

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Osvětlení ve strojovém vidění

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan GIEBL**

Osobní číslo: **E13B0185P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**

Název tématu: **Osvětlení ve strojovém vidění**

Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte a popište postupy při návrhu osvětlení pro systémy strojového vidění.
2. Detailně popište volbu osvětlovačů pro různé druhy geometrie osvětlení.
3. Vypracujte přehled nabízených osvětlovačů na současném trhu.
4. Navrhněte a realizujte osvětlovač spolupracující s řídicí jednotkou PD3-3024-3-EI (Lighting Solution). Pokuste se o řešení, které bude umožňovat využití pro různé geometrie osvětlení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Radek Holota, Ph.D.

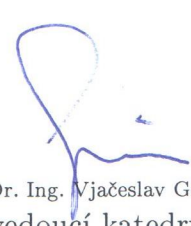
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce, která se zabývá osvětlením ve strojovém vidění, ve svém úvodu popisuje důležitost návrhu osvětlovače pro spolehlivou funkčnost optické inspekce, a to zejména z hlediska interakce světla s testovaným objektem. Praktická část práce je věnována jak návrhu osvětlovače pro různé geometrie osvětlení tak především návrhu a realizaci řídicí jednotky pro osvětlovač. Řídicí jednotka je navrhována pro řízení 48 světel a výkonově dimenzována na proudové zatížení jednoho kanálu 3,6 A. Zahrnuje jednočipový počítač Arduino, budiče PWM, výkonové spínací obvody a ochranu přetížení.

Klíčová slova

Strojové vidění, geometrie osvětlení, návrh osvětlovače ve strojovém vidění, řídicí jednotka osvětlení, budič PCA9635

Abstract

The bachelor thesis deals with lighting in machine vision. In the introduction, there is analyzed the importance of the design of the illuminator for the reliable functionality of the optical inspection, especially for interaction of the light with a test object. The practical part of the thesis describes the design of the illuminator for different lightning techniques and mainly the design and the implementation of the control unit for lightning. The control unit is designed to control 40 lights and the performance of the unit is dimensioned for the current load 3,6 A per channel. The unit includes the microcontroller Arduino, PWM drivers, power switching circuits and the overload protection.

Key words

Machine vision, lighting techniques, design of illuminator in machine vision, control unit for lighting, driver PCA9635

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Jan Giebl

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Radkovi Holotovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce, a také Ing. Jiřímu Stifterovi, Ph.D. za veškerou pomoc během návrhu a testování spínacích obvodů a proudové ochrany.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 STROJOVÉ VIDĚNÍ	11
2 OSVĚTLOVAČ VE STROJOVÉM VIDĚNÍ	12
2.1 ROZDĚLENÍ OSVĚTLOVAČŮ PODLE GEOMETRIE OSVĚTLENÍ	13
2.1.1 Přední osvětlení s jasným obrazovým polem – difuzní.....	14
2.1.2 Přední osvětlení s jasným obrazovým polem - směrové.....	16
2.1.3 Přední osvětlení s temným zorným polem.....	17
2.1.4 Zadní osvětlení	17
2.2 ZDROJE SVĚTLA	18
2.3 VLNOVÉ DÉLKY SVĚTEL.....	19
2.4 POLARIZOVANÉ SVĚTLO.....	20
2.5 ŘÍZENÍ OSVĚTLOVAČŮ	21
2.6 POSTUP PŘI NÁVRHU OSVĚTLENÍ	21
2.6.1 Vlastnosti prostředí	22
2.6.2 Interakce Světla s testovaným objektem	22
3 PŘEHLED OSVĚTLOVAČŮ NA SOUČASNÉM TRHU	23
4 NÁVRH OSVĚTLOVAČE	25
5 NÁVRH ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY	27
5.1 PRVKY ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY	27
5.1.1 Arduino Uno a jeho ovládání.....	27
5.1.2 PWM budič.....	28
5.1.3 Výkonové spínací obvody.....	29
5.1.4 Ostatní prvky.....	29
5.2 NÁVRH VÝKONOVÝCH SPÍNACÍCH OBVODŮ	30
5.2.1 Požadavky na spínací obvody	30
5.2.2 Implementace požadavků.....	31
5.3 NÁVRH PROUDOVÉ OCHRANY	33
5.3.1 Význam rozdílového zesilovače.....	34
5.3.2 Význam použití klopného obvodu JK.....	35
5.4 NÁVRH DPS SE SPÍNACÍMI OBVODY A PROUDOVOU OCHRANOU	36
5.4.1 Návrhová pravidla pro správnou funkčnost zařízení	37
5.4.2 Testování první prototypové desky.....	38
5.4.3 Návrh druhé prototypové desky	39
5.5 NÁVRH A IMPLEMENTACE PROGRAMU	40
5.5.1 Požadovaná funkce programu	40
5.5.2 Použité programátorské prostředky	40
5.5.3 Použité prostředky pro ovládání řídicí jednotky.....	41
5.5.4 Popis funkčnosti programu.....	41
6 ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44
PŘÍLOHY	1

Úvod

Pojem strojové vidění se zabývá automatizovanou inspekcí v průmyslových systémech. Zpravidla je optická inspekce koncipována podle požadavku kontroly a vlastností testovaného objektu. Spolehlivost inspekce určuje především návrh osvětlovače, objektivu, kamery a softwarové analýzy obrazu. Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na problematiku osvětlovačů, u kterých se kladou požadavky zejména na určení vhodné geometrie osvětlení, směrovosti světla, zdroje světla a vlnové délky. V práci jsou také popisovány principy a přehledy nejčastěji užívaných osvětlovačů současnosti.

Praktická část bakalářské práce se věnuje návrhu osvětlovače, který umožňuje využití pro různé geometrie osvětlení. Návrh osvětlovače obsahuje čtyřicet světelných modulů. Požadavkem vedoucího práce je možnost řídit intenzitu každého modulu zvlášť, a tudíž se shledalo jako nevhodné využití řídicí jednotky PD3-3024-3-EI, která umí řídit pouze tři světla. Na základě toho se v praktické části přešlo k návrhu samotné řídicí jednotky.

Hlavním cílem práce je tedy návrh řídicí jednotky. Řízení osvětlovačů ve strojovém vidění je nejčastěji řešeno digitálním způsobem za pomoci pulzně šířkové modulace (dále jen PWM). Návrh tedy zahrnuje výběr vhodného budiče PWM, který umí komunikovat po I2C sběrnici s počítačem Arduino. Největší část práce je věnována návrhu spínacích výkonových obvodů, neboť samotný budič není schopný dodat velký výkon, proudové ochrany a řídicího softwaru. Pro komunikaci s obsluhou bude řídicí jednotka využívat malý LCD displej a tlačítka pro ovládání. Veškeré ovládání bude řešeno softwarově, tlačítka tedy budou připojena na vstupy Arduina. Řídicí jednotka je navrhována tak, aby byla schopná řídit 48 světel.

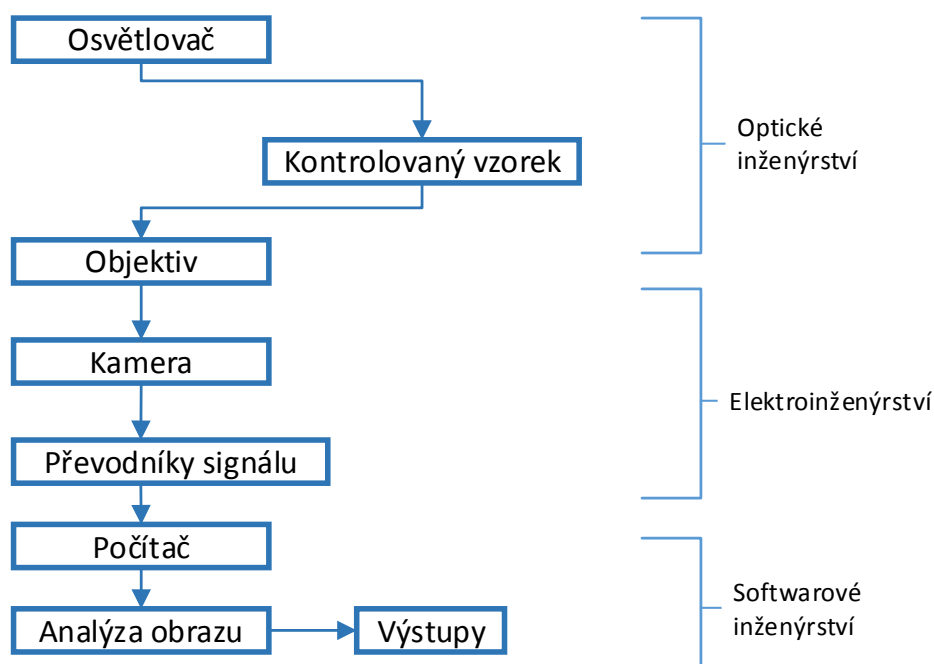
Seznam symbolů a zkratk

A	Amper
B	Značka magnetické indukce, základní jednotkou je tesla [T]
CCD	Charged-Coupled Device
CLK	Clock
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CLR	Clear
DOAL	Directed On Axis Lights
DPS	Deska plošných spojů
E	Značka elektrické intenzity [$V \cdot m^{-1}$]
Hz	Hertz
IDE	Integrated Development Environment
IIC	Inter-Integrated Circuit
IR	Infrared
LED	Light-Emitting Diode
ms	Milisekunda
PLC	Programmable Logic Controller
PRE	Preset
PWM	Pulse Width Modulation
SMD	Surface Mount Device
UV	Ultraviolet
V	Volt
W	Watt
ZP	Zorné pole

1 Strojové vidění

V této kapitole je ve stručnosti popsáno, co v podstatě strojové vidění je, z jakých částí je tvořeno a k čemu se používá.

Již v sedmdesátých letech minulého století technika dovozovala zpracovávat data nesoucí obrazovou informaci. Díky tomu vznikl obor, který se často označoval jako počítačové vidění. Obecně jde o systém, který je schopný na základě dat přijatých z kamery sám vyhodnocovat, kontrolovat a řídit určitý proces. Pro počítačové vidění používané v průmyslové automatizaci se v dnešní době používá název strojové vidění. [5]



Obr. 1.1 Postup zpracování informace ve strojovém vidění

Na obrázku 1.1 je zobrazen obecný postup zpracování informace ve strojovém vidění. Zpravidla je cílem navrhnout tento systém tak, aby byl schopen pořídit věrný obraz vzorku, převést tento obraz do digitální podoby, a poté obraz na základě algoritmu vyhodnotit s takovou spolehlivostí, s jakou by ho zhodnotil člověk. Je zřejmé, že navrhování takového systému je závislé na konkrétním úkolu (např. rozpoznávání vad, rozpoznávání barev, čtení číselných kódů, měření rozměrů atd.) a k tomu, aby vývojář dokončil zadaný cíl, je zapotřebí řešit tyto problémy:

- Výběr vhodného typu snímání kamery: Volí se standardně mezi plošným a řádkovým snímáním.
- Určení zorného pole: Závisí na rozměrech snímaného prvku a na poměru stran snímačů kamery.
- Výpočet potřebného rozlišení kamery: Je založen na velikosti zorného pole, na prostorovém rozlišení a na potřebné přesnosti celého úkolu.
- Výběr kamery s vhodnými síťovými kartami pro komunikaci, hardwarovým provedením a dalšími vlastnostmi.
- Výběr objektivu: Důležitým parametrem pro návrh čočky je vzdálenost od vzorku, velikost zorného pole a typ kamerového čipu. Na základě těchto informací se počítá ohnisková vzdálenost objektivu.
- Výběr osvětlení: Tento návrh závisí na konkrétním záměru strojového vidění, podle kterého se následně volí vhodná geometrie osvětlení, zdroj světla atd. Podrobněji se tímto tématem zabývají další kapitoly.
- Mechanický návrh: Zařízení musí být chráněno proti vibracím a nárazům. V závislosti na výsledné aplikaci by měla být zohledněna možnost polohování kamer a osvětlovačů.
- Elektrický návrh: Navržení napájení, kabeláže.
- Vývoj softwaru: Programování algoritmů pro analýzu pořízených vzorků a pro ovládání celého systému. [1]

Z předešlého textu vyplývá, že aspektů, podle kterých se jednotlivé části strojového vidění navrhují, je mnoho a nelze je jednoduše shrnout do stručných bodů. Vzhledem k tomu, že tato práce je zaměřena především na osvětlovače, tak už ostatní prvky strojového vidění nebudou v následujících kapitolách podrobněji popisovány i přes to, že jsou neméně důležité pro správnou funkčnost systému.

