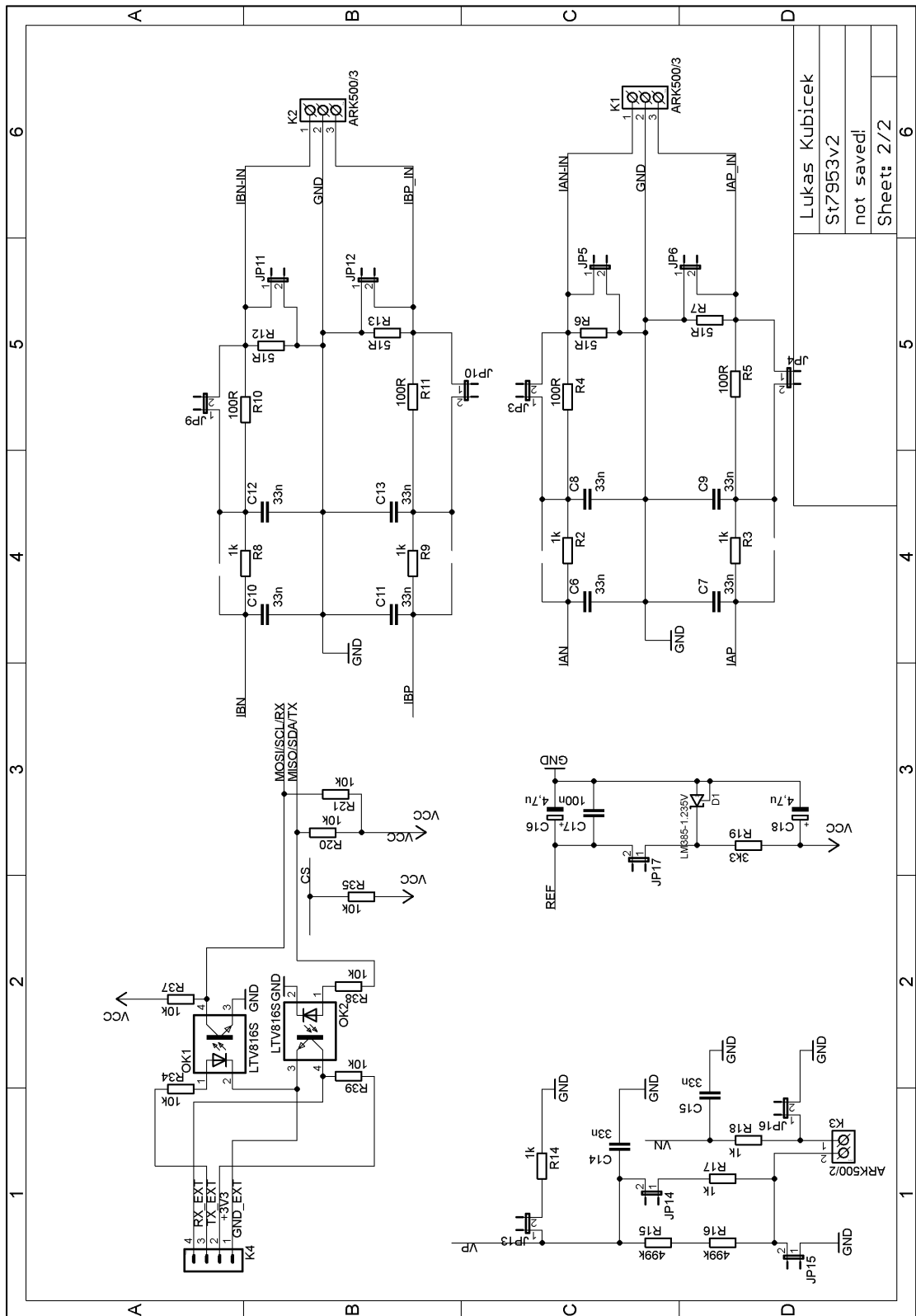
B WATTMETR ADE7953

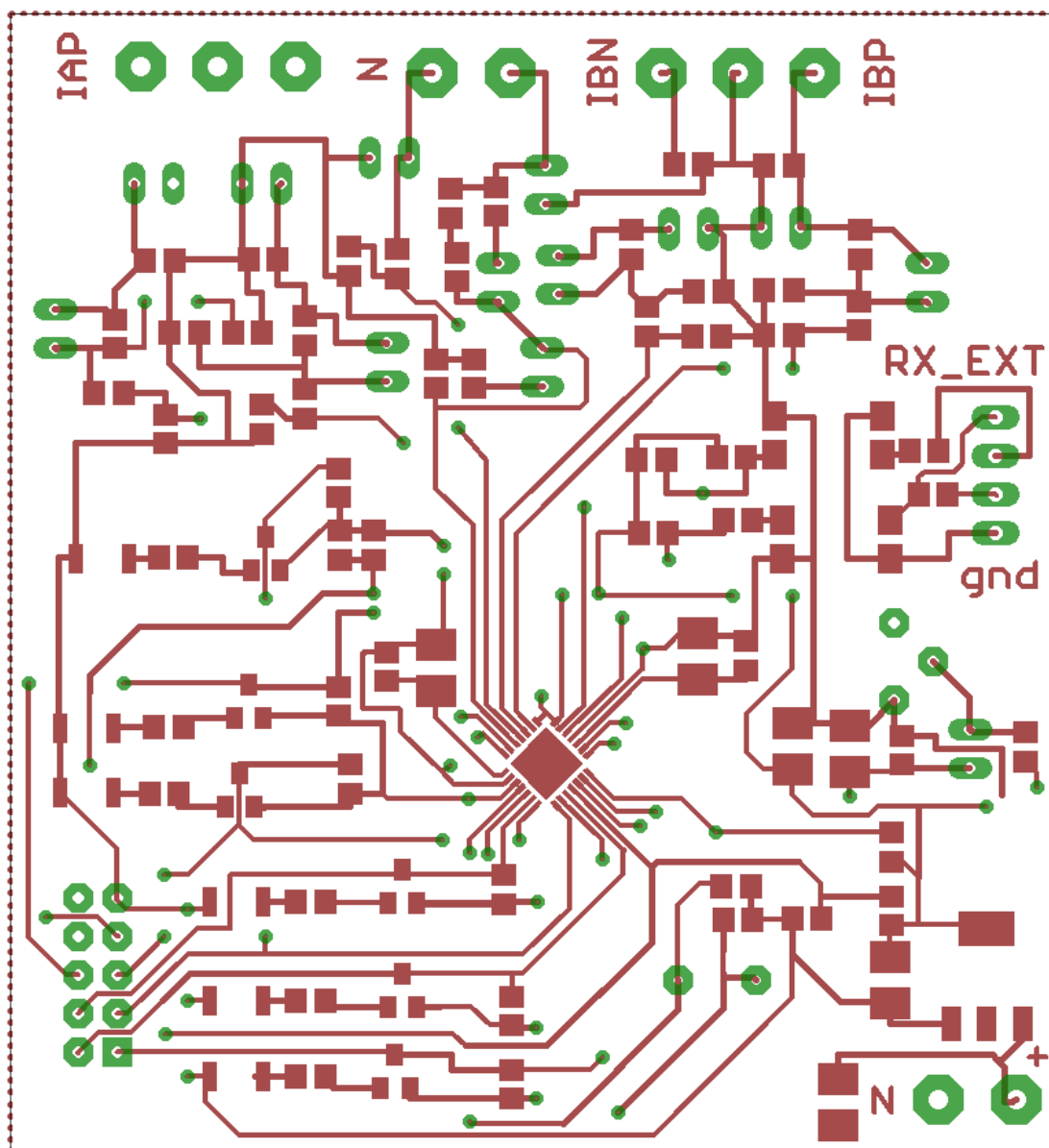


