



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## POWERLINE KOMUNIKACE PRO ŘÍZENÍ LED SVĚTEL

POWERLINE COMMUNICATION FOR LED UNIT CONTROL

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Ondřej Šebesta**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Peter Honec, Ph.D.**

**BRNO 2020**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Ondřej Šebesta

**ID:** 164411

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Powerline komunikace pro řízení LED světel

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout a implementovat systém komunikace po napájecím vedení (PLC – PowerLine Communication) mezi PC a osvětlovacím LED tělesem. Pro tvorbu fyzické vrstvy použijte vhodný PLC modem (NE5050, TDA5051, ST7540...).

1. Seznamte se s problematikou PLC.
2. Definujte požadavky s ohledem na budoucí úlohu řízení obecného LED osvětlení.
3. Navrhněte a otestujte vhodnou fyzickou vrstvu s použitím PLC dostupných modemů.
4. Navrhněte komunikační protokol s ohledem na budoucí zapojení více zařízení na jednu linku.
5. Vytvořte interface pro připojení LED modulu pro demonstraci funkcionality.
6. Otestujte a vyhodnoťte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Lutz Lampe, Andrea M. Tonello, Theo G. Swart: Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid, ISBN 978-1-118-67671-4

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Peter Honec, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, 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 částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ŠEBESTA, Ondřej. Powerline komunikace pro řízení LED světel [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127116>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Peter Honec.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a testem systému pro powerline komunikaci, umožňujícím řízení LED světel.

Práce nejdříve popisuje základní principy powerline komunikace, specifikuje komunikační pásma a shrnuje základní funkční požadavky na komunikaci v rámci systému pro řízení LED osvětlení.

Dále popisuje způsob výběru modemu pro powerline komunikaci, návrh testovacího modulu s tímto modemem a také metodu testování reálné komunikace mezi dvěma testovacími moduly včetně výsledků testování.

Nejobsáhlejší část práce popisuje návrh hardwaru a softwaru univerzálního PLC modulu a způsob jeho použití. Kromě toho zmiňuje použité vývojové nástroje a příklad implementace do LED osvětlení.

V závěru práce jsou shrnuty výsledky testování navrženého systému.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

PLC modem, ST7540, úzkopásmová komunikace, powerline komunikace, LED osvětlení.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the design and testing of a system for powerline communication, enabling control of LED lights.

The work first describes the basic principles of powerline communication, specifies the communication bands and summarizes the basic functional requirements for communication within the system for LED lighting control.

It also describes the method of selecting a modem for powerline communication, the design of a test module with this modem and also the method of testing real communication between two test modules, including test results.

The most comprehensive part of the work describes the design of hardware and software of the universal PLC module and how to use it. In addition, it refers to the development tools used as an example of implementation in LED lighting.

At the end of the work are summarized the results of testing the proposed system.

## **KEYWORDS**

PLC modem, ST7540, narrowband communication, powerline communication, LED lighting

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Powerline komunikace pro řízení LED světél 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 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 31. května 2020

.....  
Ondřej Šebesta

# PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové Ing. Petrovi Honcovi, Ph.D. a firmě CAMEA, spol. s r.o. za technickou, materiální a finanční podporu mé diplomové práce.

V Brně dne 31. května 2020

.....  
Ondřej Šebesta

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Problematika PLC .....	2
2.1	Ultra úzkopásmová komunikace .....	2
2.2	Úzkopásmová komunikace .....	2
2.3	Širokopásmová komunikace .....	3
2.4	Rušení.....	3
3	Požadavky na PLC systém pro řízení LED osvětlení .....	5
3.1	Ovládání výstupu .....	5
3.2	Další funkce.....	5
3.3	Ovládání Lightline .....	5
3.4	Komunikace .....	6
3.5	Napájení a integrace .....	6
4	Výběr PLC modemu .....	7
4.1	Popis vybraného modemu ST7540.....	8
5	Návrh a test fyzické vrstvy.....	9
5.1	Popis zapojení vývojové desky .....	9
5.1.1	Power Line Transceiver.....	9
5.1.2	Řídicí část.....	10
5.1.3	Propojení s PC .....	11
5.1.4	Napájení.....	12
5.2	Návrh hardware vývojové desky.....	12
5.3	Test funkce fyzické vrstvy .....	14
5.3.1	Ověření hardware .....	14
5.3.2	Test komunikace mezi moduly .....	14
6	Univerzální PLC modul s ST7540 .....	19
6.1	Hardware .....	19
6.1.1	Plošný spoj.....	20
6.1.2	Napájení.....	21
6.1.3	Řídicí část.....	22
6.1.4	Komunikační část powerline .....	22
6.1.5	RS-232 .....	22
6.1.6	USB.....	22
6.2	Software .....	22
6.2.1	Modul pro powerline komunikaci .....	23
6.2.2	Modul pro obsluhu digitálních vstupů / výstupů.....	24
6.2.3	Modul pro obsluhu AD převodníku.....	24
6.2.4	Modul pro obsluhu PWM výstupů.....	26

6.2.5	Obsluha UARTu.....	27
6.2.6	Obsluha LED a tlačítka .....	28
6.2.7	Modul pro komunikaci se senzorem DS18B20 .....	28
6.2.8	Knihovna pro emulaci EEPROM.....	28
6.2.9	Modbus knihovna.....	29
6.2.10	Šifrování AES-128.....	29
6.2.11	Modul pro ovládání Lightline.....	30
6.2.12	Systémový časovač.....	31
6.2.13	Inicializace.....	31
6.2.14	Hlavní programová smyčka.....	32
6.3	Použité vývojové nástroje .....	32
6.3.1	Vývojové prostředí a konfigurační nástroj.....	32
6.3.2	Sériový monitor pro ladění .....	34
6.3.3	Nahrávání software.....	35
6.3.4	Modbus klient.....	36
6.4	Varianty osazení univerzálního PLC modulu.....	37
6.4.1	Master modul.....	37
6.4.2	Slave modul pro SMT montáž do zařízení.....	37
6.4.3	Slave modul pro THT montáž do zařízení .....	38
6.4.4	Slave modul s rozhraním pro Lightline .....	38
6.5	Práce s PLC modulem.....	39
6.5.1	Vstupy a výstupy .....	39
6.5.2	Módy komunikace.....	41
6.5.3	Nastavení komunikace.....	42
6.5.4	Modbus registry.....	43
7	LED osvětlení s PLC modulem .....	45
7.1	Návrh hardware osvětlovacího modulu .....	45
8	Testy a měření .....	47
8.1	Komunikace s moduly.....	47
8.2	Test knihoven pro šifrování AES .....	48
8.3	Měření doby odezvy .....	48
9	Závěr .....	51
	Literatura .....	52
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	54
	Seznam příloh.....	55
	A. Schéma zapojení testovací desky .....	56
	B. Osazovací výkres testovací desky .....	61
	C. Schéma zapojení PLC modulu.....	62
	D. Osazovací výkres PLC modulu .....	67

E. Schéma zapojení LED modulu .....	68
F. Osazovací výkres LED modulu TOP.....	69
G. Osazovací výkres LED modulu BOTTOM .....	70



## Seznam obrázků

Obrázek 2.1- Typy rušení na silnoproudém vedení [8].....	3
Obrázek 5.1 - Blokové schéma vývojové desky.....	9
Obrázek 5.2 - Blokové schéma PLC modemu.....	10
Obrázek 5.3 - Blokové schéma USB.....	11
Obrázek 5.4 - 3D pohled na desku plošných spojů.....	13
Obrázek 5.5 - Znázornění jednotlivých obvodů na DPS.....	13
Obrázek 5.6 - Testovací zapojení.....	14
Obrázek 5.7 - Okno testovací aplikace – karta konfigurace.....	15
Obrázek 5.8 - Okno testovací aplikace – test příkazu PING.....	15
Obrázek 5.9 - Okno testovací aplikace – PING z Node1 na Node2.....	16
Obrázek 5.10 - Okno testovací aplikace – PING z Node2 na Node1.....	16
Obrázek 5.11 - Okno testovací aplikace – odeslání zprávy.....	17
Obrázek 5.12 - Okno testovací aplikace – přijetí zprávy.....	17
Obrázek 5.13 - Okno testovací aplikace – konfigurace vstupů a výstupů.....	18
Obrázek 6.1 - Blokové schéma zapojení PLC modulu.....	20
Obrázek 6.2 - Skladba vrstev plošného spoje PLC modulu.....	20
Obrázek 6.3 - Závislost výstupní hodnoty Y na koeficientu k.....	26
Obrázek 6.4 - Okno programu SCIDE.....	32
Obrázek 6.5 - Okno nástroje STM32CubeMX.....	33
Obrázek 6.6 - Nastavení hodin a děliček mikrokontroléru v STM32CubeMX.....	34
Obrázek 6.7 - Program RealTerm s aktivní kartou nastavení portu.....	35
Obrázek 6.8 - Program RealTerm s aktivní kartou nastavení záznamu.....	35
Obrázek 6.9 - Aplikace Modbus HMI Free.....	36
Obrázek 6.10 - Master modul.....	37
Obrázek 6.11 - Modul pro SMT montáž s vyznačenými hranovými kontakty.....	37
Obrázek 6.12 - Varianty osazení PLC modulu pro THT montáž do zařízení.....	38
Obrázek 6.13 - Modul k ovládání Lightline.....	39
Obrázek 6.14 - Uspořádání signálů a napájení univerzálního PLC modulu.....	39
Obrázek 6.15 - Znázornění komunikačních módů PLC modulu.....	41
Obrázek 7.1 - LED osvětlení.....	45
Obrázek 7.2 - 3D pohled na navržený plošný spoj LED modulu.....	46
Obrázek 8.1 – Testovací projekty v aplikaci Modbus HMI Free.....	47
Obrázek 8.2 - Časová posloupnost sledovaných částí komunikace.....	49

## Seznam tabulek

Tabulka 2.1 - Rozdělení kmitočtových pásem CENELEC. [5] .....	3
Tabulka 4.1 - srovnání základních parametrů vybraných PLC modemů. ....	7
Tabulka 6.1 - Nastavení komunikačních parametrů. ....	42
Tabulka 6.2 – Seznam vstupních registrů.....	43
Tabulka 6.3 - Seznam holding registrů. ....	44
Tabulka 8.1 - Výsledky testu rychlosti AES knihoven.....	48
Tabulka 8.2 - Výsledky měření doby odezvy.....	49

# 1 ÚVOD

Technologie komunikace po silových rozvodech je mezi veřejností známá spíše v souvislosti s rozšířením počítačových sítí a distribucí internetu skrze domácí elektrické rozvody. Využití této technologie je však mnohem pestřejší. Tato technologie už dlouho slouží například k dálkovým odečtům elektroměrů, změnám nočního a denního tarifu nebo k ovládání veřejného osvětlení. Potenciál této technologie je však daleko větší a v současnosti se využívá i v domácí automatizaci, jejímž příkladem je i řízení LED světel. Výhodou této technologie je především úspora při implementaci v již stojících budovách, neboť odpadá nutnost instalace dodatečné kabeláže.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a implementací systému komunikace po napájecím vedení. Práce je rozdělena do několika částí. V teoretické části je popsána problematika přenosu dat po napájecím vedení včetně požadavků na navrhovaný systém. V následující části je popsán návrh a test zkušebního hardwaru, sloužícího především k otestování fyzické vrstvy a jako pomůcka pro další ladění před návrhem finálního řešení. Nejobsáhlejší část práce je věnována návrhu hardwaru a softwaru univerzálního modulu pro powerline komunikaci, jehož implementaci a testům je věnován zbytek práce.

## 2 PROBLEMATIKA PLC

Termín Powerline Communication, zkratkou PLC, neboli česky komunikace po napájecím vedení, popisuje způsob přenosu dat po napájecím vedení, určeném primárně k přenosu elektrické energie za účelem napájení zařízení. Nejčastěji jsou pro komunikaci využívány silové rozvody elektrické sítě.

Powerline komunikace využívá k datovým přenosům volná kmitočtová pásma, dostupná na napájecích vedeních. Princip přenosu spočívá v namodulování přenášených dat na napětí v napájecím vedení na straně vysílače a demodulování těchto dat na straně přijímače. Tento způsob přenosu dat s sebou přináší jisté benefity, avšak spolu s nimi přichází řada problémů. Napájecí rozvody nejsou nijak přizpůsobeny datovým přenosům a jsou velmi zarušeným médiem. Přenosové parametry, stejně jako rušení, se mění v čase a je proto nutné používat robustní modulace a techniky pro přenos dat [1].

Powerline technologii lze dle použitého frekvenčního pásma, ve kterém pracují, rozdělit do tří kategorií. Každé frekvenční pásmo má své výhody a nevýhody, od kterých se odvíjí i způsob jejich využití.

### 2.1 Ultra úzkopásmová komunikace

Využívá velmi nízké frekvence v rozsahu 30 Hz až 300 Hz a přenosová rychlost se pohybuje v řádu desítek bitů za sekundu. Pomalá rychlost je kompenzována velkým komunikačním dosahem, umožňujícím realizaci datových přenosů až na vzdálenost kolem 150 km bez použití opakováče. Toto frekvenční pásmo nalézá využití v systémech AMR (Automatic Meter Reading) ke vzdáleným odečtům elektroměrů nebo HDO (hromadné dálkové ovládání) [2] [3].

### 2.2 Úzkopásmová komunikace

V roce 1991 byl představen evropský standard EN 50065, definující čtyři pásma pro úzkopásmovou komunikaci po napájecích rozvodech, označována jako CENELEC A, B, C a D [4]. V České republice spadá pod normu ČSN EN 50065-2-3, která stanovuje kmitočtová pásma, výkonové limity a také limity pro rušení. Rozdělení kmitočtových pásem CENELEC je uvedeno v tabulce 2.1.

Úzkopásmová komunikace je vhodná pro aplikace, kde nejsou vyžadovány velké datové toky. Jde zejména o automatizaci budov či dálkové odečty elektroměrů. Maximální rychlost komunikace se pohybuje v řádu desítek kbit/s a vzdálenosti v řádu stovek metrů [6].

Tabulka 2.1 - Rozdělení kmitočtových pásem CENELEC. [5]

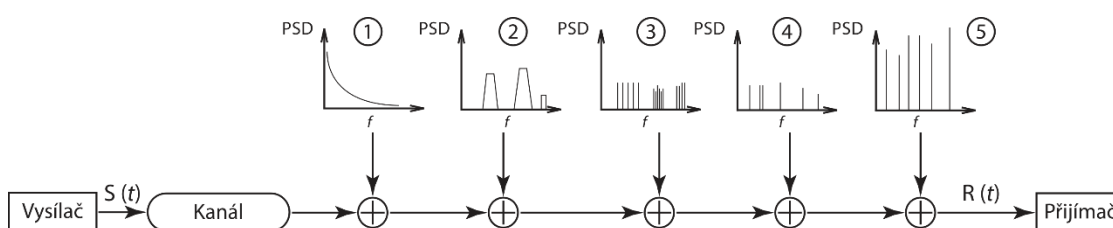
Pásmo	Frekvenční rozsah [kHz]	Využití	Protokol
A	3 – 95	Dodavatelé energií	Není definován
B	95 – 125	Koncoví uživatelé	Bez přístupového protokolu
C	125 – 140	Koncoví uživatelé	Přístupový protokol
D	140 – 148,5	Zabezpečovací systémy	Bez přístupového protokolu

## 2.3 Širokopásmová komunikace

Širokopásmová komunikace se využívá pro přenos větších objemů dat. Často je využívána pro realizaci malých počítačových sítí v domácnostech tam, kde není možno použít bezdrátový přenos nebo přivést datové kabely. Využívá složitějších typů modulace, např OFDM, kdy je využito více nosných (tisíce). Bývá provozována v pásmu 2 – 30 MHz a dosahuje rychlostí v řádu desítek až stovek Mbit/s [7].

## 2.4 Rušení

Rušení má zásadní vliv na kvalitu powerline komunikace. Elektrická vedení jsou primárně určena k přenosu elektrické energie a nejsou uzpůsobena pro přenos informací. PLC systém musí s touto skutečností počítat a vypořádat se s rušeními, vznikajícími v elektrické rozvodné síti. Rušení je tvořeno superpozicí pěti typů rušení, které se liší dobou trvání, intenzitou, původem a šířkou frekvenčního pásma. Obrázek 2.1 ilustruje zjednodušenou interpretaci zdrojů rušení, kde PSD je výkonová spektrální hustota, udávající rozložení výkonu šumu podél frekvenční osy.



Obrázek 2.1- Typy rušení na silnoproudém vedení [8].

- Prvním typem rušení (typ 1) je tzv. barevný šum, jehož spektrum je spojitě a jeho spektrální hustota klesá s rostoucí frekvencí.
- Úzkopásmové rušení (typ 2) zaujímá několik dílčích pásem a má vysokou spektrální hustotu. Toto rušení produkují napájecí zdroje, měniče, zářivky a spínací procesy.

- Asynchronní periodické impulzní rušení s frekvencí elektrické sítě (typ 3) je nejčastěji způsobeno spínacími prvky v distribuční síti. Jeho spektrum tvoří diskrétní špičky s frekvenčním rozestupem závislým na opakovací frekvenci.
- Synchronní periodické impulzní rušení s frekvencí elektrické sítě (typ 4) je tvořeno impulzy, které se opakují každých 10 nebo 20 ms (100 nebo 50 Hz) a jsou synchronní se sítovou frekvencí. Doba jejich trvání se pohybuje v řádu mikrosekund a jejich výkonová spektrální hustota klesá s rostoucí frekvencí.
- Asynchronní impulzní rušení (typ 5) je nejčastěji způsobeno spínacími přechodovými jevy v síti. Je tvořeno impulzy, s amplitudou až 50 dB, trvajících až několik milisekund [8].

## **3 POŽADAVKY NA PLC SYSTÉM PRO ŘÍZENÍ LED OSVĚTLENÍ**

Požadavky na systém lze rozdělit do několika kategorií dle oblasti, které se týkají. Stejně jako u ostatních druhů osvětlení je i u LED osvětlení základním požadavkem vypnutí a zapnutí. Kromě vypnutí a zapnutí je vhodné umožnit také nastavení jasu nebo barvy. Dále je dobré počítat i s možnostmi použití různých efektů, jako je plynulé rozsvěcení nebo zhasnutí, či možností nastavení spínacího programu.

### **3.1 Ovládání výstupu**

Stejně jako u ostatních druhů osvětlení je i u LED osvětlení základním požadavkem vypnutí a zapnutí. Kromě obyčejného spínání je vhodné umožnit uživateli i plynulé nastavení jasu. V případě použití vícebarevné LED lze navýšit počet výstupních kanálů a pomocí řízení úrovně jasu jednotlivých barev nastavit výslednou barvu světla.

Možnost řízení jasu lze využít i pro plynulé rozsvěcení či zhasnutí světla nebo pro dosažení různých světelných efektů.

Pro některé aplikace může být vhodné mít možnost nastavit spínání dle časového plánu. Pro tento účel je nutné, aby mělo zařízení k dispozici informaci o čase

### **3.2 Další funkce**

Kromě ovládání výstupu může zařízení obsahovat i vstupy. Příkladem vstupu může být senzor pro měření intenzity okolního osvětlení.

Pro diagnostické účely lze sbírat různé provozní údaje. Mezi nimi může být teplota čipu LED, případně chladiče, proudový odběr nebo kumulovaná doba svitu (motohodiny).

### **3.3 Ovládání Lightline**

Lightline je osvětlovací modul navržený a používaný firmou CAMEA. Modul Lightline slouží jako přísvit pro kamery. Je napájen napětím 48 V a jeho jas je řízen buďto PWM signálem o frekvenci 1 kHz nebo pomocí příkazů přes RS-232. Ke komunikaci používá modul hermafroditní konektor, díky kterému lze moduly řetězit. Pro možnost ovládat Lightline je tedy důležité, aby budoucí hardware tímto konektorem disponoval.

### 3.4 Komunikace

Při komunikaci po napájecím vedení hraje jednu z rolí odolnost vůči rušení. Z toho důvodu je vhodné použít robustní řešení, počínaje modulací. Vzhledem k snadné zarušitelnosti amplitudově modulovaného signálu se nabízí možnost využít frekvenční nebo fázové modulace. Jiné typy modulací jsou pro svoji složitost a vyšší cenu modemů pro úlohu řízení LED osvětlení nevhodné.

Pro zvýšení spolehlivosti by mělo být možné dostávat potvrzení o přijetí zpráv. Touto problematikou se zabývá QoS (kvalita služeb) a závisí na použitém komunikačním protokolu.

Na protokolu závisí také možnosti adresace. Pro LED osvětlení je vhodné mít možnost kromě ovládní jednotlivých svítidel ovládat i celé skupiny (např. chodba).

Vzhledem k tomu, že komunikace probíhá po napájecím vedení, může být vstupem do systému, v případě rozvodné sítě 230 V, každá zásuvka v dosahu. To umožňuje případnému útočníkovi komunikaci odposlouchávat nebo do ní zasahovat. Proto je nutné, aby použitý komunikační protokol obsahoval i vhodné prvky zabezpečení (šifrování, autentizace).

Až na výjimky (např. pouliční osvětlení) je důležitá rychlá odezva na ovládací povely, která by se měla pohybovat maximálně v řádu stovek, ideálně desítek milisekund.

V neposlední řadě je třeba dodržet platnou legislativu. Zejména používat povolená pásma pro komunikaci, dodržovat maximální výkonové limity v rámci vysílání a EMC a v některých případech použít správný přístupový protokol.

### 3.5 Napájení a integrace

Přestože se mohou vyskytovat výjimky, PLC zařízení jsou většinou napájena ze stejného napájecího vedení, přes které komunikují. V závislosti na aplikaci a typu napájecího vedení (stejnoseměrné nebo střídavé, s nízkým napětím nebo se síťovým napětím) je nutné volit vhodný způsob napájení PLC zařízení. Univerzálním řešením, vzhledem k bezpečnosti je galvanicky oddělený zdroj a vazební člen.

Jednou z výhod použití LED svítidel je úspora elektrické energie. Z tohoto důvodu je vhodné, aby PLC zařízení, ovládající LED, mělo rovněž nízkou spotřebu.

Z hlediska integrace do svítidla jsou důležité rozměry, které by měly být co nejmenší.



## 4 VÝBĚR PLC MODEMU

Hlavními kritérii pro výběr PLC modemu byla cena, dostupnost modemu u dodavatelů, dobrá dostupnost dokumentace a použitá modulace. Na složitost obvodového zapojení ani typ pouzdra nebyl brán ohled, neboť byla k dispozici výrobní technologie, kde tyto aspekty nehrají roli.

Při průzkumu trhu bylo nalezeno několik PLC modemů, z nichž vybrané jsou pro srovnání v tabulce 4.1.

**Tabulka 4.1 - srovnání základních parametrů vybraných PLC modemů.**

	TDA5051	ST7538	ST7540	CY8CPLC10	HT45B0005
Výrobce	NXP	STMicroelectronics	STMicroelectronics	Cypress Semiconductor	Holtek
Přenosová rychlost [Bd]	600 - 1200	600 - 4800	600 - 4800	600 - 2400	-
Modulace	ASK	FSK	FSK	FSK	ASK
Napájení [V]	5	7,5 - 12,5	7,5 - 13,5	5	5
Pásmo CENELEC	A, B, C	A, B, C	A, B, C	C	-
Cena [Kč]	66	120	110	162	6

\*Uvedené ceny jsou za kus při odběru 1000 ks a jsou platné ke dni 20.12.2019

Z vybraných PLC je z hlediska ceny nejzajímavější obvod HT45B0005 od firmy Holtek. S cenou 6 Kč se jedná o bezkonkurenčně nejlevnější PLC modem. Má však spoustu omezení, kvůli kterým není vhodný. Jedním z nich je maximální vstupní napětí 42 V. HT45B0005 je totiž schopen pracovat pouze s galvanickou vazbou na napájecí vedení. Jedná se o velmi jednoduchý obvod s funkcí transceiveru, který využívá amplitudové klíčování, realizovaného změnou impedance zátěže vedení. Režie je plně řízena mikrokontrolérem. I přesto tento obvod stojí za zmínku a určitě najde uplatnění v nízkonapěťových obvodech [9].

Dalším modemem s nízkou cenou je TDA5051. V manuálu výrobce uvádí pouze frekvenci 132,5 kHz, což odpovídá pásmu CENELEC C, dodává však, že frekvence nosné může být snížena nastavením oscilátoru. Tento obvod bohužel využívá pouze amplitudové klíčování, které je náchylné k chybám, a tudíž byl vyloučen z výběru [10].

Modem CY8CPLC10 z uvedených vyžaduje nejméně režie ze strany mikrokontroléru. Využívá také frekvenční klíčování, které je odolnější vůči rušení. Bohužel ale pracuje jen s jedinou nosnou frekvencí, spadající do pásma CENELEC C a jeho cena je ze všech nejvyšší [11].

Zbývající modemy ST7538 [12] a ST7540 [13] od STMicroelectronics jsou na tom velmi podobně. Oba využívají frekvenční klíčování a ze všech srovnávaných

modemů mají nejvyšší rychlost – až 4800 Bd. Nabízejí také možnost volby z osmi kmitočtů nosné, čímž pokrývají celé pásmo CENELEC B a části pásem A a C. Nakonec byl vybrán obvod ST7540, který je oproti ST7538 levnější, má vyšší rozsah napětí, lepší citlivost přijímače a v neposlední řadě je novější, což pravděpodobně zaručí jeho delší dostupnost.

Co se týká dokumentace, jsou na tom nejlépe modemy od firmy STMicroelectronics. Kromě obsáhlých katalogových listů jsou dostupné mnohé příklady zapojení, vývojové desky i zdrojové kódy.

## **4.1 Popis vybraného modemu ST7540**

ST7540 je poloduplexní modem, určený ke komunikaci po napájecím vedení. Umožňuje synchronní i asynchronní komunikaci a používá frekvenční klíčování. Může být napájen stejnosměrným napětím v rozsahu 7,5 až 13,5 V a díky dvěma integrovaným lineárním stabilizátorům s ochranou proti zkratu je schopen dodávat do obvodu napětí 5 V a 3,3 V, obojí s maximálním proudovým zatížením 50 mA. Kromě dvojice lineárních stabilizátorů v sobě integruje i výkonový zesilovač, vhodný pro zatěžování zátěží s nízkou impedancí.

Modem může komunikovat na jednom z osmi různých kmitočtech nosné v rozsahu 60 až 132,5 kHz, díky čemuž zvládá pokrýt celé pásmo CENELEC B a části pásem A a C. Dále nabízí čtyři možné komunikační rychlosti od 600 po 4800 Bd a dvě volby pro kmitočtový zdvih.

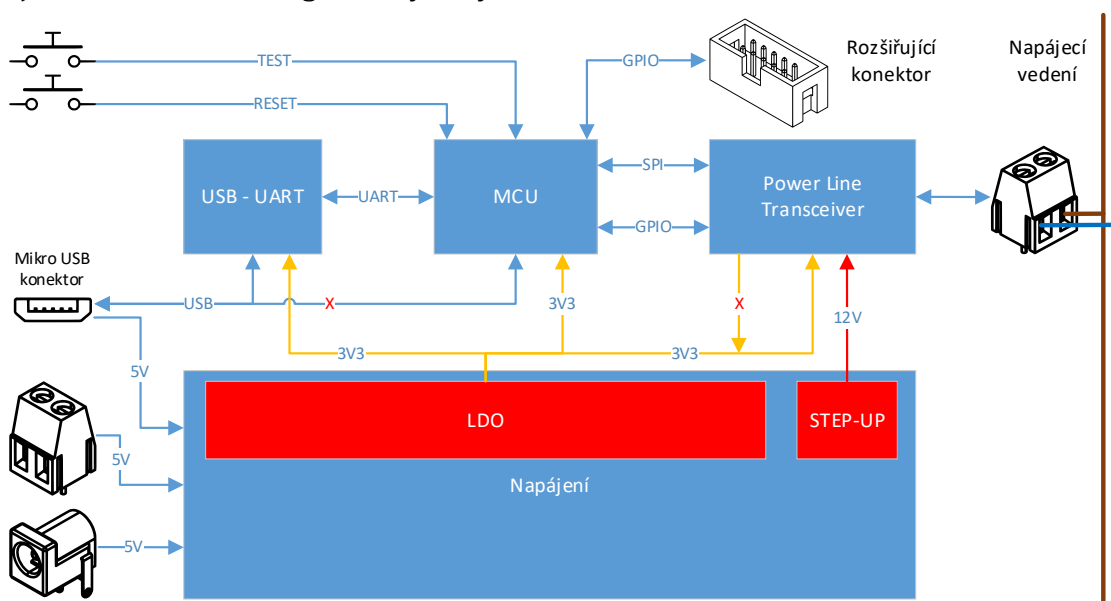
Protože se jedná pouze o modem, zprostředkovávající komunikaci na fyzické vrstvě, je k jeho fungování potřeba mikrokontrolér, který bude zajišťovat režii. Komunikace mezi ST7540 může probíhat přes UART nebo SPI. Komunikace přes UART ovšem může sloužit pouze pro asynchronní přenos a nedovoluje nastavení konfiguračního registru obvodu ST7540.