2 Osvětlovač ve strojovém vidění

Je zřejmé, že kvalita a vhodnost osvětlovače je důležitý předpoklad pro vytvoření spolehlivé optické inspekce. Pouze na základě znalostí typů osvětlení, geometrií světla, vlastností optických snímačů a optických vlastností testovaných vzorků lze navrhnout efektivní zdroj světla, který bude schopný splnit 3 důležité vlastnosti.

- Maximalizování kontrastu bodů zájmu konkrétního vzorku
- Minimalizování kontrastu částí, které nejsou předmětem inspekce
- Odolnost vůči rušivým vlivům

V některých aplikacích mohou být splněny pouze první dvě podmínky a výsledek kontroly bude poměrně spolehlivý, ale u některých měření může mít okolní osvit rušivý vliv na výsledný snímek. Na obrázku 2.1 je číselný kód psacího bloku zabalený v celofánu. Fotka vlevo byla pořízena při splnění všech tří podmínek, fotka vpravo pouze při splnění prvních dvou podmínek. V tomto případě světelné odlesky okolního osvitu sice nezakrývají čárový kód, ale na dalším bloku by mohly, čímž by bylo měření znehodnoceno. [2]



Obr. 2.1 Vlevo je vyfocený kód při dodržení všech 3 podmínek, vpravo pouze při dodržení prvních dvou. [2]

Před samotným návrhem osvětlovací soustavy, která bude mít zmiňované tři vlastnosti, je nutné zapátrat po tom, jaké vlivy může mít geometrie osvětlení, vlnová délka světla nebo použitý zdroj světla na celý systém.

2.1 Rozdělení osvětlovačů podle geometrie osvětlení

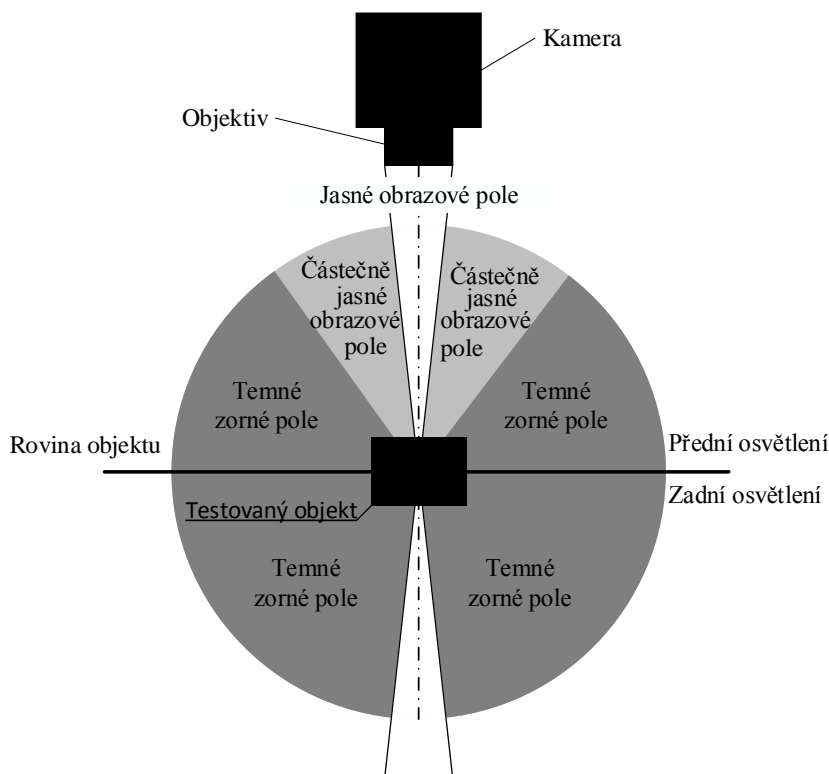
Geometrie osvětlení by se daly rozdělit do 3 hlavních kategorií, kterými jsou:

- Přední osvětlení s jasným obrazovým polem
- Přední osvětlení s temným zorným polem
- Zadní osvětlení

Na obr. 2.2 jsou vyobrazeny geometrie osvětlení. Kromě těchto tří rozdělení je geometrie dána i složením svazku světla. Paprsky světla mohou být difuzní, v tom případě je světlo

rozptýlené do všech směrů, nebo směrové, což znamená, že se paprsky od zdroje šíří rovnoběžně jedním směrem.

Obecně platí, že směrové světlo zvyšuje kontrasty způsobené členitostí a strukturou povrchu objektu, zatímco difuzní světlo tyto kontrasty zmenšuje a zvýrazňuje kontrast způsobený absorpcí. [6]



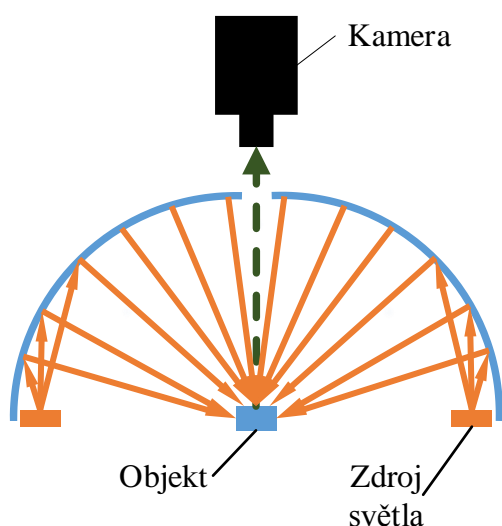
Obr. 2.2 Rozdělení geometrií osvětlení

Speciálním typem směrového světla je telecentrické nebo také kolimované osvětlení, které má silný směrový charakter. Toho je docíleno uspořádáním světelného zdroje, kdy je paprsek emitován LED diodou, následuje průchod světla přes aperturní clonu a dále jsou paprsky paralelně směřovány přes optický systém v přední části zdroje. V kombinaci tohoto světla s telecentrickým objektivem nedochází k perspektivnímu zkreslení. [1]

2.1.1 Přední osvětlení s jasným obrazovým polem – difuzní

Kopulové osvětlovače, někdy také označované jako „bezstínové“ (shadowless) osvětlovače, jsou velmi účinné při osvětlení zakřivených reflexních ploch. Konstrukce je řešena tak, aby světlo z osvětlovače emitovalo v celém prostoru objektu, a díky tomu je

osvětlen členitý povrch ze všech stran a nevytváří se tedy žádný stín. Dále se tyto osvětlovače vyznačují otvorem pro kameru, a tudíž se v ose snímáče kamery neemituje žádný světelný paprsek, a proto se „bezstínové“ osvětlovače používají právě k osvětlení reflexních ploch, aby díky odrazivosti materiálu byly i tyto body částečně osvětleny. Kopulový osvětlovač se může použít například pro čtení nápisu na zmačkané lesklé fólii. Na obr. 2.3 je zobrazeno principiální schéma osvětlovače a na obr. 2.4 je fotka osvětlovače. [1, 6]

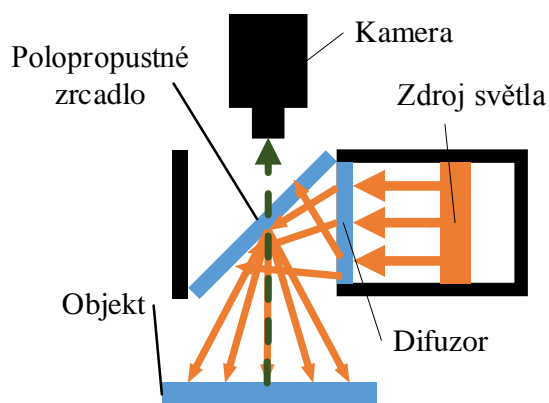


Obr. 2.3 Schéma kopulového osvětlovače



Obr. 2.4 Kopulový osvětlovač [8]

Rozptýlená koaxiální directed on axis lights světla (dále jen DOAL světla), viz obr. 2.6 využívají konstrukce s polopropustným zrcadlem, díky které může světlo dopadat rovnoměrně z plochy nad objektem, a to i z míst přímo před objektivem kamery. Oproti kopulovému osvětlovači ale nedochází k rozptylu světla v celém prostoru objektu, ale pouze v jeho rovině, a proto není vhodný k osvětlování členitých povrchů, ale používá se spíše k osvětlení rovných, jemně strukturovaných povrchů, nebo reflexních povrchů. Schéma koaxiálního osvětlovače je na Obr. 2.5. [1, 6]



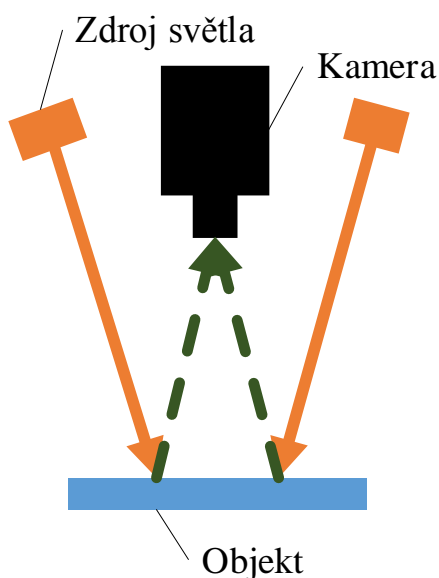
Obr. 2.5 Schéma DOAL osvětlovače



Obr. 2.6 DOAL osvětlovač [8]

2.1.2 Přední osvětlení s jasným obrazovým polem - směrové

Směrové osvětlovače s jasným obrazovým polem jsou nejčastěji používanými zdroji světla jak v technice, tak v běžném životě. Tento typ geometrie je specifický v tom, že je směrový a světlo je nejčastěji vyzařováno z bodového zdroje. Patří sem ale celá řada dalších osvětlovačů, například kruhové, telocentrické, plošné viz Obr. 2.8 a další. Právě díky směrovému charakteru lze tuto geometrii využít k vytváření kontrastu a ke zvýraznění detailů objektu. Je méně účinná, ale vhodná k osvětlení odrazových ploch. Principiální schéma předního směrového osvětlení je na obr. 2.7 [4]



