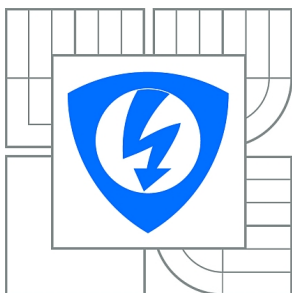


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SYSTÉM ŘÍZENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PO SILOVÝCH ROZVODECH

LIGHT SYSTEM CONTROL VIA POWERLINE COMMUNICATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

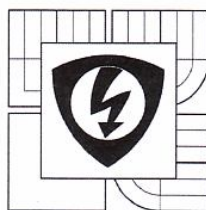
Bc. TOMÁŠ RUMÍŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. TOMÁŠ FRÝZA, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Tomáš Rumišek

Ročník: 2

ID: 109714

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Systém řízení světelných zdrojů po silových rozvodech

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte možnosti komunikace po silnoprůdém vedení, včetně požadavků kladených na tento typ komunikace. Vyberte vhodný obvod realizující komunikaci a navrhnete komunikační protokol. Správnost komunikace prakticky ověřte.

Vyberte fotosenzory, které budou snímat aktuální osvětlení místností. Dále navrhnete IR přijímač, který bude schopen přijímat kód z libovolného dálkového ovladače s protokolem RC 5. Vytvořte celkové schéma zařízení. Realizujte ovládání jednoho světelného zdroje. Analyzujte správnost navrženého postupu.

Napište zdrojový kód pro mikrokontrolér, realizujte navržené zařízení pro celou budovu (několik místností) a ověřte jeho funkčnost v praxi.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry Atmel AVR. Praha: BEN - technická literatura, 2003.

[2] DOSTERT, K. Powerline communications. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 18.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:


prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

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

Výzkum realizovaný v rámci této diplomové práce byl finančně podpořen projektem
CZ.1.07/2.3.00/20.0007 **Wireless Communication Teams**
operačního programu **Vzdělávání pro konkurenceschopnost**.



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Finanční podpora byla poskytnuta Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky.

Tento příspěvek vzniknul za podpory projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0007 WICOMT,
financovaného z operačního programu Vzdělávání pro konkurenceschopnost



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a realizací inteligentního systému domovního osvětlení. V obytných částech domu je intenzita osvětlení udržována na konstantní úrovni, kterou si nastavuje uživatel. Intenzitu osvětlení lze manuálně nastavit pro jednotlivé místnosti z centrálního modulu s uživatelským rozhraním. Nebo ji lze změnit libovolným dálkovým ovladačem přímo v místnosti, ve které se uživatel momentálně nachází. Při použití dálkového ovladače je informace o změně osvětlení přenesena do centrálního modulu. Pro komunikaci mezi centrálním modulem a jednotlivými svítidly jsou použity stávající rozvody elektrické energie.

KLÍČOVÁ SLOVA

Osvětlení, AVR, Atmel, mikrokontrolér, PLC, ST7540, silové vedení

ABSTRACT

The thesis deals with the design and implementation of smart house lighting. In the living parts of the house, the light intensity is maintained at a constant level which is set by the user. The intensity of lighting can be set manually for each room from a central module with a user interface. It can also be changed by any remote control directly in the room in which the user is currently located. When the remote control is used, the information about the change of light intensity is transmitted to the central module. For communication between the central module and the luminaires, the existing power lines are used.

KEYWORDS

Light, AVR, Atmel, microcontroller, PLC, ST7540, powerline

RUMÍŠEK, T. *Systém řízení světelných zdrojů po silových rozvodech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 43 s., 15 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Tomáš Frýza, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Systém řízení světelných zdrojů po silových rozvodech 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

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomáši Frýzovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	VIII
SEZNAM TABULEK	IX
ÚVOD	1
1 KOMUNIKACE PO SILOVÝCH ROZVODECH.....	2
1.1 Obecné informace o PLC.....	2
1.2 Norma EN 50065-1	2
1.2.1 Rozdělení kmitočtového pásma.....	3
1.2.2 Podmínky přenosu dat	3
1.3 Problémy PLC	4
1.4 Modulace používané u PLC	5
1.4.1 Modulace s amplitudovým klíčováním (ASK).....	5
1.4.2 Modulace s kmitočtovým klíčováním (FSK)	5
1.4.3 Modulace OFDM.....	6
1.5 Komunikační obvody	6
1.5.1 TDA5051	6
1.5.2 ST7537, ST7538, ST7540	7
1.5.3 INT51X1	8
1.5.4 AS5501/5502	9
1.5.5 Obvody DSS.....	9
1.5.6 Další způsoby realizace PLC.....	9
1.6 Výběr komunikačního obvodu.....	9
2 NÁVRH HARDWARU	11
2.1 Implementace systému.....	11
2.2 Blokové schéma modulů.....	12
2.3 Mikrokontrolér	13
2.4 PLC modem ST7540	14
2.4.1 Pouzdro	14
2.4.2 Vysílací část	15
2.4.3 Příjímací část.....	17
2.4.4 Komunikace mikrokontroléru s PLC modemem.....	18
2.4.5 Konfigurační registr	19
2.4.6 Simulace PLC filtrů.....	20
2.5 Příjem infračerveného záření.....	24

2.6	Ovládací panel	24
2.7	Regulátor výkonu svítidla	25
2.7.1	Triaková regulace	26
2.7.2	Návrh regulátoru	26
2.7.3	Regulovatelné prvky	27
2.8	Snímání intenzity osvětlení	28
2.8.1	Směrová selektivita	28
2.8.2	Rozsah snímaných vlnových délek	28
2.8.3	Spektrální citlivost	29
2.8.4	Výběr fotočlánku	30
3	SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ	32
3.1	Mezimodulový komunikační protokol	32
3.1.1	Kontrolní součet	32
3.2	Komunikace mezi modulem a regulátorem	33
3.3	Obslužný program centrálního modulu	34
3.4	Obslužný program podružného modulu	35
3.5	Obslužný program regulátoru	35
4	OŽIVENÍ A MĚŘENÍ ZAŘÍZENÍ	36
5	ZÁVĚR	39
	LITERATURA	40
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	42
	SEZNAM PŘÍLOH	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1.1: ZÁVISLOST IMPEDANCE VEDENÍ NA ČASE A FREKVENCI (PŘEVZATO Z [3])	4
OBRÁZEK 1.2: MODULACE S AMPLITUDOVÝM A KMITOČTOVÝM KLÍČOVÁNÍM (PŘEVZATO Z [7])	5
OBRÁZEK 1.3: MODULACE OFDM	6
OBRÁZEK 2.1: IMPLEMENTACE SYSTÉMU V BUDOVĚ (ŘEZ DVOUPODLAŽNÍ BUDOVY - POHLED Z BOKU)	11
OBRÁZEK 2.2: BLOKOVÉ SCHÉMA CENTRÁLNÍHO MODULU	12
OBRÁZEK 2.3: BLOKOVÉ SCHÉMA PODRUŽNÉHO MODULU	13
OBRÁZEK 2.4: POUZDRO OBVODU ST7540 (PŘEVZATO Z [11])	14
OBRÁZEK 2.5: BLOKOVÉ SCHÉMA VYSÍLACÍ ČÁSTI ST7540 (PŘEVZATO Z [11])	15
OBRÁZEK 2.6: AKTIVNÍ VYSÍLACÍ FILTR (PŘEVZATO Z [15])	16
OBRÁZEK 2.7: PASIVNÍ VYSÍLACÍ FILTR (PŘEVZATO Z [15])	16
OBRÁZEK 2.8: BLOKOVÉ SCHÉMA PŘÍJÍMACÍ ČÁSTI ST7540 (PŘEVZATO Z [11])	17
OBRÁZEK 2.9: PASIVNÍ PŘÍJÍMACÍ FILTR (PŘEVZATO Z [16])	18
OBRÁZEK 2.10: KOMUNIKACE ROZHRAŇÍM UART A SPI (PŘEVZATO Z [11])	19
OBRÁZEK 2.11: SIMULACE PASIVNÍHO FILTRU 2.ŘÁDU	20
OBRÁZEK 2.12: PŘENOS PASIVNÍHO FILTRU DRUHÉHO ŘÁDU	21
OBRÁZEK 2.13: SIMULACE PASIVNÍHO VYSÍLACÍHO FILTRU	21
OBRÁZEK 2.14: PŘENOS PASIVNÍHO VYSÍLACÍHO FILTRU PRVNÍHO ŘÁDU	22
OBRÁZEK 2.15: SIMULACE PASIVNÍHO PŘÍJÍMACÍHO FILTRU	22
OBRÁZEK 2.16: PŘENOS PASIVNÍHO PŘÍJÍMACÍHO FILTRU	23
OBRÁZEK 2.17: SIMULACE PŘÍJÍMACÍ ČÁSTI	23
OBRÁZEK 2.18: PŘENOS PŘÍJÍMACÍ ČÁSTI	23
OBRÁZEK 2.19: DEFINICE LOGICKÝCH ÚROVNÍ PROTOKOLU RC-5 (PŘEVZATO Z [18])	24
OBRÁZEK 2.20: KOMUNIKAČNÍ PAKET PROTOKOLU RC-5 (PŘEVZATO Z [18])	24
OBRÁZEK 2.21: PRINCIP TRIAKOVÉ REGULACE	26
OBRÁZEK 2.22: SCHÉMA ZAPOJENÍ REGULÁTORU	27
OBRÁZEK 2.23: SPEKTRUM ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN (PŘEVZATO Z [25])	29
OBRÁZEK 2.24: ZÁVISLOST RELATIVNÍ CITLIVOSTI OKA NA RŮZNÉ VLNOVÉ DÉLKY (PŘEVZATO Z [25])	29
OBRÁZEK 2.25: CITLIVOST A SMĚROVÁ SELEKTIVITA SFH 3710 (PŘEVZATO Z [26])	30
OBRÁZEK 2.26: ZÁVISLOST PROUDU FOTOTRANZISTORU NA INTENZITĚ OSVĚTLENÍ (PŘEVZATO Z [26])	31
OBRÁZEK 2.27: SCHÉMA ZAPOJENÍ FOTOTRANZISTORU	31
OBRÁZEK 3.1: DATOVÝ RÁMEC MEZIMODULOVÉ KOMUNIKACE	32
OBRÁZEK 3.2: PRINCIP POUŽITÍ CRC	33
OBRÁZEK 3.3: DATOVÝ RÁMEC PRO KOMUNIKACI MEZI MODULEM A REGULÁTOREM	33
OBRÁZEK 3.4: PRŮBĚH KOMUNIKACE MEZI PODRUŽNÝM MODULEM A REGULÁTOREM	34
OBRÁZEK 4.1: SPEKTRUM FSK SIGNÁLU	36
OBRÁZEK 4.2: DATA NAMĚŘENÁ FSK DEMODULÁTOREM	37

SEZNAM TABULEK

TABULKA 1.1: ROZDĚLENÍ KMITOČTOVÉHO PÁSMÁ	3
TABULKA 1.2: PŘEHLED PLC MODEMŮ OD FIRMY ST MICROELECTRONICS, [9], [10], [11].....	7
TABULKA 1.3: PŘEHLED PLC MODEMŮ	9
TABULKA 2.1: POPIS PINŮ ST7540 (PŘEVZATO Z [11]).....	18
TABULKA 2.2: PROGRAMOVATELNÉ FUNKCE ST7540.....	20
TABULKA 4.1: CHYBOVOST PŘENOSU PRO RŮZNÉ VZDÁLENOSTI	38

ÚVOD

Cílem této práce je návrh a realizace inteligentního systému řízení osvětlení, který udržuje v objektu konstantní úroveň osvětlení. A to navzdory změnám venkovního osvětlení a používání přídavných svítidel (stolní lampy, apod.). Základem je systém modulů, které snímají aktuální intenzitu osvětlení v jednotlivých místnostech. Naměřenou hodnotu porovnávají s požadovanou intenzitou osvětlení nastavenou uživatelem. Na základě tohoto porovnání je regulován výkon svítidla.

Požadovanou intenzitu osvětlení pro kterékoli svítidlo lze nastavit manuálně na centrálním modulu. Intenzita se volí na grafickém rozhraní pro jednotlivé místnosti a je zadávána v procentech. Pokud je potřeba změnit intenzitu pouze v jedné místnosti, lze k tomu použít libovolný dálkový ovladač (dále jen DO), který byl předem nakonfigurován pro komunikaci s jedním nebo více podružnými moduly. Informace o změně intenzity na některém z podružných modulů je přenesena do centrálního modulu. Díky tomu jsou na centrálním modulu zobrazeny stále aktuální informace o nastavené intenzitě osvětlení v jednotlivých místnostech.

Komunikace mezi moduly probíhá po síťových rozvodech 230 V. To je velká výhoda oproti běžně dostupným systémům inteligentního osvětlení, protože není nutné zavádět další kabeláž, která by si vyžádala úpravy interiéru a nemalou investici.

Použití vypínačů světel zůstává neměnné. Jediným rozdílem je hodnota výkonu svítidla. Po zapnutí svítidla je totiž výkon nastaven na požadovanou úroveň. Nedosahuje tedy maximální úrovně výkonu. Vypínač také zapíná a vypíná příslušný modul. To vede k úspoře elektrické energie.

V první kapitole této práce je rozebrána problematika komunikace po silových rozvodech a její řešení pro zadaný projekt. Nejprve jsou uvedeny základní informace o komunikaci po silových rozvodech a poté je na základě stanovených priorit vybrán vhodný komunikační obvod. Druhá kapitola obsahuje hardwarovou strukturu jednotlivých modulů a jejich periferií. Třetí kapitola je věnována návrhu komunikačních protokolů pro dosažení spolehlivé komunikace. Poslední, čtvrtá kapitola popisuje postup při oživování a měření zařízení.

1 KOMUNIKACE PO SILOVÝCH ROZVODECH

Tato kapitola se věnuje komunikaci po silových rozvodech, která je v literatuře označována zkratkou PLC (Power Line Communications). V první části jsou uvedeny základní informace a problémy, se kterými se tento typ komunikace potýká. V další části je na základě stanovených požadavků vybrán a detailně popsán nejvhodnější komunikační obvod.

1.1 Obecné informace o PLC

PLC je komunikační technologie, která umožňuje přenášet data po stávajících silových rozvodech nízkého napětí. To může být velmi výhodné při realizaci datové sítě v budovách. Není třeba zavádět další přenosové cesty. Komunikace po silových rozvodech je tedy finančně výhodnější a zároveň poměrně jednoduchá. [1]

Tato technologie je známa už od počátku 20. století, kdy byla využívána k hromadnému dálkovému ovládání. Postupem času nacházela využití pro přenos telefonního signálu a širokopásmový přenos dat. V dnešní době nachází největší využití v dálkovém řízení elektroměrů, řízení inteligentních domácností či realizaci domácích počítačových sítí. [1]

Komunikace po silových rozvodech je založena na modulaci vysílaných dat na nosný signál o zvolené frekvenci. Tento modulovaný signál je poté superponován na síťové napětí 230 V. Na přijímací straně je síťové napětí potlačeno a modulovaný signál je demodulován. Při tomto přenosu dat lze volit frekvenci nosné, přenosovou rychlost a hloubku modulace. Na základě zvolené frekvence nosné se PLC dělí na širokopásmovou a úzkopásmovou. Širokopásmová komunikace se používá pro přenos dat o velkém objemu, zatímco úzkopásmová komunikace přenáší menší množství dat, a proto je vhodná pro domácí automatizaci. Pro navrhovaný systém zcela dostačuje úzkopásmová komunikace. Další text o PLC bude proto zaměřen právě na tento typ komunikace. [2]

1.2 Norma EN 50065-1

Evropská komise pro elektrotechnickou standardizaci v Bruselu (CENELEC) vydala normu EN 50065-1 "Zabezpečení komunikace na nízkonapěťové elektrické instalaci ve frekvenčním pásmu 3 kHz až 148,5 kHz"[3]. Byla přijata v řadě evropských zemí.

Tato norma definuje základní pravidla, která je nutné dodržet při komunikaci po silových rozvodech. Zaměřuje se především na rozdělení kmitočtového pásma a bezpečný a bezproblémový přenos dat. Bližší popis tohoto standardu lze nalézt v [4].

1.2.1 Rozdělení kmitočtového pásma

Pro úzkopásmovou PLC je určeno kmitočtové pásmo od 3 kHz do 148,5 kHz. Toto pásmo se podle tabulky 1.1 dále dělí na 4 dílčí pásma.

Tabulka 1.1: Rozdělení kmitočtového pásma

Pásmo	Frekvenční rozsah [kHz]	Určeno pro	Přístupový protokol
A	3 – 95	Dodavatele	Ne
B	95 – 125	Odběratele	Ne
C	125 – 140	Odběratele	Ano
D	140 – 148,5	Zabezpečovací systémy	Ne

Pásmo A není možné pro PLC využít, protože je určeno pouze pro dodavatele elektrické energie. Pásmo D taktéž nelze využít, protože je rezervováno pro zabezpečovací systémy. Zbývají tedy kmitočtová pásma B a C, která jsou normou rozlišena použitím přístupového protokolu. Přístupový protokol slouží k bezpečnému a bezproblémovému přenosu dat. Pásma nevyžadující přístupový protokol jsou v případě komunikačního systému s více vysílači zatížena vznikem chyb. Na základě těchto informací je zřejmé, že pro PLC je nejvhodnější pásmo C, které vyžaduje přístupový protokol. Více o přístupovém protokolu je uvedeno v kapitole 1.2.2.

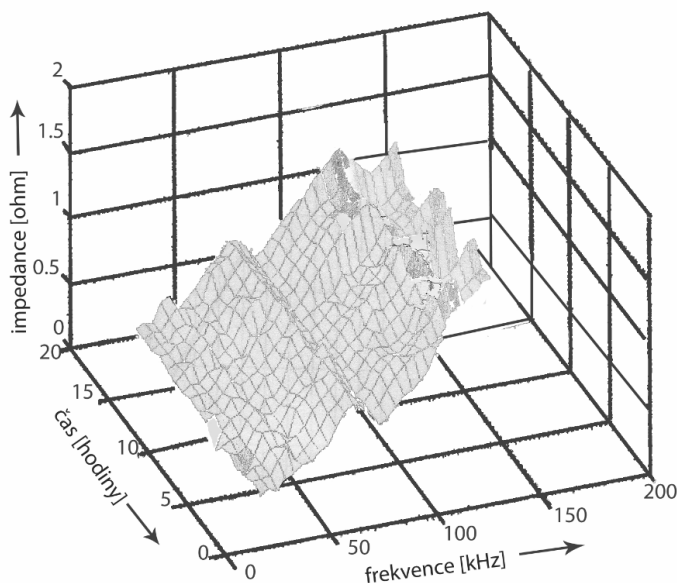
1.2.2 Podmínky přenosu dat

Podmínky přenosu dat pro pásmo C jsou definovány přístupovým protokolem, který lze nalézt v [4]. Komise CENELEC vyžaduje přístupový protokol CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance), který je dán následujícími pravidly:

- Komunikace probíhá na libovolném kmitočtu v rámci pásma C. Na kmitočtu 132,5 kHz musí být vyslán signál informující o probíhající komunikaci.
- Před začátkem vysílání musí vysílač zkontrolovat, zda není komunikační kanál již využíván jiným vysílačem. Tato procedura pomáhá předejít kolizi v důsledku více současně komunikujících zařízení.
- Celková doba přenosu nesmí přesáhnout 1 s. Toto opatření znemožní nepřetržité vysílání jediného vysílače, který by ostatním vysílačům soustavně bránil v komunikaci.
- Prodleva ve vysílání jediného vysílače nesmí přesáhnout 80 ms.
- Vysílač musí po ukončení komunikace čekat minimálně 125 ms, než začne znovu vysílat.
- Pokud chce vysílač začít komunikovat, musí počkat 85 ms po ukončení komunikace jiného vysílače.

1.3 Problémy PLC

Komunikace po silových rozvodech je i přes mnoho pozitivních vlastností zatížena negativy a problémy, které je nutné pro bezproblémovou komunikaci řešit. Prvním a pravděpodobně také nejdůležitějším problémem jsou stávající rozvody elektrické energie. V ideálním případě by všechny elektrické rozvody měly být totožné. Byly by vyrobeny ze stejného materiálu o stejném průměru, vedeny ve svazcích po stejném počtu vodičů a ve stejné chráničce. V tomto ideálním případě by byla předem daná charakteristická impedance vedení. Ovšem realita je zcela jiná. Ideální podmínky nejsou a nemohou být splněny a charakteristická impedance je proměnná. Závisí nejen na místě, ve kterém ji měříme, ale také na frekvenci a čase. Na obrázku 1.1 je znázorněna závislost impedance síťového vedení na čase a frekvenci. [2], [3]



Obrázek 1.1: Závislost impedance vedení na čase a frekvenci (převzato z [3])

S impedancí se na vedení mění také jeho útlum. Nejnižší útlum je v kmitočtovém pásmu C, tedy od 125 kHz do 140 kHz.