## 5 NÁVRH A TEST FYZICKÉ VRSTVY

Pro testování vhodného PLC modemu se nabízely dvě možnosti. První možností bylo zakoupení hotového zařízení v podobě vývojové desky nebo modulu, druhou možností byl návrh vlastního hardware. Vzhledem k požadavku na vytvoření LED modulu pro demonstrační účely bylo přistoupeno k návrhu vlastní desky. Toto řešení je levnější a na rozdíl od hotového modulu či vývojové desky snadno modifikovatelné.

### 5.1 Popis zapojení vývojové desky

Navržená deska částečně vychází z vývojové desky STEVAL-IHP005V1 [14] od STMicroelectronics, díky čemuž lze využít firmware a softwarové nástroje, dodávané výrobcem k vývojové desce. Tyto nástroje umožní provést funkční test hardware a komunikace před započítím psaní vlastní aplikace. Blokové schéma navržené testovací desky je na obrázku 5.1. Spoje, přerušené červeným křížkem, nejsou v základní konfiguraci využity.

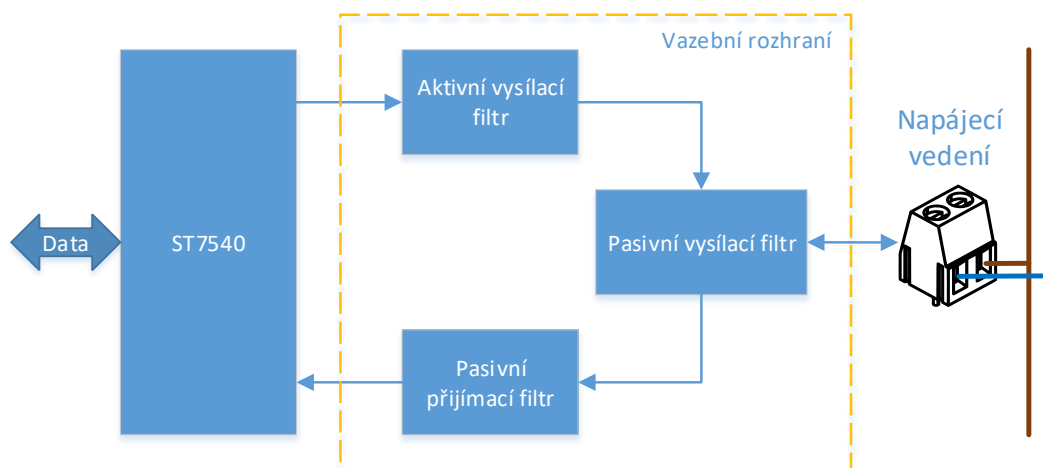


Obrázek 5.1 - Blokové schéma vývojové desky.

#### 5.1.1 Power Line Transceiver

Jako Power Line Transceiver je použit obvod ST7540. Jeho zapojení včetně hodnot součástek vychází z vývojové desky od STMicroelectronics. Toto řešení slouží jako výchozí bod pro test funkčnosti hardware, další ladění a modifikace.

Obvod lze rozdělit na 4 bloky viz obrázek 5.2.



**Obrázek 5.2 - Blokové schéma PLC modemu.**

První blok obsahuje samotný integrovaný obvod ST7540 spolu se zpětnými vazbami pro nastavení výstupního proudu a napětí. Zbylé tři bloky jsou filtry, tvořící vazební rozhraní.

Aktivní vysílací filtr filtruje a zesiluje kmitočtově modulovaný signál, generovaný obvodem ST7540. Jedná se o filtr typu dolní propust a jeho úkolem je odfiltrovat vyšší harmonické složky vstupního signálu a zesílit signál na úroveň vhodnou pro přenos napájecím vedením. Výkonový zesilovač je umístěn přímo v pouzdře obvodu ST7540, ale má samostatně vyvedeny diferenciální vstupy, výstup i napájení.

Pasivní vysílací filtr slouží jako vazební člen mezi obvodem a napájecím vedením. Je zde využita transformátorová vazba, tudíž tento člen zajišťuje galvanické oddělení, důležité v případě připojení k silovým rozvodům. Transformátor je vlastní výroby a je navinut na jádře EPC10 s kostrou v SMD provedení. Transformátor má poměr vinutí 1:1 a indukčnost 1 mH. Transformátor je zalitý v epoxidu a prošel testem elektrické pevnosti na 4 kV.

Pasivní přijímací filtr slouží jako pásmová propust a je naladěn na frekvenci blízkou nosné.

## 5.1.2 Řídicí část

Kvůli kompatibilitě se software k vývojové desce vychází i zapojení a typ mikrokontroléru z vývojové desky od STMicroelectronics. Použitý mikrokontrolér nese označení STM32F103CB. Jedná se o 32bitový mikrokontrolér s jádrem ARM Cortex M3, s maximálním taktem 72 MHz. Disponuje 128 kB FLASH a 20 kB SRAM paměti, čtyřmi časovači a dvěma 12bitovými AD převodníky. Kromě běžných komunikačních periférií jako SPI, I<sup>2</sup>C a USART nabízí také CAN a USB. Dostupný je v 48pinovém pouzdře LQFP nebo UFQFPN.

Ke komunikaci s ST7540 je využito rozhraní SPI a několik vstupně výstupních pinů.

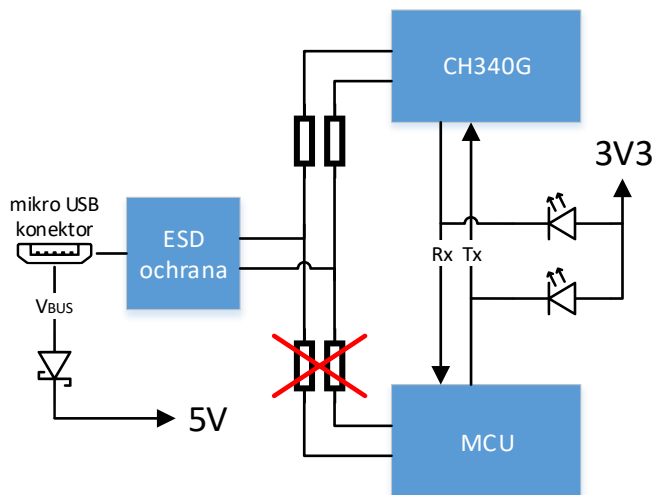
Pro účely ladění je na desce osazena dvojice LED, připojených na vývody BP8 a PB9, jedno univerzálně využitelné tlačítko, připojené k PA8 a resetovací tlačítko. Dolních 8 vstupů/výstupů portu B (PB0 až PB7) je spolu s napájením 3,3 V a signálovou zemí vyvedeno na 10pinový konektor se zámkem, umožňující např. připojení rozšiřujícího modulu. Tyto signály mají rovněž podporu v ovládací aplikaci, dodávané výrobcem.

Pro nahrání aplikace a její ladění je z mikrokontroléru vyvedeno rozhraní SWD.

Vzhledem k tomu, že má mikrokontrolér periférii s obvodem reálného času (RTC), je deska opatřena záložní baterií. RTC obvod může mít v aplikaci řízení LED osvětlení dvě využití. Prvním využitím je spínání dle nastaveného časového programu. Druhým využitím je možnost uložení konfiguračních dat do bateriově zálohované paměti RAM v RTC periférii procesoru.

### 5.1.3 Propojení s PC

Pro pohodlnější práci s vývojovou deskou je na desce integrován převodník z USB na UART, který je vyveden na mikro USB konektor. Přes tento konektor je možné desku současně i napájet. Kromě převodníku je možné k USB konektoru osazením propojek připojit i přímo piny procesoru a využít jeho USB periférii. Tato možnost poslouží v budoucnu při vývoji vlastní aplikace.



Obrázek 5.3 - Blokové schéma USB.

Jako převodník slouží obvod CH340G, který byl vybrán především kvůli svojí nízké ceně, v porovnání s konkurenčním FTDI čipem. CH340G pro svoji funkci vyžaduje pouze krystal 12 MHz a blokovací kondenzátory na napájení.

USB rozhraní je chráněno před elektrostatickými výboji ESD ochranou AZC099-04S, umístěnou co nejbližší USB konektoru. Elektrostatické výboje vznikají při dotyku dvou částí s rozdílným potenciálem, tedy např. při připojení USB konektoru, a v krajním případě mohou vést ke zničení obvodu.

Výstup převodníku (signály Rx a Tx rozhraní UART) je opatřen dvojicí LED, indikující komunikaci mezi PC a mikrokontrolérem. To je velmi nápomocné při ladění, neboť lze stav komunikace vidět pouhým okem bez použití logického analyzátoru nebo osciloskopu.

Kvůli ochraně USB portu počítače a možnosti napájet desku z externího zdroje, je mezi USB konektorem a 5V větví obvodu zařazena sériová schottky dioda s malým úbytkem v propustném směru. Dioda zamezuje zpětnému toku proudu do USB portu počítače při připojení externím napájení.

### **5.1.4 Napájení**

Modul je napájen stejnosměrným napětím 5 V, které je možno přivést přes USB konektor, 2,1mm napájecí jack nebo šroubovací konektor. Napětí 3,3 V je z 5 V získáno lineárním stabilizátorem. Při vývoji lze využít i stabilizátor 3,3 V, integrovaný v obvodu ST7540, který je schopen dodat proud až 50 mA. Pro jeho využití stačí pouze odpájet externí stabilizátor, který, je-li připojen, blokuje jeho funkci.

Pro napájení výkonového zesilovače ST7540 je třeba stejnosměrné napětí kolem 7,5 až 13,5 V. Jelikož je deska napájena z 5 V, je toto napětí vytvářeno pomocí step-up měniče s MT3608. Výstupní napětí měniče je nastaveno na hodnotu 12 V.

## **5.2 Návrh hardware vývojové desky**

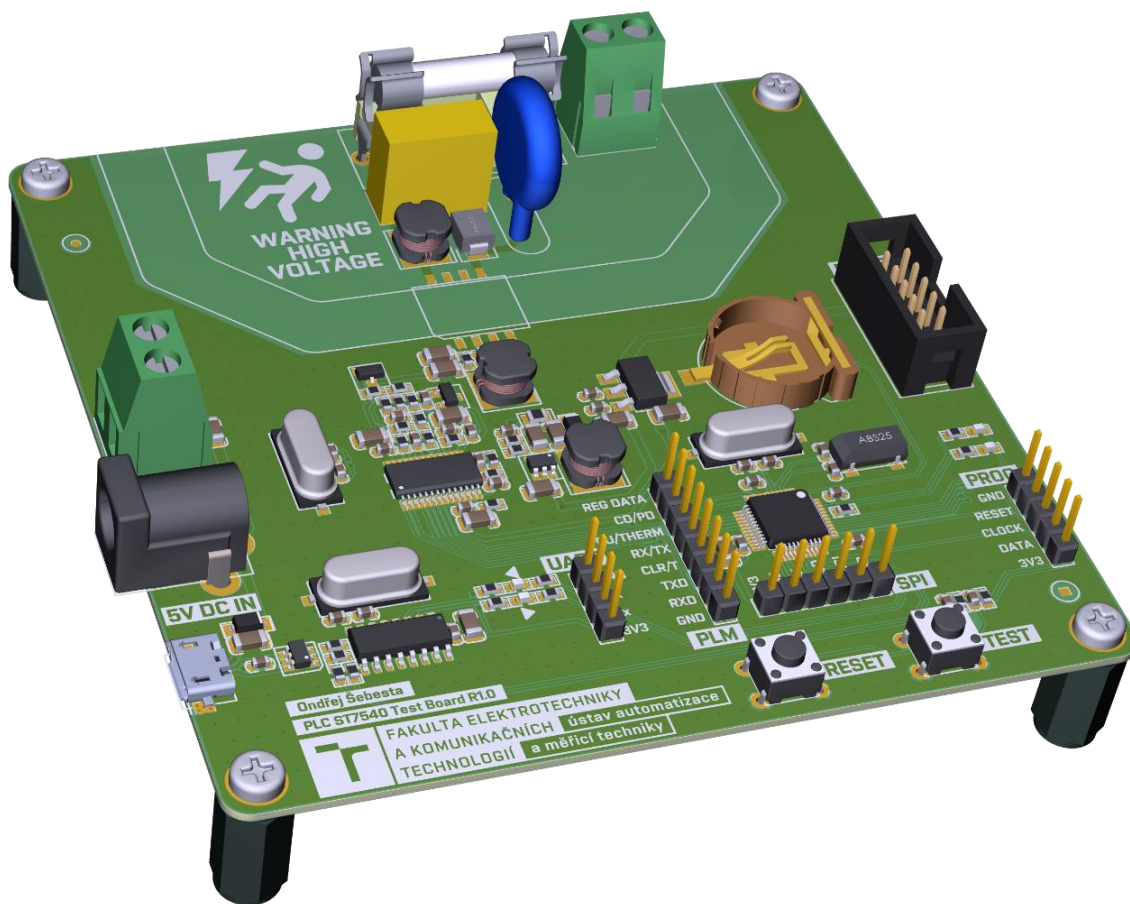
Deska plošných spojů, dále jen DPS, byla navržena v návrhovém prostředí Altium Designer 18. Jedná se o unifikované prostředí pro návrh plošných spojů s nativním 3D zobrazením, podporující vícedeskové sestavy či hierarchická schémata.

DPS byla navržena jako dvouvrstvá s prokovenými otvory a rozměry 100x100 mm, což jsou parametry vhodné pro prototypovou výrobu v Číně.

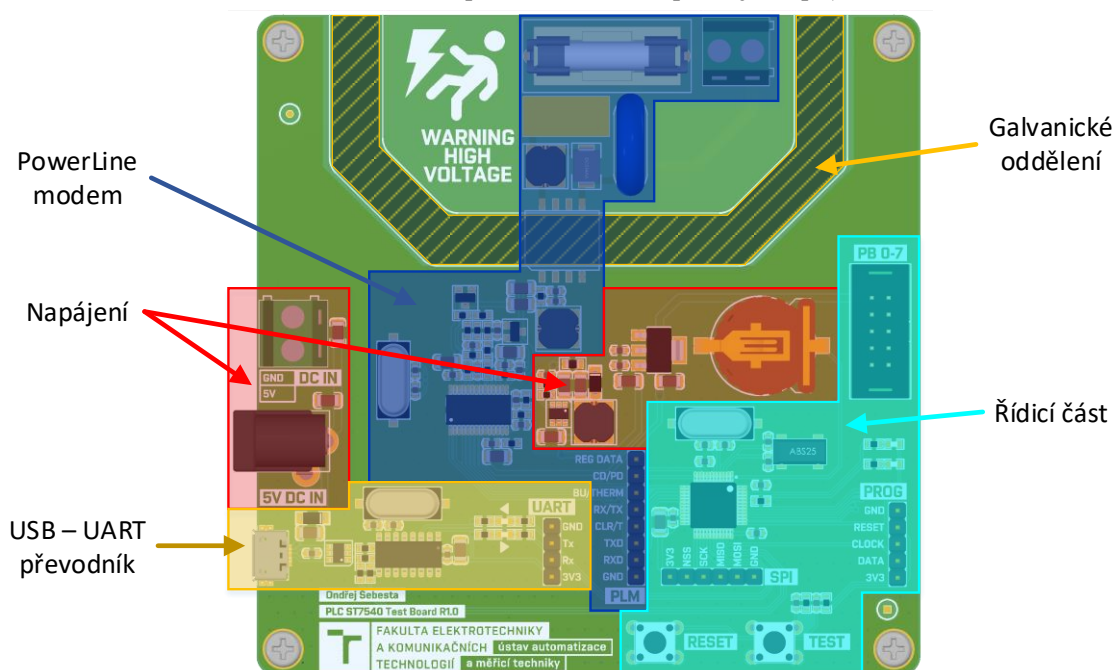
Při návrhu bylo dbáno také na bezpečnost – nejmenší povrchová vzdálenost mezi obvody s nízkým napětím a obvody, připojenými k napájecímu vedení je 8,6 mm. Aby DPS neležela při testování přímo na podložce, kde by mohlo dojít ke zkratu mezi piny na straně BOTTOM, je v rozích opatřena otvory pro uchycení distančních sloupků.

Pro usnadnění ladění jsou všechny důležité digitální signály vyvedeny na pinové konektory, umožňující připojení logického analyzátoru.

3D náhled na desku plošných spojů je na obrázku 5.4, znázornění jednotlivých obvodových bloků na obrázku 5.5.



Obrázek 5.4 - 3D pohled na desku plošných spojů.



Obrázek 5.5 - Znázornění jednotlivých obvodů na DPS.

## 5.3 Test funkce fyzické vrstvy

Pro testy byly osazeny dva kusy testovací DPS. K osazení byla využita profesionální osazovací linka, disponující tiskárnou na pájecí pastu, osazovacím automatem a pájením v parách. Z toho důvodu byly DPS osazeny kompletně, namísto postupného oživování a doosazování komponent.

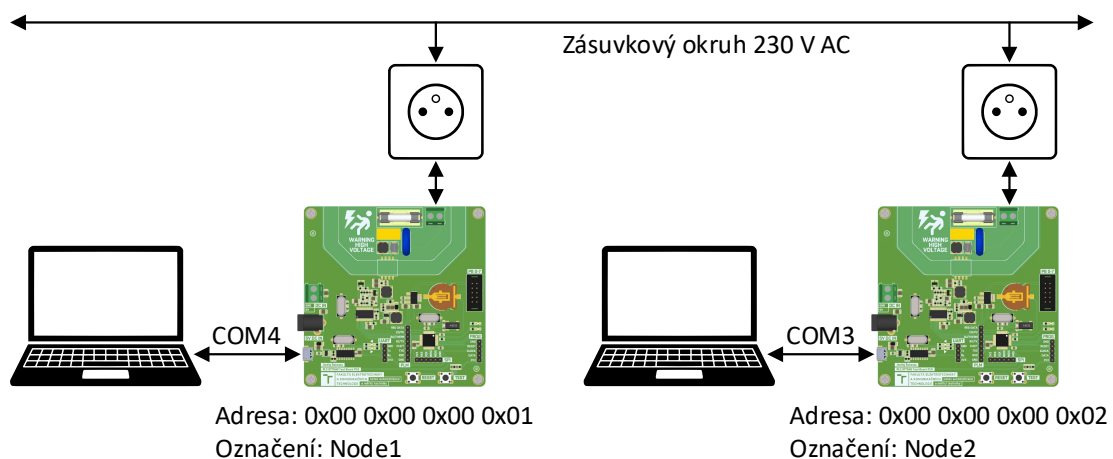
### 5.3.1 Ověření hardware

Po plném osazení bylo připojeno napájecí napětí a zkontrolována napětí jednotlivých zdrojů. Následně byl proveden test funkce převodníku USB na UART. Po připojení desky k PC se ve správci zařízení objevil emulovaný COM port. Na DPS byly propojeny signály Rx a Tx a bylo odesláno několik znaků, která se také vrátila.

V posledním kroce byl mikrokontrolérů nahrán firmware pro vývojovou desku STEVAL-IHP005V1.

### 5.3.2 Test komunikace mezi moduly

Při testování byl každý modul připojen do jiné zásuvky v rámci jednoho zásuvkového okruhu a propojen s notebookem pomocí USB kabelu, kterým byl i napájen. Oba notebooky byly napájeny z akumulátoru a odpojeny od sítě aby se zabránilo vazbě skrz společné napájení. Jediné spojení mezi moduly bylo tedy přes síťovou zásuvku a rozvody 230 V. V každém PC byla spuštěna aplikace Remote Console for GP PLM module - Rel.5.5.exe a přes virtuální COM port bylo navázáno spojení s deskou.

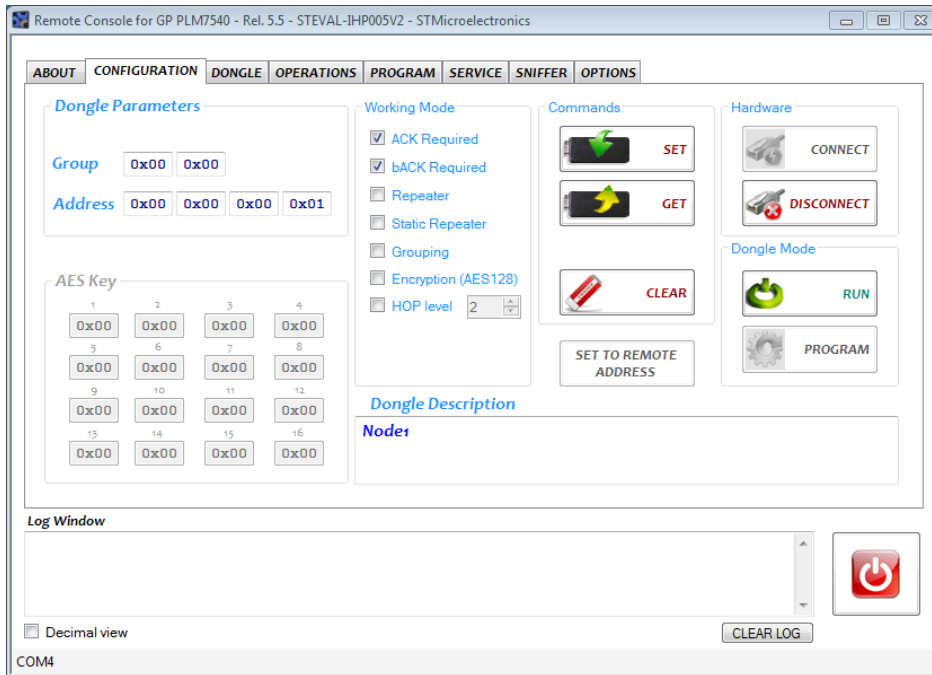


**Obrázek 5.6 - Testovací zapojení.**

Nejdříve bylo třeba nakonfigurovat obě testovací desky. Stiskem tlačítka CONNECT v záložce CONFIGURATION bylo navázáno spojení mezi deskou a aplikací. Testovací deska, v aplikaci označována jako dongle, se po připojení nachází v programovacím režimu, který umožňuje nastavit parametry. Pro test komunikace stačilo nastavit jen adresu a pracovní mód. První deska dostala

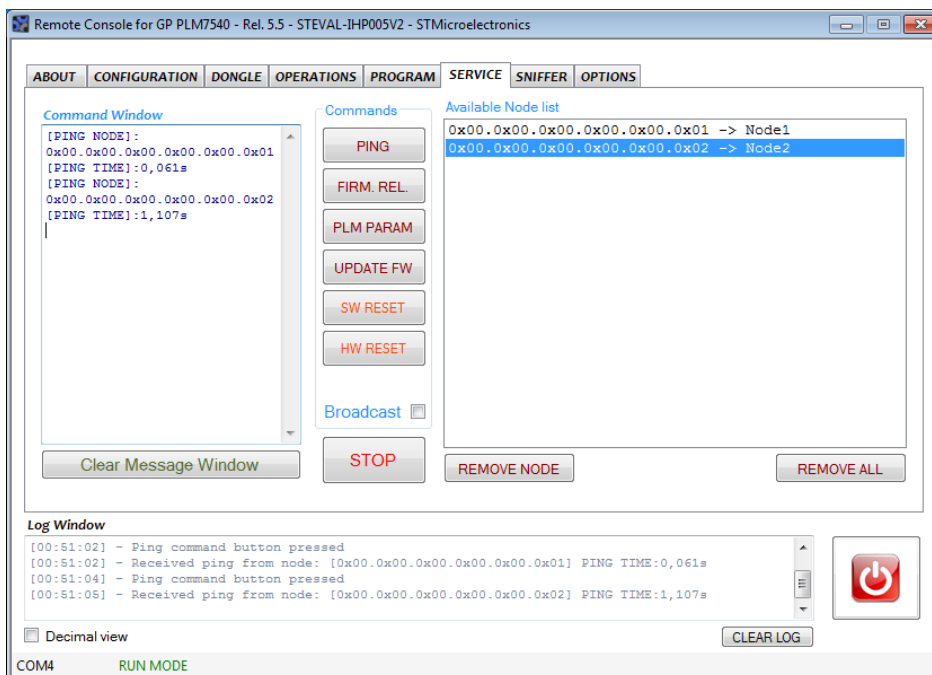


přiřazenu adresu 0x00 0x00 0x00 0x01 a označení Node1. Stiskem tlačítka SET byly parametry uloženy a po stisku tlačítka RUN přešla deska do provozního stavu.



**Obrázek 5.7 - Okno testovací aplikace - karta konfigurace.**

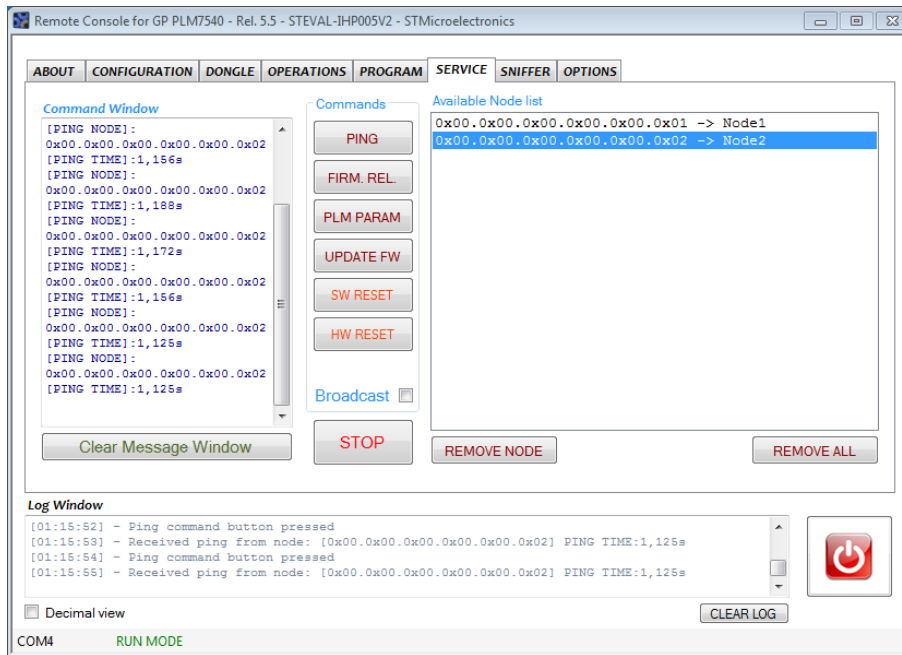
Stejným způsobem proběhla konfigurace druhé desky. Ta dostala adresu s posledním bajtem 0x02 a označení Node2. Jakmile byly obě desky v provozním stavu, bylo možné přejít na záložku SERVICE a otestovat spojení pomocí příkazu PING.