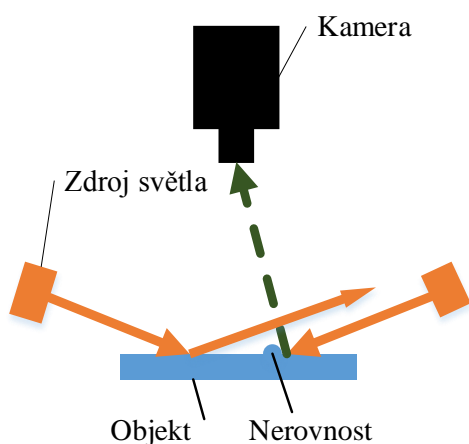
Obr. 2.7 Schéma předního směrového osvětlení



Obr. 2.8 Plošné osvětlovací pole [8]

2.1.3 Přední osvětlení s temným zorným polem

Temné zorné pole se vytvoří tak, že osvětlovač svítí na objekt z takového úhlu, při kterém nedochází k přímému odrazu světla do snímače kamery. Perfektně rovný povrch se jeví jako tmavý a pouze vyvýšeniny nebo vrypy odrážejí světlo jiným směrem. V těchto místech je pořízený obraz světlejší. Tato technika je citlivá na prachové částice a špínu, které působí rušivě, protože reagují na světlo podobně jako nerovnosti povrchu. Je důležité, aby byl tento osvětlovač umístěn co nejbližší k objektu, neboť s rostoucí vzdáleností se snižuje využívaný efekt rozptylování světla. Tato geometrie se využívá například pro zvýraznění strukturálních vad, kontur, tvarů, nebo hran. Zdrojem světla může být plošný, či kruhový osvětlovač, který svítí do středu. Principiální schéma osvětlovače s temným ZP je na Obr. 2. 9. Kruhový osvětlovač s temným ZP je na Obr. 2.10. [1]



Obr. 2.9 schéma osvětlovače s temným ZP

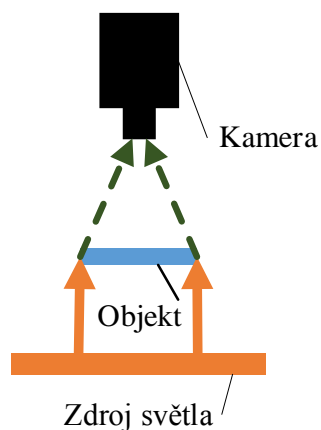


Obr. 2.10 Kruhový osvětlovač s temným ZP [8]

2.1.4 Zadní osvětlení

Zadní osvětlovače, jak už z názvu vyplývá, svítí do zadní části objektu a mohou se dělit taktéž na rozptýlené, směrové, nebo na osvětlovače s jasným či temným zorným polem. V zásadě ale nejsou kladeny zvláštní požadavky na orientaci osvětlení, pouze vzdálenost osvětlovače od objektu by měla být větší než je hloubka ostrosti objektivu. Principiální schéma zadního osvětlení je na obr. 2.11. [1]

Nejčastěji se používají rozptýlené osvětlovače, které jsou vhodné pro kontrolu tvaru, kontur a počtu objektů. Méně často se používají směrové osvětlovače vhodné například ke kontrole umístění součásti v průhledném pouzdru. [6]



Obr. 2.11 Schéma zadního osvětlení

2.2 Zdroje světla

Typicky se ve strojovém vidění používají tyto světelné zdroje:

- Zářivky
- Halogenidové výbojky
- LED
- Rtuťové výbojky
- Xenony
- Vysokotlaké sodíkové výbojky

Zářivky, halogenidové výbojky a LED světla se používají především pro systémy se základní až střední náročností kontroly, zatímco rtuťové výbojky, xenonové výbojky a vysokotlaké sodíkové výbojky se používají pro systémy s náročnou kontrolou nebo pro aplikace, ve kterých je zapotřebí velmi jasný zdroj světla.

Jas zdroje ale není jediným důležitým faktorem. Důležitý je i spektrální obsah světla. Běžně používané kamery využívají senzory typu CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) nebo CCD (Charge-Coupled Device). Každá tato technologie je jinak citlivá na různé vlnové délky. Kvalitní kamery mají ve své dokumentaci zobrazenou spektrální závislost citlivosti na vlnové délce světla. Tato závislost by také měla pomoci při výběru konkrétního osvětlení. [2]

Dříve byly nejpoužívanějšími zdroji zářivky a halogenidové výbojky, neboť mají bezesporu větší intenzitu světla než LED zdroje. V dnešní době se ale stále více prosazuje

LED technologie, která se zlepšila v intenzitě, stabilitě i v ceně, navíc díky malým rozměrům jedné diody lze sestavit světlo různých tvarů a velikostí a vzhledem k velké dynamice lze zajistit snadné řízení světla [7], čehož se právě u osvětlovačů ve strojovém vidění využívá. Také situace na trhu tomu odpovídá. Prakticky všechny společnosti zmíněné v kapitole 3 dodávají osvětlovače s LED zdroji.

2.3 Vlnové délky světla

Obrazový snímač kamery a lidské oko mají odlišné vnímání světla. Zatímco lidské oko vnímá vlnové délky v rozmezí 380 až 770 nm a citlivost na konkrétní barvy je popsána křivkou normálního fotometrického pozorovatele tzv. křivkou $V(\lambda)$ [7], tak strojové vidění má rozdílnou spektrální citlivost a je schopné vnímat vlnové délky v rozmezí 380 až 1100 nm. Zahrnuje tedy i krátkovlnnou infračervenou oblast. Při použití speciálních fluorescenčních vrstev může být kamerový snímač citlivý i na kratší vlnové délky, pak obsahuje i ultrafialovou oblast. [1] Jinými slovy strojové vidění vnímá barvy s rozdílnou citlivostí než člověk, a je schopné snímat i infračervené (dále jen IR), či ultrafialové (dále jen UV) záření, což může být v některých aplikacích využito.

Standardně se použité vlnové délky dělí na:

- Viditelné světlo – monochromatické
- Viditelné světlo - bílé
- IR záření
- UV záření

Při použití monochromatického světla může vyzařovaná barva v interakci s testovaným objektem vytvořit ideální, nebo naopak nepoužitelné prostředí pro snímání obrazu. Například pokud testovaným vzorkem bude bílý objekt s červeným nápisem a cílem inspekce bude kontrola tohoto nápisu, tak jakou barvu zvolit ke zvýšení kontrastu středu zájmu? Podle teorie barev existuje tzv. kruh barev, který je znázorněn na obr. 2.12. Barvy, které leží v tomto kruhu proti sobě, jsou barvami komplementárními. Největšího kontrastu se dosáhne právě kombinací těchto doplňkových barev. Z toho vyplývá, že ke zvýraznění červeného nápisu je nejvhodnější použít osvětlovač, který svítí zeleně, protože dojde k absorpci barvy. [1, 3]



Obr. 2.12 Kruh barev

Naopak bílé světlo, které obsahuje všechny viditelné vlnové délky, se hodí spíše ke snímání vícebarevného vzorku, aby nemohlo dojít v důsledku osvětlení stejnou barvou k úplnému odražení světla.

Při použití IR záření je nutné opustit klasické fotometrické veličiny, které popisují vyzařování elektromagnetického záření v optickém pásmu, a přejít na radiometrické veličiny. IR záření se může použít tam, kde by při osvětlení viditelným světlem docházelo k rušení pracovníka, nebo je možné v kombinaci s infračerveným filtrem potlačit vlivy okolního rušivého světla. [1]

Na druhé straně viditelného spektra se pod hranicí 380 nm vyskytuje ultrafialová oblast záření. Ve strojovém vidění se používají standardně dvě techniky pro použití UV světla. Přímé UV osvětlení v kombinaci s kamerou citlivou na ultrafialovou oblast a UV osvětlení použité v kombinaci s objektem, který vykazuje fluorescenční vlastnosti. V prvním případě je zapotřebí mít kameru, která má senzor s fluorescenční vrstvou. Tato vrstva převede UV záření do viditelného spektra. Nevýhoda těchto čidel spočívá v rychlém stárnutí a vysoké ceně. Na druhé straně je výhodné použití UV světla v kombinaci s fluoreskujícím vzorkem. Díky této vlastnosti dochází rovnou k převodu světla do viditelné oblasti a není zapotřebí speciálního kamerového snímače. [1]

2.4 Polarizované světlo

Pro pochopení účinků polarizace je důležité si uvědomit, že světlo je elektromagnetické vlnění popsané vektorem elektrické intenzity \mathbf{E} a vektorem magnetické indukce \mathbf{B} . Tyto

vektory jsou na sebe kolmé a jsou kolmé i na směr, kterým se vlnění šíří. Jedná-li se o světlo nepolarizované, tedy světlo běžně používané, mění vektory **E** a **B** velikost i směr, ale musí být zachována vzájemná kolmost. Jedná-li se o světlo polarizované, mění se pouze velikost vektorů. [9]

Ve strojovém vidění se používají dva typy aplikací polarizace. Jedná se o potlačení odrazů od objektů s použitím jednoho polarizačního filtru před objektivem kamery nebo použití polarizačního filtru před objektivem i před osvětlovačem. Je možné takto zabránit například rušivým odrazům. Dokonce je polarizované světlo schopné zobrazit pnutí v průhledném materiálu díky křížové polarizaci viz obr 2.13 a 2.14. [1, 3]



Obr. 2.13 Průhledný plastový držák na plechovky při použití červeného zadního světla [3]



Obr. 2.14 Průhledný plastový držák na plechovky při použití polarizovaného světla [3]

2.5 Řízení osvětlovačů

Řízení osvětlovačů se využívá, pokud je potřeba používat světlo ke krátkým externě synchronizovaným osvitům, či je vyžadováno řízení intenzity, nebo když je nutné jedno světlo zhasnout a jiné rozsvítit. Řídící jednotka by měla mít digitální vstupy, které lze propojit s výstupy světel a kamer. Toto propojení umožňuje synchronizaci snímku se světlem. Řídící jednotky mohou být zabudované v kameře, externí nebo je možné používat řízení z programovatelného logického automatu (dále jen PLC). [1, 6]

2.6 Postup při návrhu osvětlení

Nyní nic nebrání tomu nastínit si postup návrhu osvětlovače, který bude mít ideálně všechny tři vlastnosti zmiňované na začátku kapitoly 2. Nejprve je nutné prozkoumat základní rysy prostředí, ve kterém bude inspekce probíhat, a také vzájemné působení

vzorku a světla. Teprve na základě této analýzy je možné dopracovat se k optimální osvětlovací soustavě. [3]

2.6.1 Vlastnosti prostředí

Strojové vidění je v podstatě počítačové vidění používané v průmyslu, a proto je zřejmé, že podmínky, při kterých bude kontrola probíhat, jsou značně závislé na zakomponování tohoto systému do výrobního procesu. Běžně je tedy žádoucí, aby inspekce probíhala cestou od jedné linky ke druhé, ideálně tak, aby nedošlo ke zpoždění výroby. Může tak být negativně ovlivněn výběr účinných řešení, protože tím dochází k omezení typů osvětlení, geometrií, vzdáleností atd. [3]

Vlastnosti prostředí ovlivňuje i osvit okolním světlem, nejčastěji umělým osvětlením továrny, či denním světlem. V podstatě se těmito rušivým zdrojům dá bránit třemi způsoby. Nejefektivnější je tyto vlivy plně odstínit. To ale bývá často nemožné, právě kvůli technickým nárokům výroby. Dalším způsobem může být použití osvětlovače o řádově vyšším osvitu, než osvětlovače parazitní. Potřebný světelný tok je však vysoký, z čehož vyplývá, že je vysoký i potřebný elektrický příkon světla. Proto se často osvětlovač zapíná jen po dobu expozice. Tento způsob však může být nepříjemný pro pracovníky. Třetím způsobem je použití světelného filtru, který propustí úzké pásmo vlnových délek, čehož lze využít v kombinaci s monochromatickým světlem.