Obrázek B.1: Foto: Wattmetr s IO ADE7953

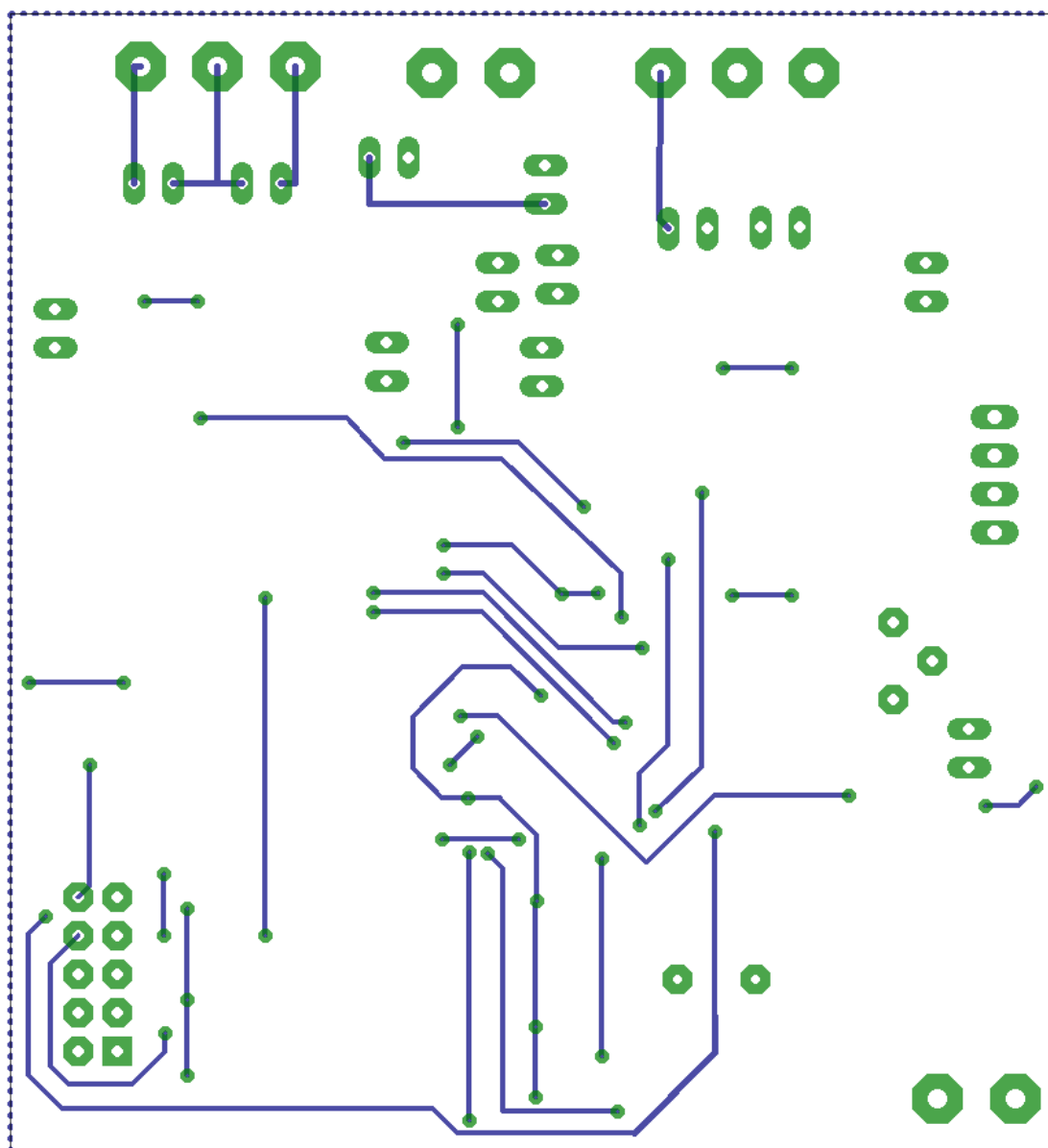
B.1 DPS a schéma: Wattmetr ADE7953







Obrázek B.2: DPS: Wattmetr – strana součástek



Obrázek B.3: DPS: Wattmetr – strana spojů



67