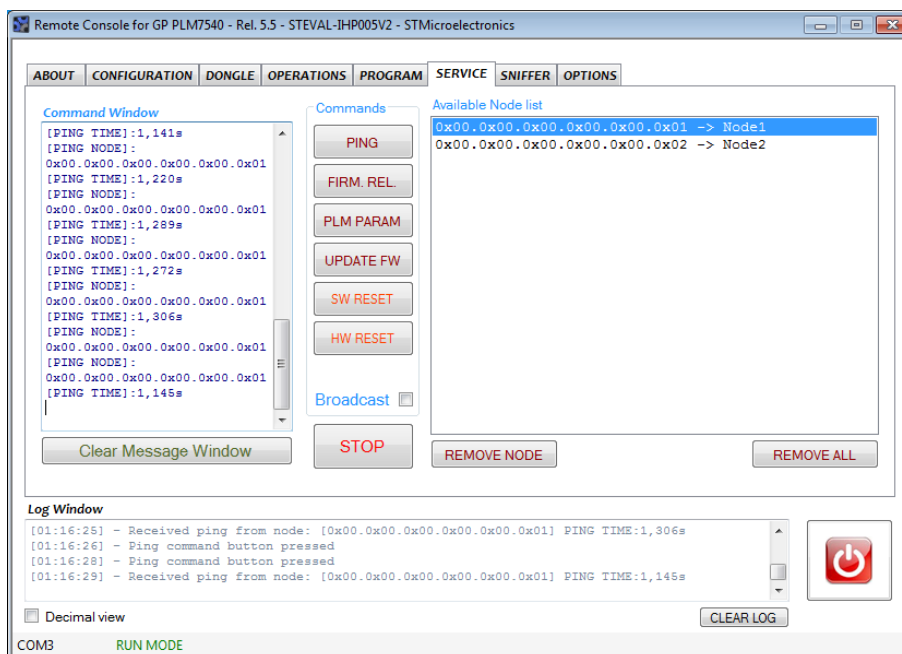
**Obrázek 5.8 - Okno testovací aplikace - test příkazu PING.**

V okně aplikace, připojené k desce s označením Node1, byla ze seznamu nejdříve vybrána adresa desky s posledním bajtem 0x01, což je právě adresa

Node1. Jak je vidět v poli Command Window, odezva byla pouhých 61 ms, neboť deska odeslala příkaz PING sama sobě. Další příkaz PING byl již odeslán na adresu Node2, tedy adresu s posledním bajtem 0x02. Zde už odezva činila 1,107 s. To, že Node2 odpověděl znamená, že komunikace mezi deskami byla úspěšná. Následně byly provedeny ještě další pokusy o odesílání příkazu PING a to jak z NODE1, tak z NODE2. Odezva při komunikaci mezi deskami byla v rozmezí 1 až 1,5 s.

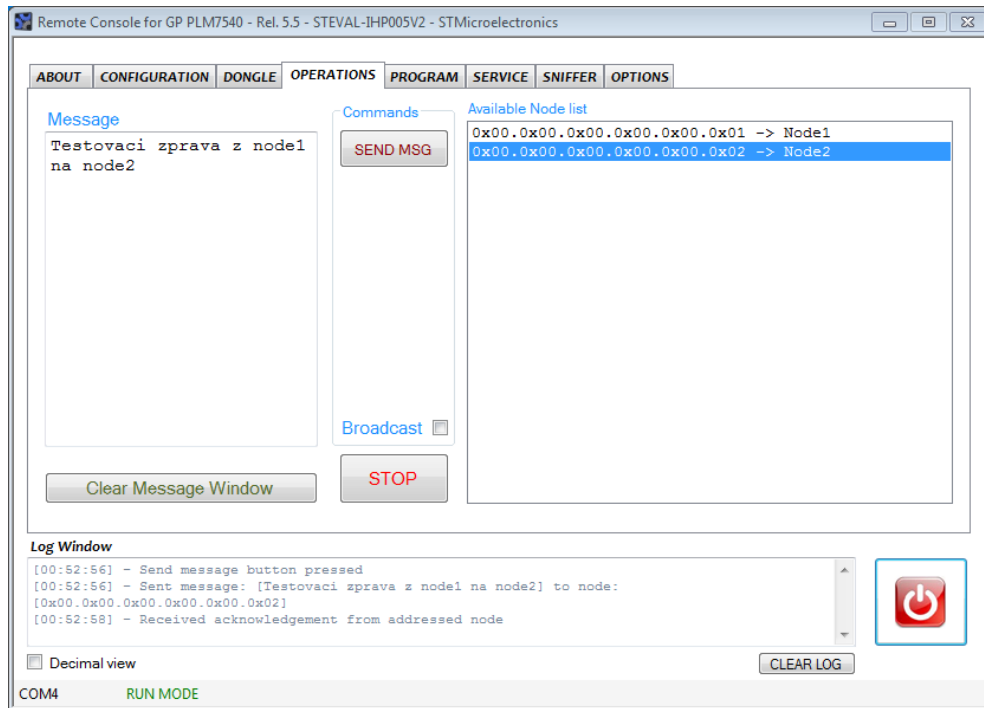


Obrázek 5.9 - Okno testovací aplikace – PING z Node1 na Node2.

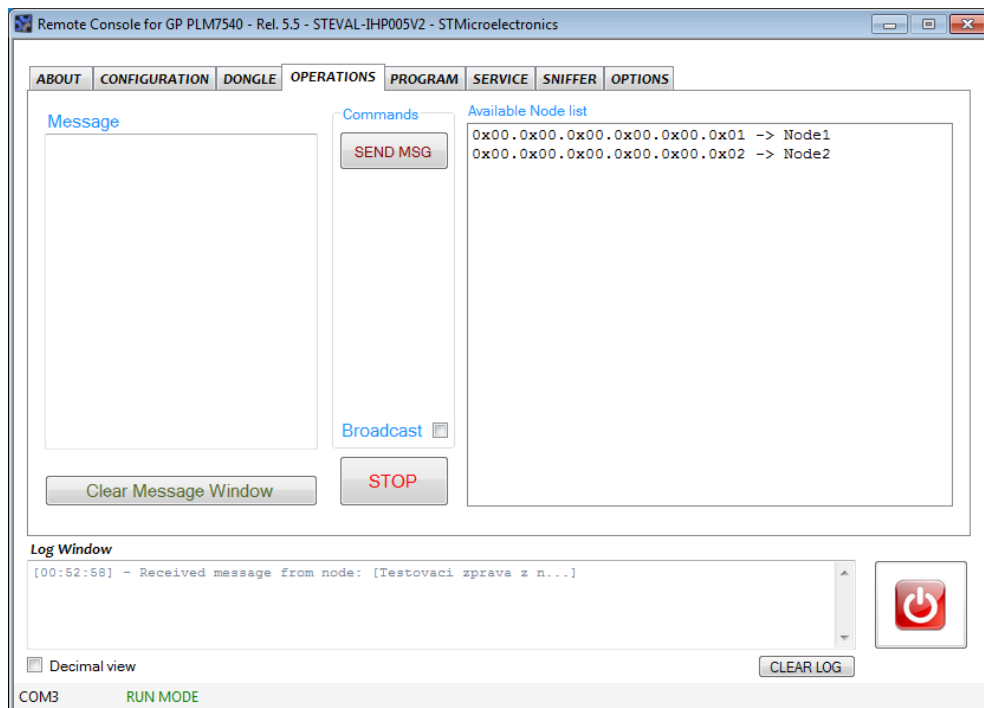


Obrázek 5.10 - Okno testovací aplikace – PING z Node2 na Node1.

Další možnosti testovací aplikace se nacházejí v kartě OPERATIONS. Z této karty lze odeslat zprávu buďto konkrétnímu nódu nebo tzv. broadcast zprávu na všechny nody. Pro test funkce byla odeslána zpráva z Node1 na Node2.

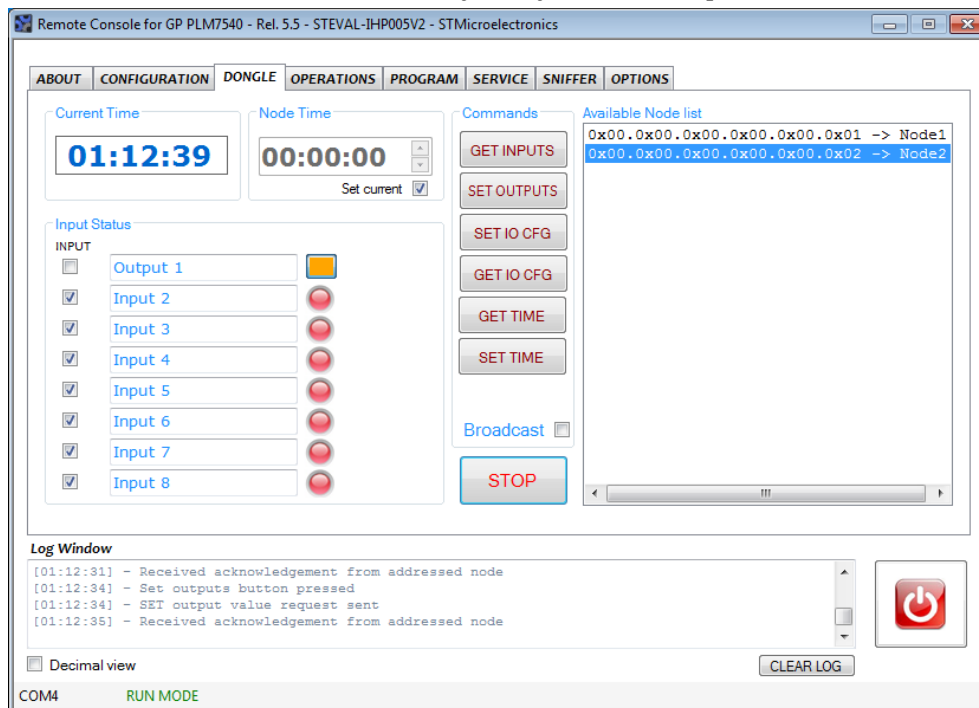


Obrázek 5.11 - Okno testovací aplikace – odeslání zprávy.



Obrázek 5.12 - Okno testovací aplikace – přijetí zprávy.

Z aplikace lze také nastavovat vstupně výstupní piny, vyvedené na rozšiřující konektor. Piny lze nastavit jako vstupy nebo výstupy a dle toho číst nebo zapisovat logické úrovně. Čtení i zápis je možné provádět z libovolného nódu na libovolný nód v seznamu nebo rovnou na všechny nody zatržením políčka Broadcast.



Obrázek 5.13 - Okno testovací aplikace – konfigurace vstupů a výstupů.

Karta PROGRAM umožňuje nastavení konfiguračního registru, které však pro test funkce navržené testovací desky není třeba. Na kartě SNIFFER je možné sledovat komunikaci na lince, avšak tato funkce vyžaduje jiný firmware desky, který nebyl testován.

## 6 UNIVERZÁLNÍ PLC MODUL S ST7540

Na základě požadavků na PLC systém a testů s vývojovou deskou byl navržen univerzální PLC modul s modemem ST7540, pojmenovaný jako „PLC ST7540 Module“. Při návrhu modulu byl kladen důraz na jeho univerzálnost a širokou využitelnost. Z toho důvodu byl návrh plošného spoje směřován k malým rozměrům, aby bylo možné modul integrovat i do zařízení, kde je málo prostoru. Napájecí část je uzpůsobena širokému rozsahu napájecího napětí od 12 V do 60 V, což je dostatečný rozsah pro integraci do většiny zařízení bez nutnosti instalace druhého zdroje pro napájení PLC modulu. Modul má vyvedeno celkem 15 signálů z mikrokontroléru. Tyto signály jsou spojeny s různými periferiemi, které lze využívat. Komunikační část modulu je galvanicky oddělena od napájecího vedení a modul je tedy možné propojit s částmi zařízení, přístupnými dotyku.

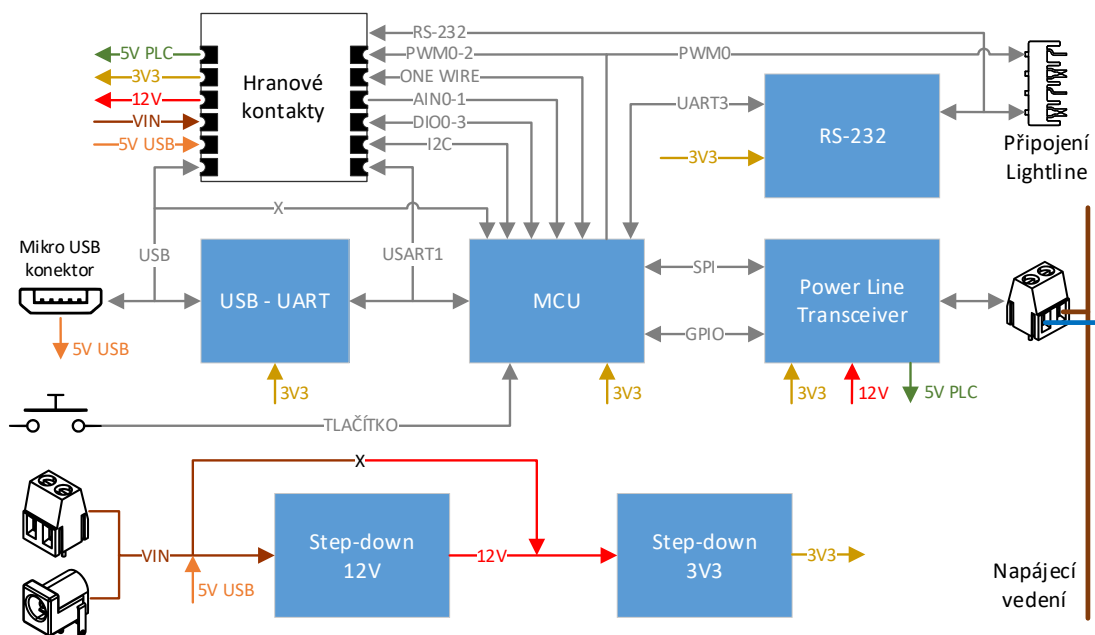
Pro komunikaci byl zvolen protokol Modbus v režimu RTU, a to hned z několika důvodů. Hlavními důvody jsou jeho jednoduchost, možnost adresace zařízení na sběrnici, kontrola validity přijatých a definovaný způsob předávání dat. Neméně důležitá je skutečnost, že se jedná o otevřený protokol, hojně využívaný v širokém spektru aplikací. Ke komunikaci s powerline moduly lze tedy jednoduše použít již existující softwarové nástroje.

Jelikož komunikace s moduly může probíhat po napájecím silovém vedení, přístupném i mimo oblast, kde je systém používán, je veškerá komunikace skrze napájecí vedení šifrována. K zabezpečení komunikace je použit standard AES, využívající 128bitový klíč.

Následující podkapitoly popisují navržený hardware a software, včetně nástrojů, použitých při vývoji. Závěr kapitoly je věnován možnostem využití univerzálního PLC modulu a návodu k práci s ním.

### 6.1 Hardware

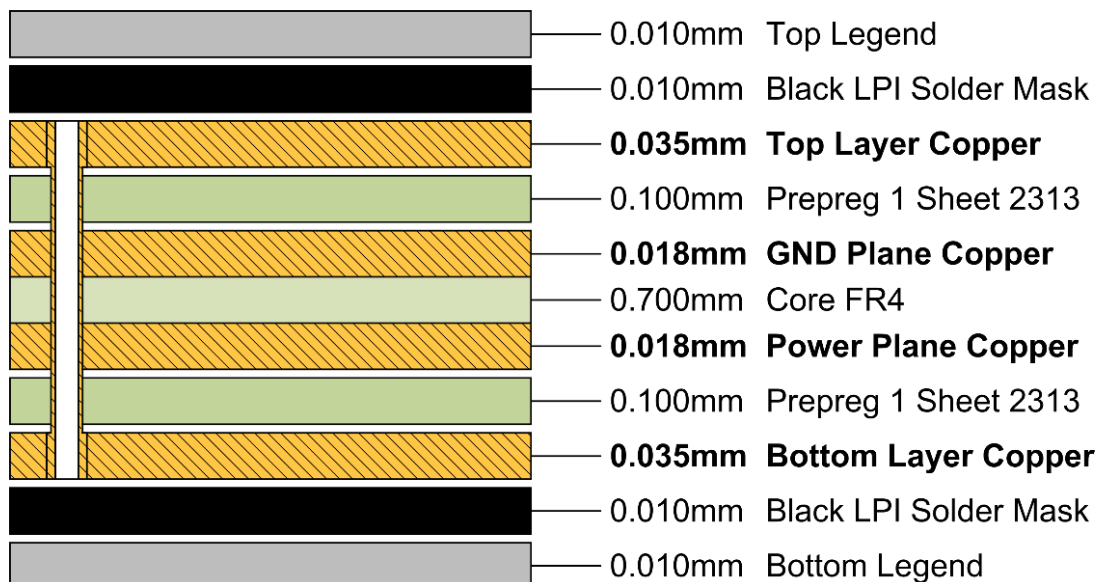
Hardware PLC modulu částečně vychází z vývojové desky. Obvody pro powerline byly kompletně zachovány, stejně tak použitý mikrokontrolér. Změněno bylo zapojení signálů k mikrokontroléru pro efektivnější využití jeho periferií a byla kompletně přepracována napájecí část. Kompletní blokové schéma PLC modulu je uvedeno na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1 - Blokové schéma zapojení PLC modulu

### 6.1.1 Plošný spoj

Modul je navržen na 4vrstvě plošném spoji o rozměrech 50 x 50 mm. Vnitřní vrstvy jsou použity jako napájecí, okrajové vrstvy slouží k propojení signálů. Hlavními přednostmi tohoto uspořádání vrstev jsou velmi nízká impedance napájecího vedení a možnost impedančního přizpůsobení spojů v krajních vrstvách. Skladba a tloušťka jednotlivých vrstev je znázorněna na obrázku 6.2.



Obrázek 6.2 - Skladba vrstev plošného spoje PLC modulu

Většina komponent na plošném spoji je v provedení pro SMT, některé konektory a pasivní součástky jsou v provedení pro THT. Vzhledem k nutnosti použití vysoké hustoty integrace byly primárně voleny pasivní komponenty R a C v pouzdře 0402, ostatní komponenty byly voleny v provedení s nejmenším dostupným pouzdrům.

## 6.1.2 Napájení

Modul lze napájet více způsoby. Napětí až 60 V lze připojit skrze souosý konektor o průměru 5,5 mm s kolíkem 2,1 mm nebo šroubovací konektor s roztečí 5 mm. Napájecí napětí lze přivést i na hranový konektor, tvořený kontakty na hraně desky. S omezením (viz text níže) lze modul napájet i přes USB konektor. Napájecí část, která zabírá přibližně jednu třetinu plošného spoje, je tvořena dvěma spínanými zdroji topologie step-down a dvěma lineárními stabilizátory, integrovanými v obvodu ST7540.

První zdroj slouží k úpravě vstupního napětí na 12V pro napájení analogového koncového stupně PLC modemu ST7540. Je řízen měničem TPS54260 a jeho vlastností je, že zvládne za určitých podmínek pracovat v režimu 100% střídavy. V tomto režimu je interní výkonový MOSFET naplno otevřen a úbytek napětí mezi vstupem a výstupem zdroje je dán pouze úbytkem na MOSFETu a na cívce. Pro výstupní napětí zdroje 12 V tak stačí vstupní napájecí napětí 12 V. V případě použití napájecího napětí 12 V je však zdroj prakticky nevyužitý. Pro tento případ lze místo zdroje osadit jen propojku v provedení dvou nulových rezistorů v pouzdře 0603. Propojka je zapojena mezi vstup a výstup zdroje.

Druhý zdroj generuje napětí 3,3 V pro zbývající obvody. Na vstup jsou mu přes sériové diody s malým úbytkem přiváděna 2 napětí. Jedním z nich je 12 V z prvního zdroje, druhým je 5 V, přiváděných USB konektorem. Toto řešení bylo použito, aby bylo možné napájet řídicí část z USB bez nutnosti připojení externího napětí. Při napájení z USB není napájen koncový stupeň PLC modemu a tudíž nelze komunikovat s powerline sítí. Možnost napájení přes USB tak slouží pouze k účelu konfigurace řídicího mikrokontroléru a pro účely ladění.

Pro napájení interních obvodů PLC modemu je ST7540 vybaven dvojicí lineárních stabilizátorů s výstupními napětími 5 V a 3,3 V. Jejich maximální proudové zatížení je 50 mA a lze je využít i k napájení externích obvodů. Výstup 5V stabilizátoru je vyveden na výstup modulu pro možnosti napájení externích komponent. Stabilizátor na 3,3 V není využit a na vývod součástky je připojeno napětí 3,3 V, generováno step-down měničem.

### 6.1.3 Řídicí část

Stejně jako v případě vývojové desky, je i pro řízení PLC modulu použit mikrokontrolér STM32F103CB. Napínání mikrokontroléru se ale liší od vývojové desky. Kvůli lepšímu využití interních periférií, dostupných pouze na některých vývodech bylo napínání optimalizováno. Kromě toho byly použity menší krystaly a pro integrovaný RTC obvod slouží jako záloha superkapacitor 330 mF namísto prostorově neúsporné baterie.

### 6.1.4 Komunikační část powerline

Zapojení modemu ST7450 je kompletně přejato z vývojové desky. V rámci ušetření místa na plošném spoji však byly vypuštěny pozice pro neosazované součástky a ostatní součástky byly nahrazeny menšími pouzdry. Vazební transformátor vlastní výroby byl z důvodu bezpečnosti nahrazen sériově vyráběným typem s definovanými parametry elektrické pevnosti.

### 6.1.5 RS-232

Pro komunikaci s Lightline jsou využity signály RxD a TxD z rozhraní RS-232. Jako budič slouží obvod MAX3221, který může být napájen napětím od 3 V do 5,5 V. Obvod má integrované nábojové pumpy, díky kterým zvládne generovat napětí, potřebné k dosažení validních napěťových úrovní signálů RS-232.

### 6.1.6 USB

Pro komunikaci s řídicím systémem bylo zvoleno rozhraní USB 2.0, vyvedené na konektor mikro USB. K výběru je vertikální i horizontální provedení. Za konektorem následuje ESD ochrana. S konektorem lze propojit buďto přímo mikrokontrolér nebo převodník USB na USART. Ten je připojen na USART mikrokontroléru. Na datových signálech jsou sériově připojeny dvě dvojice rezistorů o hodnotě 22  $\Omega$ , které zajišťují správné impedanční zakončení a současně dle osazení určují, zda-li je k datovým signálům na konektoru připojen mikrokontrolér nebo převodník z USB na USART.

## 6.2 Software

Software je navržen tak, aby bylo možné snadno přidávat nové funkcionality a nebo odebírat stávající. Vzájemné závislosti jednotlivých částí jsou omezeny na nutné minimum. Obsluha jednotlivých softwarových modulů je volána buďto jednorázově při určité akci nebo s nastavenou periodou v hlavní smyčce. Z toho důvodu jsou všechny části až na výjimky psány jako neblokující. Důležité je, aby žádná volaná funkce neblokovala běh programu na dobu delší, než nezbytně



nutnou (například voláním funkce *delay()* nebo blokujícím čekáním na nějakou událost).

## 6.2.1 Modul pro powerline komunikaci

Modul obsahuje všechny funkce potřebné pro obsluhu modemu ST7540 i pro samotnou komunikaci s powerline sítí. Část funkcí slouží pro výměnu dat mezi modulem a zbytkem programu, zbytek jsou interní funkce, ostatní mají na starost komunikaci s powerline sítí, práci s pakety, kontrolu dat a obsluhu modemu ST5740. Nejdříve budou popsány funkce, dostupné pro zbytek programu.

Pro správnou funkci modulu je třeba jej inicializovat voláním funkce *Powerline\_Init()*.

K odeslání dat do powerline sítě slouží funkce *PLM\_SendData()*, které stačí předat ukazatel na buffer s daty a délku dat. Na stav odesílání se lze dotazovat voláním funkce *PLM\_FrameSent()*, která vrací hodnotu 1 v případě, že byla všechna data odeslána.

Příjem je aktivován voláním funkce *PLM\_StartReceiveData()*. O tom, zda-li byla přijata data informuje funkce *PLM\_ValidFrameArrived()* návratovou hodnotou 1. Byla-li přijata validní data, jsou uložena v interním bufferu a lze k nim získat přístup pomocí funkcí *PLM\_GetReceivedBufferPointer()* a *PLM\_GetBufferLength()*. Funkce *GetReceivedBufferPointer()* vrací adresu bufferu s daty a *GetBufferLength()* vrací délku přijatých dat.

Interní funkce modulu je následující. Předávání dat mezi mikrokontrolérem a modemem probíhá přes periférii SPI ve slave režimu. Komunikace probíhá v přerušení, v jehož obsluze se nachází stavový automat, který řeší samotný příjem a odesílání dat.

Zavoláním funkce *PLM\_SendData()* je spuštěn proces odesílání dat. Je vytvořen paket, do kterého je vložena probouzecká sekvence 31 střídajících se znaků 1 a 0, následovaná 16bitovou preambulí, hlavičkou a délkou dat v paketu. Poté jsou vložena samotná data, která jsou zabezpečena proti chybám proložením s bajty, zajišťující dopřednou chybovou korekci FEC (Forward Error Correction). Objem přenášených dat se tím sice zdvojnásobí, ale je možné obnovit data poškozená impulzním šumem. Za daty následuje ještě jeden kontrolní bajt, rovněž opatřený chybovou korekcí. Po vytvoření paketu je nastavením signálů zvolen mód odesílání dat a čeká se na synchronizaci signálu CLK SPI periferie. Jakmile je detekována logická nula na signálu CLK, spustí se odesílání dat a povolí se přerušení SPI. Data jsou odesílána v přerušení a po odeslání posledního bajtu je nastaven příznak *PLM\_Flag.PLM\_F\_TXOK* na hodnotu *PLM\_FLAG\_TRUE*.

Zadetkuje-li modem ST7540 příchozí data, nastaví svůj výstup *CD\_PD* do logické nuly. Tím je vyvoláno přerušení, v jehož obsluze dojde k resetu SPI

periferie a vyprázdnění přijímacího bufferu. Následující příchozí data jsou zpracována stavovým automatem v obsluze přerušení SPI a po dokončení příjmu je nastaven příznak *PLM\_Flag.PLM\_F\_RXOK* na hodnotu *PLM\_FLAG\_TRUE*. Periodickým voláním funkce *PLM\_ValidFrameArrived()* lze kontrolovat stav přijímacího bufferu. Jsou-li v bufferu data, je zkontrolována jejich validita a v případě že jsou data validní jsou překopírována do bufferu, vráceného funkcí *PLM\_GetReceivedBufferPointer()*. Nejsou-li data validní, jsou zahozena a dále se pokračuje v režimu příjmu dat.

## 6.2.2 Modul pro obsluhu digitálních vstupů / výstupů

K inicializaci modulu slouží funkce *Dio\_Init()*, která voláním funkce *Dio\_SetConfig()* nastaví piny DIO0 až DIO3 jako vstupní s připojeným interním pull-up rezistorem.

Funkce *Dio\_SetConfig()* má dva vstupní parametry výčtového typu. První parametr slouží k volbě DIO0 až DIO3 a druhý k volbě konfigurace. DIO0 až DIO3 lze konfigurovat jako vstup nebo výstup. Možnosti konfigurace vstupu jsou s interním pull-up, případně pull-down rezistorem nebo jako plovoucí. Výstup lze konfigurovat jako push-pull nebo s otevřeným kolektorem. Nastavení jednotlivých DIO lze vyčíst voláním funkce *Dio\_GetConfig()*.

U výstupních DIO lze nastavovat jejich stav na hodnotu log. 0 nebo log. 1. K tomu slouží funkce *Dio\_SetValue()*. Funkce má dva vstupní parametry. Prvním je volba DIO, druhým je nastavovaná hodnota. Zápis hodnoty 0 má za následek změnu výstupního napětí DIO na 0 V. Zápis nenulové hodnoty změní stav DIO v závislosti na konfiguraci. Je-li DIO konfigurován jako push-pull, je na jeho výstupu napětí 3,3 V. Je-li konfigurován jako otevřený kolektor, pouze se rozpojí tranzistor, a výstup je plovoucí.

Pro sledování reálné logické úrovně na DIO slouží funkce *Dio\_GetValue()*. Funkce vrací přímo reálnou logickou úroveň, přítomnou na pinu daného DIO, bez ohledu na nastavenou hodnotu.