Dalším problémem, se kterým se PLC potýká, je přenos signálu přes síťové transformátory. Signály o vyšších kmitočtech buď síťovými transformátory neprojdou vůbec, anebo jsou po průchodu značně utlumeny. Řešením tohoto problému je přemostění výkonového transformátoru jiným transformátorem, který je uzpůsoben pro přenos vyšších kmitočtů. [2], [3]

Dalšími negativními vlivy, které se uplatňují při PLC jsou:

- Šum na pozadí kanálu
- Úzkopásmové rušení (vytvářené zářivkami, televizory, apod.)
- Impulsní rušení (vytvářené především spínanými zdroji a tyristorovými regulátory)
- Komunikace rozvodných závodů

1.4 Modulace používané u PLC

V této kapitole bude nastíněna funkce a vlastnosti digitálních modulací, které se využívají pro komunikaci po silových rozvodech. Volba vhodné modulace má velký vliv na kvalitu přenosu dat. V případě špatného výběru bude komunikace zatížena vznikem chyb v důsledku rušení. Tyto chyby mohou komplikovat, nebo zcela znemožnit komunikaci. Naopak v případě výběru vhodné modulace lze dosáhnout bezproblémové komunikace bez vlivů rušení.

Nejpoužívanější modulace pro PLC :

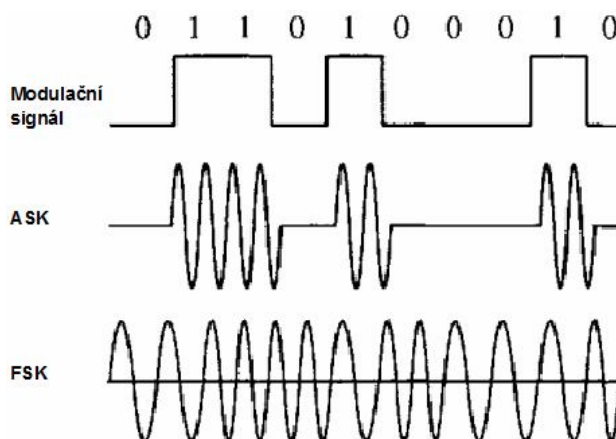
- ASK (Amplitude Shift Keying) - Modulace s amplitudovým klíčováním
- FSK (Frequency Shift Keying) - Modulace s kmitočtovým klíčováním
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) - Ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením

1.4.1 Modulace s amplitudovým klíčováním (ASK)

Jedná se o nejjednodušší modulaci, která je používána. Princip je založen na změně amplitudy nosného signálu v závislosti na modulačním signálu. ASK nevyžaduje velkou šířku frekvenčního pásma, ale je z používaných modulací nejvíce náchylná k chybám. Z tohoto důvodu není příliš vhodná pro PLC systémy. Modulovaný signál je znázorněn na obrázku 1.2 uprostřed. [5], [6]

1.4.2 Modulace s kmitočtovým klíčováním (FSK)

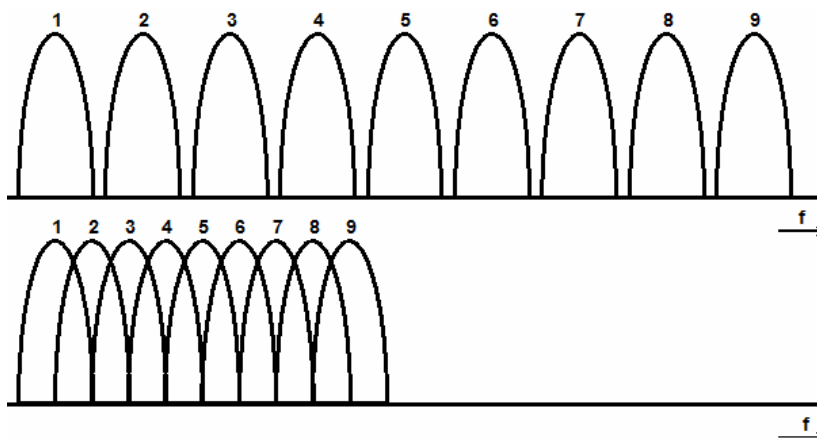
Modulace je založena na přiřazení rozdílné frekvence logickým úrovním. Na základě aktuální logické úrovně modulačního signálu mění nosný signál svoji frekvenci. Šířka frekvenčního pásma je závislá na vzdálenosti kmitočtů logických úrovní. FSK je oproti ASK podstatně méně náchylná k chybám. Z tohoto důvodu je pro PLC systémy vhodnější. Tento typ modulace je zobrazen na obrázku 1.2 dole. [5], [6]



Obrázek 1.2: Modulace s amplitudovým a kmitočtovým klíčováním (převzato z [7])

1.4.3 Modulace OFDM

Na obrázku 1.3 dole je zobrazen princip této modulace. OFDM rozděluje kmitočtové pásmo na více komunikačních kanálů, které přenáší data současně. Komunikační kanály jsou vzájemně ortogonální a díky tomu se mohou překrývat. Tím dochází ke zmenšení vyžadovaného kmitočtového pásma. OFDM tedy dovoluje přenášet velké množství dat v krátkém čase. [5]



Obrázek 1.3: Modulace OFDM

Jak již bylo zmíněno, pro navrhovaný systém dostačuje úzkopásmová komunikace. Proto, a také pro svou komplikovanost je tato modulace nevhodná.

1.5 Komunikační obvody

V této kapitole jsou uvedeny všechny známé PLC modemy, které teoreticky lze pro navrhovaný systém použít.

1.5.1 TDA5051

Tento obvod od společnosti Philips slouží ke komunikaci po silovém vedení. V každém integrovaném obvodu je obsažen modulátor i demodulátor. Obvod tedy funguje jako vysílač i přijímač. Díky tomu lze po silovém vedení provozovat poloduplexní přenos. V pouzdře obvodu je také obsažen oscilátor, který lze využít ke stanovení modulační/demodulační frekvence. V případě nevyužití oscilátoru lze použít hodinový signál mikrokontroléru. TDA5051 nabízí přenosovou rychlost 1200 bit/s. [8]

Obvod v základním zapojení požaduje několik podpůrných obvodů. Pro připojení k elektrické síti 230 V je zapotřebí vazební obvod, který potlačuje 50Hz signál a současně funguje jako anti-aliasingový filtr. Mezi vazebním obvodem a vstupem modemu je umístěn zesilovač pro zvýšení citlivosti přijímače. Pokud je vyžadována synchronizace přenášených dat se síťovým napětím, je nutné přidat do zapojení obvod detekce průchodu síťového napětí nulou. [8]

Největší slabinou TDA5051 je používaná modulace ASK. I když se jedná o nejjednodušší způsob modulace, je zatížena vznikem interferencí a náchylná k chybám.

Základní charakteristika obvodu:

- Plně digitální generování nosné
- Modulační/Demodulační frekvence je nastavena z interního oscilátoru, nebo hodinovým signálem mikrokontroléru
- Integrovaný výstupní zesilovač s ochranou proti přetížení
- Automatické nastavení zesílení na vstupu přijímače
- 8-bitový A/D převodník a úzkopásmový digitální filtr
- Digitální demodulace poskytuje data v základním pásmu
- Snadným zapojením lze dosáhnout souladu s normou EN 50065
- Pro jednoduché aplikace je vyžadováno minimum externích součástek
- Vyrábí se v pouzdře SO16

1.5.2 ST7537, ST7538, ST7540

Tyto tři verze obvodu pro PLC vytvořila společnost ST Microelectronics. Jejich číselné označení odpovídá postupnému časovému vývoji. Mezi jednotlivými modely jsou základní rozdíly, které jsou uvedeny v tabulce 1.2.

Všechny tři modemy používají digitální modulaci FSK, která přináší oproti ASK menší náchylnost k chybám. I přes výše uvedené rozdíly jsou tyto obvody vzájemně kompatibilní.

Parametry těchto obvodů jsou výrobcem nastaveny tak, aby splňovaly i nejpřísnější požadavky mezinárodních norem pro elektromagnetickou kompatibilitu. Potlačení elektromagnetických interferencí na přijatelnou úroveň je dosaženo vhodným nastavením vysílacích obvodů. Elektromagnetická susceptibilita je zaručena úzkopásmovou filtrací příchozího signálu. [11]

Tabulka 1.2: Přehled PLC modemů od firmy ST Microelectronics, [9], [10], [11].

Vlastnost	ST7537	ST7538	ST7540
Režim	Asynchronní	Synchronní/ Asynchronní	Synchronní/ Asynchronní
Napájecí napětí	5 V a 10 V	7,5 V až 12,5 V	7,5 V až 13,5 V
Proudový odběr	30 mA	5 mA	5 mA
Počet programovatelných přenosových frekvencí	1	8	8
Komunikační rychlost až	2400 bit/s	4800 bit/s	4800 bit/s
Detekce průchodu nulou	Ne	Ano	Ne
Citlivost přijímače	Lepší než 1 mV _{ef}	1 mV _{ef}	250 μV _{ef}
Integrovaný regulátor 5 V	Ne	Ano	Ano
Integrovaný regulátor 3,3 V	Ne	Ne	Ano
Pouzdro	PLCC28	TQFP44	HTSSOP

Na základě uvedených informací o PLC obvodech je patrné, že za nejméně vyhovující lze označit ST7537. Použití tohoto obvodu vyžaduje dvou napájecích napětí, má největší proudový odběr, jedinou přenosovou frekvenci a umožňuje pouze asynchronní přenos. ST7538 a ST7540 jsou svými vlastnostmi srovnatelné. Pokud by z nich měl být jeden vybrán, byly by při výběru hlavními parametry cena a dostupnost obvodu, která je v rámci Evropy špatná. Další text bude zaměřen pouze na nejnovější modem ST7540.

Obvod ST7540 umožňuje synchronní nebo asynchronní poloduplexní komunikaci po silovém vedení. Stejně jako u TDA5051 je v každém pouzdře obsažen modulátor i demodulátor. Díky tomu je možný poloduplexní přenos. Při vhodném zapojení splňuje komunikace po silovém vedení požadavky normy EN 50065.

ST7540 vyžaduje pro svou činnost tři podpůrná zapojení. První z nich filtruje a zesiluje výstupní kmitočtově modulovaný signál, přičemž výkonový operační zesilovač je umístěn uvnitř PLC modemu a má vyvedeny oba vstupy i výstup. Druhým zapojením jsou pasivní filtry pro příjem i vysílání, které fungují jako pásmové propusti se středním kmitočtem na zvoleném komunikačním kmitočtu. Posledním podpůrným zapojením je obvod pro nastavení výstupního napětí a proudu. [11]

Základní charakteristika obvodu:

- Nastavitelné výstupní napětí a proud
- Volba mezi synchronním a asynchronním režimem
- Dva integrované napěťové regulátory
- Osm nastavitelných přenosových frekvencí
- Lze dosáhnout souladu s normou EN 50065
- Přenosová rychlost až 4800 bit/s
- Velmi nízký proudový odběr (5 mA)
- Pouzdro HTSSOP

1.5.3 INT51X1

Tento obvod pracující podle standartu HomePlug 1.0.1 navrhla firma Intellon. Jedná se o komplikovaný obvod, který využívá OFDM modulaci. Díky ní disponuje obvod velkou přenosovou rychlostí až 14 Mbit/s. INT51X1 nabízí komerčně využívané rozhraní USB a Ethernet. [12]

Základní charakteristika obvodu:

- V jediném pouzdře je obsaženo rozhraní MII/GPSI, USB a Ethernet
- Komunikační rychlost až 14 Mbit/s
- Funkce automatického zesílení
- Pro všeobecné použití je komunikace realizována rozhraním PHY
- OFDM modulace
- Inteligentní přizpůsobení přenosu dat špatným vlastnostem kanálu
- 56-ti bitové DES šifrování dat

1.5.4 AS5501/5502

Obvod navrhla společnost Austria Mikro Systeme International AG. Jedná se o PLC modem využívající FSK modulace. Samotný AS5501 vyžaduje napájecí napětí 5 V, ale pro externí zesilovač je zapotřebí 12 V (AS5501) nebo 24 V (AS5502). Na výstupu tohoto zesilovače je pak napětí 7 V_{PP} (AS5501) nebo 14 V_{PP} (AS5502). Nosný kmitočet je nastavitelný v rozsahu 64 kHz až 140 kHz s kmitočtovým zdvihem 600, 1200 nebo 2400 Hz. Obvod je dodáván v pouzdru SOIC28. [13]

1.5.5 Obvody DSS

Pocházejí od firmy DS2 a vyznačují se vysokou integrací, OFDM modulací disponující až 1536 nosnými a dosahem přibližně 400 metrů. Využívají konfigurovatelných systémů detekcí a oprav chyb. Mezi podporovaná hardwarová rozhraní patří 100Mbps Ethernet, USB, TDM, SPI, UART, GPIO. Datový tok je až 200Mbps. [14]

1.5.6 Další způsoby realizace PLC

Kromě výše uvedených integrovaných obvodů jsou k dostání také již hotové moduly, které mezi sebou komunikují po silovém vedení. Tyto moduly jsou navrhovány pro domácí automatizaci, a proto jsou zcela spolehlivé. Mezi výrobce těchto modulů patří například firma ModemTec, která vyrábí modul MT22. Ovšem jejich cena (jeden modul 5 až 10 tisíc Kč) je pro navrhovaný systém nepřijatelná.

Dalším typem PLC modulů jsou přístroje, které jsou vybaveny síťovou vidlicí pro přímé připojení k silovým vedením skrze jednofázovou síťovou zásuvku. Ty jsou navrženy pro vysokorychlostní přenos na krátké vzdálenosti. Využívají se především pro distribuci internetového připojení v rámci jednoho objektu. Cena těchto zařízení několikanásobně přesahuje cenu komunikačních modulů, které lze sestavit z integrovaných obvodů (například TDA5051 nebo ST7540). Tato zařízení nejsou navržena pro domácí automatizaci, a proto nejsou vhodná pro navrhovaný systém.

1.6 Výběr komunikačního obvodu

V tabulce 1.3 je uveden přehled integrovaných obvodů, které lze použít pro PLC komunikaci.

Tabulka 1.3: Přehled PLC modemů

Název obvodu	Rychlost	Modulace	Dostupnost
TDA5051	1200 bit/s	ASK	Dobrá
ST7540	4800 bit/s	FSK	Dobrá
INT51X1	14 Mbit/s	OFDM	Špatná
AS5502	2400 bit/s	FSK	Špatná
DSS	200 Mbit/s	OFDM	Špatná

Na základě těchto informací lze označit obvody DSS a INT51X1 za nevyhovující. Obvody jsou zbytečně komplikované a disponují funkcemi, které by nebyly využity. Jejich cena a dostupnost je také nevyhovující. TDA5051 využívá nejjednodušší modulace ASK, která je náchylná k chybám, a proto je lepší zaměřit se na obvody s FSK modulací. Ze zbývajících obvodů potřebuje ST7540 pouze jediné napájecí napětí, zatímco AS5502 vyžaduje napětí 5 V a 24 V. Z tohoto důvodu a také díky špatné dostupnosti AS5502 je pro danou aplikaci zvolen ST7540. Obvod ST7540 je běžně dostupný za cenu přibližně 220 Kč.

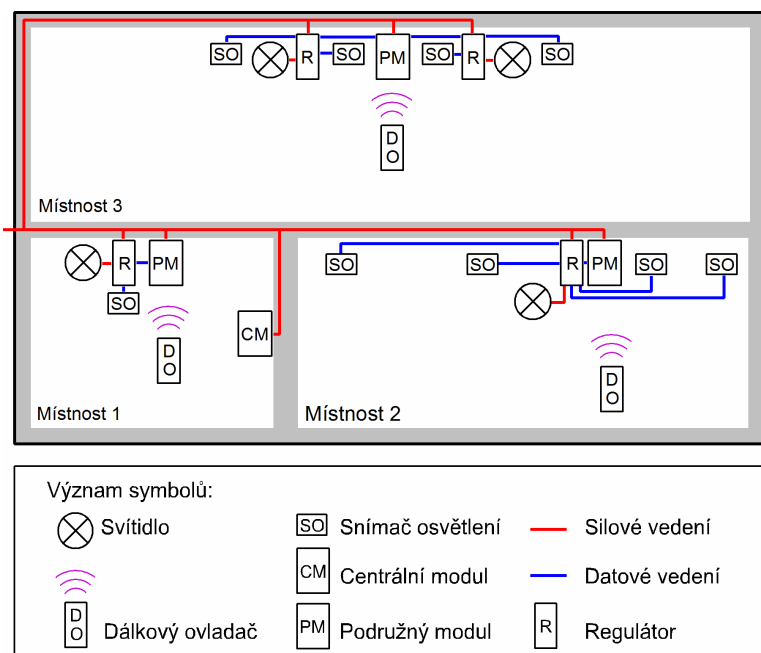
2 NÁVRH HARDWARU

Tato kapitola se věnuje návrhu hardwarových částí systému. Nejprve je vysvětlena implementace systému do stávajících budov a dále je uveden návrh a popis jednotlivých částí.

2.1 Implementace systému

Tato práce navrhuje systém celoobjektového řízení osvětlení pomocí několika podružných modulů a jednoho centrálního. Centrální modul komunikuje s podružnými moduly prostřednictvím síťových rozvodů. Všechny moduly kromě centrálního jsou totožné. Centrální modul je navíc vybaven uživatelským rozhraním složeným z LCD displeje a ovládacího panelu. Z centrálního modulu lze jako z jediného ovládat všechny ostatní moduly. Každý z podružných modulů ovládá jeden nebo více regulátorů výkonu.

Příklad použití systému řízení světelných zdrojů je uveden na obrázku 2.1. V první místnosti je umístěn centrální modul, na kterém si uživatel nastaví požadovanou intenzitu osvětlení v jednotlivých místnostech. V každé ze tří místností je podružný modul, který po silovém vedení přijímá požadovanou hodnotu intenzity osvětlení nastavenou v centrálním modulu. Tuto hodnotu lze změnit dálkovým ovladačem. Informace o změně jsou odeslány po silovém vedení do centrálního modulu. Požadovaná hodnota intenzity osvětlení je přenášena do regulátoru. Regulátor snímá aktuální intenzitu osvětlení z jednoho až čtyř snímačů osvětlení. Naměřené hodnoty zprůměruje a porovná s hodnotou poskytovanou podružným modulem. Na základě porovnání je řízena regulace výkonu příslušného svítidla.



Obrázek 2.1: Implementace systému v budově (řez dvoupodlažní budovy - pohled z boku)

Na obrázku 2.1 je v druhé místnosti zobrazen regulátor, který snímá intenzitu osvětlení ze čtyř míst. Díky tomu je daleko lépe vyhodnocena intenzita osvětlení než v první místnosti, kde byl použit pouze jediný snímač osvětlení.

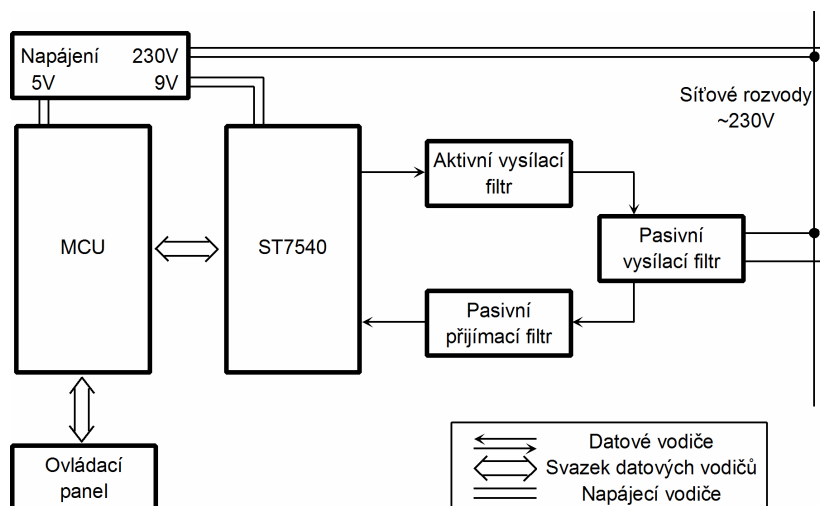
Ve třetí místnosti jsou použita dvě svítidla a ke každému z nich je připojen jeden regulátor. Oba regulátory přijímají od podružného modulu stejné informace o požadované intenzitě osvětlení. Každý z nich ale využívá své dva snímače osvětlení, a proto může být na každém svítidle nastaven jiný výkon. Kdyby byl na obou svítidlech vždy nastavován stejný výkon, mohlo by docházet k špatnému osvětlení některé části místnosti.

2.2 Blokové schéma modulů

Na obrázku 2.2 je znázorněno blokové schéma centrálního modulu. Centrální modul je napájen blokem napájení, který zásobuje mikrokontrolér i PLC modem vhodným napájecím napětím. Napájecí napětí pro PLC modem je získáno transformací síťového napětí na 9 V, jeho usměrněním a stabilizací. Další stabilizací je dosaženo snížení napětí na 5 V pro napájení mikrokontroléru.

Jestliže uživatel provede změnu na ovládacím panelu, mikrokontrolér předá nově nastavené hodnoty do obvodu ST7540, který je kmitočtově moduluje a přes aktivní a pasivní vysílací filtr odešle do síťových rozvodů.