Další nežádoucí vlastností je prašnost prostředí. Prach se poté usazuje na vzorku, na osvětlovači, či na objektivu kamery a může tak docházet k chybám měření. Je nutné zajistit pravidelné čištění prostoru kontroly. [3, 6]

2.6.2 Interakce Světla s testovaným objektem

Při analýze snímaného vzorku je důležité si ujasnit, co konkrétně bude předmětem kontroly, aby na základě toho mohlo dojít k určení důležitých vlastností testovaného objektu. To, jakým způsobem bude povrch vzorku reagovat na dopadající světlo, je ovlivněno mnoha faktory, například hrubostí povrchu, členitostí, odrazivostí, absorpcí, tvarem, barvou, nebo materiálem. Požadavkem je, aby odražené světlo poskytlo kameře obraz, který maximalizuje kontrast bodů zájmu. Návrhář poté musí být schopen vybrat typ

světla, geometrii a zajistit vhodné řízení osvětlení. Konkrétními vlastnostmi osvětlovačů se zabývaly předešlé kapitoly. [3]

Závěrem je důležité si uvědomit, že výsledný návrh je mnohdy kompromisem mezi tím, co je pro danou aplikaci nejlepší a tím čeho je možné v provozu dosáhnout. Platí však, že čím lépe se připraví prostředí pro snímání vzorku, tím méně práce bude s následným softwarovým návrhem kontroly. [4]

3 Přehled osvětlovačů na současném trhu

Na trhu je celá řada společností, které se zabývají strojovým viděním jako celkem. Nabízejí tedy osvětlovače, kamery, objektivy, software, komunikační karty a další potřebné komponenty pro automatizovanou kontrolu. Vzhledem k tomu, že cílovým zákazníkem těchto společností není obyčejný spotřebitel, ale spíše podnik, je v internetových obchodech cena komponentů veřejná pouze obchodním partnerům, nikoliv obyčejným návštěvníkům webu. Jistě by bylo zajímavé porovnání například cenových relací konkrétních typů osvětlení, ale bohužel to není z těchto důvodů možné, a proto se tato kapitola bude zabývat přehledem nabízených osvětlovačů některých společností působících na českém trhu, konkrétně se jedná o Ate system, Abbas, Elcom, Workswell, Smartview.

Standardně se v nabídce dodavatelů uplatňuje následné rozdělení světél. V závorce jsou uvedené v milimetrech maximální rozměry aktivních ploch.

- Plošné (1600 x 1200)
- Liniové/řádkové (40 x 980)
- Kruhové/prstencové (průměr 160)
- Kopulové (průměr 210)
- DOAL (100 x 100)
- Osvětlovače s temným ZP (průměr 150)
- Telecentrické (průměr 300)

Hlavními rysy osvětlovačů ve strojovém vidění jsou následující specifikace.

- Použitý zdroj světla - dnes většinou LED technologie.
- Napájecí napětí 24 V.
- Příkon - řádově jednotky až desítky wattů, v závislosti na rozměrech světla.
- Varianty osvětlovačů - kontinuální, pulzní, nebo zábleskové světlo.
- Možnosti digitálního řízení - napěťové úrovně pro sepnutí se pohybují ve velkém rozsahu, například 3 – 30 V, a to z toho důvodu, aby se mohlo používat jak TTL (transistor transistor logic) napěťové rozhodování běžných mikrokontrolerů, kde logická „1“ je v rozmezí 2 až 5 V, tak PLC napěťové úrovně, kde logická „1“ může být více než 12 V.
- Některé modely mají navíc i možnosti analogového řízení - většinou v rozsahu 0 - 10 V.
- Rozsahy okolních teplot – od -20 až do +55 °C.
- Volba z několika vlnových délek osvětlovače – zelená, modrá, červená, bílá, IR a UV. Výrobce u každé barvy uvádí dominantní vlnovou délku světla. Vyzařování v IR oblasti bývá poměrně běžné, a to s maximální vlnovou délkou 950 nm. Osvětlovače s UV zářením se na trhu příliš nevyskytují. Pokud jsou v nabídce, tak o vlnové délce kolem 365 nm.

K osvětlovačům se dají dokoupit další doplňky. Difuzní skla s různou propustností či polarizační filtry. U některých typů kruhových/prstencových světel je možné nastavit čočky do různých poloh podle vyzařovaného úhlu, což je výhodou při použití světla na různé vzdálenosti.

Společnosti mají v nabídce i speciální modifikace světel. Zde je výčet některých z nich.

- Speciální konzola čtvercového tvaru pro uchycení 4 liniových světel – toto zařízení je možné použít jako osvětlení s přímým či s temným ZP.
- Telecentrický set s koaxiálním osvětlením - do koaxiálního osvětlovače z boční strany svítí kolimované světlo, jehož paprsky se lámou pod pravým úhlem směrem k testovanému vzorku. Pokud je povrch objektu dokonale rovný, tak se paprsky odrazí a projdou do telecentrického objektivu, který je umístěn v horní části koaxiální jednotky. Sestava je tedy vhodná pro přesnou kontrolu rovnosti povrchu.

- Kopulové osvětlovače v kombinaci s koaxiálním osvětlením - tyto osvětlovače vhodně spojují vlastnosti obou světél a jsou určeny pro osvětlování vysoce reflexních ploch.
- Osvětlovací set pro oboustrannou kontrolu součástek - tato sada je určena ke kontrole dílů v jedné ose, kdy je třeba osvětlit a pořídit obraz obou stran rychle se pohybujících objektů. Typické použití může být například při kontrole elektronických součástek.
- Voděodolná světla - nacházejí využití v prostorech s velkou vlhkostí.

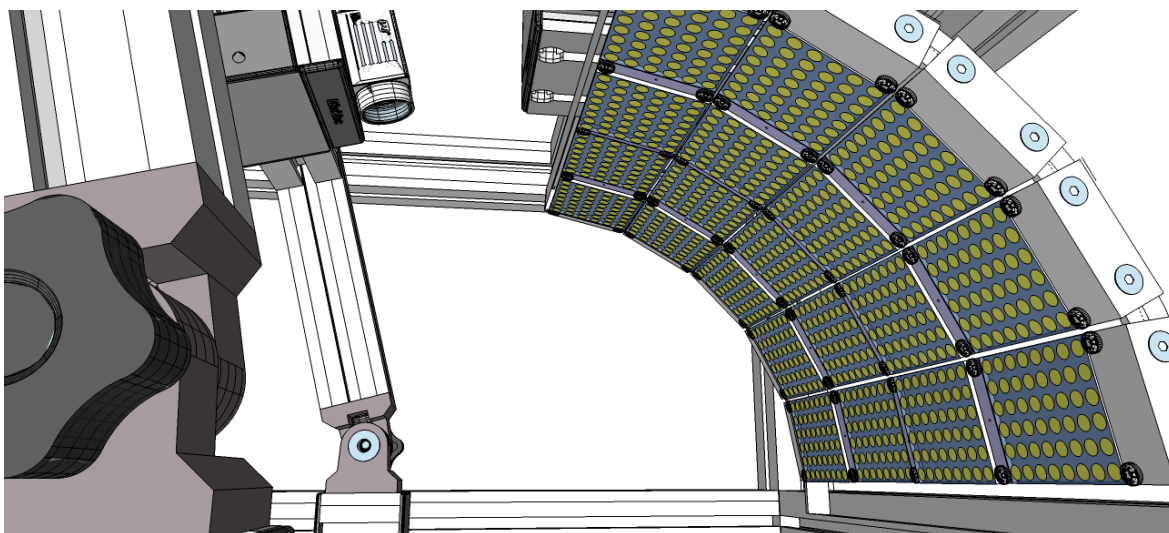
4 Návrh osvětlovače

Jedním z cílů bakalářské práce bylo vytvořit návrh osvětlovače spolupracujícího s řídicí jednotkou PD3-3024-3-EI, a následně tento návrh realizovat. Osvětlovač by měl být využitelný pro různé geometrie osvětlení, a měl by být schopný fungovat jako kontinuální či pulzní světlo řízené a napájené právě z této řídicí jednotky. Řídicí jednotka PD3-3024-3-EI má tyto specifikace.

- Možnost ovládat tři různá světla pomocí digitálních PWM (pulse width modulation) výstupů o frekvenci 125 kHz.
- Intenzitu světla lze řídit buď tlačítky na čelním panelu, nebo externě přes Ethernet.
- Výstupní napětí 24 V.
- Celkový dodaný příkon 28 W. [12]

Na začátku akademického roku 2015/2016 ale přišly ze strany vedoucího práce jiné požadavky na osvětlovač. Tyto změny byly ovlivněny spoluprací katedry aplikované elektroniky se společností GZ Media, a proto bylo rozhodnuto, že by osvětlovač mohl sloužit mimo jiné k osvětlování gramofonových desek, a tak byly při návrhu konstrukce zohledněny rozměry gramofonové desky. Jako zdroj světla je od začátku k dispozici 20 LED destiček s napájením 12 V, příkonem 3,2 W, světelným tokem 200 lumenů a s rozměry 74 x 51 mm. Rozhodlo se tedy, že se využijí všechny LED destičky a nastavitelnost různé geometrie osvětlení nebude řešena natáčením světél proti kameře, ale bude vyřešena tak, že světla budou umístěna pevně a vždy se podle požadavku na geometrii rozsvítí pouze určitá část světél. Takovéto uspořádání světél je zobrazeno na obr.

4.1. Z obrázku je patrné, že pokud je požadováno jasné ZP, rozsvítí se horní řada světel, pokud je naopak požadováno temné ZP, rozsvítí se spodní řada světel.