## 6.2.3 Modul pro obsluhu AD převodníku

Voláním funkce *Analog\_input\_Init()* je nejdříve inicializována DMA periferie, která kopíruje data z periferie AD převodníku do interní paměti. Následuje konfigurace AD převodníku. Je povolena interní napěťová reference, interní senzor teploty a jsou nakonfigurovány kanály, na které jsou přivedeny vstupy AIN0 a AIN1. Po konfiguraci je periferie AD převodníku povolena a proběhne autokalibrace, následovaná spuštěním konverze.

Když je konverze dokončena, DMA periferie uloží hodnoty do paměti a vyvolá obsluhu přerušení *DMA1\_Channel1\_IRQHandler()*. V obsluze přerušení

jsou data vyhlazena a je spuštěna další konverze. K vyhlazení dat jsou využity výpočty dle rovnic 6.1 a 6.2.

Rovnice, použité pro vyhlazení hodnot z AD převodníku:

$$X_n = ADC_n + X_{n-1} - \frac{X_{n-1}}{k}, \quad (6.1)$$

$$Y_n = \frac{X_n}{k}, \quad (6.2)$$

kde X je proměnná, uchovávající mezivýsledky, ADC je hodnota z AD převodníku, k je koeficient a Y je vyhlazená výstupní hodnota.

I když se výpočet může zdát složitý pro implementaci, kód je velmi jednoduchý. Následující kód demonstruje využití vyhlazovací funkce s koeficientem k = 16.

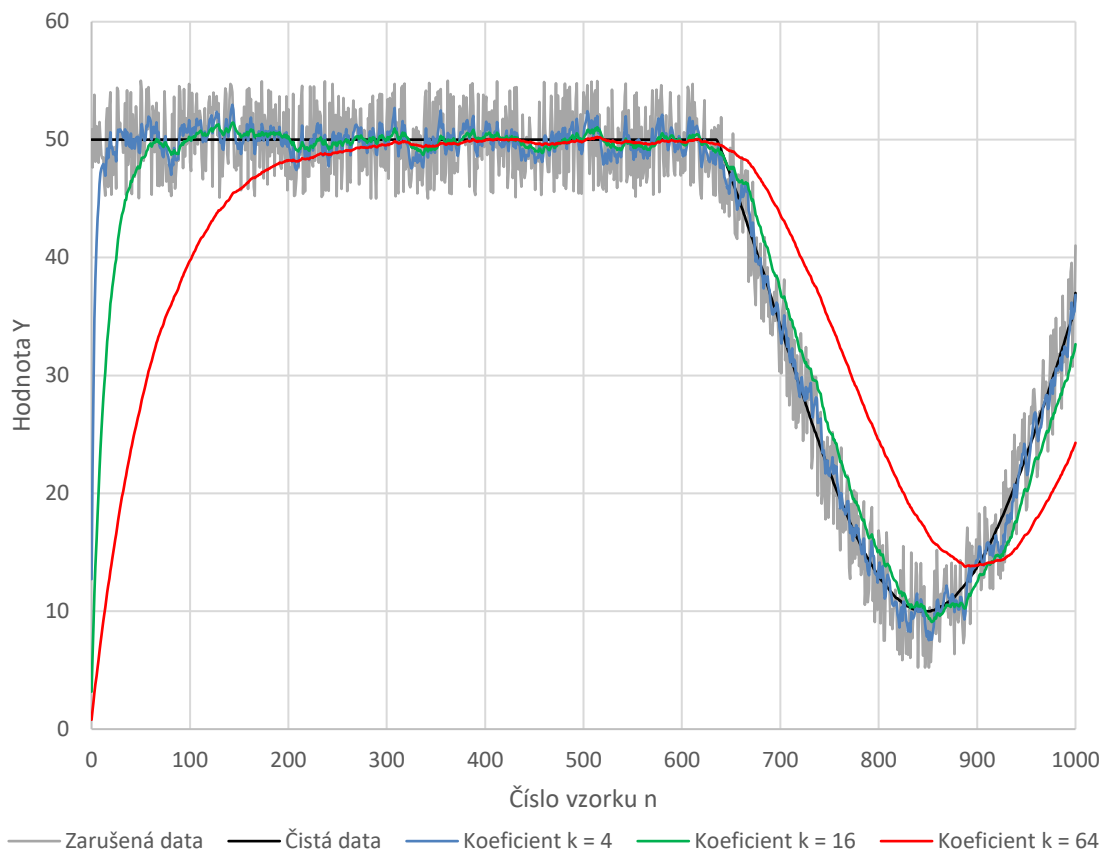
```
#define apply_Q(x) ((x) >> 4) //dělení vstupní proměnné hodnotou 16
uint16_t ADC; //surová hodnota z AD převodníku
uint32_t X; //proměnná pro uchování mezivýsledku

X -= apply_Q(X); //X = X - (X / 16)
X += ADC; //X = X + ADC

Y = apply_Q(X); //Y = X / 16
```

Metoda je méně náročná na výpočet i využití paměti oproti klouzavému průměru, ale přitom je velmi efektivní. Oproti klouzavému průměru, kde je význam všech vzorků stejný je u výše uvedené metody vyhlazení význam vzorků tím menší, čím jsou starší.

Pro demonstraci funkčnosti použité vyhlazovací funkce byl vytvořen datový soubor čítající 1000 hodnot. K těmto hodnotám byl přičten šum v podobě náhodných čísel v intervalu (-5;5). Graf na obrázku 6.3 znázorňuje velikost výstupní hodnoty Y za použití různých koeficientů k. Jak lze vidět, vyšší hodnota koeficientu k má za následek vyšší potlačení šumu, ale současně trvá déle přiblížení k ustálenému stavu. Proto je vhodné volit konstantu k s ohledem na danou aplikaci.



**Obrázek 6.3 - Závislost výstupní hodnoty Y na koeficientu k.**

K samotnému předávání vyhlazených hodnot z AD převodníku slouží čtveřice funkcí *Analog\_input\_GetVccVoltage()*, *Analog\_input\_GetAin0Voltage()*, *Analog\_input\_GetAin1Voltage()* a *Analog\_input\_GetInternalTemperature()*. Tyto funkce vypočítávají vyhlazenou hodnotu Y a rovnou ji přepočítávají na napětí, případně teplotu. Návrátové hodnoty napětí jsou v milivoltech a teplota ve stupních Celsia.

### 6.2.4 Modul pro obsluhu PWM výstupů

Modul využívá dva hardwarové časovače. Výstup PWM0 využívá časovač TIM3, výstupy PWM1 a PWM2 využívají časovač TIM4. Vzhledem k této skutečnosti nelze výstupům PWM1 a PWM2 nastavovat periodu PWM signálu nezávisle, ale jen společně.

Modul je inicializován voláním funkce *Pwm\_Init()*. Funkce nakonfiguruje oba časovače a nastaví výstupy pro generování PWM. Výchozí frekvence PWM je 1 kHz a střída nula.

Změnu výchozí frekvence je možné provést voláním funkce *Pwm0\_SetFrequency()*, případně *Pwm1\_2\_SetFrequency()*. Vstupní proměnnou je

hodnota nula až pět, odpovídající frekvencím 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz a 100 kHz. Nastavenou frekvenci lze vyčíst voláním funkce *Pwm0\_GetFrequency()*, případně *Pwm1\_2\_GetFrequency()*.

Nastavení střídy probíhá pomocí funkcí *PwmX\_SetDuty()*, kde X může nabývat hodnot 0, 1 nebo 2 v závislosti na požadovaném PWM výstupu. Vstupní hodnota může nabývat hodnot 0 až 1000. Hodnota vyšší než 1000 je omezena na hodnotu 1000. Hodnota je dále přepočtena dle nastavení děliček časovače a uložena do příslušného registru časovače, což má za následek změnu střídy PWM signálu. Zadaná vstupní hodnota je před přepočtem uložena do statické interní proměnné a může být vyčtena pomocí funkce *PwmX\_GetDuty()*.

## 6.2.5 Obsluha UARTu

Sériové rozhraní UART je v mikrokontroléru využito hned dvakrát. V prvním případě se jedná o komunikaci s řídicí aplikací, pro kterou je použita periférie USART1. Druhý UART, využívající periférii USART3, je přiveden na budič sériové linky RS-232.

Nastavení i funkce obou UARTů jsou stejné. V nastavení je provedena inicializace periférie USART, příslušné vstupy a výstupy a jsou povolena přerušení.

Oba UARTy jsou obsluhovány v přerušení a využívají odesílací a přijímací frontu, podporovanou knihovnou queue.

Odeslání dat probíhá následovně. Zavoláním funkce *Uart\_SendBufQ()*, jíž je předán buffer s daty a jeho délka, je tento buffer zařazen do odesílací fronty a je povoleno přerušení při prázdném odesílacím registru periférie USART. Pokud je odesílací registr prázdný, je vyvolána obsluha přerušení, ve které je vyčten jeden bajt dat z fronty a je vložen do odesílacího registru, ze kterého je následně odeslán. Tento proces je opakován do doby, než je fronta prázdná. Po vyprázdnění fronty je přerušení při prázdném odesílacím registru zakázáno až do dalšího volání funkce *Uart\_SendBufQ()*.

Příjem dat probíhá opět v obsluze přerušení. Příchozí data jsou řazena do přijímací fronty. Je-li po dobu trvání jednoho znaku detekován klidový stav linky, je tento stav vyhodnocen jako ukončení vysílání a je vyvoláno přerušení a v přijímací frontě je nastaven příznak *QUEUE\_FLAG\_RXTIMEOUT*. Příznak *QUEUE\_FLAG\_RXTIMEOUT* je periodicky testován a v případě, že je aktivní jsou data z fronty vyčtena a zpracována. Vyčítání dat z fronty probíhá voláním funkce *Dequeue()*. Jako vstupní parametry jsou předány dva ukazatele. První slouží k výběru fronty a druhý odkazuje na adresu, kam bude uložen vyčítaný bajt dat. Návratovou hodnotou funkce *Dequeue()* je počet dat ve frontě.

## 6.2.6 Obsluha LED a tlačítka

Obsluha zelené a červené LED spolu s tlačítkem je sjednocena v souboru s názvem BSP, což je zkratka anglických slov Board Support Package. Jedná se o software, spolupracující s hardwarovými prvky konkrétního zařízení.

Inicializace se provádí voláním funkce *BSP\_Init()*. Při inicializaci se povolí hodiny pro použité vstupně výstupní porty a inicializují se výstupy pro LED a vstup pro tlačítko. Na konci inicializace dojde k rozsvícení zelené i červené LED na dobu 500 ms.

LED lze rozsvítit, zhasnout nebo změnit její stav trojicí funkcí *BSP\_LedXOn*, *BSP\_LedXOff()* a *BSP\_LedXToggle()*, kde X zastupuje slovo Red nebo Green v závislosti na tom, zda-li se jedná o červenou nebo zelenou LED.

Stav tlačítka lze sledovat voláním funkce *BSP\_IsButtonPressed()*. Funkce vrací hodnotu jedna v případě stisku tlačítka. V opačném případě vrací nulu.

## 6.2.7 Modul pro komunikaci se senzorem DS18B20

Modul je inicializován voláním funkce *DS18B20\_Init()*. Funkce správně nastaví pin procesoru a statické proměnné, nezbytné pro funkci modulu.

Pro správné fungování je třeba každých 100 ms periodicky volat funkci *DS18B20\_Callback\_01s()*. Prvním voláním funkce je spuštěno měření teploty, nastaveno počítadlo pro čekání a přepnut mód do režimu čekání. Následujících sedm volání funkce pouze dekrementuje počítadlo pro čekání. Deváté volání funkce dekrementuje počítadlo na nulu a tím spustí vyčtení změřené teploty ze senzoru DS18B20. U přijatých dat je ověřen kontrolní součet a jsou-li data validní, je z nich vypočtena teplota, která je následně uložena do statické proměnné *ds18B20\_temperature*, kde je nadále uchovávána. Jsou-li data nevalidní, je do statické proměnné uložena hodnota 0x8000, což je minimální hodnota datového typu uint16\_t. Nakonec je mód přepnut do režimu měření a je proveden návrat z funkce. Následujícím voláním funkce *DS18B20\_Callback\_01s()* se vše opakuje.

K předání teploty slouží funkce *DS18B20\_GetTemperature()*. Funkce pouze vrací statickou proměnnou *ds18B20\_temperature*, uchovávající poslední vyčtenou teplotu. Teplota je uložena s přesností na jedno desetinné místo. Pro správnou interpretaci teploty je tedy nutné hodnotu podělit deseti.

## 6.2.8 Knihovna pro emulaci EEPROM

Knihovna využívá jednu stránku paměti FLASH o velikosti 1 KB a 1 KB paměti SRAM k emulaci EEPROM paměti.

Knihovnu je třeba inicializovat voláním funkce *ee\_init()*, která načte celou stránku FLASH do SRAM.

K datům je možno přistupovat přes funkci *ee\_read()*, případně zapisovat data pomocí funkce *ee\_writeToRam()*. Funkce *ee\_writeToRam()* zapisuje data pouze do SRAM paměti. Pro jejich uložení do FLASH slouží funkce *ee\_commit()*. Toto řešení je použito z důvodu omezeného počtu zápisů do FLASH paměti.

Celou paměť FLASH lze smazat voláním funkce *ee\_format()*. Při mazání lze zvolit, zdali se mají smazat pouze data ve FLASH nebo i v SRAM.

## 6.2.9 Modbus knihovna

Knihovna se skládá ze dvou částí. V první části, v souborech *Modbus.c* a *Modbus.h*, se nachází funkce pro zpracování Modbus rámců a generování odpovědí. Ve druhé části, v souborech *Modbus\_data.c* a *Modbus\_data.h*, se nachází část, určená k editaci. Nastavují se zde registry a jejich adresy a reakce na zápis do registrů a čtení z registrů.

Modbus knihovna je inicializována voláním funkce *MODBUS\_Init()*. Při inicializaci je z emulované EEPROM vyčtena uložená adresa zařízení. Jedná-li se o první spuštění zařízení, je EEPROM prázdná a je vyčtena hodnota 255. V takovém případě je nastavena výchozí adresa zařízení 254.

Pro práci s adresou slouží několik funkcí. Funkce *MODBUS\_GetSlaveAddress()* vrací aktuálně nastavenou adresu zařízení. K načtení adresy z EEPROM slouží funkce *MODBUS\_LoadSlaveAddress()*. Nastavení nové adresy lze provést dvěma způsoby. Prvním z nich je volání funkce *MODBUS\_SetDefaultAddress()*, která adresu nastaví na výchozí hodnotu 254 a uloží ji do EEPROM. Druhý způsob umožňuje nastavit libovolnou adresu z rozsahu 1 až 247 a je složen ze dvou kroků. Nejdříve je zavolána funkce *MODBUS\_SetAddress()*, již je předána nová adresa. Adresa je zkontrolována, a pokud je ve validním rozsahu, je uložena do EEPROM a je nastaven příznak pro změnu adresy. Adresa zařízení však zatím zůstává nezměněna. Ke změně dojde až po zavolání funkce *MODBUS\_CheckNewAddress()*, která testuje příznak pro změnu adresy a v případě, že je příznak nastaven, načte z EEPROM novou adresu, která je od této chvíle použita jako adresa zařízení. Důvod nastavení adresy ve dvou krocích je prostý. Změnu adresy lze vyvolat zápisem do příkazového registru a předáním nové adresy jako parametru během komunikace přes Modbus. Pokud by k nastavení nové adresy došlo ihned po přijetí příkazu, obsahovala by odpověď již novou adresu zařízení a nebyla by validní. Funkce *MODBUS\_SetAddress()* je tedy volána již během komunikace, ale funkce *MODBUS\_CheckNewAddress()* až po odeslání odpovědi a ukončení komunikace.

### 6.2.10 Šifrování AES-128

Proti odposlechu jsou data, odesílaná po napájecím vedení, zašifrována pomocí algoritmu AES-128 v režimu CBC. Pro šifrování a dešifrování je využita knihovna

AES, publikovaná v roce 2012 na oficiálním Arduino fóru uživatelem Markem Tillotsonem. Knihovní funkce vyžadují předzpracovaná data, proto jsou data pro knihovnu předzpracována v modulu *Security*, který současně usnadňuje její použití.

Inicializace modulu je provedena voláním funkce *Security\_Init()*. Voláním se nastaví 128bitový klíč spolu s inicializačním vektorem.

K zašifrování dat slouží funkce *Security\_EncryptBuffer()*. Vstupními parametry jsou buffer s k odeslání daty a délka dat. Výstupní hodnotou je délka zašifrovaných dat. Funkce nejdříve přesune data v bufferu o 3 indexy výš. Na index 0 uloží vstupní délku dat a na index 1 a 2 uloží 16bitovou hodnotu tzv. semena. Semeno je vypočteno z rozdílu výstupní hodnoty funkce *millis()* a součtu předchozí hodnoty semena a analogové hodnoty z interního senzoru teploty mikrokontroléru. Tato pseudonáhodná hodnota zajistí, aby byl výsledek šifrování rozdílný i při stále se opakujících vstupních datech. Bez použití semena by zašifrovaná data byla při stejných vstupních datech vždy stejná a případný útočník by mohl do sítě snadno odeslat podvržená data. Po přidání semena následuje doplnění výplně, aby měla šifrovaná data délku, rovnou celočíselnému násobku čísla 16. Po této úpravě je buffer s daty zašifrován a výsledná délka zašifrovaných dat je funkcí vrácena jako návratová hodnota.

Data, přijatá z powerline sítě jsou zpracována funkcí *Security\_DecryptBuffer()*. Vstupními parametry jsou buffer s přijatými daty a délka dat. Výstupní hodnotou je délka dešifrovaných dat. Funkce nejdříve zkontroluje správnou délku dat pomocí operace modulo 16. Je-li výsledek nenulový, je funkce ukončena s návratovou hodnotou 0. V opačném případě je provedeno dešifrování s následným odebráním semena a informaci o délce původních dat. Informace o délce původních dat je vrácena jako návratová hodnota.

Šifrování lze povolit nebo zakázat definicí hodnoty *SECURITY* v souboru *defines.h*.

### 6.2.11 Modul pro ovládání Lightline

Modul je inicializován voláním funkce *LightLine\_Init()*. Nejdříve je inicializován příslušný UART a poté je do Lightline odesláno nastavení jasu na hodnotu 0.

K nastavení jasu slouží funkce *LightLine\_SetBrightness()*, která má jako vstupní parametr hodnotu jasu v rozmezí 0 až 1000. Zadaná hodnota je funkcí *map()* převedena z rozsahu 0 až 1000 na rozsah 1023 až 0. Lightline totiž nastavuje jas jako 10bitovou hodnotu a hodnota nula odpovídá plnému jasu. Přepočtená hodnota jasu je zabalena do paketu spolu s příkazem pro nastavení jasu. Paket je doplněn o kontrolní součet a je odeslán přes UART do Lightline.



Nastavenou hodnotu jasu lze získat voláním funkce *LightLine\_GetBrightness()*, která vrací statickou proměnnou se zadanou hodnotou jasu.

### 6.2.12 Systémový časovač

Systémový časovač je realizován k tomu určeným 24bitovým hardwarovým časovačem. K jeho přetečení dochází každou 1 ms a při přetečení je vyvoláno přerušení. V obsluze přerušení je inkrementována 32bitová proměnná *millis\_cnt* a dekrementována proměnná *delay\_time*.

Proměnná *millis\_cnt* je přístupná přes funkci *millis()* a udává počet milisekund, které uběhly od posledního restartu mikrokontroléru. Funkce *millis()* má široké uplatnění. Lze ji využít k časování nebo neblokujícímu čekání.

K blokujícímu čekání slouží funkce *delay()*, která pracuje s proměnnou *delay\_time* periodicky dekrementovanou v přerušení systémového časovače. Vstupem funkce *delay()* je počet milisekund, po které má trvat blokující čekání.

### 6.2.13 Inicializace

Inicializace probíhá v následujícím pořadí. Nejdříve je spuštěna inicializační procedura ze souboru *startup\_stm32f103xb.s*, ze které je volána funkce *main()*. Následuje povolení hodin periférií a zakázání rozhraní JTAG, které je ve výchozím stavu povoleno a blokuje některé používané výstupy mikrokontroléru. Dále jsou nastaveny hodiny procesoru a systémový časovač, generující 1ms přerušení.

Jako další je inicializován USART1, který je napojen na USB-UART převodník a slouží k odesílání výpisů pro ladění. Následuje inicializace funkce pro blokující čekání s mikrosekundovým rozlišením a po ní inicializace DS18B20, která mikrosekundová čekání využívá. Dalšími v pořadí jsou PWM výstupy, analogové vstupy, digitální vstupy a výstupy, LED a tlačítko. Je-li povoleno použití šifrování, následuje jeho inicializace. Dále je inicializována emulovaná EEPROM, knihovna pro Modbus a knihovna pro powerline. Pokud při inicializaci knihovny pro powerline dojde k chybě v podobě několika neúspěšných pokusů o navázání komunikace s modemem ST7540, je program zastaven a rozsvítí se červená LED. Posledním krokem inicializace je spuštění watchdog obvodu, který resetuje mikrokontrolér v případě, že se program někde zacyklí.

Pořadí inicializace je třeba ve většině případů dodržet. V opačném případě by mohlo dojít k pokusu o inicializaci modulu, využívajícího některý z modulů, který ještě inicializován nebyl.

## 6.2.14 Hlavní programová smyčka

Hlavní programová smyčka řeší funkčnost celého modulu. Dochází v ní k periodickému volání funkcí výše popsaných programových modulů.

Ve smyčce je za použití funkce *millis()* vytvořeno časování, umožňující volat funkce s periodou 10 ms, 100 ms a 1 s. Perioda 100 ms je využita k volání funkce *DS18B20\_Callback\_01s()*, obsluhující teplotní senzor DS18B20. S periodou 1 s je nastavován watchdog a testován stisk tlačítka. Časování je využito i k ovládní zelené LED, signalizující aktivní komunikaci. Časovač pro LED je při každé komunikaci nastaven na časový limit 100 ms, po který zelená LED svítí.

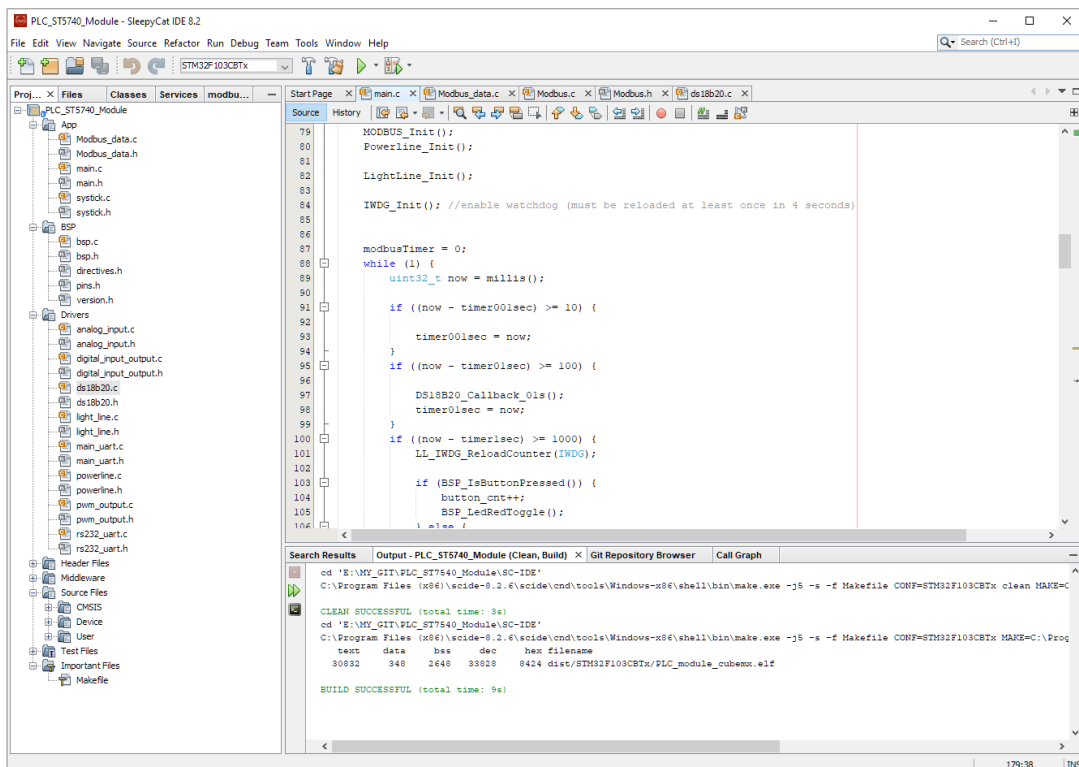
S minimální možnou periodou, bez použití časování, je volána funkce *modbus\_process()*. Tato funkce testuje data přijatá z UARTu a z powerline sítě a řeší jejich zpracování.

## 6.3 Použité vývojové nástroje

K usnadnění vývoje software byly využity volně dostupné nástroje, popsané v podkapitolách níže.

### 6.3.1 Vývojové prostředí a konfigurační nástroj

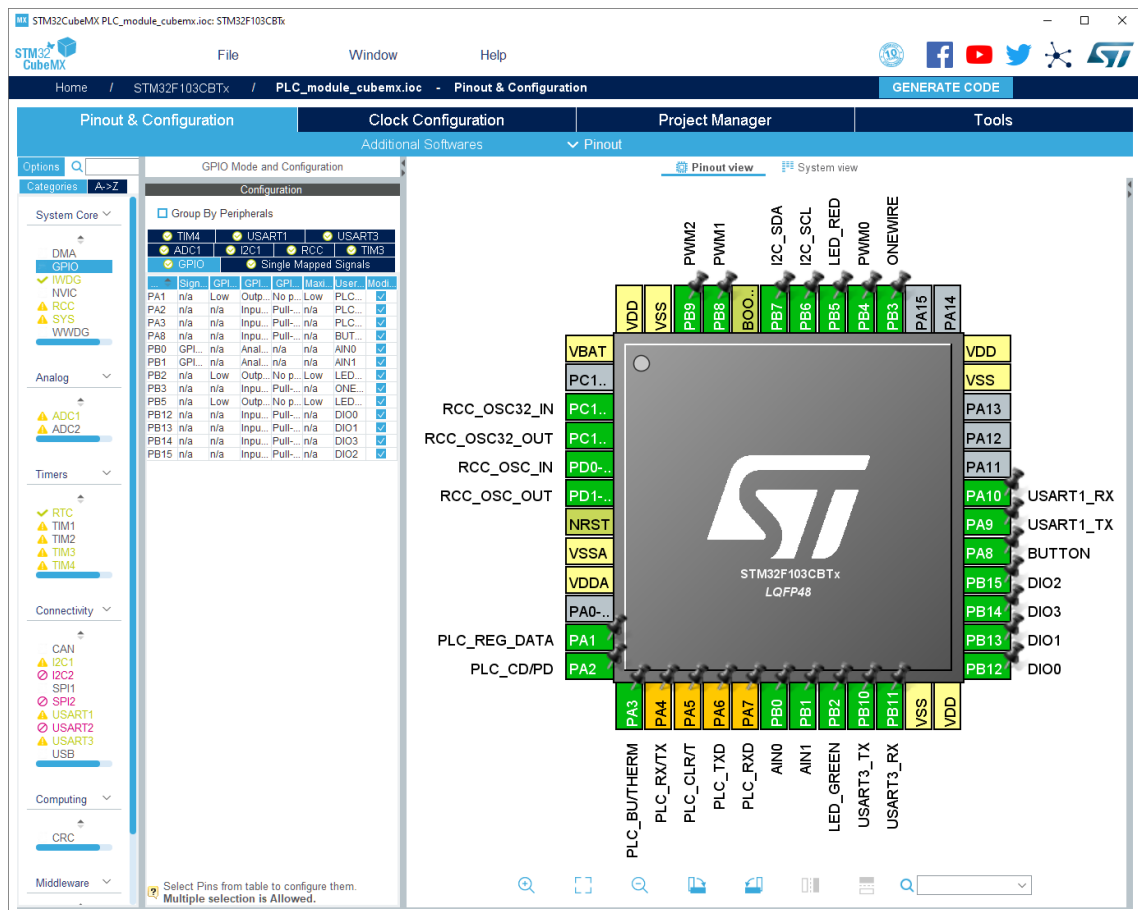
Software pro mikrokontrolér je psán v jazyce C. Jako vývojové prostředí, dále jen IDE bylo zvoleno Sleepy Cat IDE, zkráceně SCIDE. SCIDE je založeno na platformě NetBeans a slouží pro vývoj software pro mikrokontroléry s jádrem ARM. Obsahuje kompilátor a nástroj pro nahrávání a ladění software.