Centrální modul přes pasivní vysílací a přijímací filtr neustále sleduje provoz na síťovém vedení. Jestliže některý z podružných modulů odeslal data, centrální modul je přijme a provede kontrolní součet. Pokud je výsledek kontroly kladný, změní okamžitě hodnotu na displeji za právě obdrženou hodnotu.



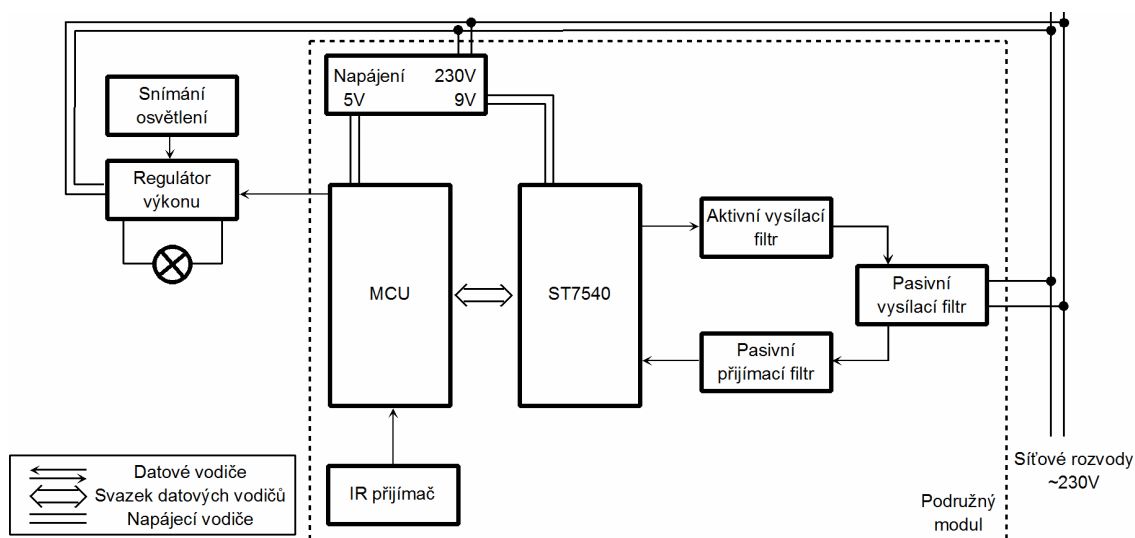
Obrázek 2.2: Blokové schéma centrálního modulu

Obrázek 2.3 znázorňuje blokové schéma podružného modulu. Tento modul je stejně jako centrální vybaven napájecím obvodem, mikrokontrolérem a modemem s filtry. Místo ovládacího panelu obsahuje infračervený přijímač, díky kterému může uživatel na daném modulu měnit nastavení dálkovým ovladačem. Pokud je intenzita změněna

dálkovým ovladačem, podružný modul o tom musí informovat centrální modul. Z mikrokontroléru jsou tedy vysílána data odpovídající nově nastavené úrovni osvětlení do ST7540. Zde jsou kmitočtově modulována na nosný signál. Poté je signál přes aktivní a pasivní vysílací filtr odeslán do síťových rozvodů.

Stejně jako centrální modul, tak i podružný modul neustále sleduje komunikaci na síťových rozvodech. V případě zaznamenání dat dojde k jejich demodulaci a předání mikrokontroléru. Ten provede nejprve kontrolu dat a poté porovná svoji adresu s adresou příjemce uvedenou v datovém paketu. Pokud jsou data v pořádku a jsou adresována modulu, který je přijal, dojde k jejich předání regulátoru výkonu. Regulátor je umístěn vně podružného modulu a data přijímá po dvoužilovém vodiči. Přijatá data slouží k porovnání s daty získanými obvody snímání osvětlení. Na základě porovnání je regulován výkon svítidla.

Pro centrální i podružný modul je v příloze A navržena jediná univerzální deska, jejíž úloha je stanovena připojením příslušných periférií a nahráním odpovídajícího softwaru.



Obrázek 2.3: Blokové schéma podružného modulu

2.3 Mikrokontrolér

Výběr je proveden na základě vyžadovaných vlastností mikrokontroléru, ceně a také dostupnosti.

Základním parametrem pro výběr je velikost programové paměti. Mikrokontrolér komunikuje s PLC modemem i regulátorem a navíc přijímá data z infračerveného přijímače. Proto je nutné zvolit model s programovou pamětí minimálně 32 kB.

Mezi další požadavky patří:

- Dostatečně vysoká pracovní frekvence
- ISP pro snadné naprogramování
- SPI rozhraní pro komunikaci s PLC modemem
- Dostatečný počet I/O pinů pro komunikaci s perifériemi

Na základě těchto požadavků je zvolen mikrokontrolér ATmega32A, který disponuje 32 kB paměti, pracuje na kmitočtu až 16 MHz a je k dostání v pouzdru TQFP44 [15].

2.4 PLC modem ST7540

Základní parametry tohoto obvodu byly popsány v kapitole 1.5.2 ST7537, ST7538, ST7540. Další text proto obsahuje především detailní popis. Informace pro tuto kapitolu jsou čerpány z katalogového listu ST7540 [11] a aplikačního listu ST7540 [16].

2.4.1 Pouzdro

Obvod je umístěn ve standardním pouzdru HTSSOP28. Rozmístění vývodů tohoto pouzdra je zobrazeno na obrázku 2.4.

Napájení obvodu je umístěno na pinech 16 (Vss) a 17 (Vcc). Jak již bylo uvedeno, napájecí napětí musí být v rozmezí 7,5 V až 13,5 V. Proudový odběr bez připojené zátěže je ve vysílacím režimu přibližně 60 mA a v přijímacím 5 mA. Obvod obsahuje dva interní regulátory, které regulují napájecí napětí na hodnoty 5 V a 3,3 V. Každý z nich má zatížení až 50 mA. Dají se tedy využít například pro napájení mikrokontroléru.

Vývody 1 až 8 a 10 až 13 slouží ke komunikaci s mikrokontrolérem. Jsou popsány v kapitole 2.4.4 Komunikace mikrokontroléru s PLC modemem.

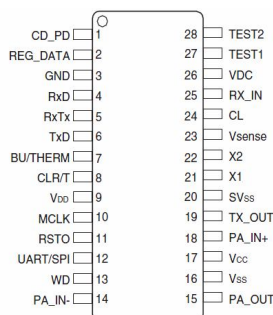
V pouzdru je obsažen výkonový operační zesilovač, který má vyvedeny oba vstupy i výstup. Vstupy jsou na pinech 14 (PA_IN-) a 18 (PA_IN+). Výstup je na pinu 15 (PA_OUT). Je napájen obvodem ST7540, který mu generuje nesymetrické napětí 9 V.

Vývody 21 a 22 (X1 a X2) slouží k připojení krystalu o frekvenci 16 MHz.

Pin 24 (CL) slouží k nastavení maximálního proudu na výstupu Tx_OUT. Pin 23 (VSENSE) nastavuje na tomto výstupu napětí.

Síťové rozhraní je realizováno piny 19 a 25. Z pinu 19 (Tx_OUT) jsou data odesílána do síťových rozvodů a na pinu 25 (Rx_IN) jsou data ze síťových rozvodů přijímána.

Chlazení obvodu je řešeno chladicí ploškou na spodní straně obvodu, která by měla být připájena k větší chladicí ploše na desce plošných spojů. Jelikož je pájecí ploška pro klasické pájení nepřístupná, je horní strana obvodu vybavena klasickým chladičem. Tím dochází pravděpodobně k většímu tepelnému zatěžování obvodu. Aby nedocházelo k přehřátí, nejsou z bezpečnostních důvodů využity vnitřní regulátory napětí. Díky tomu se proudový odběr sníží až o 100 mA.



Obrázek 2.4: Pouzdro obvodu ST7540 (převzato z [11])

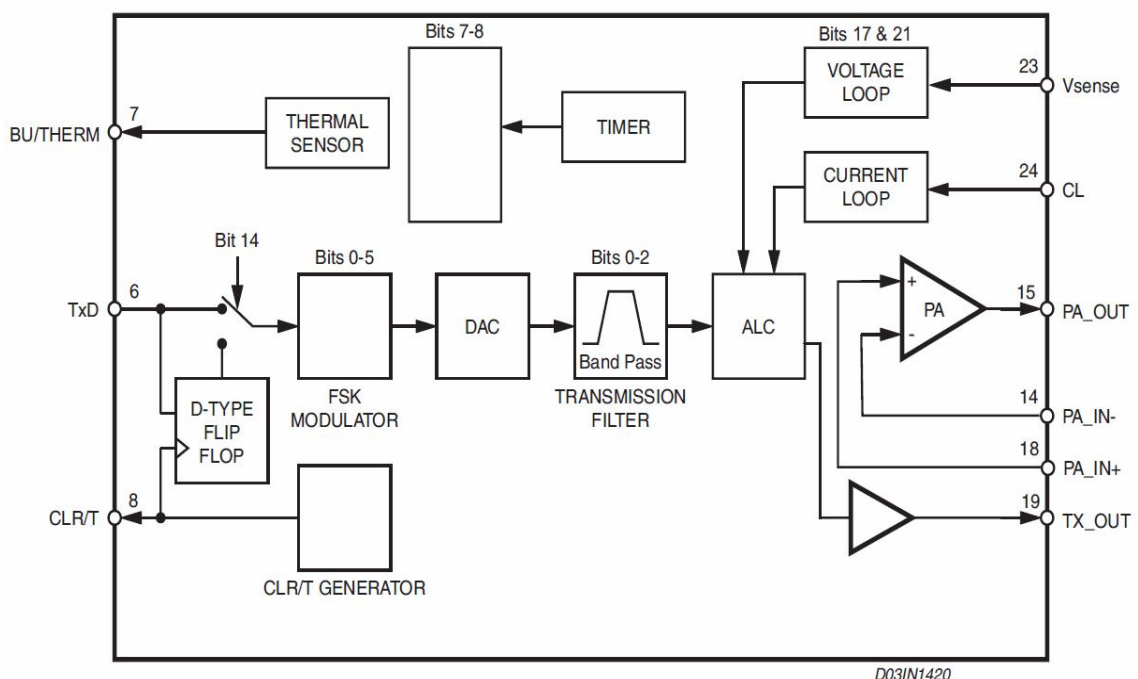
2.4.2 Vysílací část

Schéma interní vysílací části obvodu ST7540 je zobrazeno na obrázku 2.5.

Data, která jsou mikrokontrolérem určena k odeslání, přicházejí na pin TxD. V případě asynchronního režimu jsou data přenášena ze vstupu rovnou do FSK modulátoru. Ovšem pokud je využívána synchronní komunikace, jsou data odesílána do FSK modulátoru postupně na základě signálu ze synchronizačního generátoru CLR/T. Frekvenční digitální modulátor vytváří modulovaný signál přímou digitální syntézou, která používá k vytvoření signálu o dvou kmitočtech referenční signál s konstantní frekvencí. Dále je zpracováván signál převeden DA převodníkem z digitální podoby do analogové a vyfiltrován pásmovou propustí.

Signál poté prochází přes blok automatického řízení úrovně (ALC), který jej upraví na základě aktuálně naměřených hodnot signálu na výstupu obvodu. Blok ALC realizuje zpětnovazební řízení. Údaje o výstupním napětí a proudu získává z napěťové a proudové regulační smyčky. Napěťová smyčka měří napětí na odporovém děliči a porovnává jej s interní napěťovou referencí. Rozdíl mezi porovnávanými hodnotami řídí zesílení bloku ALC. Proudová smyčka využívá rezistor k měření napětí, které se mění podle procházejícího proudu. Zesílení bloku ALC závisí opět na rozdílu mezi měřenou hodnotou a interní napěťovou referencí.

Signál vystupující z obvodu ST7540 na pinu TX_OUT prochází před vstupem do síťových rozvodů jedním aktivním a jedním pasivním vysílacím filtrem. Všechny filtry (vysílací i přijímací) byly převzaty z aplikačního listu ST7540 [16]. Dále byly mírně pozměněny podle [17] pro získání lepších výsledků filtrace.

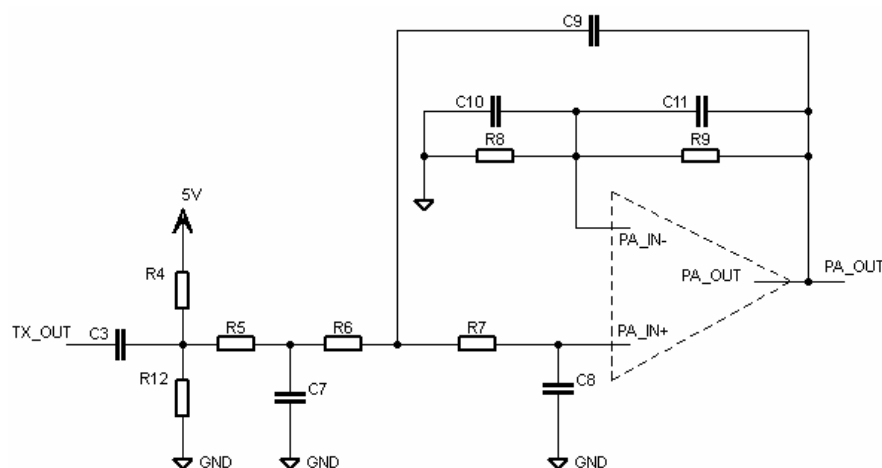


Obrázek 2.5: Blokové schéma vysílací části ST7540 (převzato z [11])

Aktivní vysílací filtr

Aktivní vysílací filtr je založen na výkonovém integrovaném zesilovači, který je na obrázku 2.6 zobrazen přerušovanou čarou.

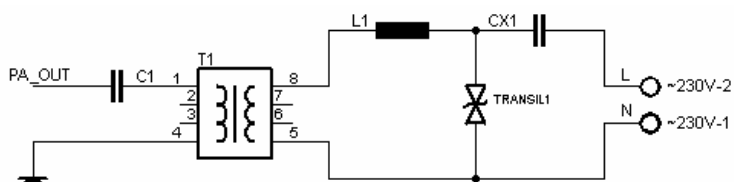
Stejnoseměrná složka vstupního signálu filtru je odfiltrována kondenzátorem C3. Poté je odporovým děličem nastavena na konstantní úroveň. Dělič je tvořen rezistory R4 a R12. Kombinace rezistoru R5 a kondenzátoru C7 realizuje dolní propust 1. řádu. Integrovaný zesilovač v zapojení Sallen - Key tvoří dolní propust 2. řádu se zesílením 9 dB. Celé zapojení tedy realizuje dolní propust 3. řádu [16]. Signál z výstupu zesilovače PA_OUT poté prochází ještě pasivním vysílacím filtrem, který je zobrazen na obrázku 2.7.



Obrázek 2.6: Aktivní vysílací filtr (převzato z [15])

Pasivní vysílací filtr

Na obrázku 2.7 je schéma pasivního vysílacího filtru, který přivádí modulovaný signál do síťových rozvodů.



Obrázek 2.7: Pasivní vysílací filtr (převzato z [15])

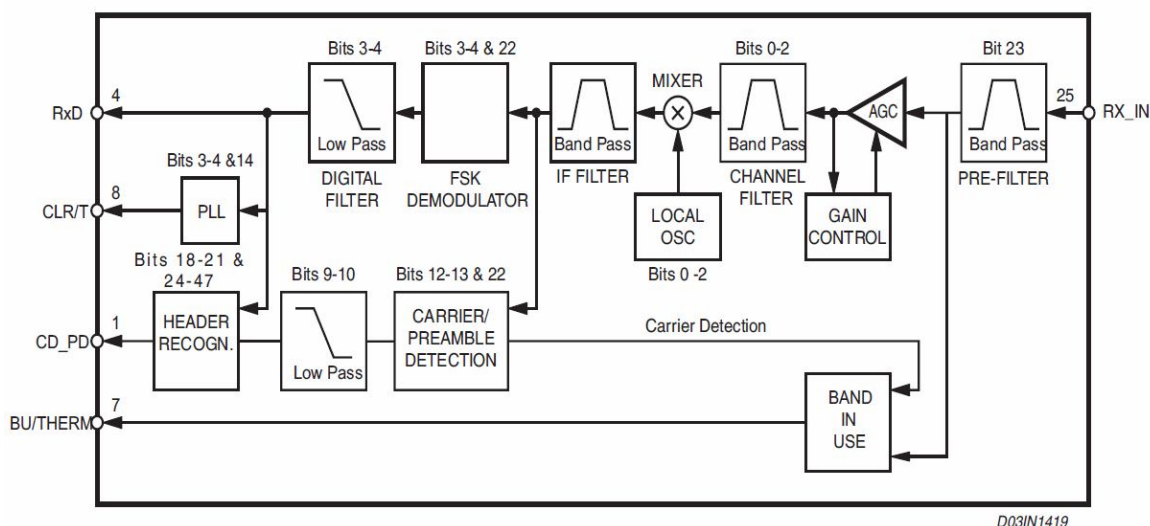
Toto zapojení slouží k oddělení vysílací a přijímací části od síťových rozvodů. Jeho primárním úkolem je oddělení 50 Hz složky od užitečného signálu. Zapojení se označuje jako vazební člen.

Kondenzátor C1 slouží k potlačení případné stejnosměrné složky. Sériové zapojení cívky L1 a vinutí transformátoru T1 vytváří indukčnost, která společně s bezpečnostním kondenzátorem CX1 realizuje horní propust. Tento filtr potlačuje signálovou složku

o kmitočtu 50 Hz. Transil je použit jako ochranný prvek pro minimalizaci účinků přechodných dějů. Transformátor T1 galvanicky odděluje vysílací či přijímací část od elektrického vedení [2]. Na tento transformátor jsou kladeny speciální požadavky, které lze nalézt například v [16]. Proto se pro komunikaci po síťových rozvodech používají speciální PLC transformátory.

2.4.3 Přijímací část

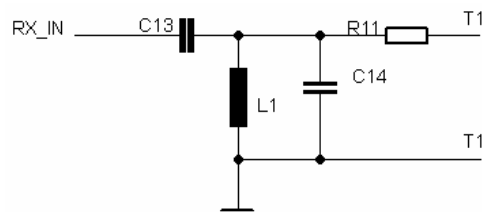
Schéma přijímací části, která je obsažena v obvodu ST7540, je zobrazeno na obrázku 2.8. Přijímaný signál se čte z pinu RX_IN a je filtrován pásmovou propustí s šířkou pásma 62 kHz. Poté je automaticky zesílen blokem AGC na požadovanou hodnotu. Signál je znovu filtrován úzkopásmovou propustí soustředěnou kolem komunikačního kmitočtu. Šířka pásma tohoto filtru je 14 kHz. Poté signál prochází směšovačem, který pomocí oscilátoru vhodně posune kmitočet signálu. Před FSK demodulací je v pásmové propustí zlepšen poměr signálu ku šumu. Po demodulaci jsou ze signálu odstraněny šumové špičky v digitálním filtru. Poté jsou data odesílána přímo do mikrokontroléru. ST7540 dokáže v bloku PLL z těchto dat obnovit synchronizaci. Obnovený synchronizační signál je dostupný na pinu CLR/T. Blok Carrier/preamble detection je obvod, který detekuje buď nosný signál na komunikačním kmitočtu, nebo posloupnost symbolů "1010". První režim lze použít ke zjištění, jestli je komunikační kanál používán, nebo je volný a modem může začít vysílat. Druhý režim, ve kterém je v signálu zachytávána posloupnost "1010", lze použít pro nalezení začátku a konce komunikačního rámce. Samozřejmě pouze za předpokladu, že bude komunikační rámec těmito posloupnostmi vybaven.



Obrázek 2.8: Blokové schéma přijímací části ST7540 (převzato z [11])

Pin RX_IN je k síťovému rozvodu připojen prostřednictvím pasivního přijímacího filtru. Paralelní kombinace L1 a C14 na obrázku 2.9 tvoří pásmovou propust se středním

kmitočtem na komunikační frekvenci. Rezistor R11 významně ovlivňuje výsledný tvar přenosové charakteristiky. Jeho hodnota je volena s ohledem na toleranci součástek při dostatečném útlumu signálu na potlačovaných kmitočtech. Kondenzátor C13 slouží k odfiltrování stejnosměrné složky. Šířka pásma tohoto filtru je přibližně 17 kHz.