Obr 4.1 Detail osvětlovače

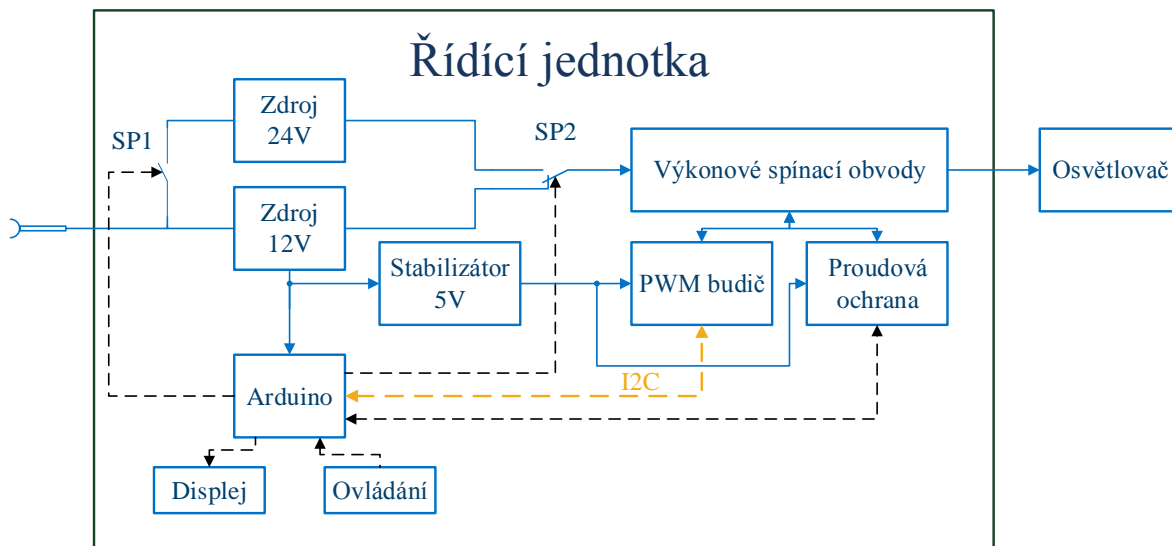
Celkem tedy návrh osvětlení zahrnuje pět řad světel a v každé řadě jsou umístěny čtyři LED destičky. Na LED destičkách je možné v zadní části v určitém místě přerušit zemní spoj a destička poté může posloužit jako dva nezávisle řízené zdroje světla. Ve výsledku lze tedy dosáhnout situace, kdy je tento osvětlovač sestaven ne z 20, ale ze 40 světelných modulů. Tuto velkou škálovatelnost osvětlovače bohužel nepodporuje řídicí jednotka PD3-3024-3-EI, která má pouze 3 nezávislé PWM výstupy.

Při návrhu konstrukce se uvažovalo s použitím hliníkových profilů firmy MiniTec Framing Systems. [13] Modely profilů jsou použité v 3D nákresu. Pro splnění požadavků na geometrii osvětlení je postačující statické umístění kamery. V nákresu je ale naznačený i možný pohyb této kamery po kružnici pro jiný zorný úhel snímače. 3D nákres celého osvětlovače je zobrazen v příloze A a na přiloženém CD.

Protože je v zájmu vedoucího práce vytvořit osvětlovač s velmi pružným nastavením světel, rozhodlo se ustoupit od vlastní konstrukce osvětlovače a zaměřit se na vývoj nové řídicí jednotky. Původně uvažovaná řídicí jednotka PD3-3024-3-EI, která má tři nastavitelné výstupy není dostačující. Nová řídicí jednotka by měla být schopná řídit všech 40 světelných modulů, ze kterých je složen navržený osvětlovač. Vlastní realizace osvětlovacího stanoviště tak nakonec bude tématem navazující diplomové práce.

5 Návrh řídicí jednotky

Hlavním cílem řídicí jednotky je napájet a řídit LED světla zmiňovaná v předešlé kapitole. Nicméně během návrhu byl kladen velký důraz na univerzálnost celého zařízení a to tak, aby jednotlivé výstupy byly schopné dodat i vyšší výkony, dala se měnit intenzita osvětlení, mohlo být připojeno světlo s napájením 12 nebo 24 voltů, a také aby byly obvody chráněny proti zkratům. Na obr. 5.1 je zobrazeno blokové schéma zařízení.



Obr. 5.1 Blokové schéma vlastní řídicí jednotky

5.1 Prvky řídicí jednotky

5.1.1 Arduino Uno a jeho ovládání

Počítačem, který celé zařízení řídí, je Arduino Uno. Toto Arduino má následující specifikace.

- Mikroprocesor ATmega328P.
- Frekvence procesoru 16 MHz.
- Provozní napětí 5 V.
- Napájecí napětí 7 – 12V.
- 14 digitálních vstupních/výstupních pinů, z nichž 6 umí generovat PWM.
- 6 analogových vstupů.
- Možnost komunikace s jinými zařízeními přes IIC (Inter-Integrated Circuit) sběrnici, taktéž nazývané I2C sběrnici, nebo SPI (Serial Peripheral Interface) sběrnici.

Z výčtu je patrné, že Arduino je schopné generovat PWM, tudíž by mohlo také posloužit jako řídicí prvek pro osvětlení, ale obsahuje pouze 6 PWM výstupů, což je pořád nedostatečný počet. Arduino tedy není využito k přímému řízení světla, místo toho využívá schopnost sériové komunikace po I2C sběrnici, přes kterou posílá příkazy jiným zařízením, které jsou určeny ke generaci PWM a mají více výstupních pinů.

Digitální piny jsou obousměrné, mohou tedy sloužit jako vstupy či výstupy. Na osmi vstupech jsou připojena tlačítka nebo přepínače, kterými lze řídicí jednotku ovládat. Šest výstupních pinů je použito pro práci s LCD displejem. Návrhem softwaru řídicí jednotky se zabývá kapitola 5.5. [10]

5.1.2 PWM budič

Jako vhodný prvek pro řízení světel byl vybrán budič PWM PCA9635, který má následující vlastnosti.

- Napájecí napětí 2,3 – 5,5 V.
- 16 PWM digitálních výstupů.
- Frekvence generátoru 97 kHz.
- 8 bitové řízení.
- Komunikace po I2C sběrnici.

Očekává se, že řídicí jednotka bude schopná řídit celkem až 40 světel. PCA9635 umí řídit 16 světel, bude tedy zapotřebí použít 3 budiče. Řídicí instrukce vysílá Arduino po I2C sběrnici. V této topologii může být vysílač označen jako MASTER. I2C komunikace je dvou vodičová. Po vodiči SDA (synchronous data) se vysílají data a po vodiči SCL (synchronous clock) jsou vysílány synchronizační pulzy. Vodiče jsou přivedeny ke třem budičům PWM, tyto zařízení mohou být označeny jako SLAVE. Topologie, ve které je právě jeden vysílací prvek a několik přijímacích prvků, je nazývána monomaster. Jak ale SLAVE rozpozná, že vysílaná data jsou adresována právě jemu? Pokud se MASTER snaží zahájit komunikaci, musí nejprve vyslat 8 adresačních bitů. Každý SLAVE musí mít unikátní adresu, která je nastavena hardwarově, proto je u PCA9635 vyvedeno z pouzdra 7 adresových pinů. Adresové piny se propojí buď s napájením 5V (logická „1“), nebo se zemí (logická „0“). Výslednému zapojení pinů odpovídá určitá adresa. Během zahajování komunikace je ale vysláno celkem 8 bitů. Prvních 7 bitů je tedy adresových

a poslední bit je takzvaný read/write bit, který určuje, zda chce MASTER data zapisovat nebo číst. [11, 14]

Intenzita osvětlení je nastavována různou střídou PWM. Zjednodušeně řečeno jde o to, že se mění poměr času, kdy je digitální výstup v logické „1“ oproti času, kdy je digitální výstup v logické „0“. Pokud se tyto časy budou střídát velmi rychle, tak se díky nedokonalostem lidského zraku jeví různý poměr časů jako různá hodnota intenzity světla. Ve skutečnosti ale LED blikají, pouze oko to není schopné zaregistrovat díky své setrvačnosti. Lidskému oku postačí poměrně malé frekvence, aby si mozek myslel, že je pozorován kontinuální obraz. V aplikacích strojového vidění je ale pozorovatelem kamera nikoliv člověk. Kamery jsou schopné pořídít řádově i stovky snímků za sekundu, což je nutné při volbě frekvence zohlednit. Proto byl zvolen budič s poměrně vysokou frekvencí 97 kHz, tak aby se běžně používaným kamerám ve strojovém vidění toto rychlé blikání jevílo jako kontinuální svit. Zde se nabízí porovnání s tovární řídicí jednotkou PD3-3024-3-EI, která má frekvenci 125 kHz. [15]

Přivedené napájení musí být v rozmezí 2,3 až 5,5 V. Vzhledem k tomu, že Arduino funguje na 5V logice, tak je i budič napájen z 5V stabilizátoru napětí tak, aby všechny řídicí pulzy byly kompatibilní, viz obr. 5.1.

5.1.3 Výkonové spínací obvody

Budič PWM PCA9635 je schopný na každém výstupu dodat maximálně 25 mA, což postačí na rozsvícení několik LED diod. Není ovšem schopný dodat výkon pro rozsvícení celého světla, a proto se běžně tento problém řeší externími spínacími obvody. Tato práce se zabývá podrobnějším návrhem externích spínacích obvodů v kapitole 5.2.

5.1.4 Ostatní prvky

Z obr. 5.1 je patrné, že řídicí jednotka je schopná napájet světla 12 voltovým nebo 24 voltovým zdrojem. Přepínání mezi zdroji je v blokovém schématu naznačeno spínačem SP2. Pro napájení vnitřních částí slouží pouze 12 V zdroj, neboť na Arduino je možné přivést maximálně 12 V, a na stabilizátoru by při přivedení 24 V bylo nutné chladit velký ztrátový výkon. 12 V zdroj je tedy připojen permanentně, zatímco 24 V zdroj nemusí být připojen vůbec, pokud není využíván. K odpojení tohoto zdroje se používá spínač SP1.

SP1 a SP2 jsou reléové spínače řízené Arduinem. Kompletní schéma zapojení je v příloze B.

Poslední a neméně důležitý prvek schématu je proudová ochrana, která má za úkol odpojit drivery při zkratování výstupních pinů či při překročení určité hranice odebíraného proudu. Návrhem proudové ochrany se podrobněji zabývá kapitola 5.3.

5.2 Návrh výkonových spínacích obvodů

5.2.1 Požadavky na spínací obvody

V předchozím textu již bylo zmíněno, že budič PWM PCA9635 musí být výkonově posílen, pokud má na jeden výstup dodat výkon větší než 125 mW. Navíc má PCA9635 na svém výstupu napětí 5 V, zatímco požadavkem je 12 V nebo 24 V. Jako vhodné řešení se nabízí použít tranzistorový zesilovač ve třídě D, který je impulzně regulovaný. Tyto zesilovače nemají pracovní bod, přechází velmi rychle ze stavu zcela zavřeného do plně otevřeného, a proto na tranzistoru nevznikají velké ztráty. Díky tomu mají zesilovače třídy D účinnost řádově 90 % až 95 %. Na obrázku 5.2 je zobrazeno blokové schéma tohoto zesilovače. Filtr, který následuje za koncovým stupněm, je prvek, který převede pulzní signál na střední hodnotu, v našem případě je filtrem i spotřebičem LED světlo. [19]



Obr.5.2 Blokové schéma zesilovače ve třídě D

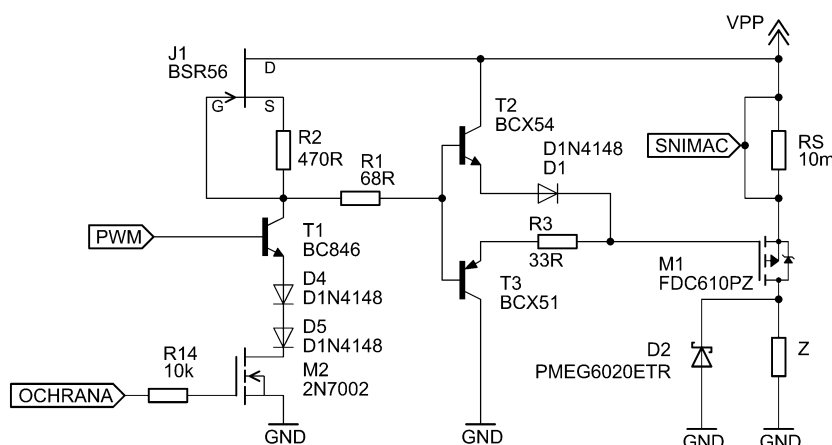
V první řadě je důležitý výběr vhodného výkonového tranzistoru koncového stupně, na který jsou kladeny tyto požadavky.