Obrázek 6.4 - Okno programu SCIDE.

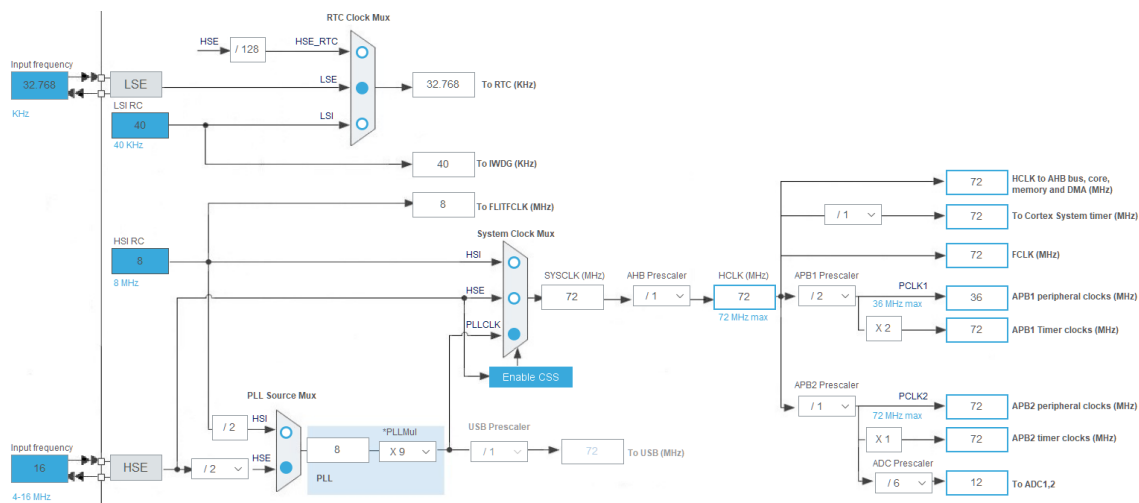
Pro generování potřebných knihoven a nastavení mikrokontroléru byl použit nástroj STM32CubeMX. Tento nástroj usnadňuje konfiguraci pomocí grafických nástrojů, jimiž lze nakonfigurovat jednotlivé periferie mikrokontroléru. Nástroj umí generovat zdrojové kódy, využitelné pro inicializaci periferií i všechny potřebné knihovny.

Po spuštění nástroje je jako první nutné vybrat použitý mikrokontrolér. V tomto případě se jedná o typ STM32F103CBTx. Následuje přechod na hlavní obrazovku s aktivní kartou „Pinout & Configuration“ viz obrázek 6.5. Zde lze nakonfigurovat použité GPIO a případně jim přiřadit vlastní název, který bude využit i ve zdrojových kódech. Karta dále umožňuje konfiguraci periferií jako jsou časovače, AD převodníky, SPI a další.



Obrázek 6.5 - Okno nástroje STM32CubeMX.

Na kartě „Clock Configuration“ lze kompletně nastavit hodiny a děličky mikrokontroléru. Použité nastavení je zobrazeno na obrázku 6.6.



**Obrázek 6.6 - Nastavení hodin a děliček mikrokontroléru v STM32CubeMX.**

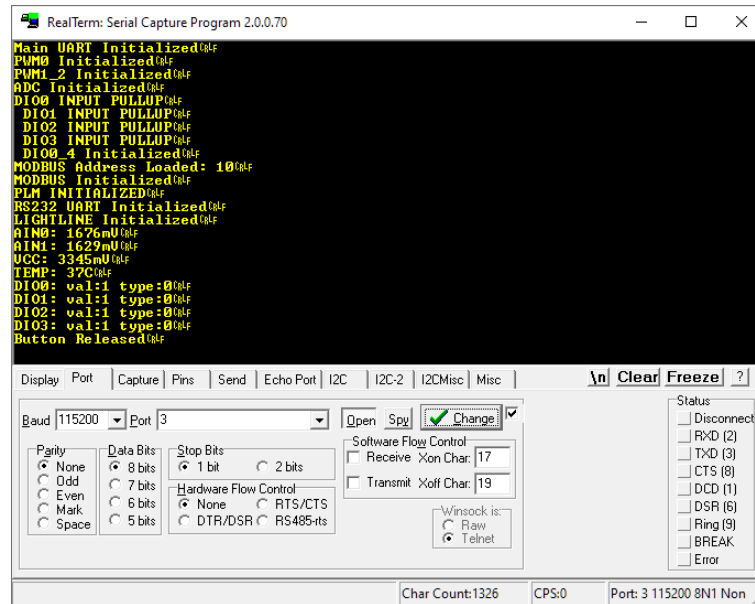
Nastavení počíta s použitím externího krystalu s frekvencí 16 MHz. Z něj je pomocí děliček a PLL generován hodinový signál o frekvenci 72 MHz, který je dále distribuován do periférií. Pro interní RTC obvod je použit externí krystal s frekvencí 32,768 kHz.

Na závěr je nutné nastavit hodnoty na kartě „Project Manager“. Struktura a typ projektu závisí na použitém IDE a lze vybrat několik možností. Pro import do SCIDE je nutné zvolit možnost „Other Toolchains (GPDSC)“. Stiskem tlačítka „GENERATE CODE“ se vyexportují knihovny a zdrojové kódy v podobě projektu.

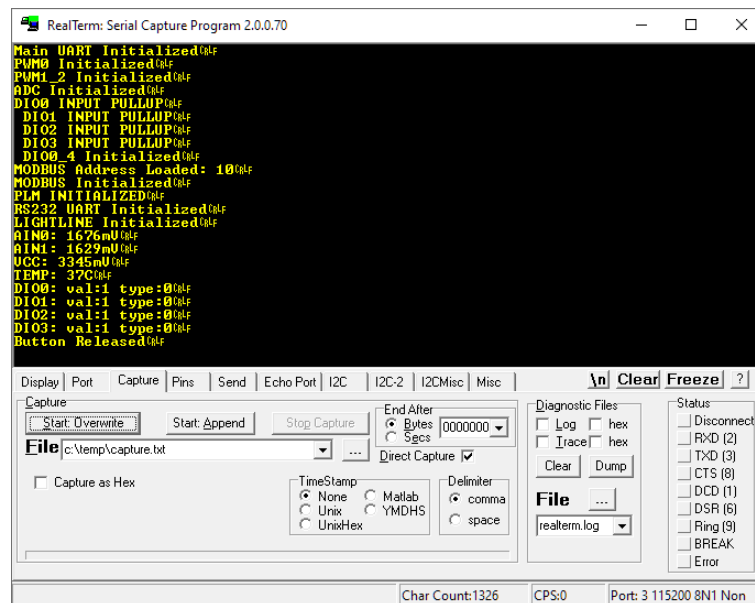
Vygenerovaný projekt je potřeba ještě zpracovat nástrojem *gpdsc2nb* dle manuálu na webu k SCIDE, který je dostupný online pod odkazem <http://pck338-242.feld.cvut.cz/scide/>. Nástroj *gpdsc2nb* i offline verze webové stránky SCIDE jsou součástí elektronické přílohy této práce.

### 6.3.2 Sériový monitor pro ladění

K zobrazení ladicích výpisů, zasílaných skrze USB-UART převodník na emulovaný sériový port v PC sloužil program RealTerm. RealTerm nabízí široké možnosti nastavení, ať už formát zobrazovaných dat nebo nastavení komunikace. Kromě toho umí odesílat data nebo zaznamenávat přijatá data do souboru. To je velmi užitečné pro ladění, neboť mikrokontrolér často odesílá velké množství dat, které je třeba analyzovat. Na následujících obrázcích 6.7 a 6.8 je zobrazeno okno programu RealTerm s nastavením portu a záznamem dat. Na obrázcích je možnost vidět i odeslaná data z mikrokontroléru.



Obrázek 6.7 - Program RealTerm s aktivní kartou nastavení portu.



Obrázek 6.8 - Program RealTerm s aktivní kartou nastavení záznamu.

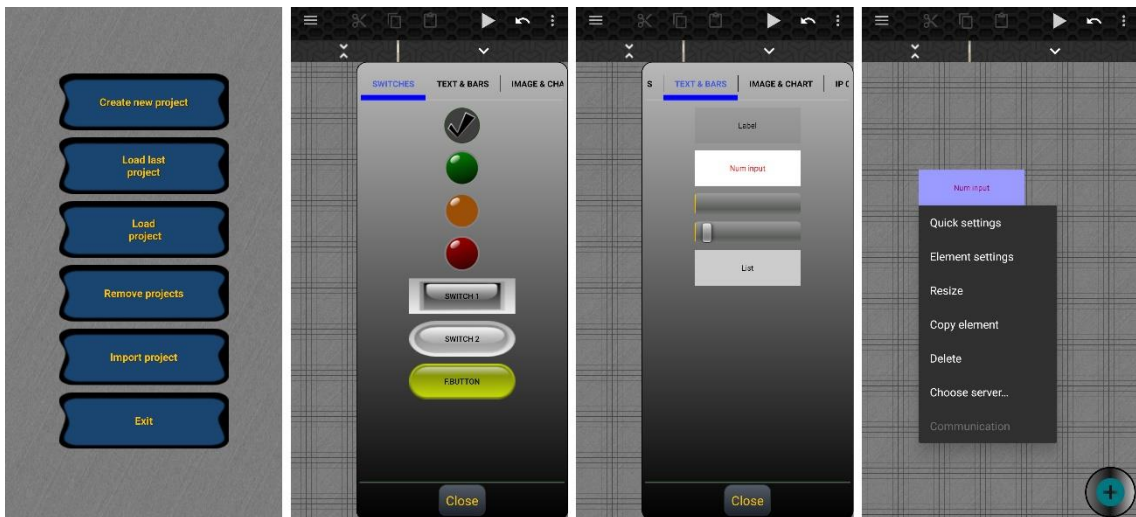
### 6.3.3 Nahrávání software

Software je do mikrokontroléru nahráván přes rozhraní SWD. K nahrávání byl využit programátor a ladicí nástroj ST-LINK/V2 od STMicroelectronics. ST-LINK/V2 umožňuje nahrávání mikrokontrolérů řady STM8 a STM32. S programátorem umí pracovat buďto přímo prostředí SCIDE, díky integrovanému nástroji OpenOCD nebo je možné využít program STM32 ST-LINK Utility. Ten je zdarma dostupný na stránkách STMicroelectronics a umožňuje nahrávat zkompilované kódy ve formátech .bin i .hex.

## 6.3.4 Modbus klient

Po dlouhém hledání vhodného Modbus klienta pro Windows, který by uměl vyčítat a zapisovat do volitelných registrů byla zvolena alternativa v podobě aplikace HMI Modbus Free pro Android. Aplikace jako jedna z mála kromě Modbus TCP podporuje i Modbus RTU, tedy umožňuje komunikaci se zařízením, připojeným k sériovému portu.

Použití aplikace je jednoduché. Po spuštění je zobrazeno hlavní menu, umožňující tvorbu nového projektu. Zvolením této možnosti je uživatel vyzván k zadání názvu projektu a po jeho zadání a potvrzení je zobrazena prázdná pracovní plocha. Na plochu lze přidávat komponenty stiskem tlačítka se symbolem + v pravém dolním rohu. Na výběr jsou tlačítka, indikátory, textová pole, posuvníky, seznamy, obrázky a také grafy. Stiskem a přetažením je možné komponenty umístit na pracovní plochu projektu. Po kliknutí na komponent se zobrazí kontextové menu s nastavením.



Obrázek 6.9 - Aplikace Modbus HMI Free.

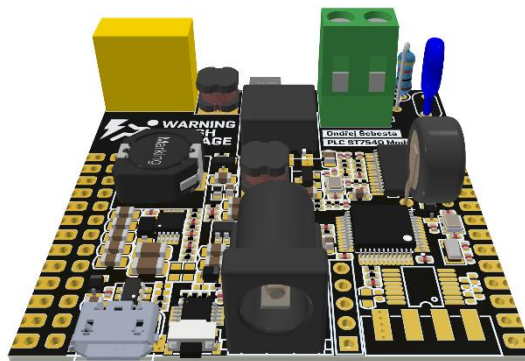
Po nastavení parametrů připojení, adresy registru a datového typu, se kterým komponent pracuje, je možné otestovat funkci. K zařízení s Androidem stačí připojit USB rozbočovač s podporou OTG a do něj připojit USB kabelem PLC modul. V zařízení s Androidem se zpřístupní virtuální sériový port, který umožní aplikaci s PLC modulem komunikovat. Stiskem symbolu šipky v horní liště aplikace je spuštěna komunikace. Komponent nyní zobrazuje hodnotu v nastaveném registru a je-li povolen zápis, lze klepnutím na komponent zadat novou hodnotu k odeslání do registru.

## 6.4 Varianty osazení univerzálního PLC modulu

Návrh modulu vychází z požadavků na několik způsobů využití. Plošný spoj je univerzální a umožňuje několik variant osazení dle požadovaných funkcí.

### 6.4.1 Master modul

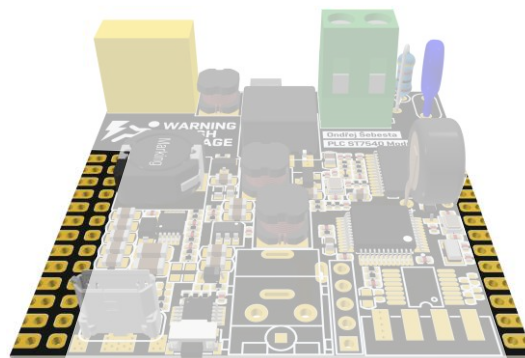
Master modul slouží primárně k připojení počítače či jiného řídicího zařízení do powerline sítě. Modul má osazen napájecí konektor, USB konektor a konektor pro připojení k silovému vedení. S modulem samotným lze sice komunikovat, ale primárně funguje jako most mezi emulovaným sériovým portem a rozhraním pro powerline. Zprávy přijaté ze sériového portu jsou master modulem zasílány do powerline sítě a zprávy z powerline sítě jsou naopak zasílány zpět do sériového portu.



Obrázek 6.10 - Master modul.

### 6.4.2 Slave modul pro SMT montáž do zařízení

Jedná se o variantu osazení modulu, kdy je z konektorů osazen pouze konektor pro připojení k silovému vedení a vertikální USB konektor. Zbývající propojení je zajištěno kontakty přímo na hranách desky plošných spojů.

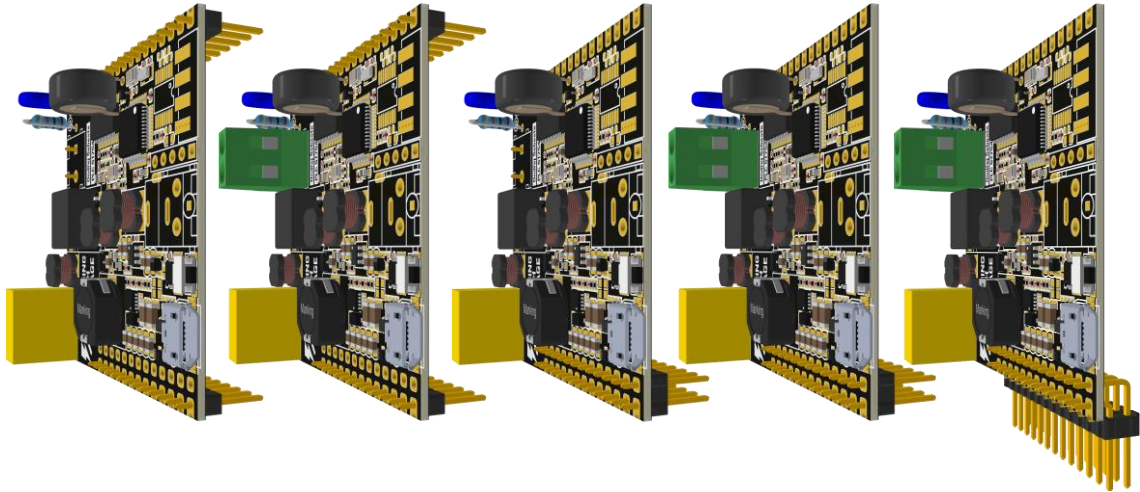


Obrázek 6.11 - Modul pro SMT montáž s vyznačenými hranovými kontakty.

Modul je možné integrovat do zařízení přímo připájením na plošky bez použití konektorů. Tím je možné snížit celkovou výšku elektroniky v zařízení a odpadne osazování propojovacích konektorů.

### 6.4.3 Slave modul pro THT montáž do zařízení

Toto provedení má 5 variant osazení, které jsou k vidění na obrázku 6.12. Jednotlivé varianty v pořadí jedna až pět jsou zobrazeny zleva doprava a popsány v textu níže.



Obrázek 6.12 - Varianty osazení PLC modulu pro THT montáž do zařízení.

První variantou je použití jednořadých pinových lišt s roztečí 2,54 mm na dvou hranách desky a dvojice pinů s roztečí 5,08 mm pro připojení k silovému vedení.

Druhá varianta počítá opět s použitím jednořadých pinových lišt na dvou hranách desky, ale pro připojení k silovému vedení využívá šroubovací konektor.

Třetí varianta používá podobně jako první dvojici pinů s roztečí 5,08 mm pro připojení k silovému vedení, ale k propojení se zařízením využívá pouze jednu dvouřadou pinovou lištu.

Čtvrtá varianta je kombinací varianty číslo 2 a 3. K propojení se zařízením používá jednu dvouřadou pinovou lištu a pro připojení k silovému vedení má osazen šroubovací konektor.

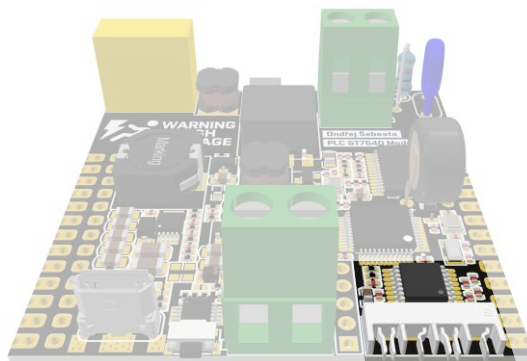
Poslední varianta je určena do zařízení s malou plochou na plošném spoji. Modul je propojen pomocí úhlové dvouřadě pinové lišty s roztečí 2,54 mm a k silovému vedení je připojen pomocí šroubovacího konektoru.

### 6.4.4 Slave modul s rozhraním pro Lightline

Lightline je osvětlovací modul navržený a používaný firmou CAMEA. Modul je napájen napájecím napětí 48 V a k ovládní využívá 4pinový hermafroditní konektor. Díky tomuto konektoru lze moduly řetězit za sebe. Modul určený



k ovládání Lightline je vybaven stejným konektorem a jeho napájecí vstup umožňuje připojení vstupního napětí 48 V. Lze ho tedy připojit přímo k Lightline.



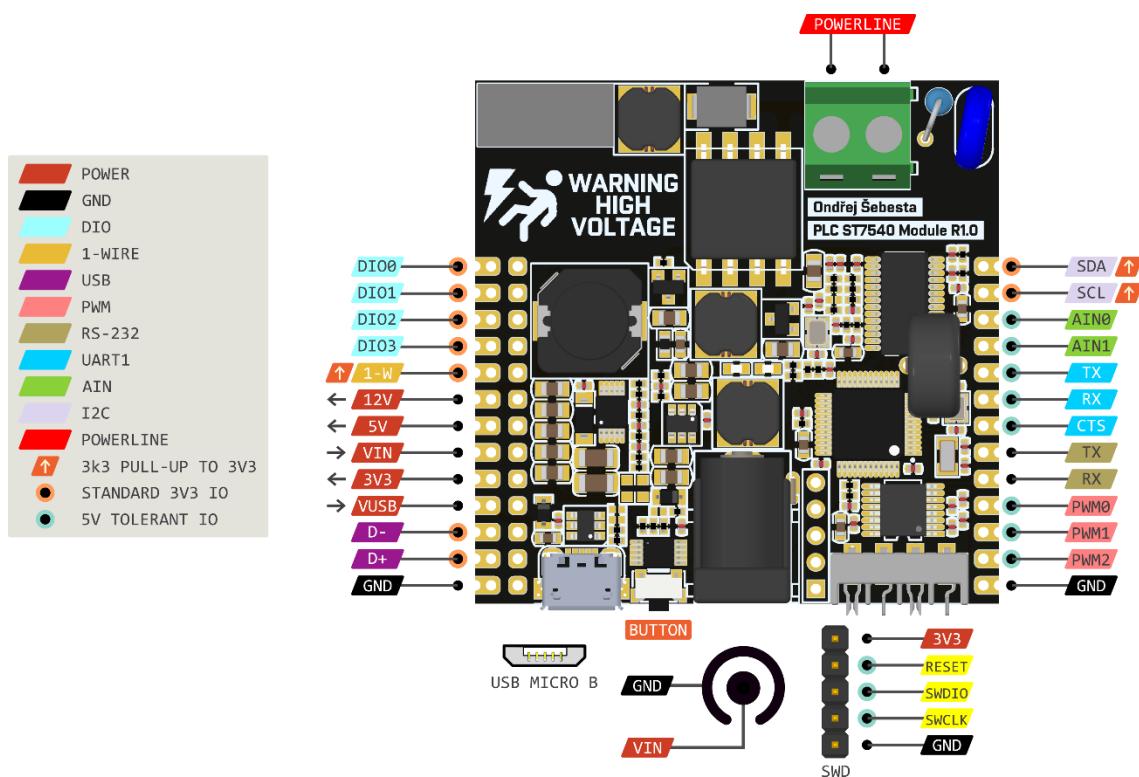
Obrázek 6.13 - Modul k ovládání Lightline.

## 6.5 Práce s PLC modulem

Tato podkapitola slouží jako manuál k integraci a použití univerzálního PLC modulu. popisuje způsob jeho zapojení a komunikace s ním.

### 6.5.1 Vstupy a výstupy

O podobě modulu lze získat lepší představu z obrázku 6.14.



Obrázek 6.14 - Uspořádání signálů a napájení univerzálního PLC modulu.

Pro nastavování a indikaci stavů je modul osazen červenou a zelenou LED a tlačítkem. Některé další vstupy a výstupy jsou vyvedeny na konektory a na hranové kontakty na levé a pravé hraně modulu. Konektor na pravé straně modulu je paralelně spojen s pravou polovinou dvouřadého konektoru na levé straně modulu. Vyvedené vstupy a výstupy jsou popsány v pořadí shora ve směru hodinových ručiček.

Signály SDA a SCL I<sup>2</sup>C sběrnice. Signály jsou 5 V tolerantní, ale jejich pull-up rezistory o hodnotě 3,3 k $\Omega$  jsou připojeny k napětí 3,3 V, tudíž sběrnice pracuje s 3,3V logikou.

Analogové vstupy AIN0 a AIN1. Vstupy jsou přivedeny na 12bitový AD převodník. Přípustná hodnota napětí na vstupech je 0 V až 3,3 V. Vstupy nemají žádné ochrany ani filtry. Ty je třeba doplnit na desce v zařízení, do kterého je modul integrován. Provedení ochrany a filtru závisí na požadavcích konkrétní aplikace.

Komunikační rozhraní USART1. Primárně je ke komunikaci s modulem použito rozhraní USB a následně převodník z USB na USART. Signály TxD, RxD a CTS (značeno ze strany mikrokontroléru) mezi převodníkem a mikrokontrolérem jsou pro případ potřeby vyvedeny na hranové kontakty.

Signály TxD a RxD rozhraní RS-232. Tyto signály jsou paralelně připojeny i k hermafroditnímu konektoru pro ovládání Lightline.

PWM výstupy PWM0 až PWM2. Výstupy jsou typu push-pull a pracují s napěťovými úrovněmi 0 V a 3,3 V. U všech výstupů je možno měnit základní frekvenci PWM. Frekvenci výstupu PWM0 lze měnit nezávisle, frekvenci PWM1 a PWM2 jen společně, protože sdílejí jeden časovač.

Dolní pravý a levý kontakt slouží jako signálová a napájecí zem GND.

Na spodní hraně modulu se nachází konektor pro připojení Lightline modulu a vedle něj programovací konektor se signály SWD rozhraní. Uprostřed je umístěn souosý napájecí konektor, následovaný tlačítkem a mikro USB-B konektorem vlevo.

Signály USB D+ a D- spolu s napájecím vstupem 5V následují hned za kontaktem GND. Toto uspořádání je stejné jako rozložení signálů na USB-A konektoru a dovoluje přímé připojení USB kabelu na kontakty na desce.

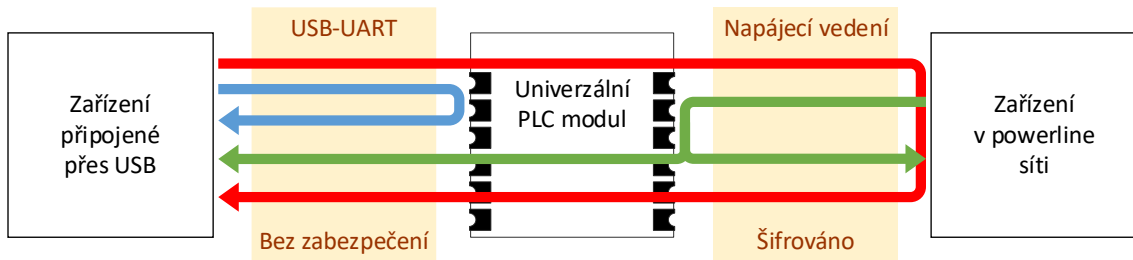
Napájecí vstupy a výstupy. Slouží pro napájení modulu napětím 12 V až 60 V nebo jako napájecí výstupy pro připojené periferie. Dostupná výstupní napětí jsou 3,3 V, 5 V a 12 V.

Komunikační sběrnice 1-Wire. Jedná se o jednovodičovou sběrnici, která slouží k připojení různých periférií. Nejčastěji se jedná o senzory teploty nebo vlhkosti, ale k dispozici jsou i různé typy pamětí nebo identifikátorů.

Univerzální digitální vstupy/výstupy DIO0 až DIO3. Každý ze čtyř signálů lze jednotlivě konfigurovat jako vstup nebo výstup. Vstupy jsou 5 V tolerantní, výstupy pracují s napětovou úrovní 0 V až 3,3 V. V případě použití jako vstup tlačítek je vhodné signál opatřit kondenzátorem proti zákmitům. V případě použití výstupu pro ovládání LED by neměl proud LED překročit 5 mA.

## 6.5.2 Módy komunikace

Modul nabízí tři komunikační módy, jejichž datové toky jsou znázorněny barevně na obrázku 6.15. Mód je volen automaticky dle zdroje a cíle přenášené zprávy.



Obrázek 6.15 - Znázornění komunikačních módů PLC modulu.

První mód, znázorněný modrou šipkou, je zvolen v případě Modbus rámce, přijatého z USB rozhraní, adresovaného právě tomuto modulu. Rámec není v tomto případě přeposílán do powerline sítě, ale je rovnou vyhodnocen a odpověď odeslána zpět do zařízení připojeného přes USB.

Druhý mód, znázorňuje červená šipka. Rámec je opět přijat z USB rozhraní, ale není adresován danému modulu. Modul tedy rámec zašifruje a odešle do powerline sítě. Příchozí odpovědi z powerline sítě opět dešifruje a odesílá do zařízení, připojeného přes USB.

Zelenými šipkami je znázorněn tok dat ve třetím módu. Modbus rámce, přijaté z powerline sítě jsou dešifrovány a je zkontrolován adresát. Je-li rámec adresován tomuto modulu, provede se příslušná reakce a vytvoří se odpověď. Ta je zašifrována a odeslána zpět do powerline sítě.