Obrázek 2.9: Pasivní přijímací filtr (převzato z [16])

2.4.4 Komunikace mikrokontroléru s PLC modemem

PLC modem disponuje dvanácti piny určenými pro komunikaci s mikrokontrolérem. Jejich popis je uveden v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Popis pinů ST7540 určených pro komunikaci s mikrokontrolérem (převzato z [11])

číslo	Název	Směr	Popis
1	CD_PD	Výstupní	Detekce nosného kmitočtu nebo hlavičky rámce.
2	REG_DATA	Vstupní	Volba mezi zápisem do konfiguračního registru a sítovou komunikací.
3	GND		Digitální signálová zem pro komunikaci
4	RxD	Výstupní	Výstup s přijatými daty.
5	RxTx	Vstupní	Volba mezi vysíláním a přijmem.
6	TxD	Vstupní	Vstup pro příjem dat k odeslání.
7	BU/THERM	Výstupní	Signál detekce nosné nebo signalizace překročení maximální teploty obvodu.
8	CLR/T	Výstupní	Hodinový signál pro synchronní komunikaci.
10	MCLK	Výstupní	Hodinový signál pro SPI komunikaci.
11	RSTO	Výstupní	Pin resetující mikrokontrolér při přetečení watchdog časovače ST7540.
12	UART/SPI	Vstupní	Výběr rozhraní UART nebo SPI.
13	WD	Vstupní	Nulování interního časovače watchdog

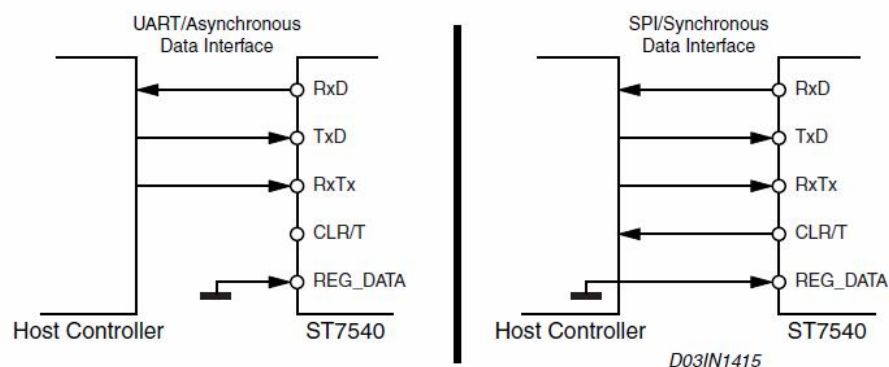
Mikrokontrolér může komunikovat s PLC modemem prostřednictvím rozhraní UART nebo SPI. Pokud je zvoleno rozhraní UART, komunikace je asynchronní. Při volbě rozhraní SPI je použita synchronní komunikace. Dále jsou v textu popsány základní rozdíly mezi rozhraními a režimy komunikace.

Rozhraní UART s asynchronní komunikací

Použití rozhraní UART je nejjednodušším způsobem komunikace mezi ST7540 a mikrokontrolérem. Jak naznačuje obrázek 2.10 vlevo, komunikace probíhá prostřednictvím tří vodičů. Na lince pinu RxD jsou přenášena přijatá data ze síťových rozvodů. Po lince pinu TxD se přenáší data určená k odeslání. Logickou úrovní na vstupu RxTx si mikrokontrolér volí mezi přijímacím a vysílacím režimem ST7540. Pin CLR/T určený pro SPI komunikaci zůstává nepřípojen. Vstup REG_DATA je uzemněn, protože při asynchronní komunikaci je konfigurační registr nepřístupný.

Rozhraní SPI se synchronní komunikací

Komunikace prostřednictvím SPI je komplikovanější, protože je nutné zavést synchronizační signál. Synchronní komunikace umožňuje přístup do konfiguračního registru, ve kterém lze nastavit volitelné funkce a také změnit některé parametry ST7540. Na obrázku 2.10 vpravo je znázorněna komunikace pomocí SPI. Oproti zapojení s rozhraním UART je zde zapojen také pin CLR/T, který přenáší synchronizační impulsy. Pin REG_DATA je držen během komunikace po síťových rozvodech v nízké úrovni. Pouze při zápisu do konfiguračního registru je nastaven na vysokou úroveň.



Obrázek 2.10: Komunikace rozhraním UART a SPI (převzato z [11])

2.4.5 Konfigurační registr

Konfigurační registr obvodu ST7540 umožňuje zapnout volitelné funkce a také změnit některé parametry obvodu. Registr je v základním režimu 24 bitový. Zápisem do 21. bitu lze zapnout rozšířený konfigurační registr (48 bitů), který nabízí další volitelné funkce. Nejdůležitější programovatelné funkce jsou uvedeny v tabulce 2.2.

V [17] bylo stanoveno optimální nastavení konfiguračního registru, při kterém je přenos dat zatížen nejmenším možným výskytem chyb. Při ponechání přednastavených hodnot se chybovost pohybuje kolem 50 %. Po změně citlivosti a kmitočtového zdvihu bylo dosaženo téměř 0 % chybovosti [17]. Zápis do konfiguračního registru je tedy nezbytný. Proto je použita synchronní komunikace prostřednictvím rozhraní SPI a proveden zápis optimálního nastavení do registru.

Měřením chybovosti přenosu při různých nastaveních bylo zjištěno, že naměřené údaje se téměř shodují s údaji uvedenými v [17]. Pouze nastavení citlivosti je vhodnější ponechat v přednastaveném režimu.

Tabulka 2.2: Programovatelné funkce ST7540

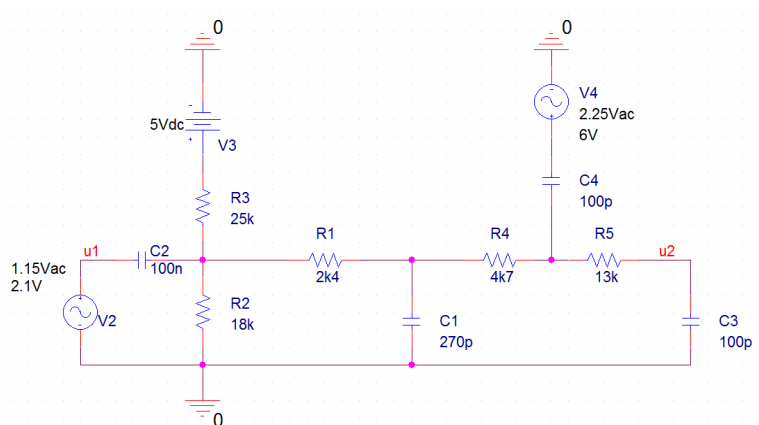
Parametr	Možnosti nastavení
Komunikační kmitočet	60 až 132,5 kHz
Přenosová rychlost	600 až 4800 bit/s
Kmitočtový zdvih	0,5 nebo 1
Časovač watchdog	Ano/Ne
Časový limit pro vysílání	1 s nebo 3 s
Citlivost přijímače	Normální/Vysoká
Předfiltrování přijímaného signálu	Ano/ Ne

2.4.6 Simulace PLC filtrů

Simulace proběhly v programu PSpice verze 10.3. Hodnoty součástek jsou převzaty z aplikačního listu [16] a hodnoty napětí z katalogového listu ST7540 [11].

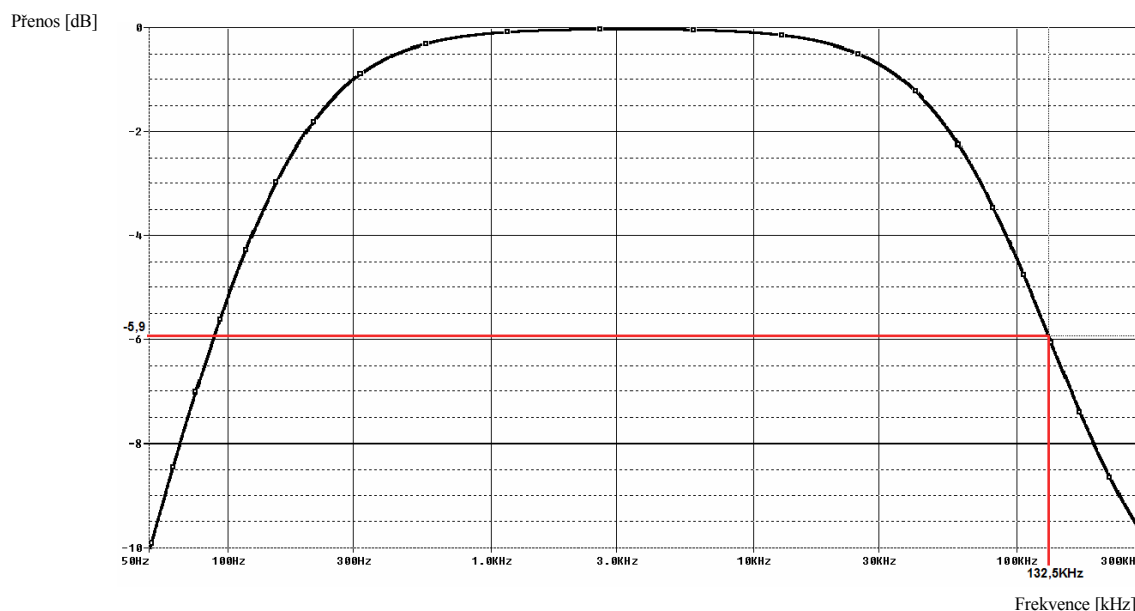
Aktivní vysílací filtr

Celý aktivní vysílací filtr nemohl být simulován v důsledku nedostatečných informací o výkonovém zesilovači integrovaném v PLC modemu. Místo simulace aktivního filtru 3. řádu byla proto provedena simulace pouze jeho pasivní části 2. řádu. Na obrázku 2.11 je schéma zapojení simulované části filtru. Zdroj V2 představuje výstupní signál z ST7540 na pinu TX_OUT. Integrovaný regulátor napětí na výstupu VDC je realizován zdrojem V3. V4 simuluje zpětnou vazbu aktivního filtru. Přenos je měřen mezi body u1 a u2.



Obrázek 2.11: Simulace pasivního filtru 2.řádu

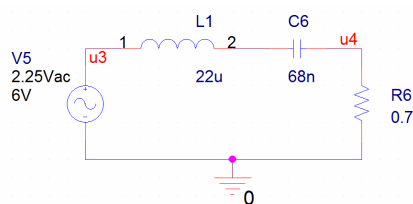
Na obrázku 2.12 je výsledek této simulace pro AC analýzu. Rozsah kmitočtů je 50 Hz až 300 kHz s krokem 1 Hz. Ze simulované charakteristiky je vidět, že bod maximálního přenosu filtru neleží ideálně na komunikačním kmitočtu. Jelikož není do simulace zahrnut aktivní filtr, nelze posoudit celkovou kvalitu aktivního vysílacího filtru.



Obrázek 2.12: Přenos pasivního filtru druhého řádu

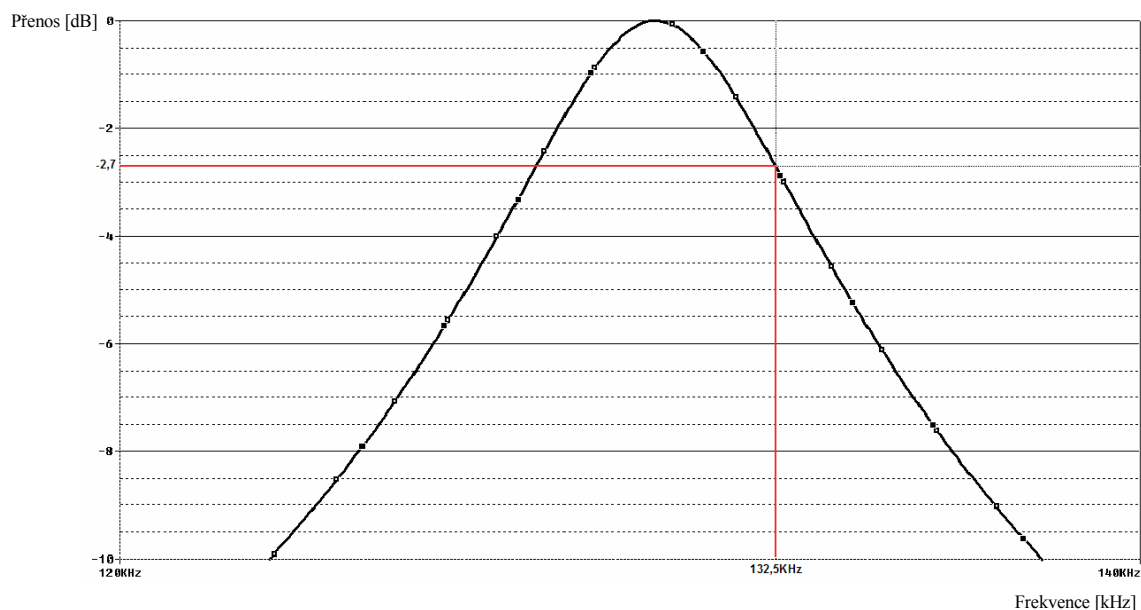
Pasivní vysílací filtr

Pasivní vysílací filtr funguje jako vazební prvek mezi aktivním vysílacím filtrem a síťovými rozvody. Slouží také ke galvanickému oddělení, které zajišťuje PLC transformátor. Ten není do této simulace zahrnut. Zdroj V5 na obrázku 2.13 představuje výstup aktivního vysílacího filtru. Simulovaný filtr je zatížen rezistorem R6, jehož hodnota odpovídá impedanci síťových rozvodů. Impedance rozvodů se mění v místě i čase, proto je zvolena běžná hodnota $0,7 \Omega$.



Obrázek 2.13: Simulace pasivního vysílacího filtru

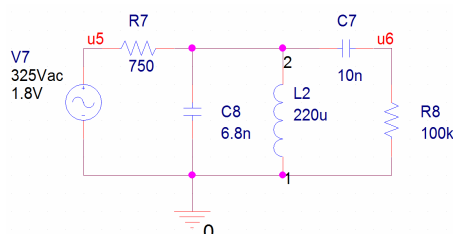
Na obrázku 2.14 je vidět, že filtr je pásmovou propustí na kmitočtu 130,5 kHz. Odchylka 2 kHz od komunikačního kmitočtu je zapříčiněna rozdílem mezi vypočítanou kapacitou kondenzátoru 65,6 nF a vyráběnou kapacitou 68 nF. V důsledku této odchylky je na frekvenci 132,5 kHz útlum 2,7 dB.



Obrázek 2.14: Přenos pasivního vysílacího filtru prvního řádu

Pasivní přijímací filtr

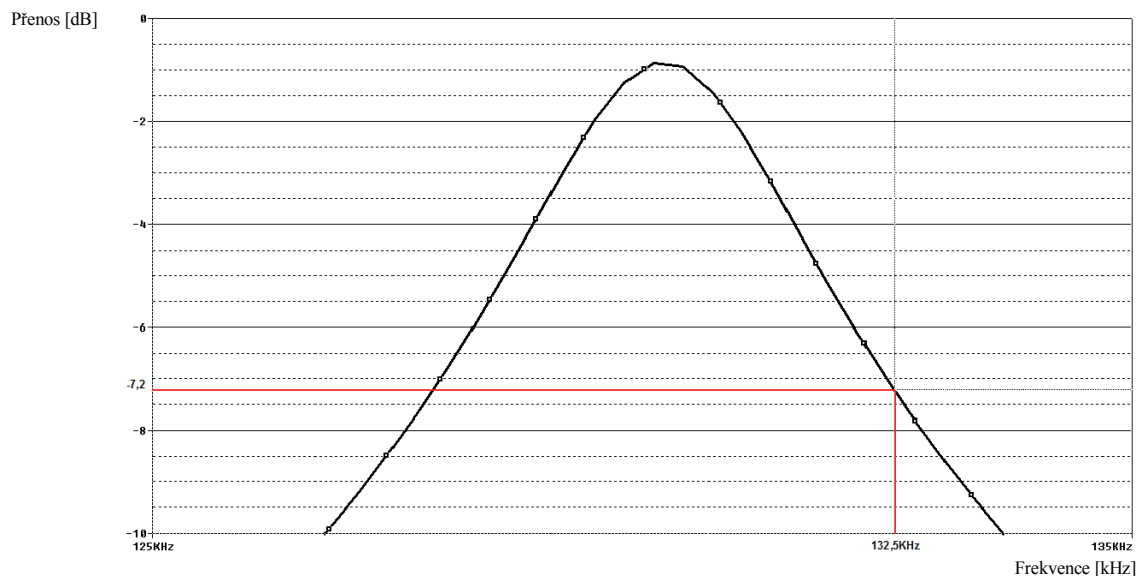
Na vstup filtru na obrázku 2.15 je přivedeno síťové napětí. Pro simulační program PSpice je uvedena jeho maximální hodnota. Zatěžovací rezistor R8 představuje impedanci vstupu pro příjem dat RX_IN.



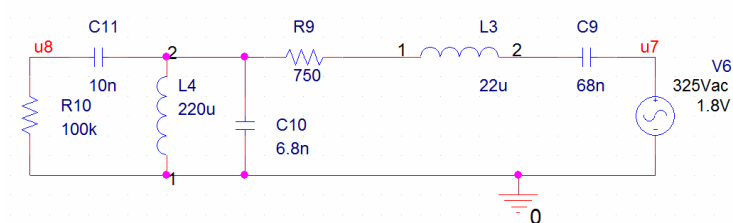
Obrázek 2.15: Simulace pasivního přijímacího filtru

Na obrázku 2.16 je uveden přenos přijímacího filtru. Také v tomto případě se jedná o pásmovou propust.

U přijímacího filtru je nutné si uvědomit, odkud přijímá signál na svůj vstup. Signál totiž nepřichází přímo ze síťových rozvodů, ale z pasivního vysílacího filtru. Přijímaný signál vstupuje do výstupní brány vysílacího filtru a vystupuje na vstupu. Odtud teprve pokračuje do simulovaného přijímacího filtru. Na obrázku 2.17 je zobrazeno popisované zapojení. Touto cestou musí tedy signál projít, aby se dostal ze síťových rozvodů do obvodu ST7540. Zdroj V6 představuje síťové rozvody a rezistor R10 vstupní pin RX_IN obvodu ST7540. Prvky R9, C10, L4 a C11 tvoří přijímací filtr. Cívka L3 a kondenzátor C9 realizují pasivní vysílací filtr.

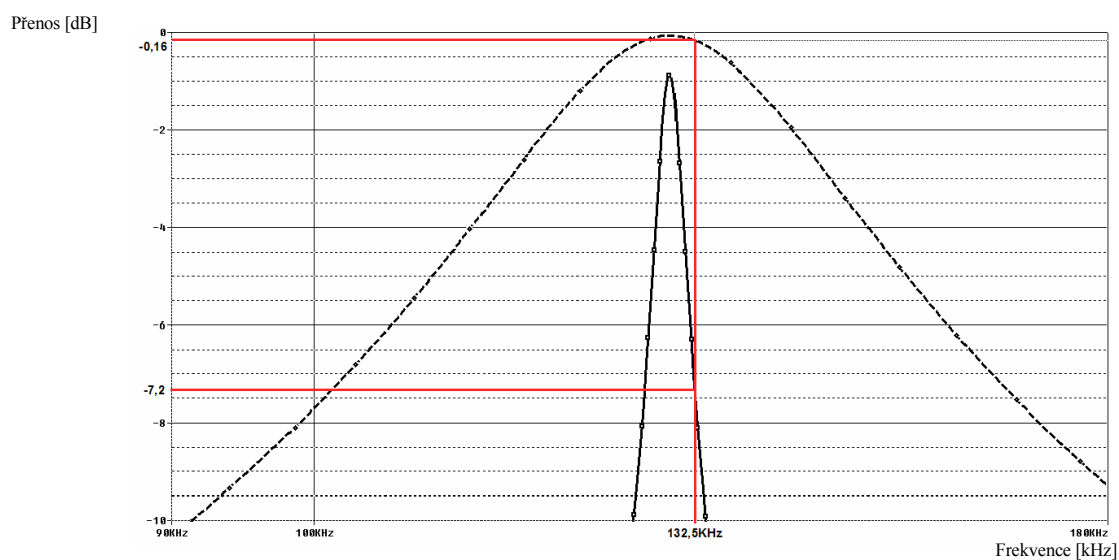


Obrázek 2.16: Přenos pasivního přijímacího filtru



Obrázek 2.17: Simulace přijímací části

Obrázek 2.18 zobrazuje přenosovou charakteristiku výše uvedeného zapojení (přerušovanou čarou) a pasivního přijímacího filtru (spojitou čarou). Graf poukazuje na zlepšení přenosové charakteristiky při průchodu signálu přijímacím i vysílacím filtrem. Na komunikačním kmitočtu je útlum menší o 7,1 dB.

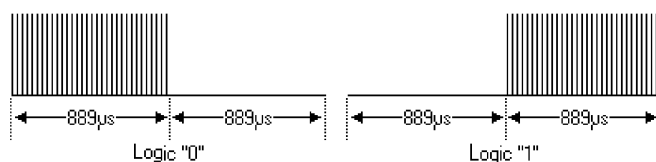


Obrázek 2.18: Přenos přijímací části

2.5 Příjem infračerveného záření

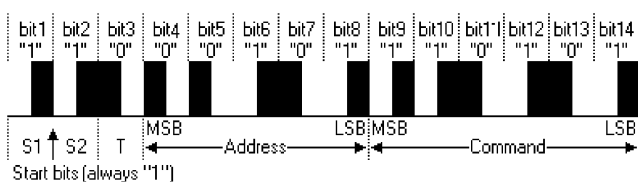
Každý z podružných modulů lze řídit centrálním modulem nebo libovolným dálkovým ovladačem s protokolem RC-5. K příjmu signálu z DO slouží přijímač infračerveného záření TSOP 1740. Přijímač je zapojen dle doporučení katalogového listu a dokáže přijímat signály s kmitočtem do 40 kHz.