- Nízký odpor přechodu drain – source (dále jen r_{DS}) v plně otevřeném stavu.
- Maximální možný přenesený výkon drain – source.
- Nízké vstupní kapacity.
- Velká povolená výkonová ztráta.

5.2.2 Implementace požadavků

Jako vhodný tranzistor se jeví P kanálový MOSFET (metal oxide semiconductors field effect transistor) FDC610PZ. Dynamické ztráty tranzistoru jsou tím vyšší, čím je delší doba přeběhu, je tedy žádoucí, aby byla doba spínání co nejkratší.

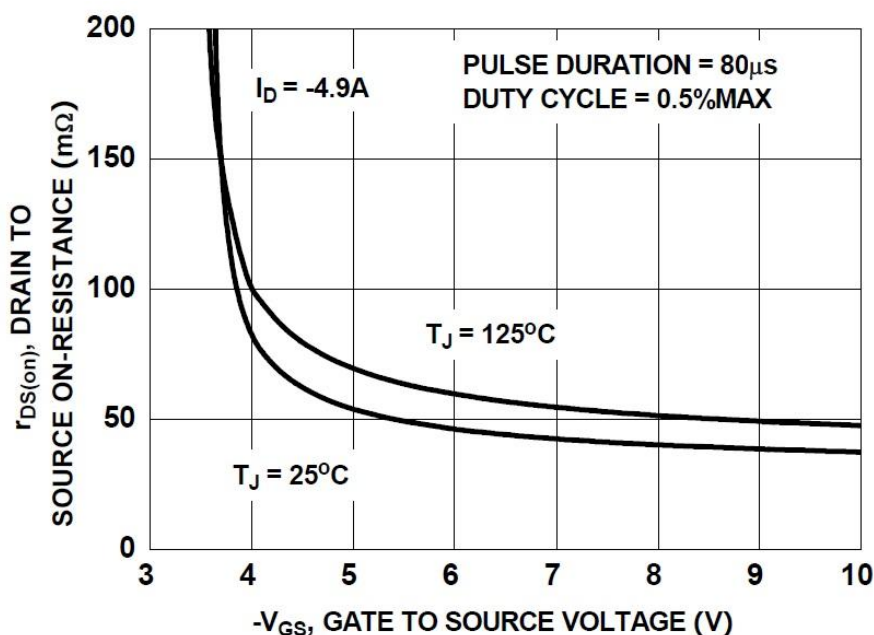
Strmosti hran jsou ovlivněny parametry samotného budiče PWM, ale mimo jiné i parazitními kapacitami hradla unipolárního tranzistoru FDC610PZ. Na kondenzátoru nemůže nastat skoková změna napětí, a proto při přivedení strmého pulzu z budiče dojde k postupnému nabíjení kondenzátoru až na hodnotu saturačního napětí, tomuto ději se říká přechodový jev. Nicméně může docházet ke skokovým změnám nabíjecího proudu. Musí se tedy zajistit, aby byl tento proud dostatečně velký, a tím došlo ke zkrácení celého přechodového jevu. Na obrázku 5.3 je schéma zapojení výkonových spínacích obvodů. Rychlé dodávání a následné odčerpávání náboje zajišťuje komplementární zapojení bipolárních tranzistorů T2 a T3. Pokud se tranzistor T2 otevírá, tranzistor T3 se zavírá a kapacita se nabíjí na napětí zdroje. Při opačné situaci se T3 otevírá a T2 zavírá a dochází k vybití kapacity do země. Vzhledem k tomu, že se musí tato akumulovaná energie spotřebovat, je zde umístěn rezistor R3, na kterém se akumulovaný výkon přemění v teplo, a aby vybití proud nepoškodil přechod emitor - báze tranzistoru T2, je zde umístěna dioda D1 v závěrném směru.



Obr. 5.3 Schéma zapojení výkonových spínacích obvodů

Přepínáním tranzistorů T2 a T3 je také zajištěn nízký odpor r_{DS} tranzistoru M1 v sepnutém stavu. Obrázek 5.4 ukazuje závislost r_{DS} na rozdílu napětí gate - source (dále jen V_{GS}). Je patrné, že r_{DS} je nejnižší, pokud je zajištěn rozdíl V_{GS} minimálně 10 V. Jinými slovy, napětí na gate musí být o 10 V menší než napětí na source. Tato podmínka je splněna, pokud je

T3 plně otevřen. Naopak nejvyšší r_{DS} je, pokud je rozdíl V_{GS} minimální, což nastává při plném otevření tranzistoru T2. Tento popis odpovídá tezi, že tranzistor M1 má kanál typu P. Z logického hlediska to znamená, že při přivedení vysoké napěťové úrovně na gate je na zátěži nízká napěťová úroveň, a naopak při přivedení nízké napěťové úrovně na gate je na zátěži vysoká napěťová úroveň. Tento tranzistor tedy otáčí fází o 180° . Aby byla zachována správná funkčnost PWM, je zde předřazen bipolární tranzistor T1, který také zapříčiní posunutí fáze o 180° . Pokud je tranzistor T1 v sepnutém stavu, tak veškerý proud z proudového zdroje projde přes otevřený tranzistor M2 do země, zatímco ve vypnutém stavu veškerý proud projde do báze tranzistoru T2. Proudový zdroj dodává 8 mA, a je zde řešen kombinací tranzistoru J1 a odporu R2 kvůli tomu, aby držel konstantní proud při přivedení 12 V i 24 V.



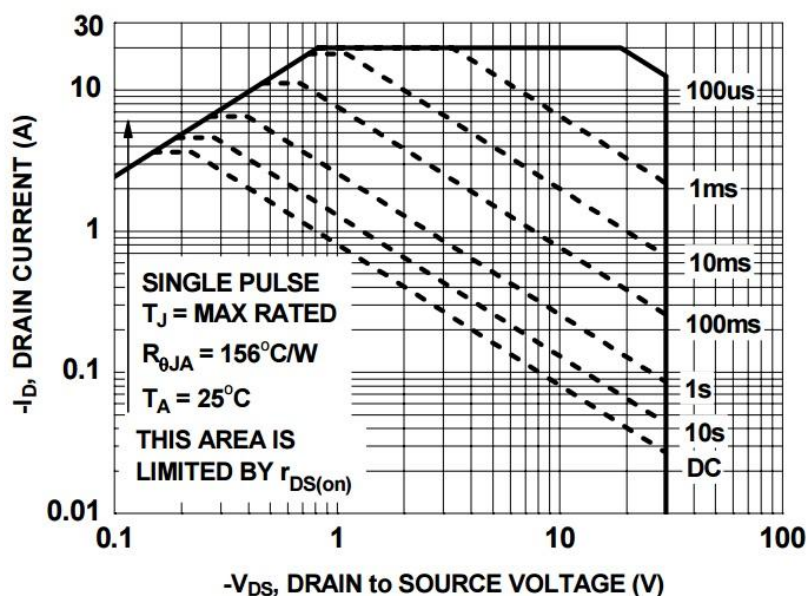
Obr. 5.4 Závislost r_{DS} na V_{GS} tranzistoru FDC610PZ [16]

Poslední důležitá věc, která může zapříčinit prodloužení dob přeběhů tranzistoru M1, je parazitní indukčnost zátěže. U indukčnosti je stavovou veličinou procházející proud. Proud indukčností nemůže skokově měnit směr ani velikost, a tudíž by se při rychlé snaze o rozepnutí tranzistoru M1 nemohl přechod drain – source zcela uzavřít, ale byl by částečně pootevřen, a k úplnému uzavření by došlo až po odeznění přechodového jevu. Tento problém je vyřešen umístěním rychlé schottkyho diody D2, přes kterou se může parazitní indukčnost vybit.

Součástky Rs a M2 na obrázku 5.3 jsou části proudové ochrany, a jsou zde zakresleny pouze pro to, aby naznačily vzájemnou interakci ochrany se spínacím obvodem. Analýzu vlastností zapojení provedl v simulačním programu PSpice pan Ing. Jiří Stifter, Ph.D. V příloze C.2 je simulace ukazující závislost výkonových ztrát tranzistoru M1 na odebíraném proudu. Vzhledem k mezním parametrům součástky je limitující výkonová ztráta přibližně 380 mW při plném otevření, tato ztráta je způsobená odporem r_{DS} . V simulaci je jí dosaženo při odběru 4 A. Proudová ochrana je s rezervou dimenzována na proudový odběr 3,6 A.

5.3 Návrh proudové ochrany

Na obrázku 5.5 je zobrazena bezpečná provozní oblast tranzistoru FDC610PZ, která ukazuje hodnoty proudů drainem (dále jen I_D) v závislosti na rozdílu napětí drain – source (dále jen U_{DS}) pro různé doby proudových pulzů. Tato charakteristika mimo jiné udává potřebnou rychlost sepnutí ochrany.

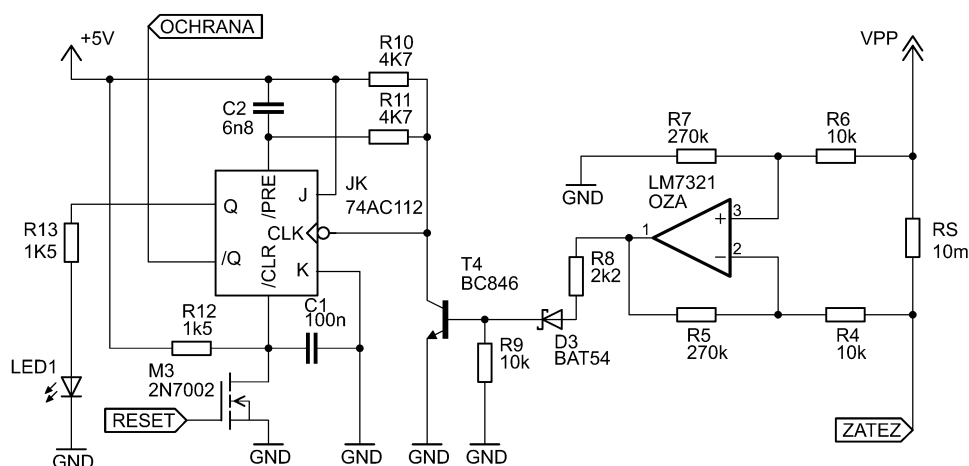


Obr. 5.5 Bezpečná provozní oblast tranzistoru FDC610PZ [16]

V první fázi návrhu bylo zamýšleno použití proudových vratných pojistek, tzv. polyswitchových pojistek. Zkoumané pojistky, viz zdroj [17], jsou ovšem poměrně pomalé. Například u jednoho z uvažovaných typů microSMD050F je reakční doba při průchozím zkratovém proudu 4 A přibližně 10 ms, což by nebylo dostatečné pro ochránění výkonového tranzistoru FDC610PZ. Z obrázku 5.3 je patrné, že při přivedení 4 A a rozdílu

napětí U_{DS} 12 V by musela být reakční doba pojistky maximálně 1 ms. Také je žádoucí, aby ochrana fungovala jako klopný obvod, což znamená, že by byla i při odeznění poruchy trvale odpojena, a následné znovu uvedení do provozu by mohlo být provedeno až vnějším zásahem obsluhy.