Mód tři má jednu vlastnost, vycházející z módu dva. Nemí-li příchozí rámec z powerline adresován tomuto modulu, je odeslán přes USB rozhraní. Modul totiž při kontrole adresy obsažené v rámci nerozlišuje, zdali se jedná o dotaz nebo odpověď. Toto chování přináší výhody i nevýhody. Výhodou je možnost sledovat provoz v powerline síti z kteréhokoliv zařízení pro účely ladění. Nevýhodou je bezpečnostní riziko s tímto spojené. Avšak vzhledem k tomu, že zabezpečení šifrováním je určeno k zamezení odposlechu z místa mimo oblast nasazení systému, bylo rozhodnuto o ponechání této funkcionality.

### 6.5.3 Nastavení komunikace

Nastavení komunikačních parametrů sériového portu a timeoutu je uvedeno v tabulce 6.1.

**Tabulka 6.1 - Nastavení komunikačních parametrů.**

Parametr	Nastavená hodnota	Popis
Baudrate	115200 Bd	Přenosová rychlost
Počet datových bitů	8	
Parita	Žádná	
Počet stopbitů	1	
HW řízení toku	Bez řízení toku	
Timeout	265 ms	Doba čekání na odpověď

Modul má ve výchozím stavu adresu 254. Adresu je možné změnit zápisem příkazu pro změnu adresy (číselná hodnota 0x0002) do registru CMD a nové adresy do registru CMD\_PARAM. Výchozí adresu je možné obnovit restartem modulu do výchozího nastavení. To se provádí stiskem a držením tlačítka po dobu deseti sekund. Během držení tlačítka bliká červená LED ve dvousekundovém intervalu. Obnovení výchozího nastavení je signalizováno rychlým zablikáním červené LED pětkrát po sobě. Během této procedury dojde k restartu mikrokontroléru.

## 6.5.4 Modbus registry

Vstupní registry, určené pouze pro čtení, jsou dostupné pod funkčním kódem pro čtení vstupních registrů (0x04). Dostupné vstupní registry, jejich adresy a popis jsou uvedeny v tabulce 6.2.

**Tabulka 6.2 – Seznam vstupních registrů.**

Adresa	Název	Násobek	Jednotka	Datový typ	Výchozí hodnota	Poznámka
0	UID 5	-	-	uint16_t	-	96bitové unikátní ID zařízení
1	UID 4	-	-	uint16_t	-	
2	UID 3	-	-	uint16_t	-	
3	UID 2	-	-	uint16_t	-	
4	UID 1	-	-	uint16_t	-	
5	UID 0	-	-	uint16_t	-	
6	SW_VERSION 1	-	-	uint16_t	-	Verze software ve formátu x.x.x.x kde x je 0-255
7	SW_VERSION 0	-	-	uint16_t	-	
8	STATUS	-	-	uint16_t	-	Status (rezervováno)
9	MILLIS 1	1	ms	uint16_t	0	Počet milisekund od posledního restartu
10	MILLIS 0	1	ms	uint16_t	0	
11	AIN_VCC_VOLTAGE	1	mV	uint16_t	-	Hodnota napájecího napětí 3,3 V
12	AIN_INTERNAL_TEMP	1	°C	uint16_t	-	Interní teplota MCU
13	AIN0_VOLTAGE	1	mV	uint16_t	-	Napětí na vstupu AIN0
14	AIN1_VOLTAGE	1	mV	uint16_t	-	Napětí na vstupu AIN1
15	DS18B20_TEMP	10	°C	int16_t	0x8000	Teplota ze senzoru DS18B20. Není-li připojen, vrací se hodnota 0x8000

K registrům, určeným pro čtení i zápis, lze přistupovat pomocí funkčních kódů čtení holding registrů (0x03) nebo zápis do jednoho (0x06) či více holding registrů (0x10). Seznam holding registrů, registry, jejich adresy a popis jsou uvedeny v tabulce 6.3.

**Tabulka 6.3 - Seznam holding registrů.**

Adresa	Název	Násobek	Jednotka	Datový typ	Výchozí hodnota	Poznámka
0	CMD	-	-	uint16_t	0	Příkaz: 0 = nic 1 = reset 2 = změna adresy
1	CMD_PARAM	-	-	uint16_t	0	Parametr příkazu (například adresa)
2	PWM0_FREQ	-	-	enum	0	Nastavení frekvence PWM: 0 = 1 kHz 1 = 5 kHz 2 = 10 kHz 3 = 20 kHz 4 = 50 kHz 5 = 100 kHz
3	PWM0_DUTY	10	%	uint16_t	0	Nastavení střídy 0,0 až 100,0 %
4	PWM1_FREQ	-	-	enum	0	Viz PWM0_FREQ
5	PWM1_DUTY	10	%	uint16_t	0	Viz PWM0_DUTY
6	PWM2_FREQ	-	-	enum	0	Viz PWM0_FREQ
7	PWM2_DUTY	10	%	uint16_t	0	Viz PWM0_DUTY
8	DIO0_CONFIG	-	-	enum	0	Konfigurace DIO: 0 = vstup pull-up 1 = vstup pull-down 2 = vstup plovoucí 3 = výstup push-pull 4 = výstup opendrain
9	DIO0_VALUE	-	-	uint16_t	0	Logická úroveň na DIO
10	DIO1_CONFIG	-	-	enum	0	Viz DIO0_CONFIG
11	DIO1_VALUE	-	-	uint16_t	0	Viz DIO0_VALUE
12	DIO2_CONFIG	-	-	enum	0	Viz DIO0_CONFIG
13	DIO2_VALUE	-	-	uint16_t	0	Viz DIO0_VALUE
14	DIO3_CONFIG	-	-	enum	0	Viz DIO0_CONFIG
15	DIO3_VALUE	-	-	uint16_t	0	Viz DIO0_VALUE
16	LL_BRIGHTNESS	10	%	uint16_t	0	Nastavení jasu Lightline 0,0 až 100,0 %

## 7 LED OSVĚTLENÍ S PLC MODULEM

Pro demonstraci využití univerzálního PLC modulu s ST7540 byl navržen osvětlovací LED panel, komunikující přes silové napájecí rozvody 230 V. Jako základ slouží 12W LED osvětlení o rozměrech 170x170 mm s napájením 230 V AC.

Osvětlení je tvořeno hliníkovým rámem, ve kterém je nalepen LED pásek napájený konstantním proudem 300 mA. Světlo vydávané LED páskem je pomocí difuzoru a odrazové vrstvy rovnoměrně rozptýleno a vyzářeno ven. Původní neupravený modul je zobrazen na obrázku 7.1.



Obrázek 7.1 - LED osvětlení.

### 7.1 Návrh hardware osvětlovacího modulu

Navržený hardware měří intenzitu osvětlení v místnosti a umožňuje řídit jas LED.

K měření intenzity osvětlení je využit polovodičový snímač, fungující jako zdroj proudu, závislého na intenzitě osvětlení. Proud, procházející snímačem vytváří na sériovém rezistoru úbytek napětí, který je měřen analogovým vstupem AIN0.

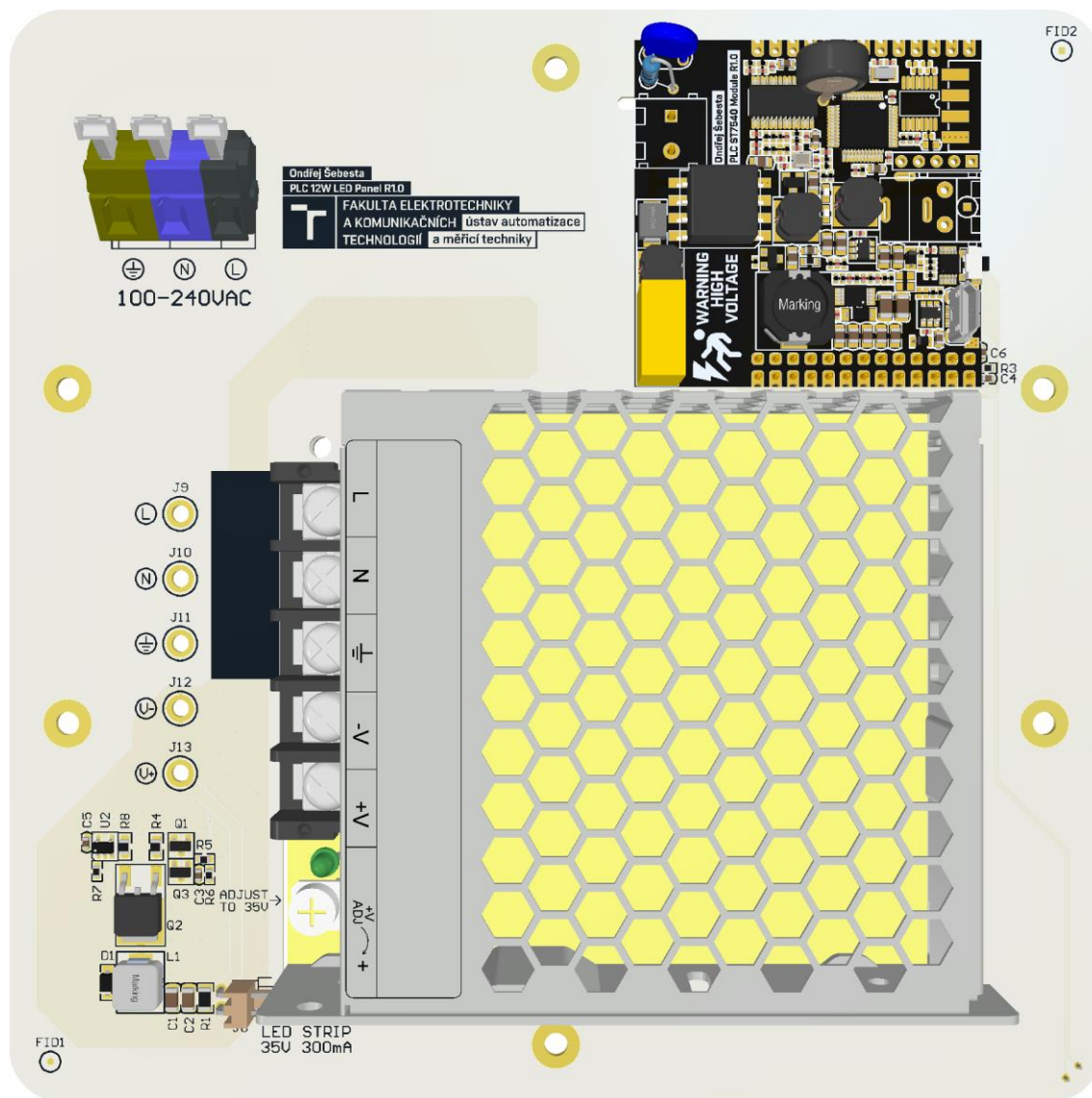
Jas LED je nastavován pomocí PWM signálu, přivedeného na spínací MOSFET. Výstup pro LED je opatřen LC filtrem, tlumícím rušení. Pro účel diagnostiky je měřen proud do LED. K měření proudu je využit analogový vstup AIN1, snímající napětí na bočníku.

K napájení byl zvolen průmyslový zdroj MEAN WELL LRS-35-36, který je dvěma šrouby uchycen k plošnému spoji. Pro připojení napájení slouží páčkové konektory na plošném spoji. Z nich je síťové napětí po plošném spoji vedeno do zdroje a do PLC modulu.

Všechny živé části jsou od nízkonapěťových obvodů odděleny mezerou minimálně 5 mm a kovová část svítidla je vodivě spojena s konektorem pro ochranný vodič PE.

Plošný spoj je do rámu svítidla uchycen na místo původního plechového krytu pomocí šesti šroubů.

Na obrázku 7.2 je k vidění 3D náhled na elektroniku, určenou k montáži do LED osvětlení.



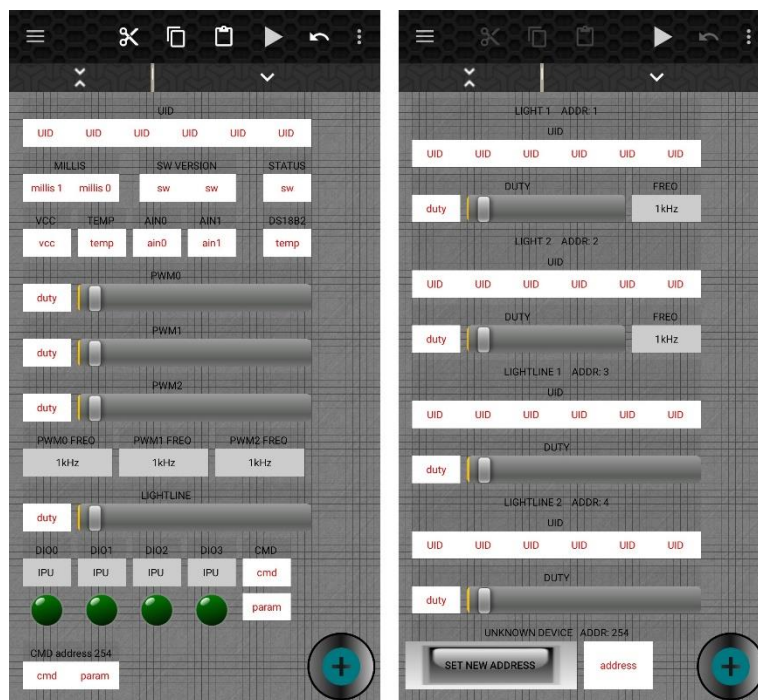
Obrázek 7.2 - 3D pohled na navržený plošný spoj LED modulu.



## 8 TESTY A MĚŘENÍ

### 8.1 Komunikace s moduly

Pro komunikaci s PLC moduly byla použita aplikace Modbus HMI Free. Bylo vytvořeno několik různých projektů pro testování. Na obrázku 8.1 lze vidět příklad dvou z nich.



Obrázek 8.1 – Testovací projekty v aplikaci Modbus HMI Free.

Projekt nalevo zpřístupňuje všechny registry, dostupné v univerzálním PLC modulu. V horní části obrazovky jsou na třech řádcích zobrazeny vstupní registry. První řádek zobrazuje unikátní identifikátor zařízení. Následuje druhý řádek s informacemi o době provozu zařízení, verzi software a informací o stavu. Na třetím řádku jsou zobrazeny informace z AD převodníku a teplotního senzoru DS18B20. V prostřední části jsou tři posuvníky pro volbu střídý PWM signálu na výstupech PWM0 až PWM2, doplněné o číselnou hodnotu nastavené střídý na levé straně. Pod posuvníky jsou tři seznamy, sloužící k nastavení frekvence PWM výstupů. Je-li k modulu připojen Lightline, je možné nastavovat jeho jas posuvníkem ve druhé třetině obrazovky. Ve spodní části obrazovky se nachází rozhraní pro ovládání DIO. Lze měnit konfigurace i stav výstupů, případně sledovat stav vstupů. Vedle rozhraní pro DIO se nachází dvě pole pro zadávání příkazů a jeho parametru. Seznam příkazů je dostupný v kapitole Modbus registry. Všechny uvedené komponenty komunikují se zařízením na adrese jedna. Nová zařízení však mají ve výchozím stavu nastavenou adresu 254. Pro změnu adresy lze využít dvě pole v levé dolní části obrazovky. Levé pole slouží k zadání příkazu

(pro změnu adresy složí příkaz číslo 2) a pravé pole k zadání parametru (například nové adresy). Tato dvě pole komunikují se zařízením na adrese 254.

Projekt napravo slouží k ovládání dvou LED modulů a dvou modulů Lightline. Obsahuje celkem pět bloků, každý s jinou adresou. První dva bloky s adresou 1 a 2 jsou určeny k ovládání LED modulů. Bloky zobrazují unikátní identifikátor zařízení, nastavenou střídu a frekvenci PWM a umožňují nastavovat střídu PWM pomocí posuvníku. Třetí a čtvrtý blok slouží k ovládání Lightline na adrese 3 a 4. Bloky opět zobrazují unikátní identifikátor zařízení a střídu, ale neumožňují nastavení frekvence PWM, neboť ta je u Lightline pevně daná. Poslední blok slouží k nastavení nové adresy pro zařízení na adrese 254.

## 8.2 Test knihoven pro šifrování AES

Byly testovány dvě knihovny pro šifrování dle standardu AES. Testy byly prováděny s délkou klíče 128 bitů a v režimu CBC. Testovanými knihovnami byly Tiny AES a upravená verze AES knihovny pro Arduino od Marka Tillotsona (dále jen Arduino AES). U obou knihoven byly srovnávány rychlosti šifrování a dešifrování pro data o čtyřech různých délkách. Pro všechny případy byl použit stejný klíč i inicializační vektor. Naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce 8.1.

**Tabulka 8.1 - Výsledky testu rychlosti AES knihoven.**

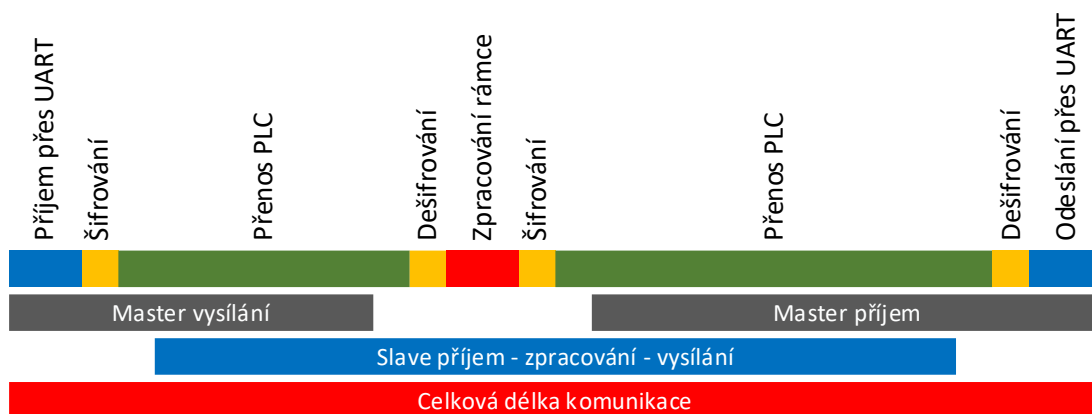
Knihovna	Operace	Šifrování				Dešifrování			
		Počet bajtů	16	32	48	64	16	32	48
Tiny AES	Čas [ms]	0,56	1,08	1,64	2,18	4,28	8,56	12,85	17,12
AES Arduino	Čas [ms]	0,33	0,64	0,96	1,28	0,43	0,84	1,26	1,68

Jak lze vidět z tabulky 8.1, knihovna AES Arduino dopadla lépe ve všech testech. Knihovna Tiny AES používala pro dekódování algoritmus, který byl složitější pro výpočet a rychlost dekódování tak byla příliš nízká.

## 8.3 Měření doby odezvy

Pro měření doby odezvy byly vybrány čtyři případy komunikace. Prvním případem bylo vyčtení všech 16 vstupních registrů. Ve druhém případě byl vyčítán pouze jeden registr na adrese 10 (MILLIS\_0). Ve třetím případě byly vyčítány všechny dostupné holding registry, kterých je celkem 17. Při posledním měření byla zapisována hodnota 500 do holding registru na adrese 3 (PWM0\_DUTY).

Následující obrázek 8.2 ilustruje časovou posloupnost jednotlivých sledovaných částí komunikace.



Obrázek 8.2 - Časová posloupnost sledovaných částí komunikace.

Každý případ komunikace byl testován čtyřikrát a výsledky jsou zaznamenány v tabulce 8.2.

Tabulka 8.2 - Výsledky měření doby odezvy.

Číslo komunikace	Délka dotazu	Délka odpovědi	Příjem přes UART	Šifrování	Přenos PLC master-slave	Dešifrování	Zpracování	Šifrování	Přenos PLC slave-master	Dešifrování	Odeslání přes UART	Celková doba komunikace
	[B]	[B]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]	[ms]
1	8	37	0,693	0,350	72,802	0,431	0,121	0,962	179,652	1,265	3,150	259,426
2	8	37	0,695	0,348	72,816	0,430	0,121	0,959	179,662	1,263	3,147	259,441
3	8	37	0,692	0,351	72,624	0,431	0,119	0,963	179,649	1,266	3,151	259,246
4	8	37	0,693	0,349	72,725	0,430	0,121	0,962	179,656	1,265	3,148	259,349
Průměr 1-4			0,693	0,350	72,742	0,431	0,121	0,962	179,655	1,265	3,149	<b>259,366</b>
5	8	7	0,702	0,341	72,775	0,434	0,038	0,331	72,602	0,431	0,550	148,204
6	8	7	0,693	0,349	72,649	0,428	0,045	0,329	72,822	0,428	0,547	148,290
7	8	7	0,695	0,346	72,662	0,431	0,044	0,329	72,808	0,430	0,549	148,294
8	8	7	0,693	0,346	72,669	0,433	0,042	0,330	72,752	0,431	0,551	148,247
Průměr 5-8			0,696	0,346	72,689	0,432	0,042	0,330	72,746	0,430	0,549	<b>148,259</b>
9	8	39	0,690	0,351	72,795	0,428	0,131	0,964	179,626	1,266	3,328	259,579
10	8	39	0,695	0,348	72,814	0,431	0,132	0,962	179,645	1,265	3,329	259,621
11	8	39	0,691	0,350	72,736	0,429	0,131	0,962	179,632	1,266	3,328	259,525
12	8	39	0,692	0,348	72,752	0,430	0,130	0,963	179,651	1,263	3,327	259,556
Průměr 9-12			0,692	0,349	72,774	0,430	0,131	0,963	179,639	1,265	3,328	<b>259,570</b>
13	8	8	0,690	0,351	72,626	0,431	0,042	0,328	72,834	0,426	0,637	148,365
14	8	8	0,693	0,349	72,815	0,429	0,041	0,331	72,805	0,428	0,635	148,526
15	8	8	0,695	0,346	72,775	0,430	0,044	0,329	72,792	0,431	0,638	148,480
16	8	8	0,692	0,348	72,802	0,431	0,041	0,331	72,812	0,429	0,635	148,521
Průměr 13-16			0,693	0,349	72,755	0,430	0,042	0,330	72,811	0,429	0,636	<b>148,473</b>

Jak lze vyčíst z tabulky 8.2, nejdelší část komunikace zabírá přenos dat po napájecím vedení. Je také možné si všimnout, že přenos různě dlouhých zpráv trvá přibližně stejnou dobu. To je dáno šifrováním zpráv, které probíhá po blocích, dlouhých 16 bajtů.

Z změřených údajů byla určena maximální doba odezvy, se kterou je při komunikaci třeba počítat jako 165 ms (160 ms trvání nejdelší komunikace a 5 ms jako rezerva).

## 9 ZÁVĚR

Byla prostudována problematika powerline komunikace a stanoveny požadavky na systém pro řízení LED světel po napájecím vedení. Byl vybrán PLC modem vhodný pro použití v aplikaci řízení LED osvětlení a s tímto modemem byl navržen testovací hardware. Na testovacím hardwaru byla ověřena funkcionality vybraného modemu a byl proveden test komunikace mezi dvěma moduly, který proběhl úspěšně.

Na základě poznatků získaných z návrhu a testů, provedených na testovacím hardwaru byl navržen univerzální PLC modul. Modul byl osazen v několika variantách pro různé aplikace a byl pro něj napsán software. Ten byl následně odladěn a otestován.

Ke komunikaci je využit protokol Modbus a pro zabezpečení přenosu proti chybám slouží dopředná chybová korekce. Data přenášená v powerline síti jsou chráněna proti odposlechu šifrováním AES-128.

Pro demonstraci použití univerzálního PLC modulu byl vyroben osvětlovací LED panel, do kterého byl modul integrován. Celý systém byl následně otestován a byla změřena jeho odezva při různých komunikačních scénářích.

# Literatura

- [1] RUMÍŠEK, Tomáš a Tomáš FRÝZA. Systém řízení světelných zdrojů po silových rozvodech. *Elektrorevue*. 2012, 2012(4), 1-7. ISSN 1213 - 1539. [online] [citováno 2.5.2020]. Dostupné také z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/power-electronics-1/5/system-řízení-svetelných-zdroju-po-silových-rozvodech/>
- [2] BERGER L. T., SCHWAGER A., ESCUDERO-GARZÁS J. J. Power Line Communications for Smart Grid Applications, [online]. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 16 pages, 2013 [citováno 2.3.2020]. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/journals/jece/2013/712376/>
- [3] MIŠUREC, Jiří a Petr MLÝNEK. Power Line Communication pro Smart Metering a Smart Grid – současné možnosti. In: Sborník 18. konference ČK CIRED. 2014, ISBN 978-80-905014-3-0.
- [4] CENELEC EN 50065-1:2011 Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz – Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances, [online]. 2011 [citováno 2.3.2020]. Dostupné z: [https://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:1047827953373901:::FSP\\_ORG\\_ID,FSP\\_PROJECT,FSP\\_LANG\\_ID:1258815,55894,25](https://www.cenelec.eu/dyn/www/f?p=104:110:1047827953373901:::FSP_ORG_ID,FSP_PROJECT,FSP_LANG_ID:1258815,55894,25).
- [5] Komunikujeme po silových rozvodech (1. část) [online]. [citováno 1.4.2020]. Dostupné z: [https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/komunikujeme-po-silovych-rozvodech-1-cast.html?fbclid=IwAR2Q\\_2KA2JxKwFqXjraBJQef1q3jgdeiz5Tb39BGsJfxHMmQenFjkaQvWe4](https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/komunikujeme-po-silovych-rozvodech-1-cast.html?fbclid=IwAR2Q_2KA2JxKwFqXjraBJQef1q3jgdeiz5Tb39BGsJfxHMmQenFjkaQvWe4)
- [6] PAVELKA, O. Internet ze zásuvky ? Ano, ale... [online]. 2000, 5.9.2000 [citováno 10.4.2020]. Dostupné z : <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00034/index.html>
- [7] GALLI S., SCAGLIONE A., WANG Z. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid, *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 998-1027, 2011.
- [8] PETRŮJ, Jakub. Modelování a simulace PLC komunikace pro chytré měření s využitím Network Simulator-3. Brno, 2018/2019, 70 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Mlýnek, Ph.D
- [9] HT45B0005 [online]. [citováno 1.4.2020]. Dostupné z: [http://www.holtek.com.tw/documents/10179/11842/HT45B0003\\_0005v100.pdf](http://www.holtek.com.tw/documents/10179/11842/HT45B0003_0005v100.pdf)
- [10] TDA5051A [online]. [citováno 1.4.2020]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TDA5051A.pdf>
- [11] CY8CPLC10 [online]. [citováno 1.4.2020]. Dostupné z: <http://www.cypress.com/file/123361/download>

- [12] ST7540 [online]. [citováno 1.4.2020]. Dostupné z:  
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/st7540.pdf>
- [13] ST7538 [online]. [citováno 1.4.2020]. Dostupné z:  
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/st7538.pdf>
- [14] STEVAL-IHP005V1 [online]. [citováno 1.4.2020]. Dostupné z:  
<https://www.st.com/en/evaluation-tools/steval-ihp005v1.html>

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

PLC	Power Line Communication
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
Bd	Baudrate
QoS	Quality of Service
EMC	Electromagnetic Compatibility
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
USART	Universal Synchronous Asynchronous Receiver and Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
SMD	Surface Mount Device
SRAM	Static Random Access Memory
AD	Analogově digitální
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter
CAN	Controller Area Network (bus)
LQFP	Low Profile Quad Flat Package
SWD	Serial Wire Debug
RTC	Real Time Clock
RAM	Random Access Memory
ESD	ElectroStatic Discharge
DPS	Deska plošných spojů
DMA	Direct Memory Access