Pro tento typ komunikace je zavedeno velké množství komunikačních protokolů. Mezi nejpoužívanější patří protokol RC-5. Protokol je založen na kmitočtu 36 kHz a bi-fázovém kódování. Jak je naznačeno na obrázku 2.19, jeden bit má dobu trvání 1,778 ms. Vysoká úroveň je stanovena opakovaným vysíláním impulsů s frekvencí 36 kHz. Pokud tyto impulsy nejsou vysílány, jedná se o nízkou úroveň. Pokud vysoká úroveň trvá 889 μ s a poté nastane ve vysílání impulsů na stejně dlouhou dobu pomlka, jedná se o logickou 0. V případě logické 1 je signál nejprve 889 μ s v nízké úrovni a poté přejde na stejnou dobu do vysoké úrovně. [18]



Obrázek 2.19: Definice logických úrovní protokolu RC-5 (převzato z [18])

Komunikační paket je zobrazen na obrázku 2.20. Začátek paketu je indikován dvěma start bity. Třetím bitem v pořadí je tzv. toggle bit, který udává, jestli je tlačítko stisknuto krátce, nebo drženo v sepnutém stavu. Dále následuje 5 bitů adresujících ovládané zařízení a 6 příkazových bitů. [18]



Obrázek 2.20: Komunikační paket protokolu RC-5 (převzato z [18])

2.6 Ovládací panel

Ovládacím panelem je vybaven pouze centrální modul.

LCD displej

Čtyřřádkový LCD displej je řízen integrovaným řadičem a nese označení MC2004BSBL/H. Na každém řádku je vypsána 1 místnost v budově, ve které je umístěn minimálně jeden podružný modul. Pomocí tlačítek lze vybírat místnosti a nastavovat pro ně požadovanou intenzitu osvětlení.

Kapacitní tlačítka

Z důvodu vyšší životnosti a spolehlivosti jsou místo standardních mechanických tlačítek použita kapacitní tlačítka. Princip kapacitních tlačítek je založen na snímání kapacity měděných plošek vyleptaných na desce plošných spojů. Každá z plošek slouží jako jedno tlačítko. Plošky vykazují určitou kapacitu, která se při doteku změní. Jako snímač změny kapacity je použit integrovaný obvod MPR084. Tento obvod je vybaven mnoha funkcemi, které zaručí optimální nastavení. Jeho zapojení je převzato z katalogového listu a uvedeno v příloze A.

Pro tuto aplikaci je využito tří tlačítek. První tlačítko slouží k pohybu nahoru, druhé k pohybu dolů a třetí tlačítko je potvrzovací. Menu zobrazované na LCD displeji je dvouúrovňové. Na první úrovni si uživatel vybere místnost, ve které chce změnit intenzitu osvětlení. Potvrzovacím tlačítkem přejde na druhou úroveň. Na druhé úrovni provede změnu intenzity osvětlení a volbu potvrdí. Po potvrzení je navrácen na první úroveň menu.

2.7 Regulátor výkonu svítidla

Regulátor výkonu svítidla slouží k nastavení požadované intenzity osvětlení. Pro regulaci výkonu se v současné době používá především tyristor, triak, nebo tranzistor MOSFET.

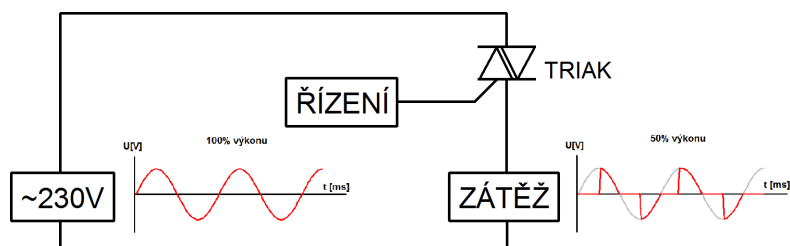
Tranzistor MOSFET je spínací prvek, který díky svým parametrům překonal standardní bipolární tranzistory. Pro své spínací a regulační schopnosti nachází široké uplatnění v řadě elektronických obvodů. Avšak jeho základním nedostatkem pro regulaci zařízení napájených střídavým napětím je jeho unipolární struktura. Pokud je pro regulaci střídavého zařízení vyžadován tranzistor MOSFET, musí nejprve dojít k usměrnění napájecího napětí. Každé zařízení však nedokáže pracovat s usměrněným napětím stejně dobře jako s klasickým neusměrněným, a proto není tranzistor MOSFET použit v navrženém regulátoru.

Tyristor je spínací prvek, který pracuje s napětím pouze jedné polarity. Jestliže se na jeho svorkách objeví opačná polarita, než pro kterou je zapojen, stává se nefunkčním. Proto se tyristor nehodí k efektivní regulaci světelných zdrojů napájených střídavým napětím. Tento problém lze vyřešit antiparalelním zapojením tyristorů. Antiparalelní zapojení dvou tyristorů je v integrované formě běžně dostupná součástka s označením triak. Triak tedy dokáže spínat napětí libovolné polarity. Díky tomu je triak základním prvkem většiny současných regulátorů nízkovýkonových elektrických spotřebičů. Další výhodou a důvodem k výběru regulace pomocí triaku je jednoduchost a finanční nenáročnost regulačního systému. [19], [20]

2.7.1 Triaková regulace

Triaková regulace je často označována jako fázová regulace. Jejím principem je omezení doby, po kterou je na zátěž přivedeno střídavé napětí.

Princip triakové regulace je zřejmý z obrázku 2.21. Zdroj střídavého napětí 230 V dodává sinusové napětí, kterému odpovídá 100 % výkonu. Blok řízení udržuje každou půlperiodu triak po dobu 5 ms v rozepnutém stavu a poté jej sepne. Po uplynutí 5 ms v sepnutém stavu dojde k rozepnutí triaku. Tento cyklus se opakovaně provádí pro každou půlperiodu sinusového napětí. Při nastavení doby rozepnutého triaku na 5 ms se dostane na zátěž pouze 50 % z původního výkonu. Změnou této doby v intervalu od 0 ms po 10 ms lze dosáhnout libovolného výkonu zátěže.



Obrázek 2.21: Princip triakové regulace

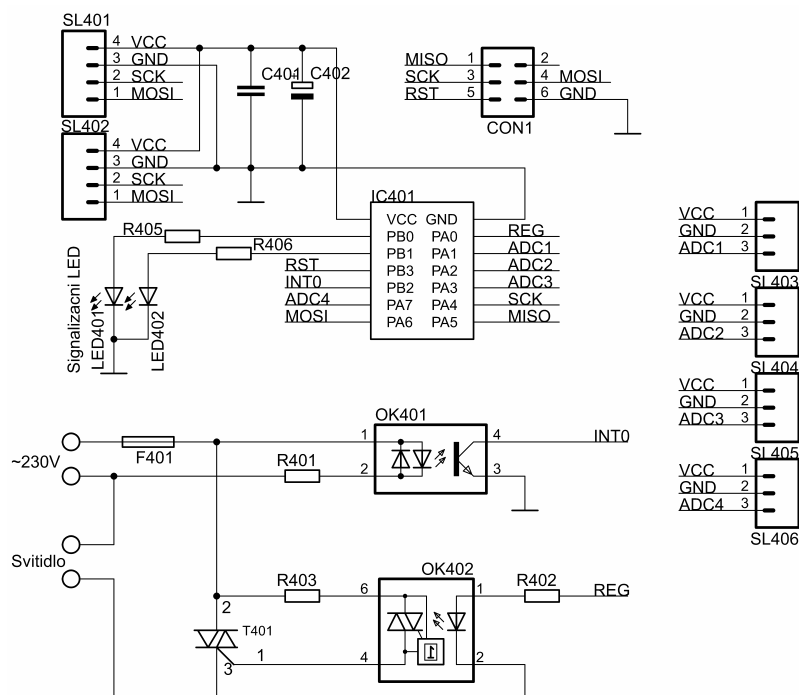
2.7.2 Návrh regulátoru

Schéma regulátoru výkonu je uvedeno na obrázku 2.22. Jádrem regulátoru je mikrokontrolér ATtiny24, který byl zvolen pro svou nízkou pořizovací cenu, programovou paměť 2 kB, dostatečný počet I/O pinů, I2C rozhraní a funkci snadného naprogramování pomocí ISP.

Konektory SL401 a SL402 slouží k připojení regulátoru k podružnému modulu. Jestliže je jeden z těchto konektorů připojen k podružnému modulu, může se na druhý konektor připojit další regulátor. Díky tomuto systému lze zapojovat regulátory do řetězce a není nutné, aby byl každý regulátor připojen přímo na podružný modul.

Konektor CON1 slouží k připojení programátoru k regulátoru. Pomocí konektorů SL403 až SL406 se k regulátoru připojí jeden až čtyři snímače osvětlení.

Z obrázku 2.21 je patrné, že pro dosažení přesné regulace výkonu je zapotřebí sledovat, ve kterém okamžiku prochází síťové napětí nulovou hodnotou. K tomuto účelu slouží optočlen OK401. Na jeho vstup je přivedeno síťové napětí omezené rezistorem R401 na přijatelnou hodnotu. Výstup je jedním vodičem připojen k pinu externího přerušení mikrokontroléru a druhý vodič je uzemněn. Po průchodu síťového napětí nulovou hodnotou se napětí postupně zvyšuje a při dosažení prahové hodnoty 1,2 V dojde k sepnutí optočlenu a tím k uzemnění pinu externího přerušení mikrokontroléru. Tento stav vyvolá přerušení mikrokontroléru a začne se počítat doba, po kterou má triak zůstat v rozepnutém stavu. Po uplynutí této doby je na pinu ovládacím triak nastaveno napětí 5 V. Nejprve dojde k sepnutí optotriaku OK402, který má nižší proudový odběr a díky tomu jej lze spínat přímo mikrokontrolérem. Po jeho sepnutí je sepnut i triak TIC226M. Rezistory R402 a R403 slouží k omezení napětí na vyhovující hodnotu.



Obrázek 2.22: Schéma zapojení regulátoru

Pro dosažení elektromagnetické kompatibility musí být regulátor vybaven odrušovacím filtrem. Na základě doporučení uvedených v [21] byl zvolen filtr 1FP422R, který se připojí mezi síťové rozvody a vstupní síťové svorky regulátoru.

2.7.3 Regulovatelné prvky

Navržený regulátor je určen k regulaci výkonu světelných zdrojů. V současné době jsou nejrozšířenějšími světelnými zdroji kompaktní zářivky, led žárovky, wolframové žárovky a zářivkové trubice.

Výkon zářivkových trubec nelze měnit běžně dostupnými regulátory. Z tohoto důvodu je navržený regulátor v případě zářivkových trubec nepoužitelný.

Standardní wolframové žárovky lze regulovat v plném rozsahu, tedy od 0 % až do 100 % výkonu, přičemž konkrétní typ žárovky nemá žádný vliv.

Standardní kompaktní zářivky a LED žárovky nelze regulovat. Ovšem na trhu jsou běžně dostupné regulovatelné kompaktní zářivky a LED žárovky, které lze navrženým zařízením regulovat. Rozsah regulace je různý v závislosti na výrobci a konkrétním typu světelného zdroje. Rozsah regulace udává hranici minimálního výkonu, při kterém světelný zdroj bliká, nebo vůbec nesvítí. Tato hranice je často určena 20 % výkonu svítidla. Cena regulovatelných kompaktních zářivek se pohybuje kolem 350 Kč, a LED žárovek kolem 600 Kč.

2.8 Snímání intenzity osvětlení

Pro snímání intenzity osvětlení se v praxi používá zařízení označované jako fotočlánek nebo fotodetektor. Jedná se o zařízení, které měří fotonový tok nebo optický výkon takovým způsobem, že přeměňuje energii absorbovaných fotonů do měřitelné formy. Fotodetektory se rozdělují na fotodiody, fotorezistory, fototranzistory a matice sestavené z těchto prvků [22]. Každý typ fotodetektoru se vyznačuje svými specifickými vlastnostmi, které lze nalézt například v [22] nebo [23].

K nejdůležitějším parametrům pro výběr vhodného fotodetektoru patří směrová selektivita, rozsah snímaných vlnových délek a spektrální citlivost.

2.8.1 Směrová selektivita

Podle směrové selektivity lze fotočlánky rozdělit:

- Fotočlánky pro měření rovinné osvětlenosti
- Fotočlánky, jejichž snímací úhel nepřesahuje 10° od osy snímání
- Fotočlánky pro měření prostorových charakteristik

Fotočlánky pro měření rovinné osvětlenosti se kalibrují pro kolmý dopad světla na snímací část. V případě jiného než kolmého dopadu světla je osvětlenost v ideálním případě úměrná kosinu úhlu dopadu. V praxi se ovšem uplatňují rušivé vlivy vytvářející odchylku od této definice. Odchylku lze eliminovat nasazením tzv. kosinového nástavce na fotočlánek. [24]

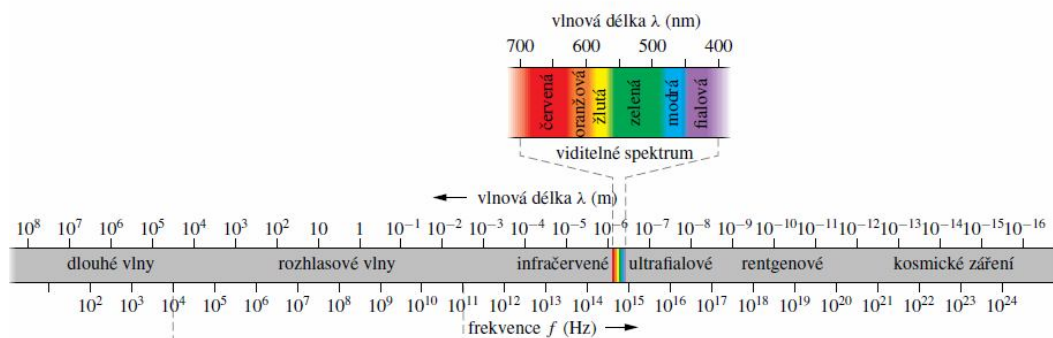
Fotočlánky, jejichž snímací úhel nepřesahuje 10° od osy snímání, se zaměřují na měření intenzity osvětlení prostoru, který má tvar velmi úzkého kužele. Jsou tedy vhodné k bodovému měření. Jsou však nevhodné pro zjištění stavu osvětlení větších prostor. [24]

Fotočlánky pro měření prostorových charakteristik mají snímací úhel větší než 10° od osy snímání. Díky tomu je osvětlení snímáno z většího prostoru. Hodnoty naměřené těmito fotodetektory se značně podobají výsledkům, ke kterým by pozorovatel došel subjektivním zkoumáním. Z tohoto důvodu je tento typ snímače osvětlení pro navrhované zařízení nejvhodnější. [24]

2.8.2 Rozsah snímaných vlnových délek

Světelný paprsek je soubor elektromagnetických vln o různých vlnových délkách. Na obrázku 2.23 je zobrazeno spektrum elektromagnetických vln. Z tohoto rozsahu vlnových délek dokáže lidské oko zachytit pouze vlny, jejichž vlnová délka je větší než 430 nm a menší než 690 nm. [25]

Běžně dostupné fotočlánky se vyrábí pro různé rozsahy vlnových délek. Tato práce je zaměřena na snímání intenzity viditelného světla. Není tedy nutné detekovat světelné záření, které není lidským okem viditelné. Proto budou při výběru fotočlánku upřednostňovány snímače, jejichž rozsah snímaných vlnových délek se co nejvíce blíží rozsahu 430 až 690 nm.

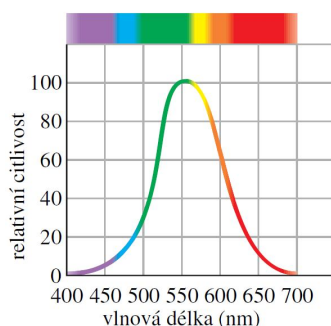


Obrázek 2.23: Spektrum elektromagnetických vln (převzato z [25])

2.8.3 Spektrální citlivost

Lidské oko vnímá jednotlivé vlnové délky s různou intenzitou. Závislost relativní citlivosti oka na vlnovou délku znázorňuje obrázek 2.24. Střed viditelné oblasti leží přibližně na hodnotě 555 nm, která je okem vnímána jako barva žlutozelená. Hranice viditelné oblasti nejsou zcela zřetelné, jelikož se křivka citlivosti oka na dlouhovlnné i krátkovlnné straně asymptoticky blíží nule. Přijmeme-li za hranice vlnové délky, při nichž klesne citlivost na 1 % své maximální hodnoty, dostaneme interval 430 nm až 690 nm. Pokud je intenzita světla dostatečně velká, může lidské oko vnímat i vlnové délky mimo tento interval. [25]

Při výběru fotočlánku, snímajícího především viditelné světlo, se musí jeho spektrální citlivost co nejvíce blížit této charakteristice.



Obrázek 2.24: Závislost relativní citlivosti oka na různé vlnové délky (převzato z [25])

2.8.4 Výběr fotočlánku

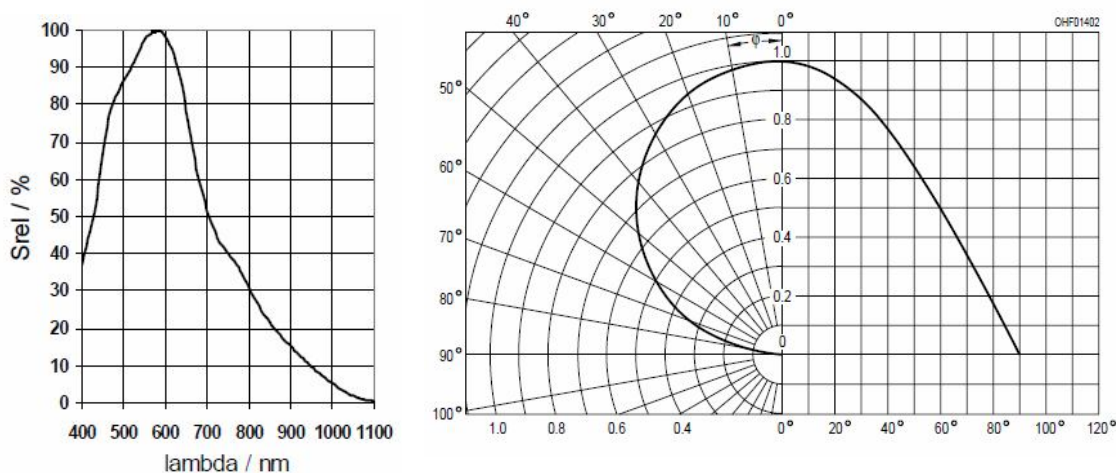
Na základě výše uvedených požadavků je pro tuto aplikaci zvolen fototranzistor s označením SFH 3710. Výrobcem je firma OSRAM.

Mezi nejdůležitější parametry tohoto fotočlánku patří:

- Rozsah vlnových délek 350 až 820 nm
- Závislost citlivosti na různé vlnové délky se blíží charakteristice lidského oka
- Vysoká směrová selektivita
- Lineární nárůst proudu v závislosti na intenzitě osvětlení
- Nízká cena

Tento fototranzistor byl navržen podle křivky relativní citlivosti lidského oka. Snímá tedy vlnové délky viditelného záření s citlivostí odpovídající přibližně lidskému oku. Na obrázku 2.25 vlevo je uvedena závislost citlivosti fototranzistoru na různé vlnové délky záření.

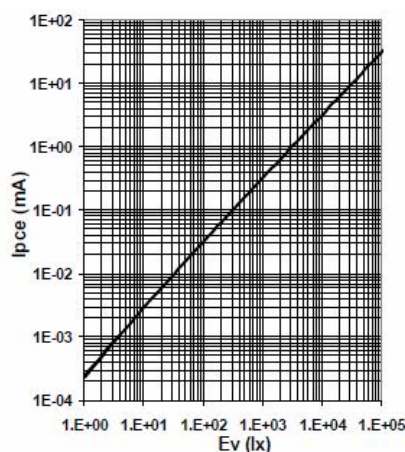
Směrová selektivita je uvedena na obrázku 2.25 vpravo. Tento graf poukazuje na široký úhel snímání. Teprve při odklonu 55° od hlavní osy dochází ke snížení citlivosti na polovinu.



Obrázek 2.25: Citlivost a směrová selektivita SFH 3710 (převzato z [26])

Lineární závislost procházejícího proudu na intenzitě osvětlení je uvedena na obrázku 2.26. Lineární průběh umožňuje jednoduché zpracování naměřených hodnot.

Jeden ze způsobů snadného měření intenzity osvětlení je uveden na obrázku 2.27. Tento obrázek zároveň znázorňuje schéma zapojení snímače osvětlení. Fototranzistor je sériově spojen s rezistorem. Sériová kombinace je připojena k napětí 5 V. Při změnách osvětlení se mění proud protékající obvodem. Při změnách proudu protékajícího rezistorem vznikají na rezistoru různé úbytky napětí. Úbytek napětí je tedy přímo úměrný protékajícímu proudu a tento proud je přímo úměrný intenzitě osvětlení fotočlánku.