Od použití proudových vratných pojistek se ustoupilo, a bylo navrženo jiné řešení využívající JK klopný obvod a rozdílový zesilovač. Na obr. 5.6 je schéma proudové ochrany.



Obr. 5.6 Schéma zapojení proudové ochrany

5.3.1 Význam rozdílového zesilovače

Hlavním smyslem ochrany je snímání napětí na malém odporu $R_s = 10 \text{ m}\Omega$. Pokud do zátěže poteče proud 3,6 A, vznikne na snímacím rezistoru úbytek napětí $\Delta U = 36 \text{ mV}$. Takto malý úbytek napětí je potřeba zesílit, a k tomu slouží diferenční, neboli rozdílový zesilovač. Odvození jeho zesílení je z rovnice (5.1). Použitý operační zesilovač musí být poměrně rychlý, s minimálním napěťovým offsetem, a typu rail to rail kvůli přiváděným napětím 12 nebo 24 V.

$$U_o = U_1 \frac{R_7}{R_6 + R_7} \frac{R_4 + R_5}{R_4} - U_2 \frac{R_5}{R_4} \quad (5.1)$$

Tato rovnice se dá upravit, pokud se provedou následující úvahy. $R_4 = R_6$, $R_5 = R_7$ a $U_2 = U_1 - \Delta U$. Výsledkem úprav je rovnice (5.2)

$$U_0 = \Delta U \frac{R_5}{R_4} = \Delta U \frac{270 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = \Delta U \cdot 27 \quad (5.2)$$

Z rovnice (5.2) vyplývá, že na výstupu diferenčního zesilovače je 27 krát zesílen úbytek napětí na snímacím rezistoru. Pokud zesílené napětí překročí dovolenou úroveň 972 mV, pak se tranzistor T4 dostatečně otevře a proudová ochrana sepne. Změnou hodnot odporů, které jsou součástí diferenčního zesilovače, by se dala nastavit jiná rozhodovací úroveň proudové ochrany.

5.3.2 Význam použití klopného obvodu JK

Logika celé proudové ochrany tkví v zapojení JK klopného obvodu. Z obr. 5.6 je zřejmé, že vstup J je pevně zapojen do logické „1“, zatímco vstup K je zapojen do logické „0“. V tabulce 1 je zobrazena pravdivostní tabulka použitého klopného obvodu.

Tab. 1 Pravdivostní tabulka JK klopného obvodu 74AC112 [18]

VSTUPY					VÝSTUPY	
/PRE	/CLR	CLK	J	K	Q	/Q
L	H	X	X	X	H	L
H	L	X	X	X	L	H
L	L	X	X	X	H*	H*
H	H	↓	L	L	Q ₀	/Q ₀
H	H	↓	H	L	H	L
H	H	↓	L	H	L	H
H	H	↓	H	H	NEGUJE	NEGUJE
H	H	H	X	X	Q ₀	/Q ₀

*Výstupní obvody jsou v nedefinovaném stavu, pokud /PRE a /CLR přechází ve stejný čas z logické „0“ do logické „1“.

Při přivedení napájení se nejprve nastaví vstup /PRE a CLK do logické „1“. V tu chvíli musí být vstup /CLR v logické „0“, čehož je docíleno díky probíhajícímu přechodovému ději, který nabíjí kondenzátor C1. V tuto chvíli je JK uveden do klidového stavu. Až dojde k nabití kondenzátoru C1, bude na vstupu /CLR logická „1“, takže JK nadále setrvává v klidovém stavu, ve kterém je výstup Q v „0“ a negovaný výstup /Q v „1“. /Q drží tranzistor M2 otevřený a zařízení může bez problému fungovat.

Pro přepnutí klopného obvodu a spuštění ochrany musí dojít na vstupu CLK k sestupné hraně. Toho je docíleno otevřením tranzistoru T4 způsobeného dostatečně velkým úbytkem napětí na R_s . V tuto chvíli je výstup Q v „1“ a /Q v „0“. Signalizace poruchy LED1 se rozsvítí, tranzistor M2 se rozezne, a to má za následek trvalé zavření výkonového tranzistoru FDC610PZ.

K resetu ochrany dojde pouze vypnutím a znovu zapnutím zařízení, nebo přivedením resetovacího impulsu z Arduina na tranzistor M3

Každý kanál musí mít svůj vlastní rozdílový zesilovač, aby mohlo dojít k detekci proudového přetížení, ale klopný obvod JK je využitý několikanásobně. K uvedení zařízení do nouzového stavu stačí, aby došlo ke zkratu na jednom ze sledovaných kanálů. Aby mohlo dojít ke spolehlivé detekci z více zesilovačů, musí být za každým zesilovačem umístěna dioda tak, aby spínací výstupní proud ze zesilovače otevřel tranzistor T4 a nemohl se odvést přes výstupy jiných zesilovačů. Na výstup /Q jsou poté navěšeny vypínací tranzistory dalších sledovaných kanálů.

Navržená ochrana je podle simulací dostatečně pohotová, a splňuje rychlosti vypínání podle požadavků bezpečné provozní oblasti tranzistoru FDC610PZ viz obr. 5.5. V příloze C.3 je možné zpozorovat, že pokud je proudový odběr 3,7 A při střídě 20%, tak koncový tranzistor M1 je odpojen za 2 μ s.

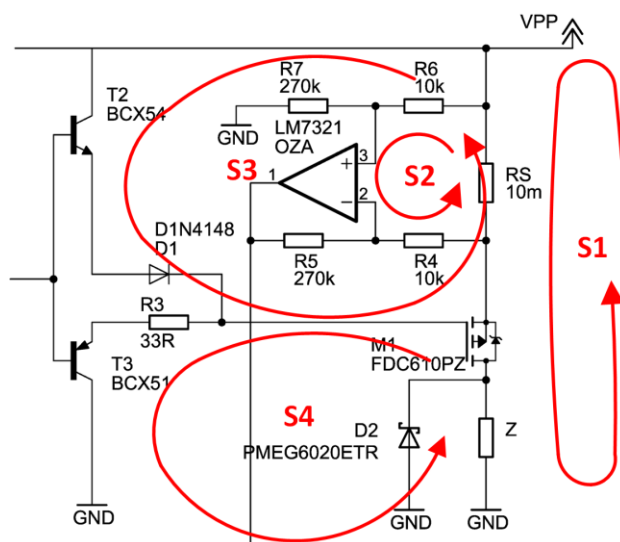
5.4 Návrh DPS se spínacími obvody a proudovou ochranou

Po návrhu výkonových obvodů a proudové ochrany se mohlo přejít k návrhu desky plošných spojů. Budič PCA9635 má šestnáct nezávislých výstupů, a tak se jevílo jako vhodné, umístit na DPS jeden budič PCA9635, šestnáct výkonových spínaných obvodů s diferenciálními zesilovači, jednu proudovou ochranu, jeden stabilizátor napětí, přívodní svorkovnice napájení ke všem kanálům a výstupní svorkovnice kanálů. Tento celkový výčet obsahuje bezmála 450 součástek na jednu DPS. Pro řízení 40 světel by musely být vyrobeny tři desky. Vzhledem k velkému počtu součástek byl od začátku uvažován návrh oboustranné DPS. Této topologii odpovídá i první vyrobený prototyp, viz příloha D.

5.4.1 Návrhová pravidla pro správnou funkčnost zařízení

Vzhledem k tomu, že vybírané součástky pro osazení jsou takřka všechny typu SMD (surface mount device), výkonovým obvodem může téct poměrně velký proud, k detekci přetížení se používá citlivý diferenciální zesilovač a k buzení je zapotřebí velmi strmých lichoběžníkových pulzů, musí se při návrhu layoutu dbát z hlediska elektromagnetické kompatibility na tyto záležitosti.

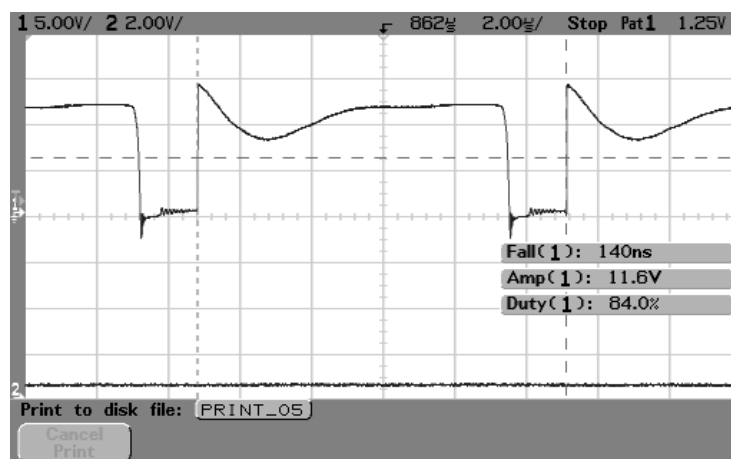
- Dimenzování výkonových cest na souvislý proud 4 A – hlavní proudová cesta je navržena na šířku 1,788 mm, vycházelo se z publikace [20]. Navíc je na desce umístěno více kanálů, a pokud každý může dodat proud 3,6 A, tak se nemůže řešit rozvod napájení z jednoho místa na desce, ale musí být ke každé dvojici kanálu, kdy je umístěn každý kanál na jiné straně desky, přivedeno napájení zvlášť.
- Omezení přeslechů zmenšením kritických proudových smyček – na obr. 5.7 jsou naznačeny kritické smyčky, které musí být co nejmenší, aby nedocházelo k velkému vyzařování elektromagnetického pole. Implementace požadavku by měla být patrná z návrhu layoutu druhé DPS umístěné v příloze E.
- Použití blokovacích kondenzátorů – v kompletním schématu lze pozorovat, že je použitý jeden filtrační elektrolytický kondenzátor a několik lokálních keramických kondenzátorů. Při výrobě prvního prototypu byl opomenut filtrační kondenzátor a z obrázku 5.8 je patrné, že docházelo ke značnému zvlnění.



Obr.5.7 Kritické proudové smyčky

5.4.2 Testování první prototypové desky

Po vyrobení první DPS a osazení jednoho kanálu, proudové ochrany a PCA9635 se přešlo k testování vlastností.



Obr.5.8 Prodloužení střídy na zátěži

Obrázek 5.8 ukazuje chování na zátěži při přivedení pulzů s 50% střídou na vstup spínacích obvodů. Zátěží je 10Ω/40W rezistor, a je napájen 12 V. Z obrázku lze vyčíst, že docházelo k poměrně velkému prodloužení střídy až o 34 % a ke zvlnění. Zvlnění se odstranilo filtračním kondenzátorem. Prodloužení se zkrátilo o 17 % použitím schottkyho antisaturační diody D4 v zapojení, viz příloha B. Nicméně hlavní příčina prodloužení nakonec tkvěla v neúmyslném špatném návrhu proudového zdroje, protože prodejce poskytl jiný model tranzistoru pro simulaci. Proudový zdroj sice fungoval, ale místo 8 mA dodával proud významně menší než 1 mA. Na základě toho musel být proveden výběr jiného tranzistoru, který bohužel do odevzdání bakalářské práce nebude k dispozici.