# Seznam příloh

Příloha A. Schéma zapojení testovací desky

Příloha B. Osazovací výkres testovací desky

Příloha C. Schéma zapojení PLC modulu

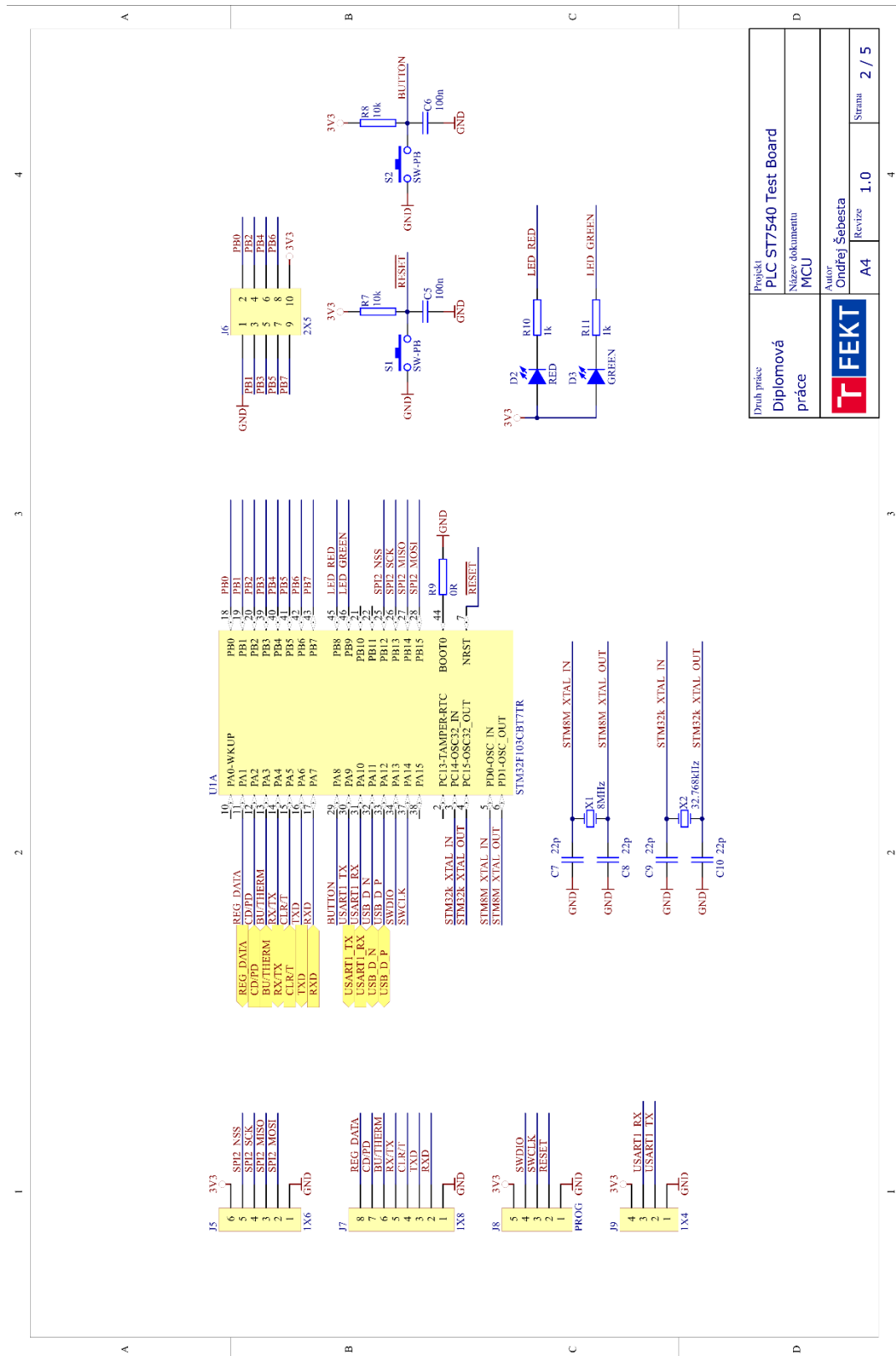
Příloha D. Osazovací výkres PLC modulu

Příloha E. Schéma zapojení LED panelu

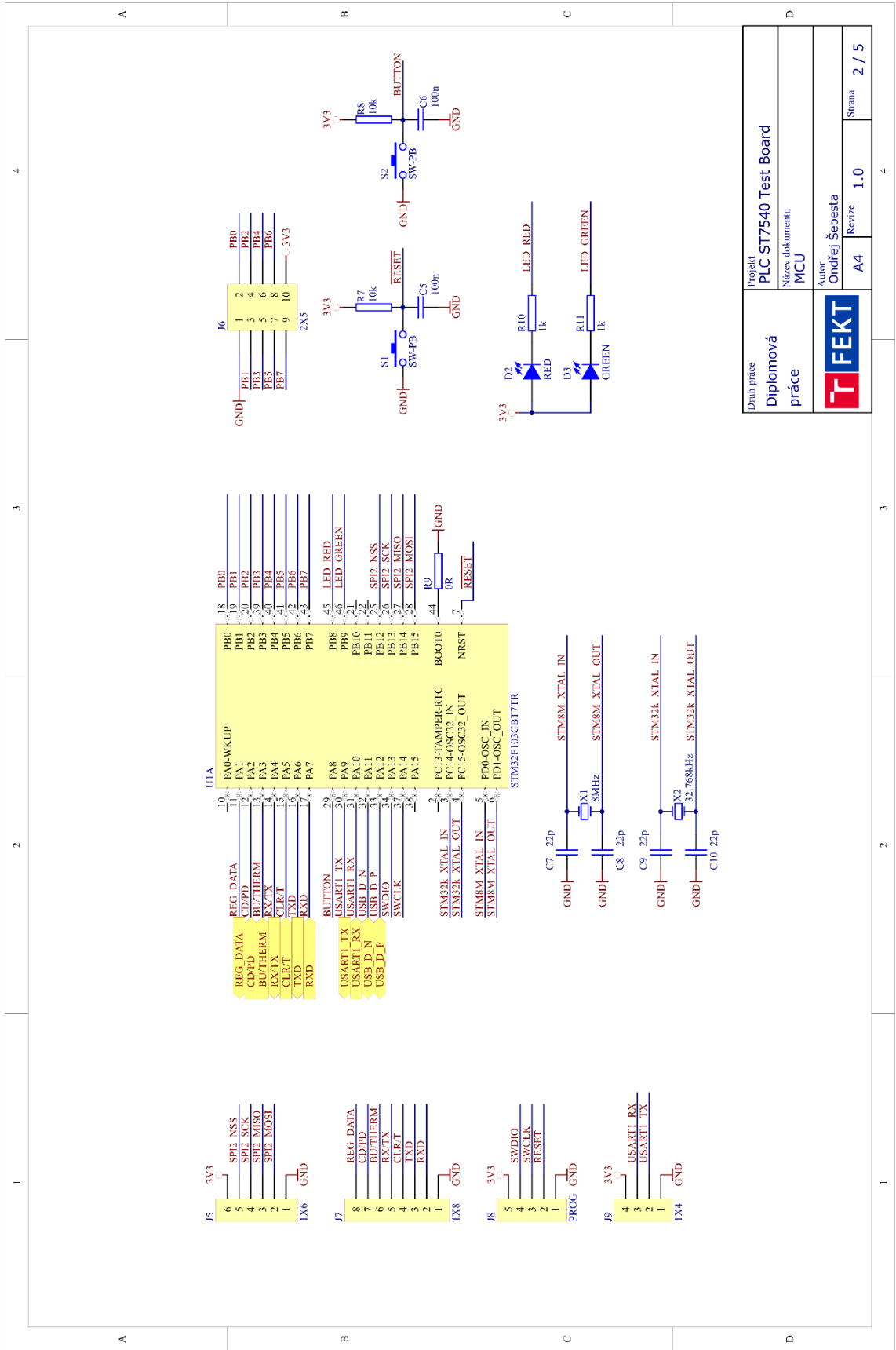
Příloha F. Osazovací výkres LED panelu TOP


Příloha G. Osazovací výkres LED panelu BOTTOM

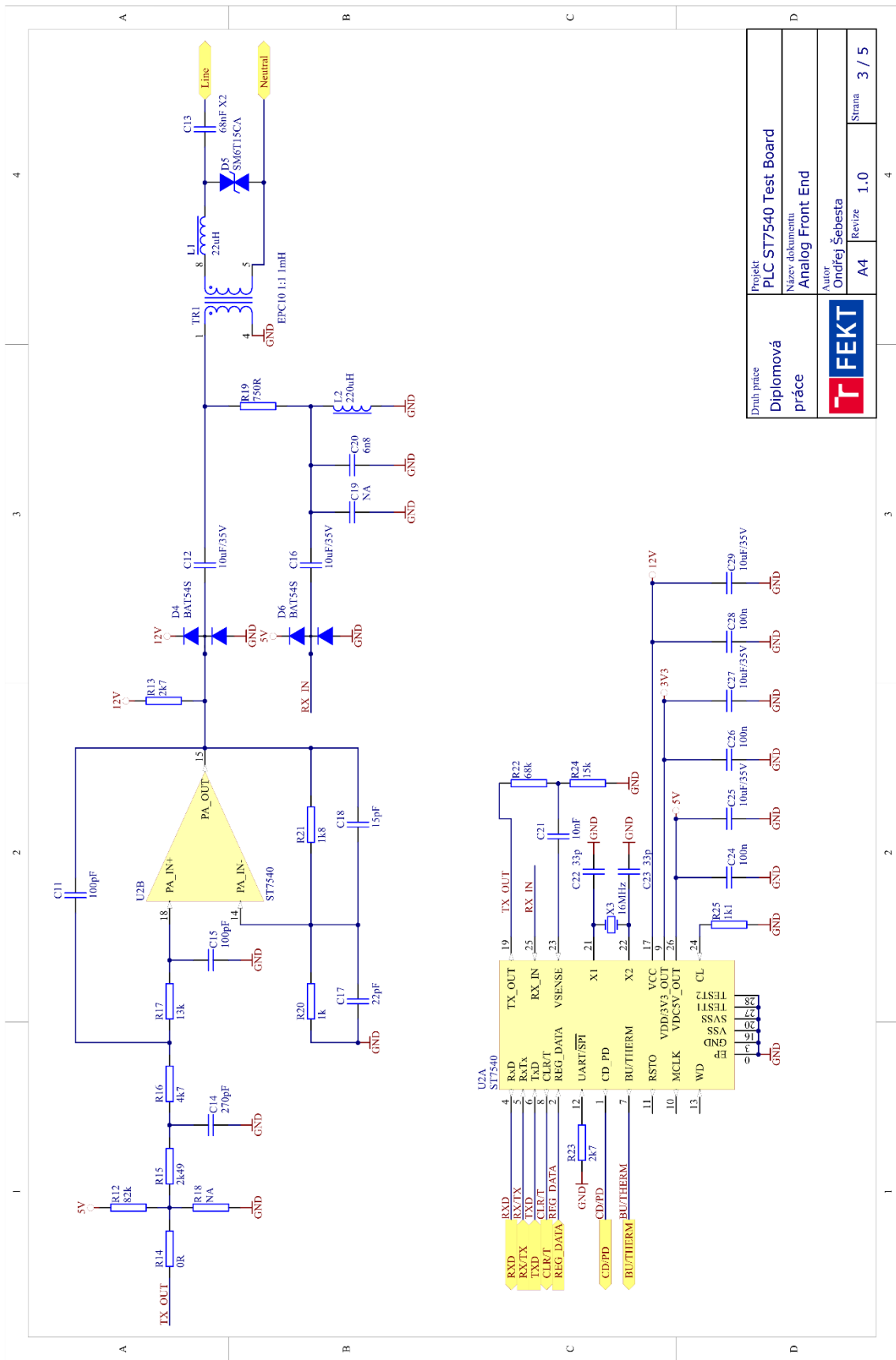
# A. Schéma zapojení testovací desky



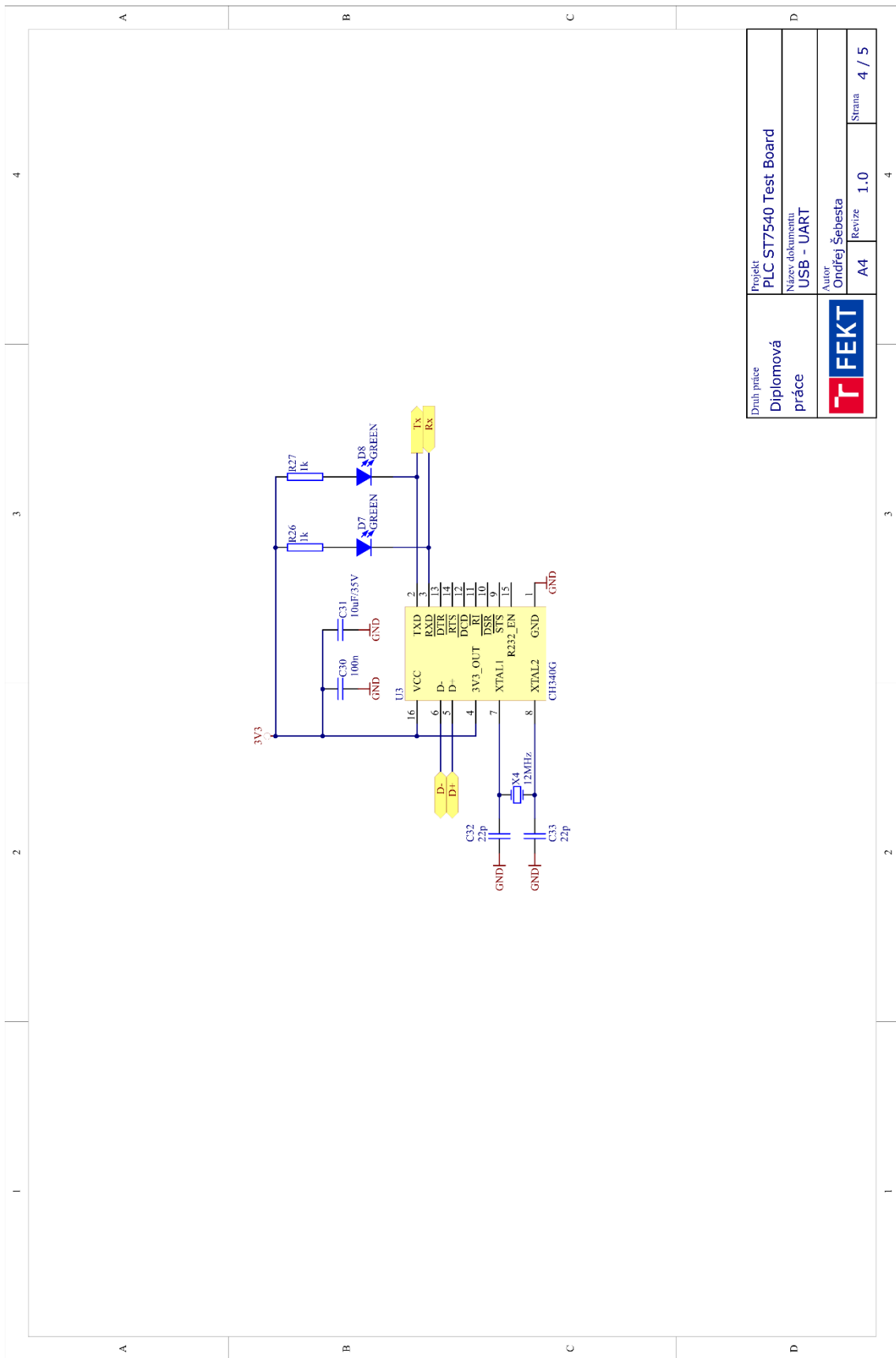
Druh práce Diplomová práce	Projekt PLC ST7540 Test Board	Strana 2 / 5	
	Název dokumentu MCU	Revize 1.0	
	Autor Ondřej Šebesta		
	A4	Revize 1.0	Strana 2 / 5



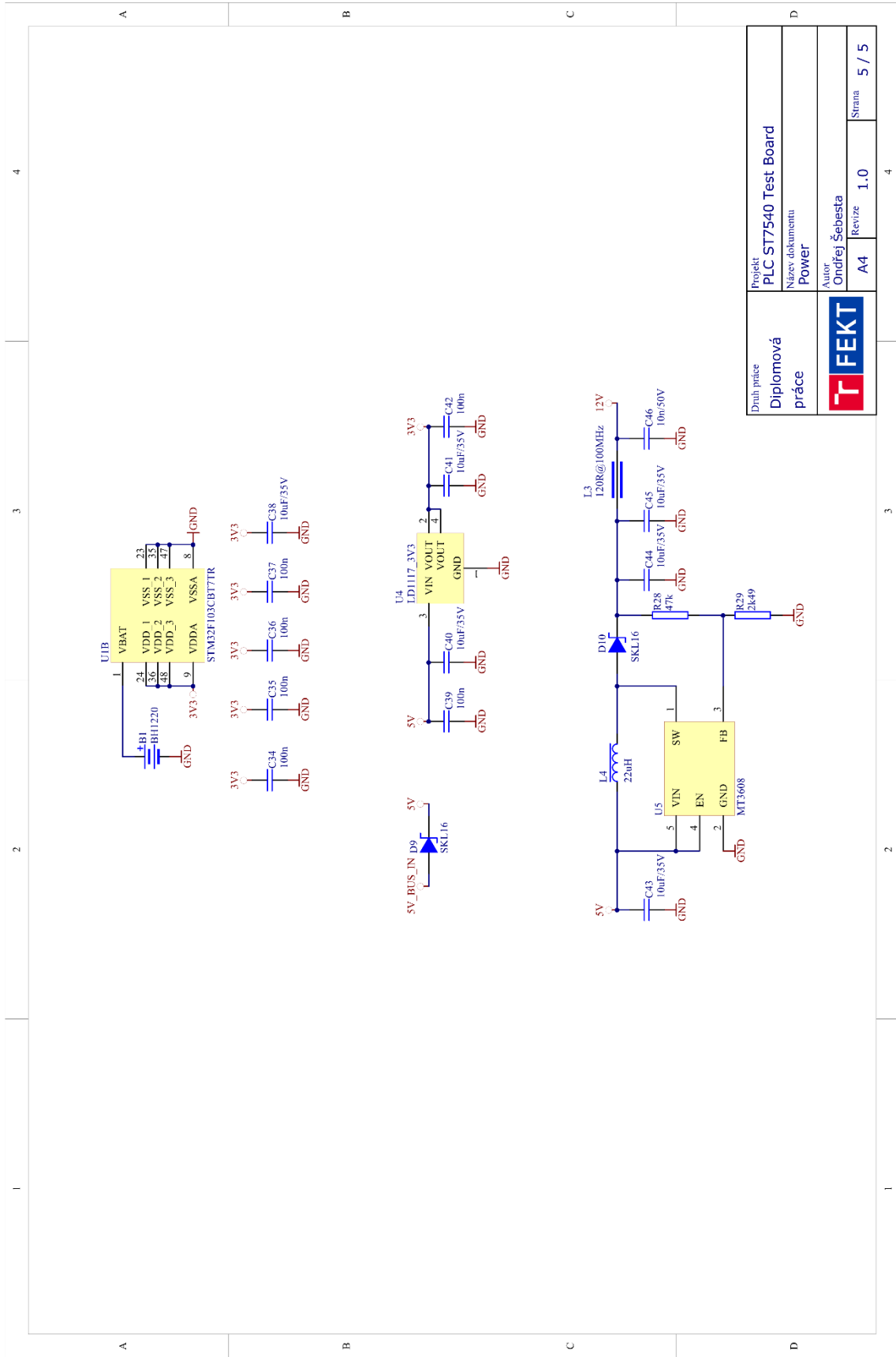
Druh práce Diplomová práce	Projekt PLC ST7540 Test Board	Strana 2 / 5	
	Název dokumentu MCU	Revize 1.0	
Autor Ondřej Šebesta			
		A4	



Druh práce <b>Diplomová práce</b>	Projekt <b>PLC ST7540 Test Board</b>		
	Název dokumentu <b>Analog Front End</b>		
<b>FEKT</b>	Autor <b>Ondřej Sebesta</b>		Strana <b>3 / 5</b>
	A4	Revize <b>1.0</b>	

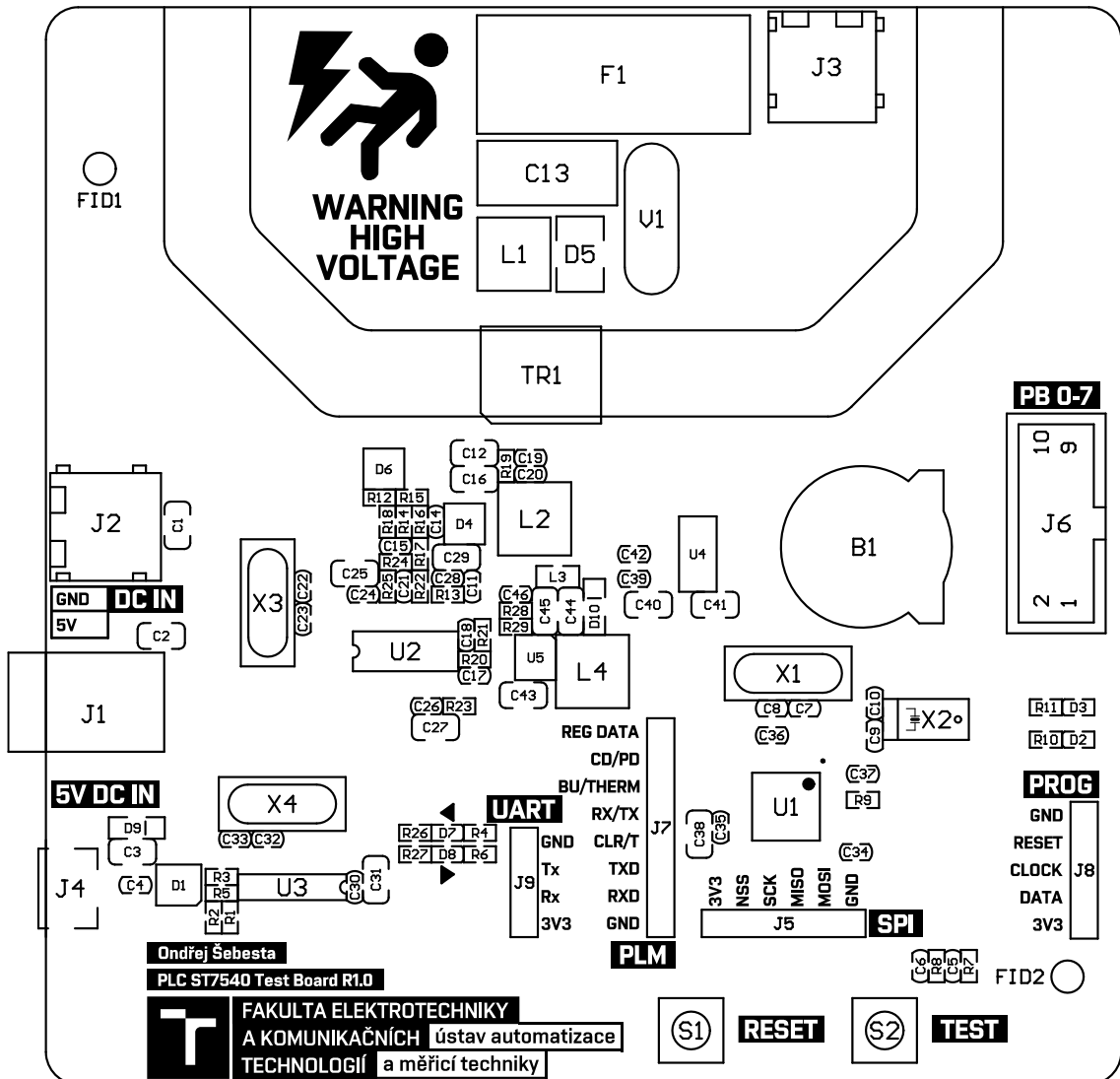


Druh práce Diplomová práce	Projekt PLC ST7540 Test Board	Strana 4 / 5	
	Název dokumentu USB - UART		
FEKT	Autor Ondřej Šebesta	Revize 1.0	Strana 4 / 5
	A4		

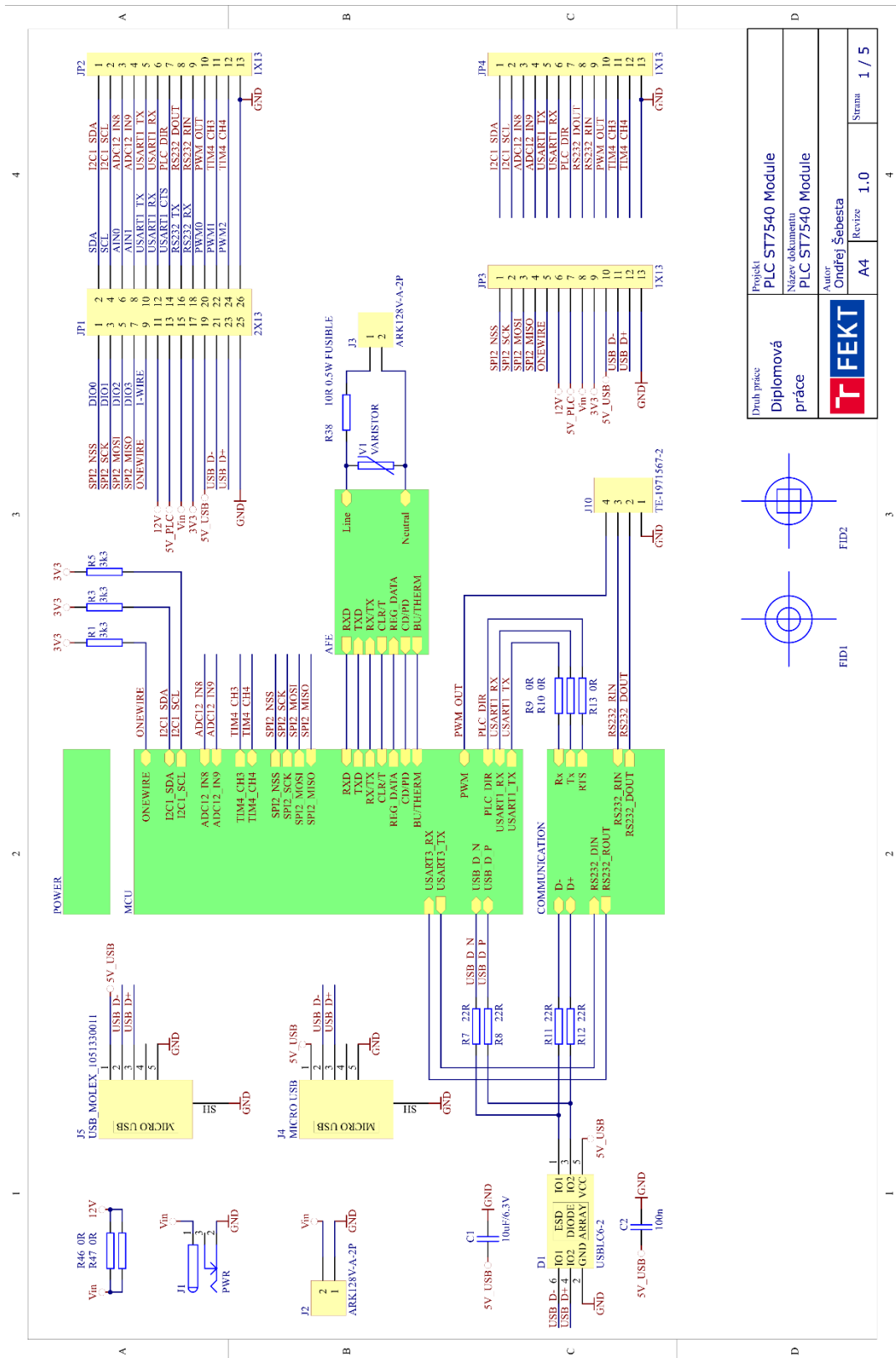


Druh práce Diplomová práce	Projekt PLC ST7540 Test Board	
	Název dokumentu Power	
FEKT	Autor Ondřej Sebesta	
	A4	Revize 1.0
		Strana 5 / 5