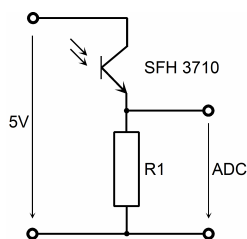
Obrázek 2.26: Závislost proudu fototranzistoru na intenzitě osvětlení (převzato z [26])

Úbytek napětí na rezistoru je převeden A/D převodníkem do číslíkové podoby a vyhodnocen mikroprocesorem. A/D převodník má rozsah vstupního napětí 0 V až 5 V. Proto je vhodné zvolit hodnotu rezistoru tak, aby byl úbytek napětí právě v tomto rozmezí.

Při návrhu snímače osvětlení je považována za maximální intenzitu osvětlení místnosti hodnota 4500 lx. Tato hodnota je předpokladem pro vyzkoušení snímače a jeho následnou kalibraci, které lze jednoduše docílit stanovením jiné maximální hodnoty a opakovaným výpočtem. Z charakteristiky uvedené na obrázku 2.26 lze odečíst hodnotu proudu 1,35 mA, která odpovídá intenzitě 4500 lx. Poté lze vyjádřit odpor rezistoru pomocí ohmova zákona:

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{5}{1,35 \cdot 10^{-3}} = 3703,7 \text{ k}\Omega \quad (2.1)$$

Z běžně dostupných hodnot rezistorů je vybrána nejbližší nižší, aby nedošlo k překročení napěťového rozsahu A/D převodníku. Hodnota odporu rezistoru R1 je tedy 3300 Ω .



Obrázek 2.27: Schéma zapojení fototranzistoru

3 SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ

Tato kapitola je věnována návrhu komunikačních protokolů a popisu obslužných programů systému. Nejprve je navržen komunikační protokol zajišťující spolehlivý přenos dat po silových vedeních. Poté je popsán systém komunikace mezi modulem a regulátorem. Poslední část této kapitoly popisuje vývojové diagramy obslužných programů. Programové vybavení mikrokontrolérů bylo vytvořeno v AVR Studiu 4.12 za podpory knihoven převzatých z [27].

3.1 Mezimodulový komunikační protokol

Mezimodulový komunikační protokol slouží ke komunikaci mezi centrálním a podružnými moduly. Musí obsahovat základní náležitosti jako je adresa příjemce, odesílatele a samozřejmě také přenášená data. Kromě toho musí také zajišťovat dostatečnou ochranu dat, při jejich přenosu. Proto je nutné vybavit protokol redundancí, zaručující bezproblémový provoz. Pro zabezpečení byl zvolen kontrolní součet.

Datový rámec je zobrazen na obrázku 3.1. Každý z bloků odpovídá jednomu bajtu. Díky osmibitovým adresám může být v systému zapojeno až 255 modulů.



Obrázek 3.1: Datový rámec mezimodulové komunikace

Každý modul sleduje provoz v komunikačním kanálu a porovnává svoji adresu s adresou příjemce uvedenou v paketu. Pokud je stejná, přijme paket. Vypočítá kontrolní součet a porovná jej s kontrolním součtem v paketu. Jestliže bylo porovnání neúspěšné, je rámec zahozen. Pokud je porovnání úspěšné, modul přijme data a podle nich nastaví intenzitu svítidla. Poté odešle centrálnímu modulu potvrzovací rámec, který má místo pro adresu příjemce zaplněno posloupností “10101010“. Tato adresa je v protokolu samozřejmě rezervována pouze pro potvrzení, takže žádný z modulů nemá stejnou adresu.

Pokud vysílač nepřijme do určité doby potvrzovací rámec, odešle datový rámec znovu. Toto opakování proběhne maximálně desetkrát a poté je informace zahozena. Jedná se o zabezpečení proti kolizi pro případ, že by některý z přijímačů přestal pracovat.

3.1.1 Kontrolní součet

Kontrolní součet je realizován osmibitovým cyklickým redundantním součtem CRC (Cyclic redundancy check). CRC se určuje na základě přenášených dat a generačního polynomu (dále jen GP). Pro dosažení optimálního zabezpečení je doporučeno několik

GP. Pro tuto úlohu byl zvolen GP CRC-8-CCIT: $x^8 + x^2 + x + 1$. Tento polynom odpovídá binárnímu číslu $(100000111)_2$. [28]

Na vysílací straně se CRC určí jako zbytek po celočíselném dělení odesílaných dat generačním polynomm. Na přijímací straně se přijatá data spolu s přijatým CRC podrobí celočíselnému dělení GP. Pokud je výsledek nulový, jsou přijatá data v pořádku.

Princip přenosu dat s kontrolou CRC je na obrázku 3.2. Pro výpočet CRC je použito logické operace XOR, která je označována symbolem $\oplus$. Na začátku se vysílaná data doplní osmi nulami, aby byla delší než GP. Poté je GP umístěn pod vstupní data tak, aby nejvýznamnější bit GP ležel pod nejvýznamnějším bitem vysílaných dat. Po provedení operace XOR je stejným způsobem GP umístěn pod výsledek a postup se opakuje, dokud je na místě původních vysílaných dat nenulová hodnota.

Vysílání - výpočet CRC

Data = 10101010
GP = 100000111

$\oplus$	1 0 1 0 1 0 1 0	0 0 0 0 0 0 0 0	Vstup GP
	1 0 0 0 0 0 1 1	1	GP
	0 0 1 0 1 0 0 1	1 0 0 0 0 0 0 0	Výsledek GP
$\oplus$	1 0 0 0 0 0	1 1 1	GP
	0 0 0 0 1 0 0 1	0 1 1 0 0 0 0 0	Výsledek GP
$\oplus$	1 0 0 0	0 0 1 1 1	GP
	0 0 0 0 0 0 0 1	0 1 0 1 1 0 0 0	Výsledek GP
$\oplus$	1	0 0 0 0 0 1 1 1	GP
	0 0 0 0 0 0 0 0	0 1 0 1 1 1 1 1	CRC

Příjem - kontrola

GP = 100000111

$\oplus$	1 0 1 0 1 0 1 0	0 1 0 1 1 1 1 1	Vstup GP
	1 0 0 0 0 0 1 1	1	GP
	0 0 1 0 1 0 0 1	1 1 0 1 1 1 1 1	Výsledek GP
$\oplus$	1 0 0 0 0 0	1 1 1	GP
	0 0 0 0 1 0 0 1	0 0 1 1 1 1 1 1	Výsledek GP
$\oplus$	1 0 0 0	0 0 1 1 1	GP
	0 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 1 1 1	Výsledek GP
$\oplus$	1	0 0 0 0 0 1 1 1	GP
	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	kontrola

Obrázek 3.2: Princip použití CRC

3.2 Komunikace mezi modulem a regulátorem

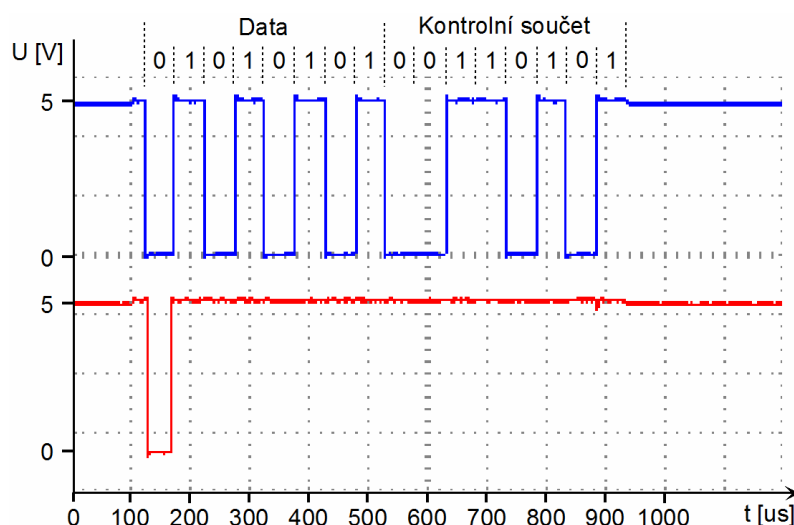
Komunikace mezi modulem a regulátorem je založena na stejném principu jako mezimodulová komunikace. Není zde však zapotřebí přenášet informace o adresátovi a odesílateli. Podružný modul totiž odesílá do všech regulátorů totožná data. Pro zachování vysoké univerzálnosti zařízení není od regulátorů vyžadováno potvrzení příjmu dat. Naopak se očekává signalizace nesprávného příjmu. Jestliže není výsledek po provedení kontrolního součtu pozitivní, žádá regulátor o opětovné zaslání dat. Teprve po úspěšném příjmu dat všemi regulátory přejde datová linka do klidového stavu.

Struktura datového rámce používaného pro komunikaci mezi moduly a regulátory je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Datový rámec pro komunikaci mezi modulem a regulátorem

Na obrázku 3.4. je zobrazen skutečný průběh datového rámce zaznamenaný osciloskopem Rigol DS1052E. Doba trvání jednoho bitu je 100 μ s. Bity jsou odesílány od bitu s nejnižší vahou do bitu s nejvyšší vahou. Na obrázku lze vidět, že začátek komunikace byl indikován na indikační lince (červený průběh) nízkou úrovní. Doba trvání indikace začátku vysílání je oproti době trvání bitu o 20 μ s kratší. Toto opatření snižuje pravděpodobnost nesprávné synchronizace přijímače s vysílačem. Po indikaci začátku přenosu je na datovou linku (modrý průběh) odesláno 8 bitů kontrolního součtu (00110101), na které okamžitě navazuje 8 datových bitů (01010101). Po dokončení přenosu je tedy na straně přijímače 16-ti bitová hodnota, která se softwarově rozdělí na datovou část a část kontrolního součtu. Jelikož je spolu s daty přenášen i kontrolní součet, není nutné ukončovat rámec, který by indikoval úspěšný přenos celého rámce. Zcela dostačuje vypočítat kontrolní součet, podle jehož výsledku přijímač stanoví, zda byl rámec přenesen správně, či nikoli.



Obrázek 3.4: Průběh komunikace mezi podružným modulem a regulátorem

3.3 Obslužný program centrálního modulu

Vývojový diagram obslužného programu centrálního modulu je uveden v příloze D.1. Jeho funkce je stejně jako u všech dalších uvedených programů založena na nastavování příznaků a opakovaném sledování jejich stavu v nekonečné smyčce. Po uvedení zařízení do provozu se nejprve provede inicializace jednotlivých částí systému. Je navázána komunikace s LCD displejem, kapacitními tlačítky a síťovým modemem ST7540. Po tomto úvodním nastavení přechází program do nekonečné smyčky, ve které opakovaně kontroluje příznaky jednotlivých událostí. V případě stisku některého z tlačítek se spustí obsluha externího přerušení a nastaví se příznak detekce stisknutého tlačítka. Nastavení tohoto příznaku odemkne v nekonečné smyčce část kódu, která nejprve vyhodnotí které z tlačítek bylo stisknuto a na základě aktuální pozice v uživatelském menu provede odpovídající operaci. V případě změny nastavení intenzity osvětlení v některé z místností se nastaví příznak, který povoluje vysílání dat do podružného modulu. Centrální modul očekává po odeslání potvrzení příjmu od podružného modulu. Jestliže je potvrzení přijato, vynuluje se příznak povolení vysílání dat do podružného modulu.

3.4 Obslužný program podružného modulu

Vývojový diagram obslužného programu podružného modulu lze nalézt v příloze D.2. Tento program stejně jako předchozí opakovaně zjišťuje stav příznaků, které zpřístupňují výkonu programu jinak uzamčené části kódu. Pro nastavení příznaků musí být detekován příchozí signál z centrálního modulu, nebo infračervený signál z dálkového ovladače. Nejprve dojde k příjmu dat. Poté se povolí vysílání do centrálního modulu a regulátoru. Po odeslání dat je zakázáno vysílání vynulováním odpovídajících příznaků. Také se povolí příjem dat od regulátoru, který v případě neúspěšného přenosu zažádá o opětovné zaslání dat. Pokud byl přenos úspěšný, je příjem dat od regulátoru uzamčen a podružný modul opět čeká na vyrušení centrálním modulem, nebo dálkovým ovladačem. Pokud je přijat IR signál a zároveň je povoleno učení kódu z dálkového ovladače, dojde k uložení přijatých dat. Vysílání do regulátoru a centrálního modulu bude v tomto případě ponecháno uzamčené.

3.5 Obslužný program regulátoru

Vývojový diagram obslužného programu regulátoru je uveden v příloze D.3. Běh programu je zacyklen v nekonečné smyčce, ve které se opakovaně rozhoduje, zda má být do podružného modulu odeslána žádost o zopakování vysílání. Povolení vysílání je uděleno pouze v případě negativního výsledku kontroly přijatých dat.

Každých deset milisekund dochází ke spuštění obsluhy přerušení, která je generována průchodem síťového napětí nulovou hodnotou. V této obsluze přerušení se nejprve provede zjištění aktuální intenzity osvětlení v místnosti a poté je nastaven časovač na dobu, za kterou má dojít k sepnutí zátěže. Po uplynutí této doby je sepnuta zátěž a znovu nastaven časovač. Tentokrát na dobu, za kterou má být zátěž rozepnuta. Tento postup nastavování časovače a spínání a rozpínání zátěže se opakuje pro každou půlperiodu síťového napětí.

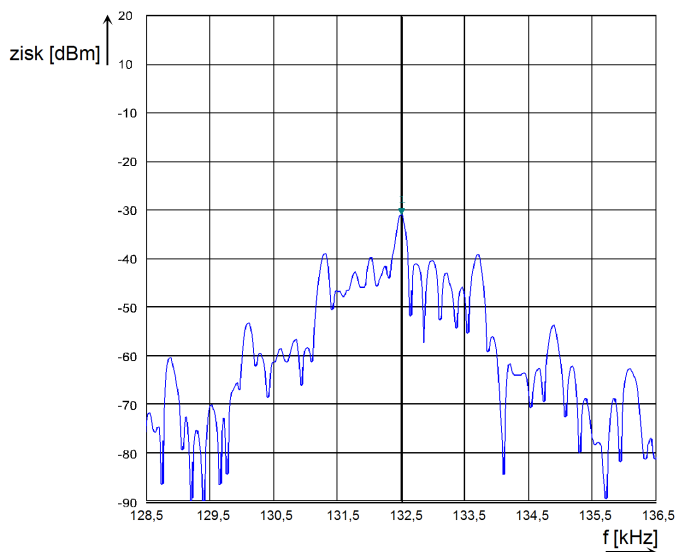
Pokud by se regulace výkonu prováděla podle jediného vzorku aktuální intenzity osvětlení, docházelo by k příliš rychlým změnám výkonu a občasnému blikání svítidla. Blikání je způsobeno rozkmitáním zpětnovazebního systému. Proto se regulace provádí na základě posledních 3000 vzorků naměřené intenzity osvětlení. Toto množství vzorků přináší spolehlivější informaci o intenzitě osvětlení v místnosti, ale také časové zpoždění zajišťující plynulejší regulaci.

4 OŽIVENÍ A MĚŘENÍ ZAŘÍZENÍ

Prvním krokem v realizaci bylo vyleptání a osazení testovací desky plošných spojů určené pro komunikaci po síťových rozvodech. Tato deska byla napájena z externího zdroje napětí. Pro větší přehlednost a snadnější hledání chyb byla část s mikrokontrolérem umístěna na další desce. Po připojení desky s PLC modemem k napájecímu napětí byl v přijímacím režimu naměřen odpovídající proudový odběr. Dále byla připojena deska s naprogramovaným mikrokontrolérem. V programu MCU bylo inicializováno rozhraní UART a v nekonečné smyčce řízeno vysílání PLC modemem. PLC modem dovoluje vysílat souvisle maximálně jednu sekundu a poté sám přechází z vysílacího režimu do přijímacího. Tato funkce je dána normou CENELEC. Z tohoto důvodu byl v programu zapnut časovač, který každou sekundu přepíná mezi vysílačem a přijímačem. V rámci tohoto časovače je také nulován interní časovač watchdog obvodu ST7540. Kdyby nebyl nulován přibližně každé 1,5 s, po uplynutí této doby by docházelo k opětovnému resetování obvodu.

Po připojení MCU k ST7540 docházelo každou sekundu ke změně proudového odběru. Naměřené hodnoty přibližně odpovídaly údajům výrobce. V přijímacím režimu byl proudový odběr přibližně 10 mA a ve vysílacím režimu 40 mA. Po zobrazení výstupního signálu modulátoru na osciloskopu byl vidět nosný signál o kmitočtu blízkém 132,5 kHz. Poté bylo provedeno měření v důležitých bodech aktivního vysílacího filtru. Všechny naměřené hodnoty se nacházely v rozmezí udávaném výrobcem.

Protože z osciloskopu nebylo možné rozpoznat změnu logických úrovní v nosném signálu, muselo být měření provedeno na signálovém analyzátoru FSQ3. Výrobce analyzátoru je firma Rohde & Schwarz. Měření probíhalo v softwarovém modu VSA (vektor signal analyzator). Na obrázku 4.1 je zachyceno naměřené kmitočtové spektrum kmitočtově modulovaného signálu. Měřený signál je útlumovými články zmenšen o 40 dB.



Obrázek 4.1: Spektrum FSK signálu

Ve spektru FSK signálu je vidět 7 špičkových hodnot. Špička uprostřed odpovídá nosnému signálu 132,5 kHz. Zbývajících šest špiček je dáno Besselovou funkcí, která popisuje frekvenčně modulovaný signál nekonečně mnoha harmonickými složkami. Ty jsou umístěny na kmitočtech součtů a rozdílů nosného kmitočtu s násobky modulačního signálu. Kmitočty harmonických složek lze matematicky vyjádřit:

$$f = f_0 \pm N \cdot F \quad (5.1)$$

kde f je kmitočet harmonické složky, f_0 je kmitočet nosného signálu, N jsou celá čísla a F je modulační kmitočet [29]. Z naměřeného spektra lze zjistit modulační kmitočet, který je dán kmitočtovou vzdáleností mezi dvěma sousedními špičkami.

Po přepnutí měřicího přístroje do režimu FSK demodulátoru, byla v modulovaném spektru rozeznána data uvedená na obrázku 4.2.

start	data	stop
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	01010101	1
0	0	

Obrázek 4.2: Data naměřená FSK demodulátorem

PLC modem vysílal opakovaně posloupnost 10101010. Další dva symboly, které se v datových rámcích vyskytují, jsou dány komunikací prostřednictvím UART mezi MCU a ST7540. Rozhraní UART v této aplikaci používá komunikační protokol, který začíná jedním start bitem a končí jedním stop bitem. Po odvysílání start bitu, který je reprezentován logickou úrovní 0, začne vysílání posloupnosti od bitu s nejnižší vahou. Po odvysílání celé posloupnosti je vysílaný řetězec zakončen stop bitem, jehož úroveň je logická 1. Naměřené hodnoty tedy zcela odpovídají vysílané posloupnosti.

Dalším krokem bylo testování mezimodulové komunikace po silových rozvodech. Proto byl vyroben druhý testovací modul. Jeden z modulů byl nastaven jako vysílač a druhý jako přijímač. Vysílač inkrementoval každou sekundu osmibitovou proměnnou a opakovaně ji odesílal. Přijímač zobrazoval tato přijatá data na LCD. Komunikace se jevila jako zcela bezchybná, což bylo způsobeno opakovaným vysíláním stejných dat. Při přenosové rychlosti 2400 bit/s bylo provedeno 240 odeslání stejné hodnoty proměnné. Pozorovatel tedy nemohl v zobrazovaném údaji rozpoznat chybu. Toto měření bylo provedeno v základním nastavení obvodů ST7540. Komunikace probíhala na vzdálenost osm metrů v laboratoři Vysokého učení technického v Brně.

Po ověření funkčnosti komunikace po silových rozvodech byla vyrobena konečná verze desky jednoho modulu obsahující mikrokontrolér i PLC modem. Po naprogramování mikrokontroléru ATmega32 byl modul schopen přijímat infračervený signál z dálkového ovladače a po stisku tlačítka si přijatý kód zapamatovat.

Poté byla navržena a vyrobena deska regulátoru výkonu. Její mikrokontrolér ATTiny24 byl naprogramován pro komunikaci s ATmega32, příjem dat ze snímačů osvětlení a regulaci výkonu svítidla. Regulace byla vyzkoušena na standardní wolframové žárovce a regulovatelné kompaktní zářivce. Regulace wolframové žárovky probíhala v rozsahu 0 % až 100 % výkonu. U kompaktní zářivky byl rozsah regulace stanoven na 20 % až 100 % výkonu zářivky. Při poklesu pod 20 % výkonu svítidla začala zářivka nejdříve blikat a poté zcela přestala svítit. Zjištěný rozsah odpovídá údajům výrobce.

Komunikace po silových rozvodech byla funkční, ale nikoli spolehlivá. Proto bylo nutné změnit konfiguraci síťového modemu. Zápis do konfiguračního registru modemu je podmíněn komunikací s mikrokontrolérem prostřednictvím rozhraní SPI. Po změně rozhraní byl v modemu zapnut synchronní přenos a zvýšen kmitočtový zdvih. Optimalizace PLC byla dokončena vytvořením datových rámců včetně zabezpečení kontrolním součtem.

Dalším krokem bylo rozšíření systému. Byl vyroben jeden centrální modul, který je vybaven kapacitními tlačítky a LCD displejem. Dále byly vytvořeny dva standardní podružné moduly, jejichž součástí je integrovaný regulátor. Jeden podružný modul s LCD displejem pro vývoj zařízení a jeden externí regulátor výkonu. Všechna zařízení jsou zapouzdřena v krabičkách odpovídající krytí IP30. Pouze centrální modul, který je vybaven větracími otvory o průměru 5 mm, splňuje krytí IP20. Fotografie jednotlivých částí jsou uvedeny v příloze E. Testování zařízení proběhlo v dvoupodlažním rodinném domě. Nejprve bylo provedeno měření chybovosti přenosu při vypnutém kontrolním součtu. Byl stanoven jeden vysílač, který vyslal 10 MB dat. Přijímaná data byla kontrolována po bytech. Jestliže tedy byl v přijatém bytu jediný chybný bit, tak byl celý byte vyhodnocen jako nesprávný. V tabulce 4.1 je uvedena chybovost přenosu pro různé vzdálenosti.

Tabulka 4.1: Chybovost přenosu pro různé vzdálenosti

Přibližná vzdálenost	Počet odeslaných bytů	Chybně přenesených bytů	Chybně přenesených bytů
[m]	[B]	[%]	[%]
5	10 000	0,018	0,059
17		0,013	
22		0,093	
26		0,123	

Po zapnutí funkce kontrolního součtu a opakovaného vysílání byla chybovost přenosu zcela odstraněna. Přenos dat v rámci budovy byl tedy zcela v pořádku. Regulace výkonu svítidel probíhala také dle předpokladů. Pouze systém snímání osvětlení by bylo vhodné doplnit trimrem, jehož pomocí by se dala citlivost snímání osvětlení nastavit pro konkrétní místnost.

5 ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na problematiku komunikace po silových rozvodech a regulaci výkonu svítidel. Nejprve byl proveden průzkum trhu s PLC modemy a poté vybrán nejlépe vyhovující obvod ST7540, který disponuje všemi potřebnými vlastnostmi a funkcemi. Byla popsána přijímací i vysílací část tohoto obvodu a navrženo schéma zapojení. Teoreticky správně zapojené vysílací a přijímací filtry byly podrobeny simulaci s pozitivním výsledkem. Následně bylo toto zapojení realizováno. Pro ověření správné funkce byla vytvořena i deska pro mikrokontrolér a napájecí zdroj. Po oživení všech částí bylo PLC zapojení měřeno. Ve všech důležitých bodech zapojení byly naměřeny správné hodnoty. Z modulovaných dat bylo 102 vzorků demodulováno signálovým analyzátozem a byla zjištěna 100 % shoda mezi modulovanými a demodulovanými daty. Poté byl zkonstruován druhý modul pro ověření mezimodulové komunikace po síťových rozvodech. Komunikace na krátkou vzdálenost proběhla bez problému. Dále byl navržen komunikační protokol splňující požadavky pro bezpečný a bezproblémový přenos dat po síťových rozvodech.

V další části byla navržena a realizována deska modulu, která obsahuje mikrokontrolér i PLC modem. Tato deska je univerzální a lze ji použít, jak pro centrální modul, tak i pro modul podružný. Je uzpůsobena pro připojení ovládacího panelu, infračerveného přijímače, tlačítka pro učení kódu a pro komunikaci s regulátorem. Pro všechny tyto funkce byl vytvořen základní software a nahrán do mikrokontroléru. Praktické vyzkoušení desky odhalilo několik malých nedostatků, které byly v průběhu dalších prací odstraněny.

V poslední části bylo změněno rozhraní pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a síťovým modemem z UART na SPI. Tato změna přinesla možnost zápisu do konfiguračního registru síťového modemu a tím i provedení optimálního nastavení PLC. Komunikace po silových rozvodech byla navíc zabezpečena kontrolním součtem a potvrzením příjmu.

Pro zvýšení univerzálnosti a zlepšení přehlednosti zdrojových kódů byly z hlavního kódu vyjmuty některé části a zařazeny do projektu jako samostatné knihovny. Tyto knihovny nyní lze samostatně využívat pro jiné projekty.

Na závěr byl systém rozšířen na jeden centrální modul, tři podružné moduly, tři regulátory výkonu a tři snímače osvětlení. Celý systém byl implementován do stávající budovy a poté testován. Testy proběhly velmi dobře. Detailní informace jsou uvedeny v předešlé kapitole.

Navržené zařízení je tedy zcela funkční a lze jej doporučit i pro jiné projekty domácí automatizace. Díky vysoké univerzálnosti desky modulu, vytvořeným knihovnám pro komunikaci po silových rozvodech a nízkým pořizovacím nákladům je PLC snadným a velmi zajímavým řešením pro komunikaci v rámci objektu.

LITERATURA

- [1] RŮŽIČKA, Tomáš. Přenos dat v elektrorozvodné síti. 2007. 50 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Dostupné z WWW: <dspace.upce.cz/bitstream/10195/24842/1/text.pdf>.
- [2] SVADBÍK, Vít. Systémy dálkového sběru dat [online]. 2008. 67 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické Brno. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8466>.
- [3] DOSTERT, K. Powerline communications. New Jersey: Prentice Hall, 2001.
- [4] Konnex PL132 - Power-Line-Communication using the CENELEC-C-Band [online]. [cit. 2011-19-4]. Anglicky. Dostupné z: <http://www.domologic.de/download/pdf/konnex_pl132_en.pdf>.
- [5] ŠIMÍK, Vladislav. Řízení laboratorního modelu kolejiště [online]. 2007. 52 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické Brno. Dostupné z WWW: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5329>.
- [6] ŽALUD, Václav. Moderní radioelektronika. Praha : BEN, 2000. 645 s.
- [7] Digital Communication. *Communication Systems* [online]. [cit. 2011-05-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.tutornext.com/digital-communication/13494>>.
- [8] TDA5051A, Home automation modem Product specification, Philips Semiconductors, 1999, [online]. [cit. 2011-19-4]. Anglicky. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/TDA5051T.pdf>>.
- [9] ST7537HS1. *HOME AUTOMATION MODEM* [online]. 1995 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/b/0f5ff17wzd9fioo3d8052433tkyy.pdf>>.
- [10] ST7538. *FSK power line transceiver* [online]. 2006 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00123477.pdf>.
- [11] Datasheet ST7540. *FSK power line transceiver* [online]. 2006 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00096923.pdf>.
- [12] LASBY, Gary. INT51X. *Integrated Powerline MAC/PHY Transceiver with USB and ETH Integrated Bridges* [online]. 2003 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <http://www.tandel.be/downloads/INT51X1_Datasheet.pdf>.
- [13] AS5501 / AS5502. *Multimode Powerline-Modem* [online]. 2000 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/47855/AMSCO/AS5501.html>>.
- [14] JANČÍK, Jaroslav. Vysokorychlostní ethernetová komunikace po elektrické síti . *Automa* [online]. 2005 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30425>.

- [15] ATMEL CORPORATION. Microcontroller : ATmega32A. In *Datasheet* [online]. 14.7.2009 [cit. 2011-12-12]. Dostupné z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2503.pdf>.
- [16] ST7540 FSK powerline transceiver. *Application Note* [online]. 2010 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z: <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/APPLICATION_NOTE/CD00143379.pdf>.
- [17] DÍTĚ, Miroslav. *NETWORK VOICE MESSAGE BOX* [online]. 2009. 74 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické Brno. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15644>.
- [18] BERGMANS, San. *SB-Projects* [online]. 2011 [cit. 2011-11-18]. Philips RC-5 Protocol. Dostupné z WWW: <<http://www.sbprojects.com/knowledge/ir/rc5.php>>
- [19] BRZOBOHATÝ, Jaromír, et al. *Elektronické součástky*. Brno, 2002. 205 s.
- [20] VRBA, Jaromír. *Výkonová elektronika 1 : Prvky měničů, střídače, měniče kmitočtu, stejnosměrné měniče*. 2009. 55 s.
- [21] DŘÍNOVSKÝ, Jiří; FRÝZA, Tomáš; SVAČINA, Jiří; KEJÍK, Zdeněk; RŮŽEK, Václav. *Elektromagnetická kompatibilita - Přednášky*. 2010. 278 s.
- [22] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. Vyd.1. Praha : BEN, 2004. 200 s.
- [23] SALEH, Bahaa; TEICH, Malvin. *Základy fotoniky 3*. Praha : Matfyzpress, 1991. 338 s.
- [24] Fotočlánek. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 10.9.2010 [cit. 2011-10-05]. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Foto%C4%8Dl%C3%A1nek>>.
- [25] HOLLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika : Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. VUTIUM, 2000. 1198 s.
- [26] SFH 3710. In *Silicon NPN Phototransistor with V_{λ} Characteristics* [online]. 2007 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z WWW: <<http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=0000000200022c8e001e0023&act=showBookmark>>.
- [27] FLEURY, Peter. Peter Fleury's Home Page. [online]. [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: <http://jump.to/fleury>
- [28] Cyclic redundancy check. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-12-11]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyclic_redundancy_check>.
- [29] Spektra modulovaných signálů. *Skripta laboratorní výuky BKSÝ* [online]. 2011 [cit. 2011-04-25]. Dostupné z WWW: <https://krel.feec.vutbr.cz/VYUKA/B_EST/prezencni/BKSÝ/LAB.CVI%acEN%d6/NOVE_NAVODY/Spektra%20modulovan%ecch%20sign%a0l%85.pdf>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DO	dálkový ovladač
PLC	komunikace po silových rozvodech
CSMA/CD	protokol mnohonásobného přístupu k médiu
ASK	modulace s amplitudovým klíčováním
FSK	modulace s kmitočtovým klíčováním
OFDM	ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením
Modem	modulátor a demodulátor
AGC	automatické řízení zesílení
UART	univerzální asynchronní sériové rozhraní
SPI	sériové periferní rozhraní
LCD	displej z kapalných krystalů
MCU	mikrokontrolér
GP	generační polynom
CM	centrální modul
PM	podružný modul
f	kmitočet harmonické složkyesselovy funkce
f_0	kmitočet nosného signálu
N	všechna celá čísla
F	modulační kmitočet

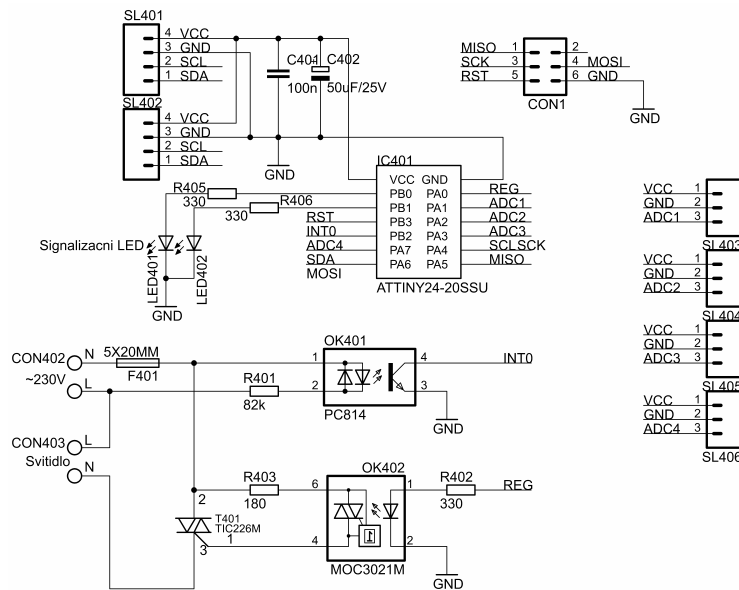
SEZNAM PŘÍLOH

A	Schémata zapojení	50
A.1	Schéma zapojení PLC modulu	50
A.2	Schéma zapojení regulátoru	51
A.3	Schéma zapojení desky napájení	51
A.4	Schéma zapojení snímače osvětlení	51
A.5	Schéma zapojení kapacitních tlačítek	51
B	Desky plošných spojů	52
B.1	Předloha desky PLC modulu	52
B.2	Předloha desky regulátoru	53
B.3	Předloha desky napájení	54
B.4	Předloha desky snímače osvětlení	55
B.5	Předloha desky kapacitních tlačítek	56
C	Seznam součástek	57
C.1	Seznam součástek PLC modulu	57
C.2	Seznam součástek snímače osvětlení	58
C.3	Seznam součástek regulátoru	58
C.4	Seznam součástek desky napájení	58
C.5	Seznam součástek desky kapacitních tlačítek	59
D	Vývojové diagramy programů	53
D.1	Vývojový diagram centrálního modulu	53
D.2	Vývojový diagram podružného modulu	54
D.3	Vývojový diagram regulátoru	55
E	Fotodokumentace	56
E.1	Fotodokumentace centrálního modulu	56
E.2	Fotodokumentace podružného modulu	57
E.3	Fotodokumentace regulátoru	57
E.4	Fotodokumentace kompletního systému	57

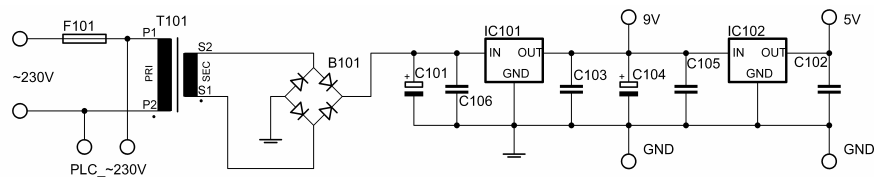
A.1 Schéma zapojení PLC modulu



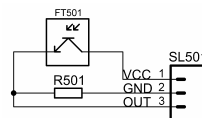
A.2 Schéma zapojení regulátoru



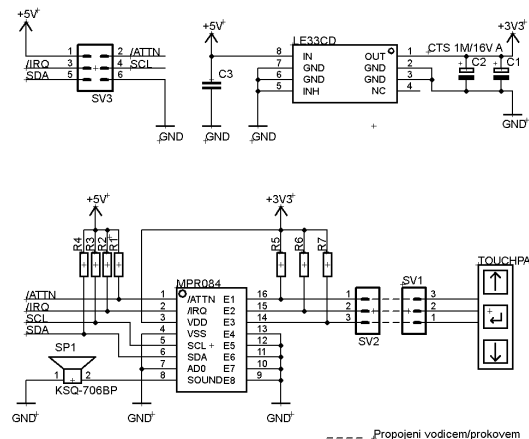
A.3 Schéma zapojení desky napájení



A.4 Schéma zapojení snímače osvětlení



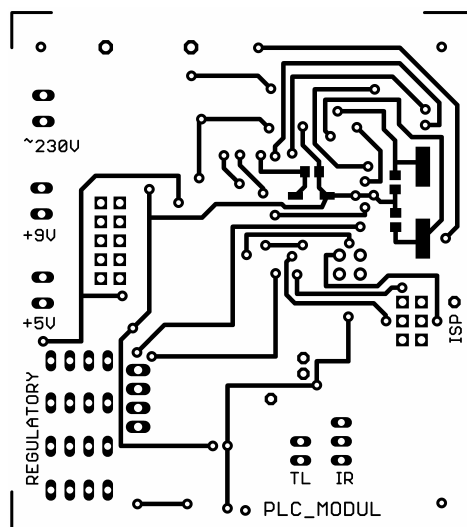
A.5 Schéma zapojení kapacitních tlačítek



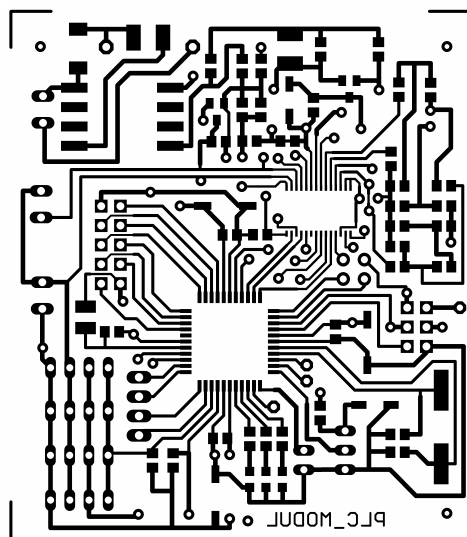
PŘEDLOHY DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 Předloha desky PLC modulu

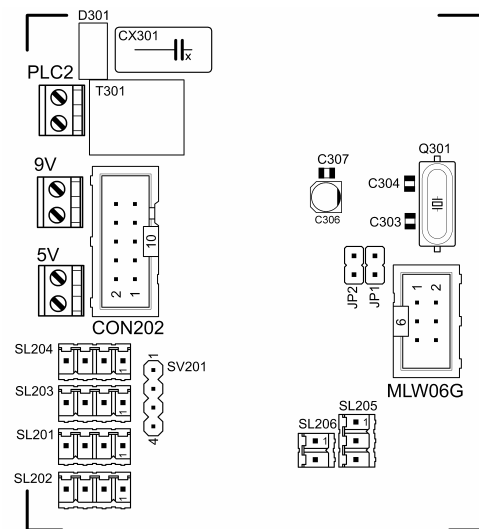
Předloha - pohled shora (strana TOP). Rozměry: 62,5 mm x 70 mm.



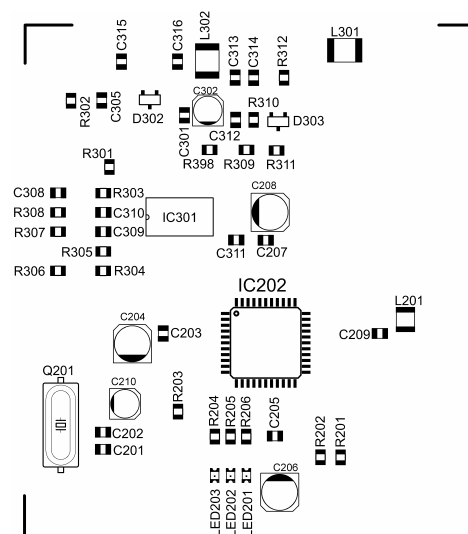
Předloha - pohled zdola (strana BOTTOM)



Rozmístění součástek - pohled shora (strana TOP)

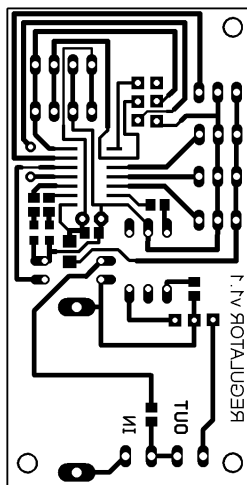


Rozmístění součástek - pohled zdola (strana BOTTOM)

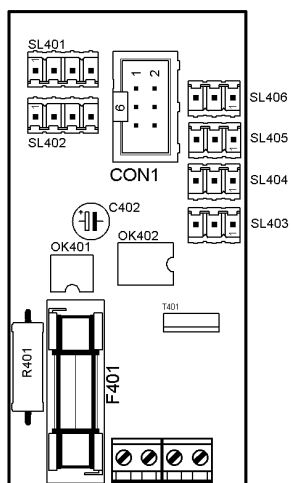


B.2 Předloha desky regulátoru

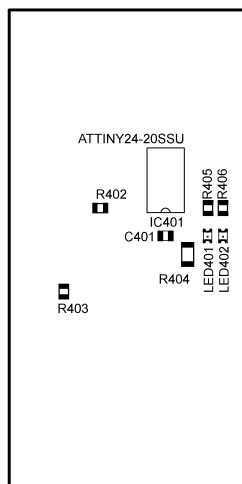
Předloha - pohled zdola (strana BOTTOM). Rozměry: 33 mm x 67 mm.