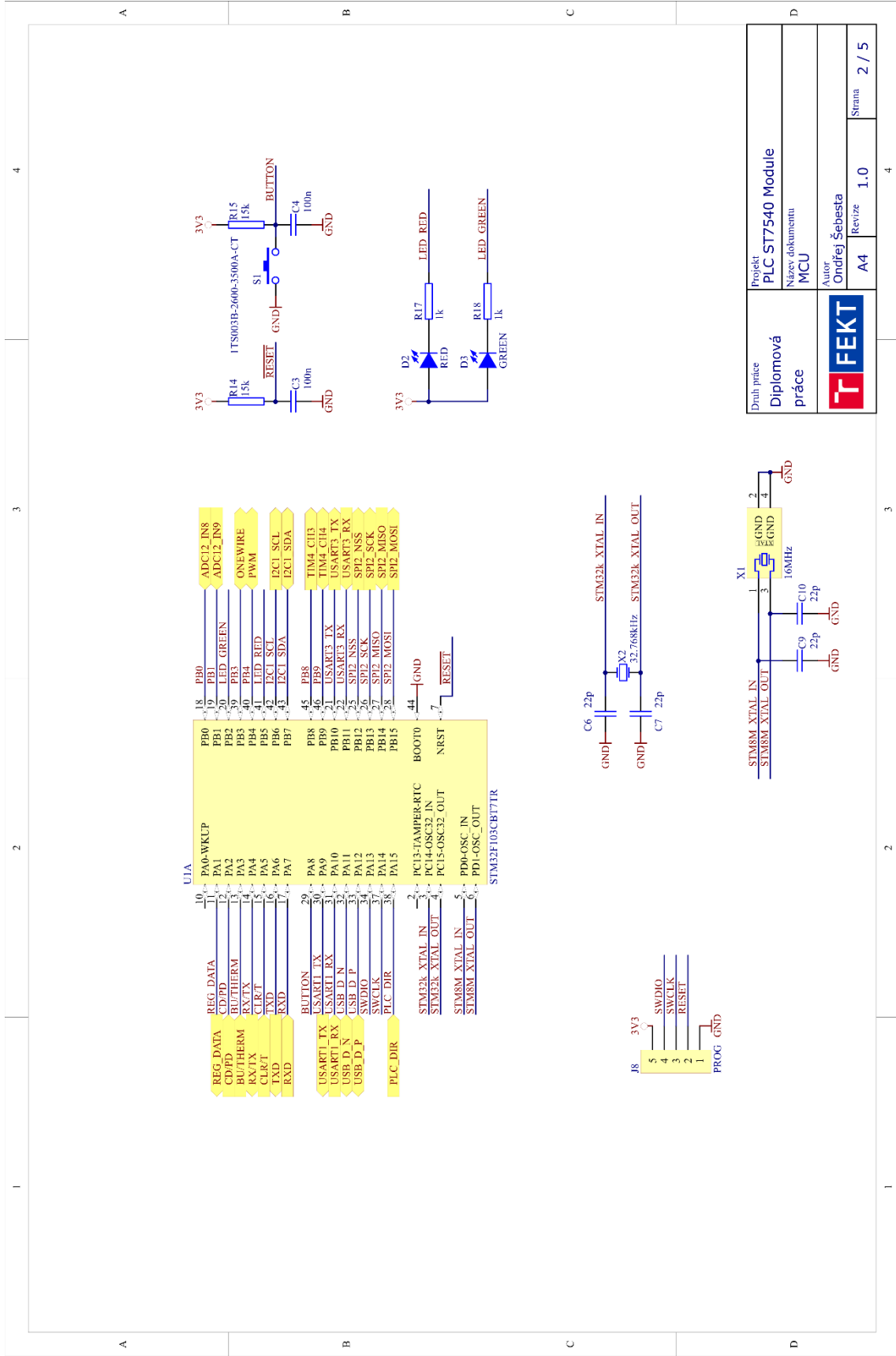
# B. Osazovací výkres testovací desky



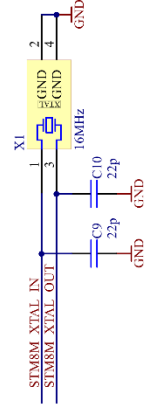
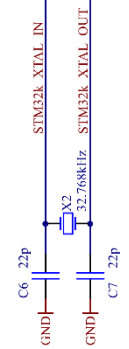
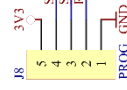
# C. Schéma zapojení PLC modulu

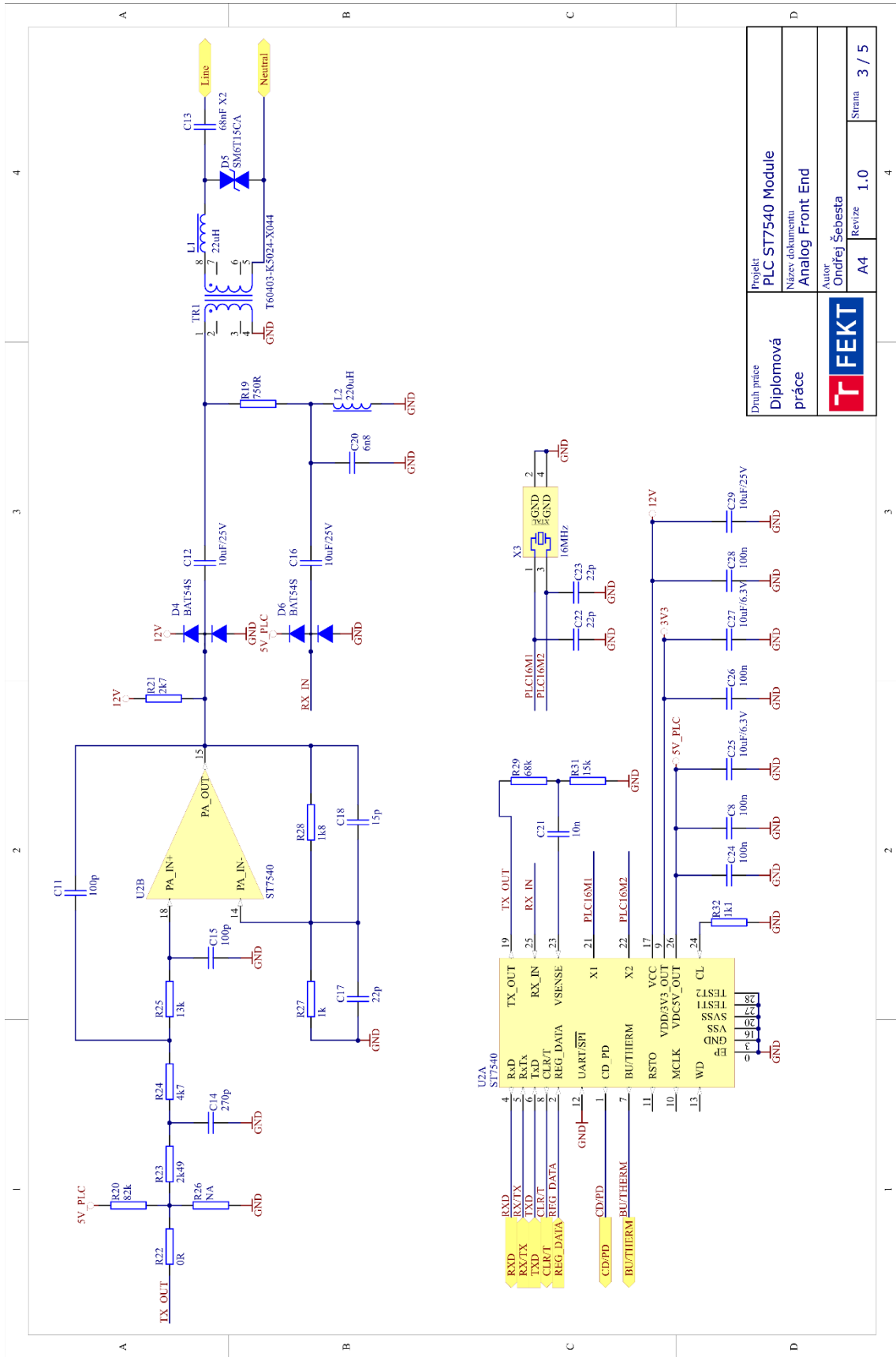




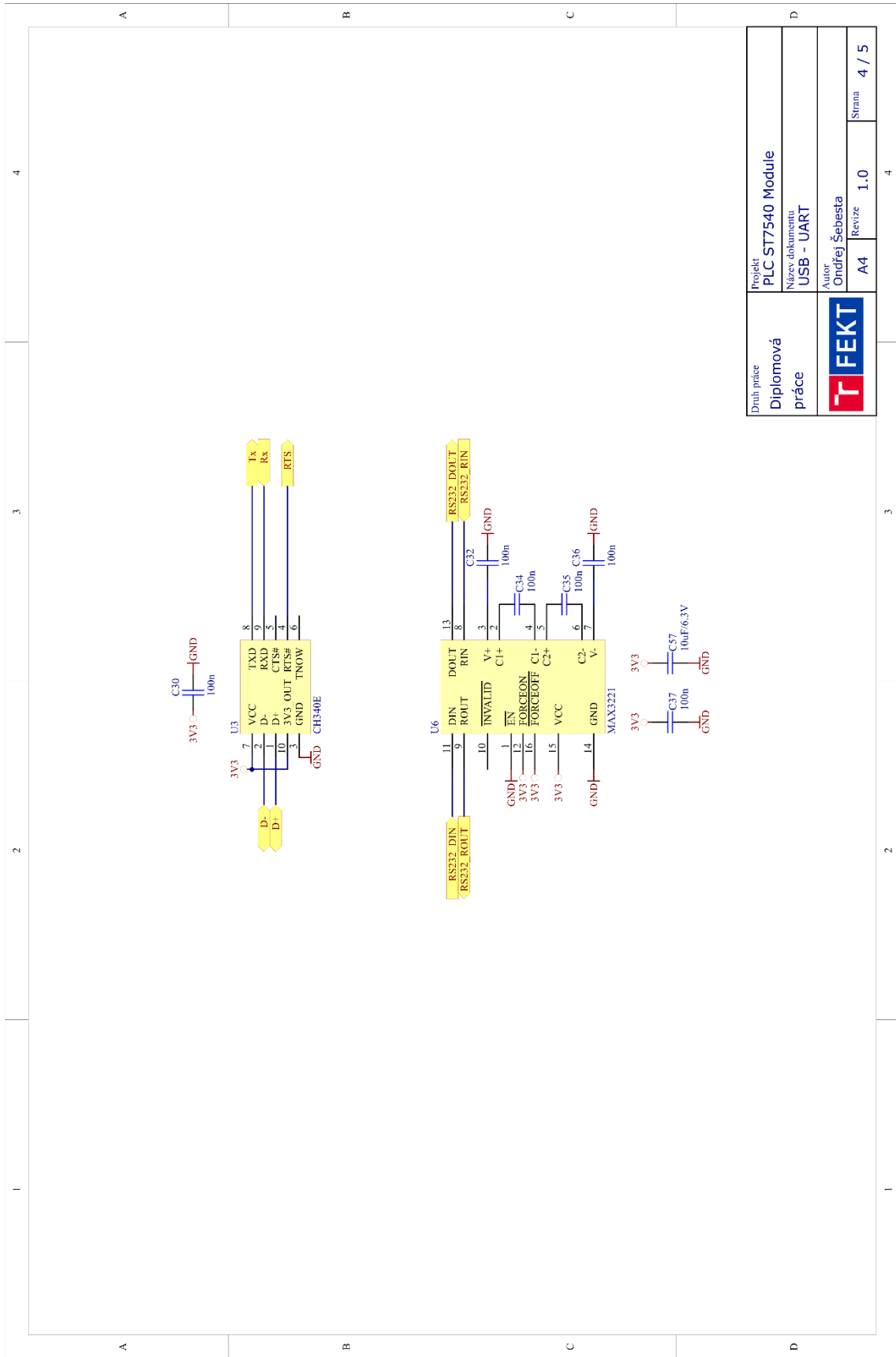


Druh práce	Projekt	PLC ST7540 Module
	Název dokumentu	MCU
Diplomová práce	Autor	Ondřej Šebesta
	Revize	1.0
FEKT		Strana 2 / 5

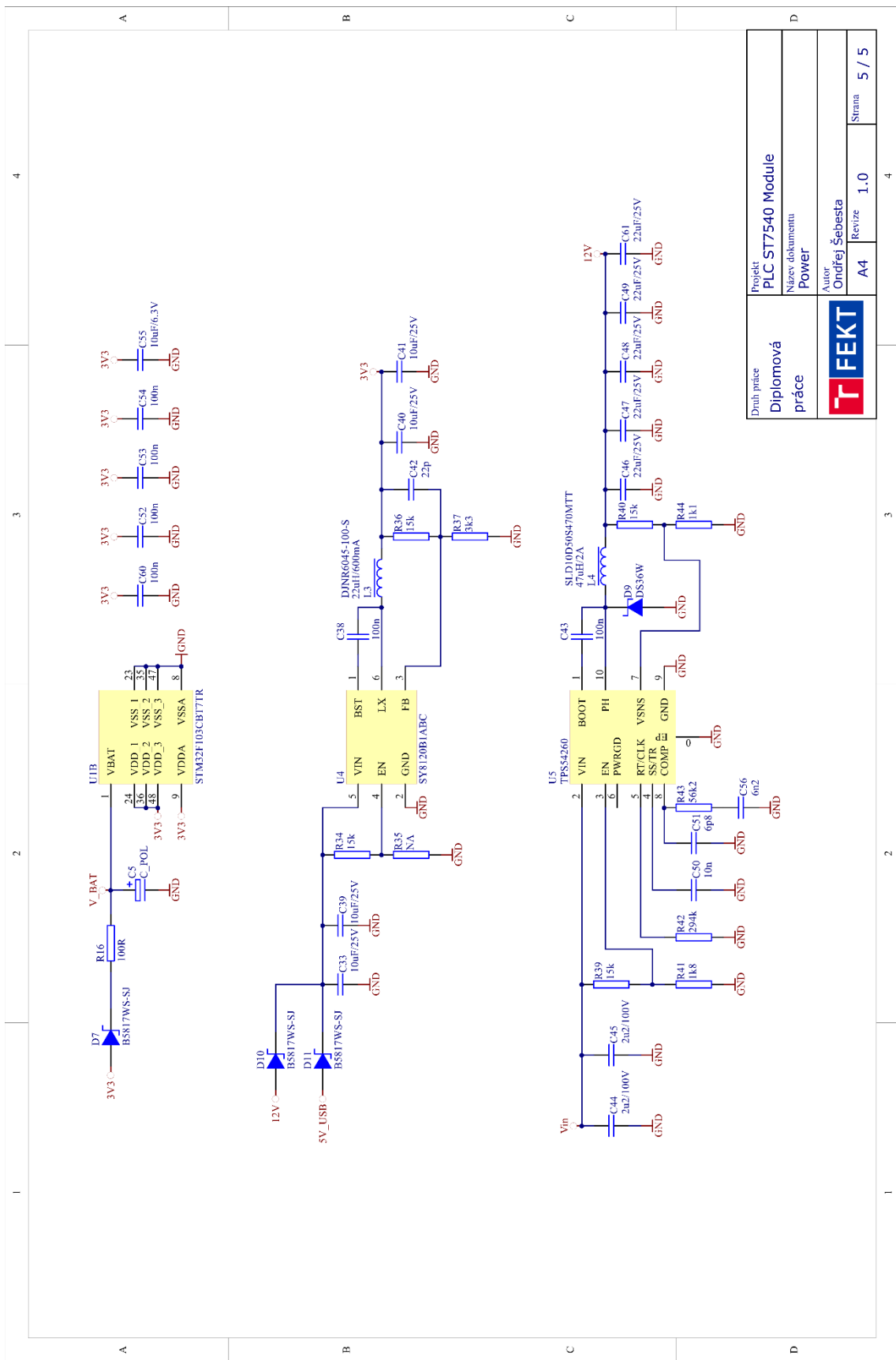




Druh práce <b>Diplomová práce</b>	Projekt <b>PLC ST7540 Module</b>
	Název dokumentu <b>Analog Front End</b>
<b>FEKT</b>	Autor <b>Ondřej Šebesta</b>
	A4 Revize 1.0 Strana 3 / 5

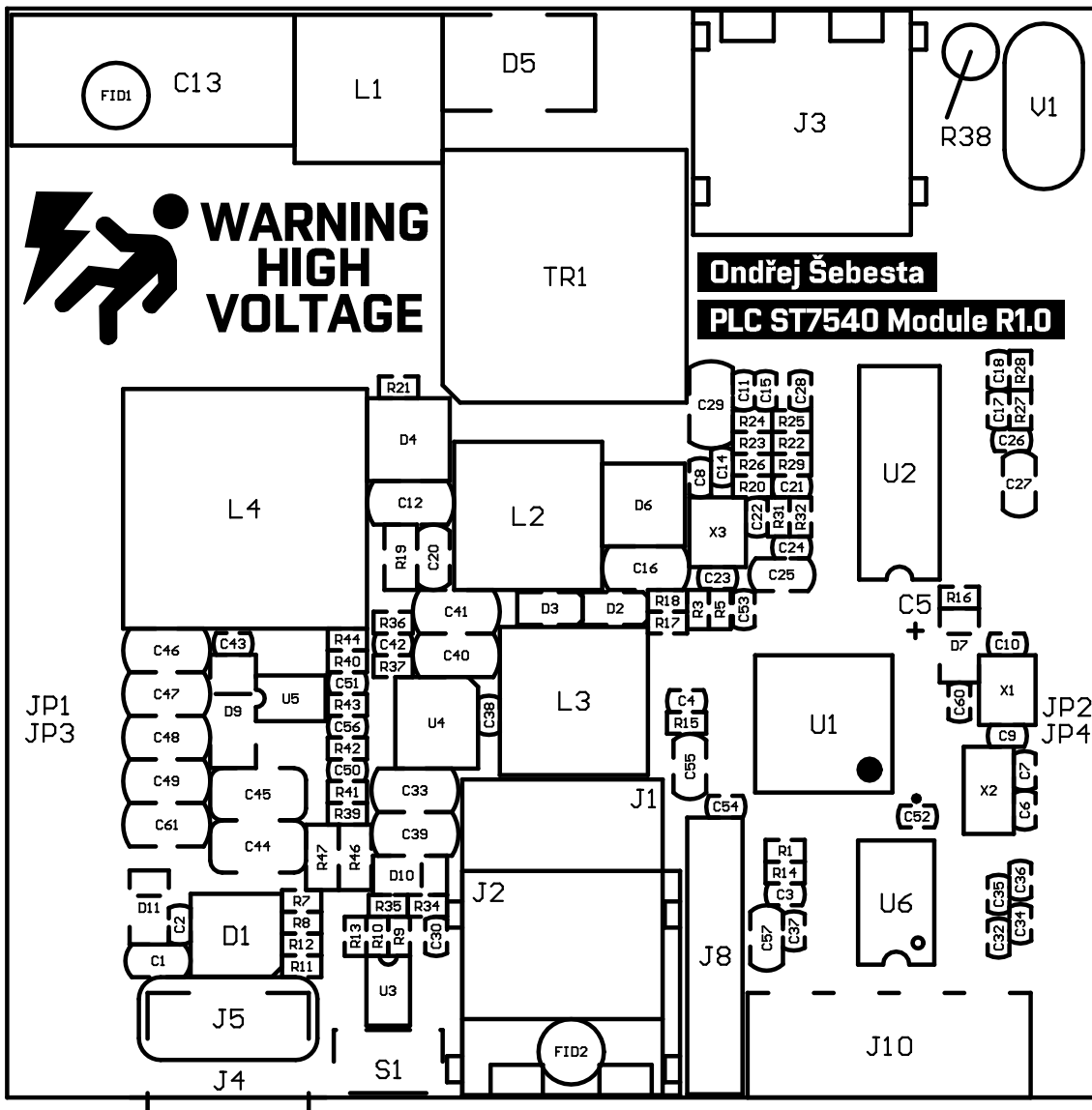


Druh práce <b>Diplomová práce</b>	Projekt <b>PLC ST7540 Module</b>	Strana <b>4 / 5</b>	
	Název dokumentu <b>USB - UART</b>		
	Autor <b>Ondřej Šebesta</b>	Revize <b>1.0</b>	Strana <b>4 / 5</b>
	A4		

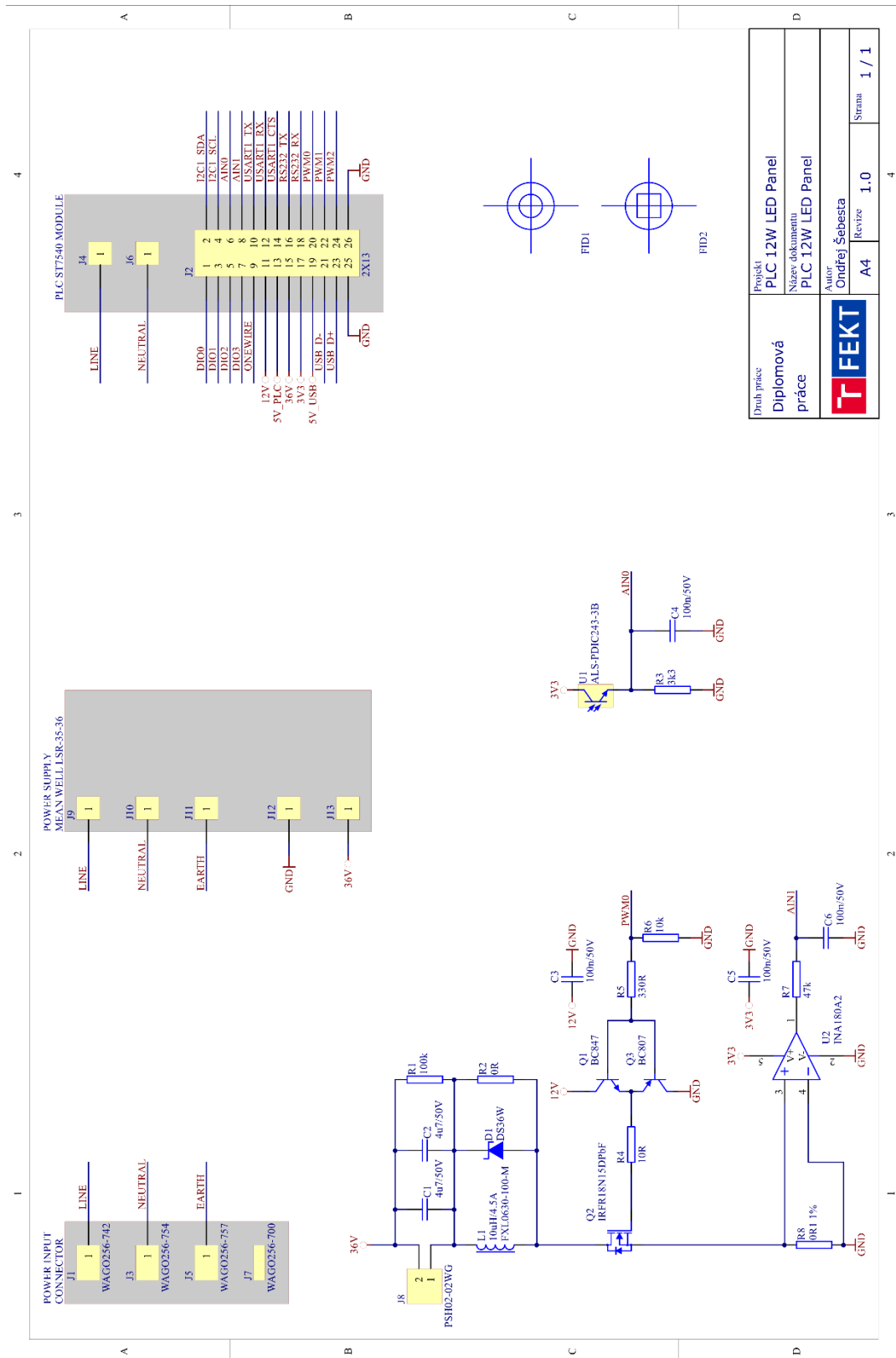


Druh práce Diplomová práce	Projekt PLC ST7540 Module	
	Název dokumentu Power	
FEKT	Autor Ondřej Šebesta	Revize 1.0
	A4	Strana 5 / 5

# D. Osazovací výkres PLC modulu

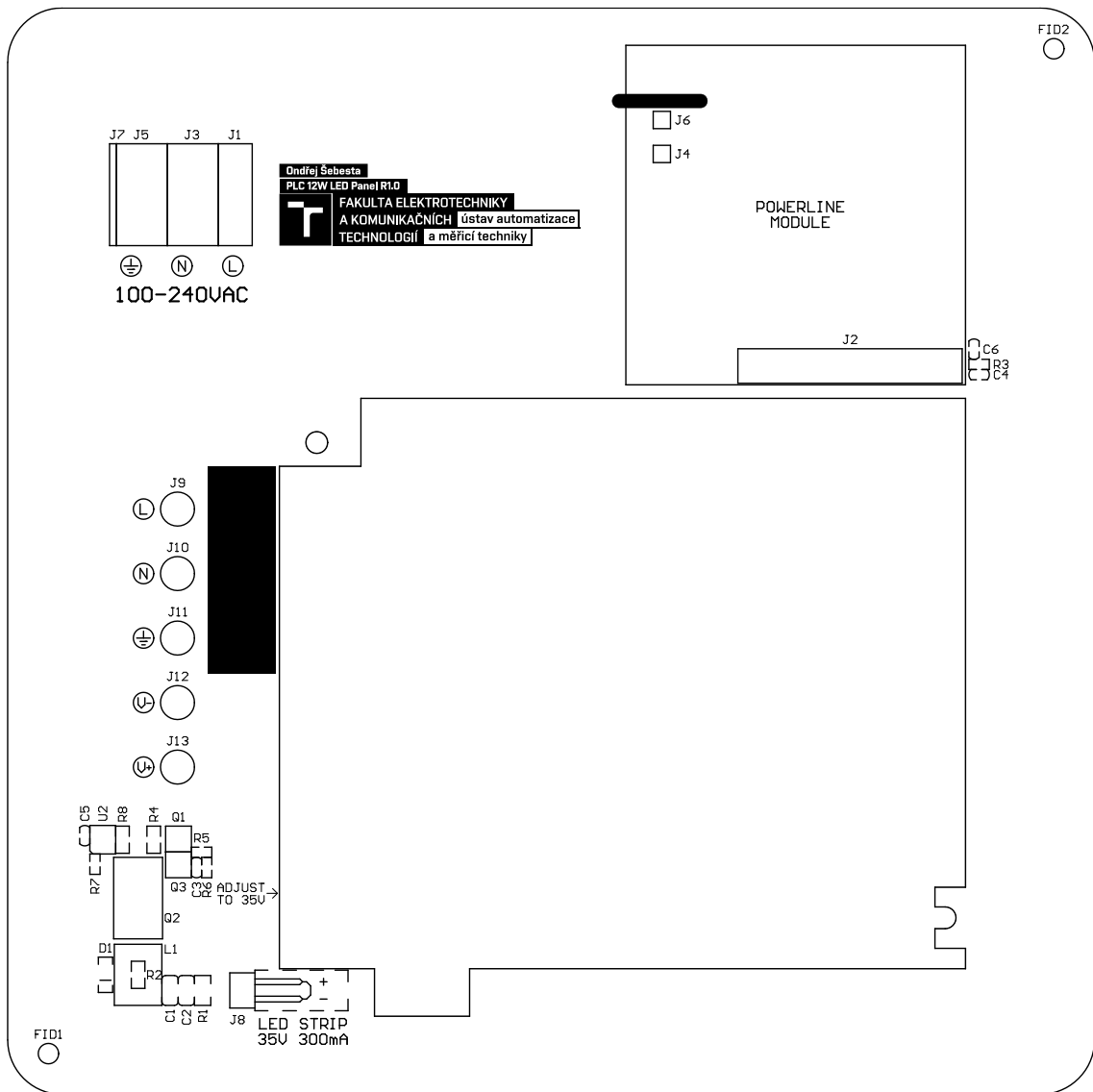


# E. Schéma zapojení LED modulu



Druh práce: Diplomová práce	Projekt	PLC 12W LED Panel
	Název dokumentu	PLC 12W LED Panel
FEKT	Autor	Ondřej Šebesta
	Revize	1.0
	Strana	1 / 1

# F. Osazovací výkres LED modulu TOP



# G. Osazovací výkres LED modulu BOTTOM