Rozmístění součástek - pohled shora (strana TOP)

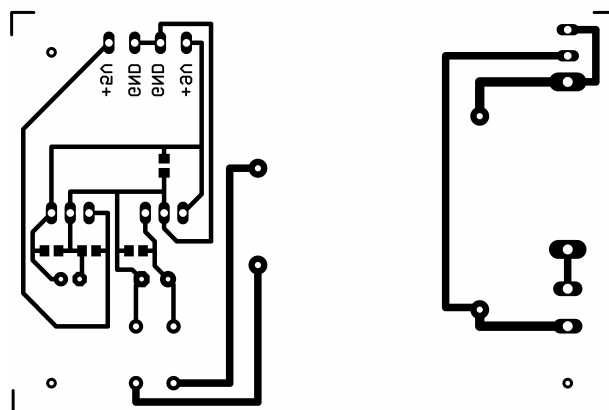


Rozmístění součástek - pohled zdola (strana BOTTOM)

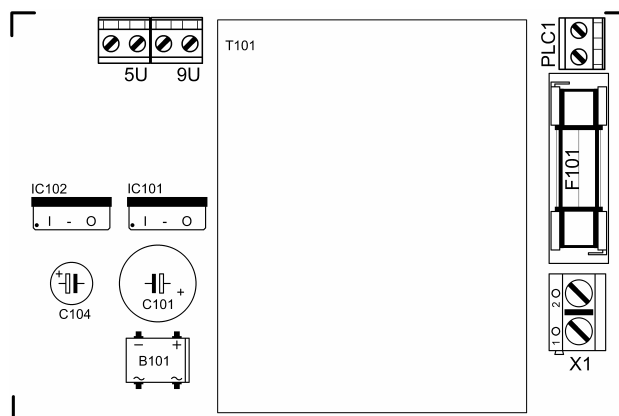


B.3 Předloha desky napájení

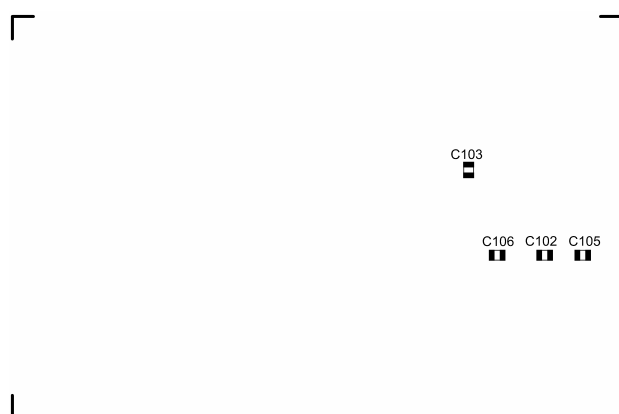
Předloha - pohled zdola (strana BOTTOM). Rozměry: 82 mm x 55 mm.



Rozmístění součástek - pohled shora (strana TOP)



Rozmístění součástek - pohled zdola (strana BOTTOM)



B.4 Předloha desky snímače osvětlení

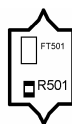
Předloha - pohled zdola (strana BOTTOM). Rozměry: 8,5 mm x 15 mm.



Rozmístění součástek - pohled shora (strana TOP)

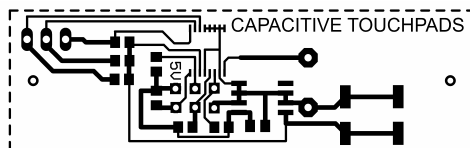


Rozmístění součástek - pohled zdola (strana BOTTOM)

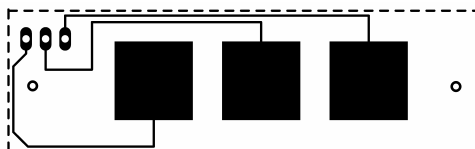


B.5 Předloha desek kapacitních tlačítek

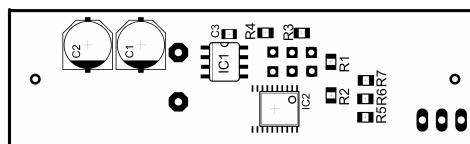
Předloha desky 1 - pohled zdola (strana BOTTOM). Rozměry: 19 mm x 62,5 mm.



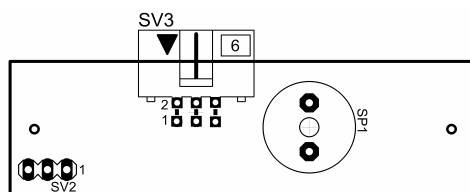
Předloha desky 2 - pohled zdola (strana BOTTOM)



Rozmístění součástek na desce 1 - pohled shora (strana TOP)



Rozmístění součástek na desce 1 - pohled zdola (strana BOTTOM)



SEZNAM SOUČÁSTEK

C.1 Seznam součástek PLC modulu

Označení	Součástka	SMD	Pouzdro	Hodnota
R301	Rezistor	ANO	805	1,5k Ω
R302	Rezistor	ANO	805	15k Ω
R303	Rezistor	ANO	805	1,6k Ω
R304	Rezistor	ANO	805	25k Ω
R305	Rezistor	ANO	805	18k Ω
R306	Rezistor	ANO	805	2,4k Ω
R307	Rezistor	ANO	805	4,7k Ω
R308	Rezistor	ANO	805	13k Ω
R309	Rezistor	ANO	805	1k Ω
R310	Rezistor	ANO	805	1,8k Ω
R311	Rezistor	ANO	805	2,7k Ω
R312	Rezistor	ANO	805	470 Ω
R398,R399	Fiktivní rezistor - neosazovat			
C301,C307,C308	Kondenzátor	ANO	805	100nF
C302,C306	Elektrolytický kondenzátor	ANO	prům4x5,3	10uF/25V
C303,C304	Kondenzátor	ANO	805	33pF
C305,C315	Kondenzátor	ANO	805	10nF
C309	Kondenzátor	ANO	805	270pF
C310,C313	Kondenzátor	ANO	805	100pF
C311	Kondenzátor	ANO	805	22pF
C312	Kondenzátor	ANO	805	15pF
C314	Kondenzátor	ANO	805	10uF
C316	Kondenzátor	ANO	805	6,8nF
Q301	Krystal	ANO	HC49UP	16MHz
L301	Tlumivka	ANO	1812	22uH
L302	Tlumivka	ANO	1812	220uH
D301	Bipolární transil	ANO	SMB	SM6T15CA
D302,D303	Schottkyho dioda	ANO	SOT23	BAT54S
T301	Oddělovací transformátor pro PLC	ANO		T60403-K5024-X044
CX301	Bezpečnostní kondenzátor X2	NE	XC10B6	68nF
JP301,JP302	Jumper	NE		

C.2 Seznam součástek snímače osvětlení

Označení	Součástka	SMD	Pouzdro	Hodnota
R501	Rezistor	ANO	805	3,3k Ω
SL501	Konektor	NE		Konektor se zámkem PSH02-04PG
FT501	Fototranzistor	ANO		SFH3710

C.3 Seznam součástek regulátoru

Označení	Součástka	SMD	Pouzdro	Hodnota
SL401,SL402	Konektor	NE		Konektor se zámkem PSH02-04PG
SL403,SL404,SL405,SL406	Konektor	NE		Konektor se zámkem PSH02-03PG
C401	Kondenzátor	ANO	805	100nF
C402	Elektrolytický kondenzátor	NE	prům.5x5, 3	47uF/25V
LED401,LED402	LED	ANO	805	červená, zelená
IC401	MCU	ANO	SOIC-14	ATTiny24-20SSU
R401	Rezistor	ANO	0414	82kΩ (2W)
R402,R405,R406	Rezistor	ANO	805	330Ω
R403	Rezistor	ANO	805	180Ω
R404	Rezistor	NE	RR	0Ω
F401	Pojistkový držák	NE	5x20mm	250V/6,3A
OK401	Optočlen	NE	DIL 4	PC814
OK402	Optočlen	NE	DIL 6	MOC3021
T401	Triak	NE	TO220	TIC226M
CON402,CON403	Konektor	NE		AK550/2
CON401	Konektor	NE		MLW06G

C.4 Seznam součástek desky napájení

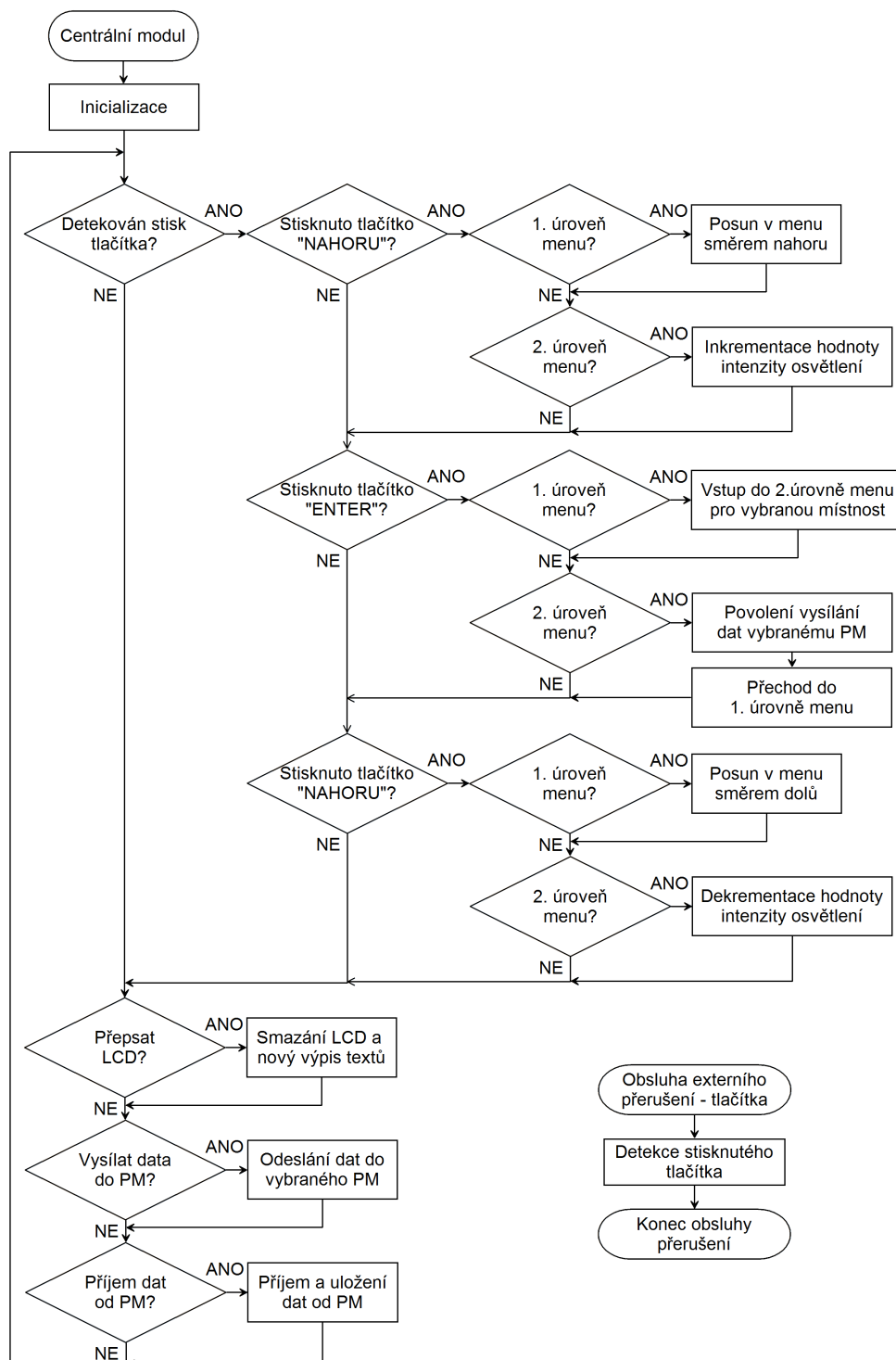
Označení	Součástka	SMD	Pouzdro	Hodnota
C101	Elektrolytický kondenzátor	NE	10x20	470uF/25V
C102,C103	Kondenzátor	ANO	805	100nF
C104	Elektrolytický kondenzátor	NE	prům 6	100uF/25V
C105,C106	Kondenzátor	ANO	805	330nF
IC101	Stabilizátor	NE	TO220	7809
IC102	Stabilizátor	NE	TO220	7805
F101	Pojistkové pouzdro	NE	22mm	250V/6,3A
B101	Usměrňovací můstek	NE	DIL	600V/1,5A
T101	Síťový transformátor	NE		230V/9V
CON101	Konektor	NE		AK500/2

C.5 Seznam součástek kapacitních tlačítek

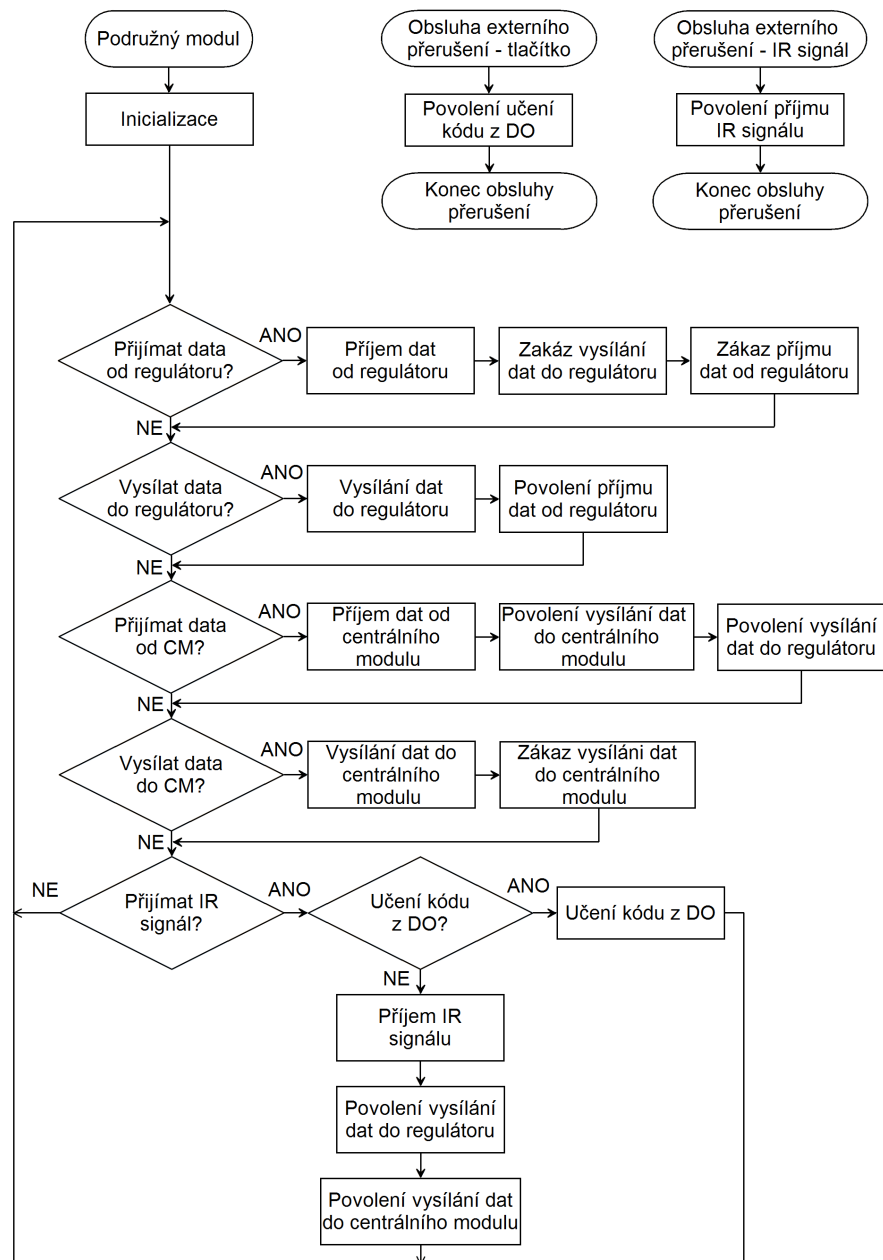
Označení	Součástka	SMD	Pouzdro	Hodnota
R1,R2,R3,R4	Rezistor	ANO	805	4,7kΩ
R5,R6,R7	Rezistor	ANO	805	820kΩ
C1,C2	Elektrolytický kondenzátor	ANO	D	1uF/16V
C3	Kondenzátor	ANO	805	100nF
IC1	Stabilizátor LE33CD	ANO	SO-8	
IC2	MPR084	ANO	TSSOP16	

VÝVOJOVÉ DIAGRAMY PROGRAMŮ

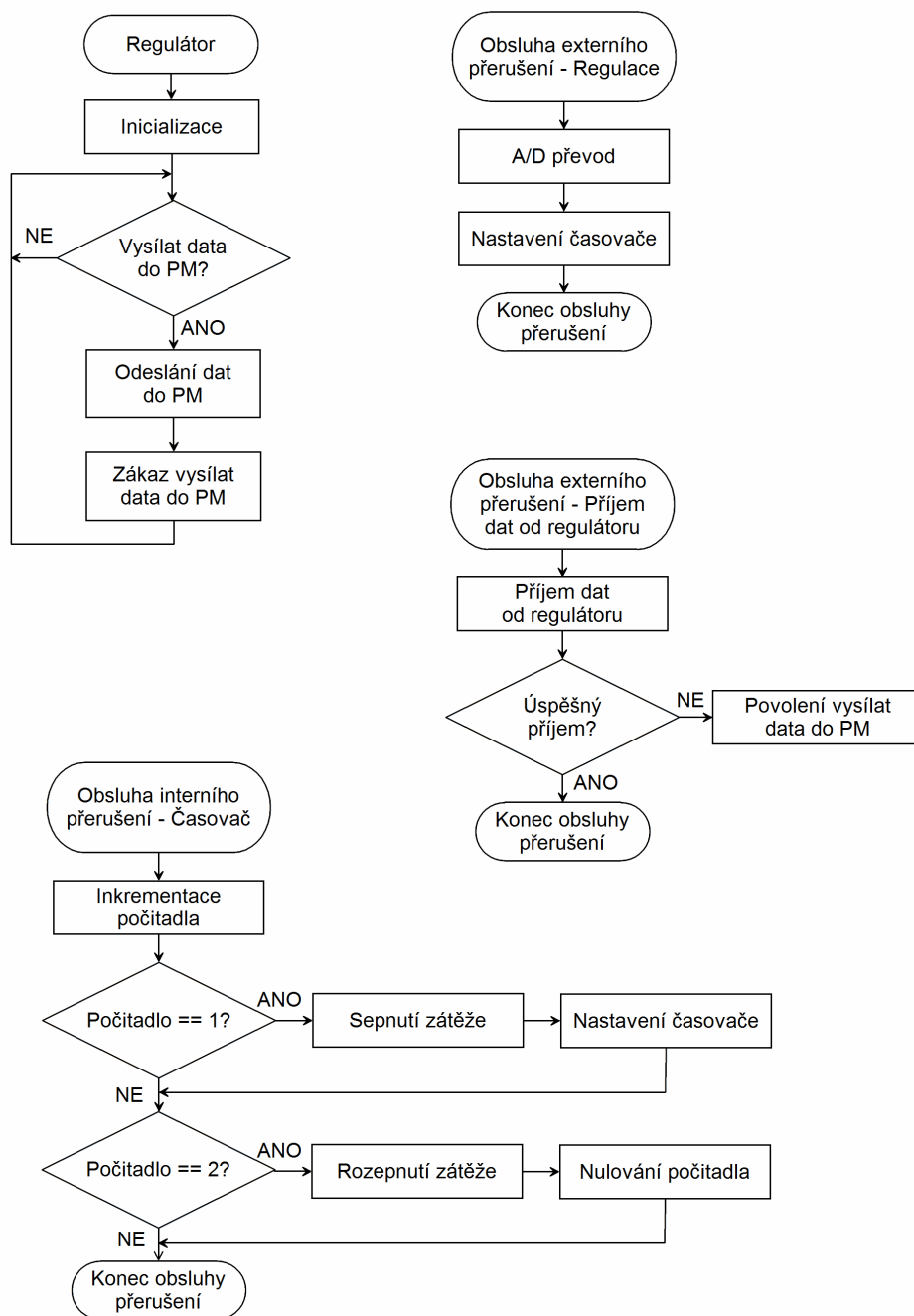
D.1 Vývojový diagram centrálního modulu



D.2 Vývojový diagram podružného modulu



D.3 Vývojový diagram regulátoru

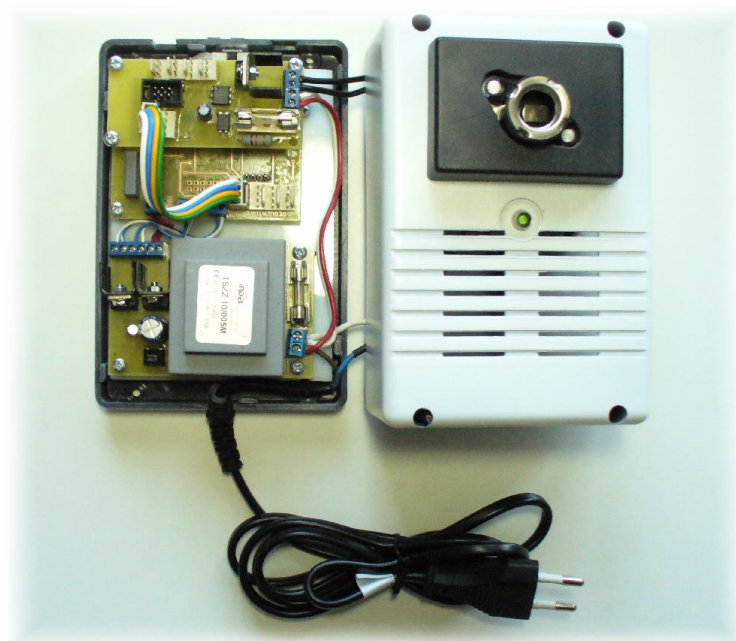


FOTODOKUMENTACE

E.1 Fotodokumentace centrálního modulu



E.2 Fotodokumentace podružného modulu



E.3 Fotodokumentace regulátoru



E.4 Fotodokumentace kompletního systému