Provizorně byl proudový zdroj nahrazen rezistorem s hodnotou 1,5 kΩ, kterým při napájení 12 V prochází proud 8 mA. V tomto případě docházelo k prodloužení střídy o 2,5 %.

Následovalo testování sepnutí ochrany. Při otestování přímého zkratu ochrana bez problému sepnula. Poté se jako zátěž použil posuvný potenciometr, a snahou bylo najít kritický proud, při kterém ochrana zareaguje. Posunem jezdce se snižovala rezistivita a zvyšoval se procházející proud, ale mnohem dříve než byl proud tak velký, aby nastalo sepnutí proudové ochrany, došlo k defektu na tranzistoru FDC610PZ a diodě D2. K poškození mohlo dojít vlivem nedostatečně velkých chladících ploch těchto součástek,

a především díky velké parazitní indukčnosti, kterou potenciometr zaváděl. Následně se pro otestování použily metal oxidové rezistory, které na tom s parazitní indukčností byly o poznání lépe. Výsledky testu ukazuje tabulka 2.

Tab. 2 Testy proudové ochrany

R_z [Ω]	I_z [A]	Stav ochrany
2,2	5,46	sepne, LED svítí
3,3	3,63	sepne až při střídě 50 %, LED nesvítí
4	2,96	sepne až při střídě 50 %, LED nesvítí
5,2	2,31	nesezne, LED nesvítí

K hodnotám z tabulky je nutné dodat, že při testech byl použit laboratorní generátor PWM, který umí generovat pouze střídý 20 %, 50 % a 80 %, frekvence pulzů byla nastavena na 97 kHz, a proud zátěží I_z je maximální hodnota proudu. Z tabulky je možné vyčíst, že praktická hranice pro sepnutí ochrany je někde mezi proudy 2,31 A a 2,96 A. Dalším důležitým poznatkem je, že se při proudových odběrech 2,96 A a 3,63 A dostával JK klopný obvod do stavu, kdy byly logické výstupy Q i /Q v logické „0“. Ochrana sice zabere, ale jedná se o nedefinovaný stav, což je špatně. Na příčinu se prozatím nepřišlo.

5.4.3 Návrh druhé prototypové desky

Při druhém návrhu byla snaha omezit nedostatky předešlé verze, ale protože se počítá s následnou výrobou DPS u profesionální firmy, byla deska navržena pouze pro jeden výkonový spínací obvod a jednu proudovou ochranu. Tato deska je předurčena pouze k otestování. V době odevzdání práce bohužel nebyly k dispozici některé nové součástky, a tak nemohlo dojít k finálním testům. Na desce jsou tyto změny. Motiv DPS je v příloze E

- Umístění filtračního kondenzátoru.
- Proudový zdroj složený z tranzistoru BSR56 a rezistoru 470 Ω .
- Rychlá schottkyho dioda PMEG6020ETR pro účinnější potlačení vlivu parazitní indukčnosti.
- Zvětšení plošek součástek, na kterých vlivem parazitních indukčností docházelo k velkému oteplení.
- Další součástky, které však na zlepšení účinnosti nemají vliv.
-

5.5 Návrh a implementace programu

5.5.1 Požadovaná funkce programu

Řídící jednotka musí být samozřejmě ovladatelná. Před návrhem architektury programu je vhodné shrnout požadavky na program, které jsou.

- Vytvoření menu pro komunikaci s obsluhou.
- Předávání informací o aktuální pozici v menu výpisem na displej.
- Zpracování hodnot tlačítkových vstupů.
- Posílání instrukcí budiči PWM.
- Řízení spínačů SP1 a SP2 pro výběr použitého zdroje napětí.
- Zpracování podnětu z proudové ochrany a případné uvedení zařízení do nouzového režimu.

5.5.2 Použité programátorské prostředky

Pro programování Arduina je předurčeno vývojové prostředí Arduino IDE (integrated development environment). Arduino je možné programovat v jazyce C nebo C++. Arduino IDE však primárně používá knihovnu Wiring, která je psaná v C++ a usnadňuje práci s Arduinem, i přes to že se jedná o knihovnu, často je v literatuře označována, jako programovací jazyk.

Aby se v „jazyku“ Wiring vytvořil spustitelný program, musí se definovat dvě funkce. Setup() a Loop(). Funkce Setup() vždy proběhne automaticky pouze jednou, a to při spuštění programu, což nastává přivedením napájení na Arduino nebo při resetu. Jak již název funkce napovídá, používá se především k tomu, aby na začátku nastavila stavy proměnných, případně inicializovala periferní obvody, jinými slovy přivedla řídicí jednotku do definovaného stavu. Funkce Loop() se spustí, až doběhne funkce Setup(), a v této smyčce program cykluje do nekonečna. [10]

Arduino IDE zahrnuje vlastní knihovny. V programu jsou použity dvě z nich. Knihovna Wire.h obsahuje funkce, které jsou určené pro komunikaci po I2C sběrnici. Knihovna LiquidCrystal.h obsahuje funkce pro komunikaci se znakovým LCD displejem. Hlavní funkce knihoven jsou popsány ve zdroji [10]. Nicméně v programu je použita ještě třetí externí knihovna, která nese název PCA9635.h, a zahrnuje funkce pro snadné řízení budiče

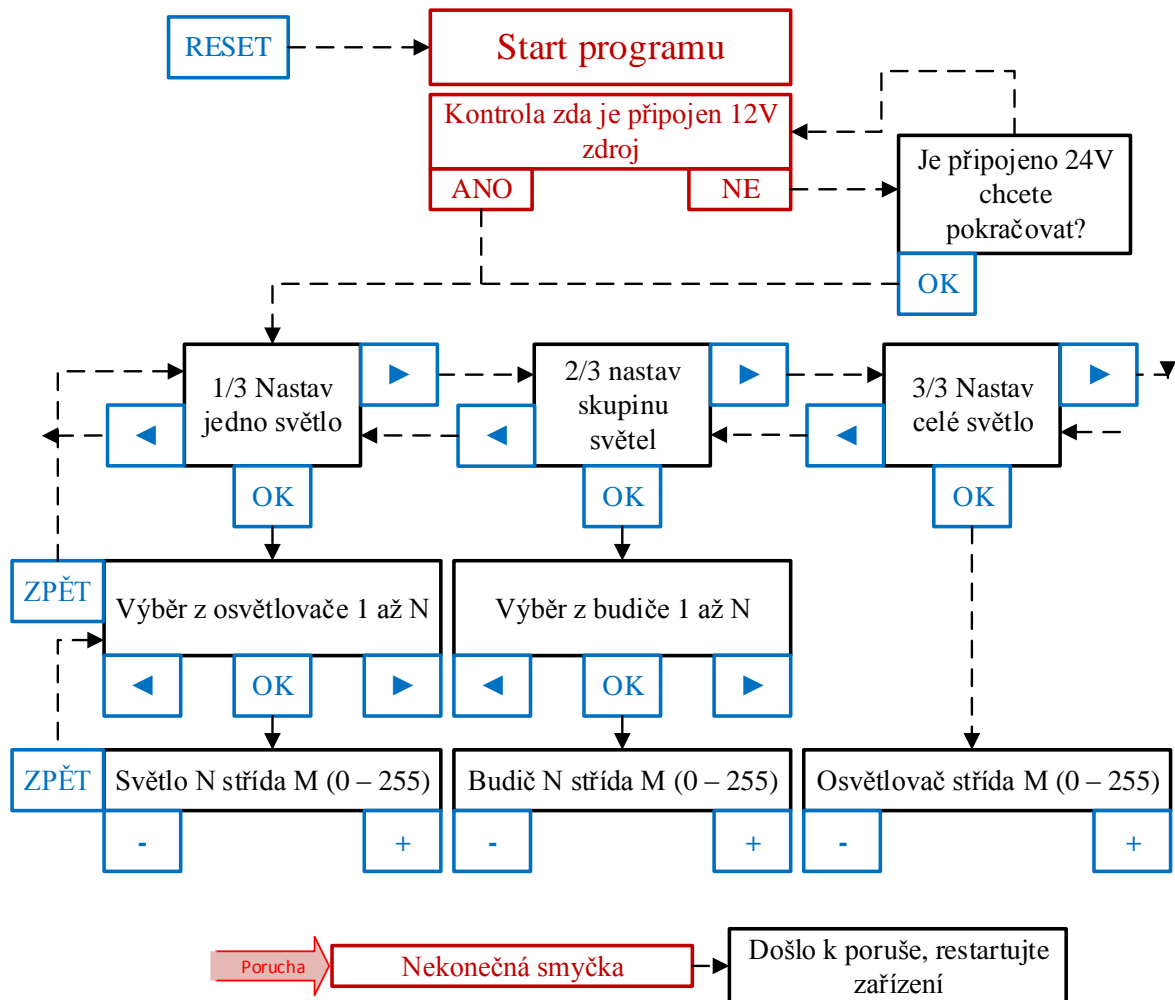
PWM. V programu jsou využity z této knihovny dvě důležité funkce `getRegister(arg1,arg2)` a `setBrightness(arg1, arg2, arg3)`. První funkce vrátí hodnotu uloženou v příslušném registru. Druhá funkce do konkrétního registru zapíše určitou hodnotu. Významy argumentů funkce jsou: `arg1` – adresa PCA9635, `arg2` – adresa registru, `arg3` – hodnota.

5.5.3 Použité prostředky pro ovládání řídicí jednotky

Pro snadnou obsluhu slouží sedm tlačítek a jeden přepínač. Obsluze jsou informace sdělovány pomocí dvouřádkového 32 znakového LCD displeje. V příloze B je celkové schéma, ve kterém je zahrnuto i propojení Arduina s ostatními prvky. Každé tlačítko má svůj pevně daný význam: TL1 – zpět, TL2 – posun v menu vlevo, TL3 – posun v menu vpravo, TL4 -potvrzení, TL5 – snižování intenzity světla, TL6 – zvyšování intenzity světla, PR – kolébkový přepínač pro výběr napájení. Pokud je vybráno napájení 24 V, rozsvítí se signalizační dioda LED4. Diody LED1 až LED3 poskytují informaci o sepnutí proudových ochran a jsou řízeny hardwarově přímo z příslušných proudových ochran. Tlačítko TL7 je určené k resetu celého zařízení.

5.5.4 Popis funkčnosti programu

Na obrázku 5.9 je vyobrazen diagram pro ovládání programu, který by měl čtenáři poskytnout základní představu o tom, jakým způsobem jednotku lze řídit. Při spuštění Arduina nebo při restu se nejprve kontroluje použité napájení světel. Pokud je přepínač v poloze 24V, tak se program zeptá, zda může pokračovat. Tato kontrola je kvůli zamezení destrukci, pokud by před zapnutím došlo omylem k přepnutí přepínače na 24V, a byla by připojená světla na 12V. Následná obsluha menu je již naznačena na obrázku 5.9. Nastavením skupiny světel je myšleno současné nastavení intenzity všech světel, které přísluší jednomu budiči PWM. Podrobnější implementací a popisem programu se tato práce již nezabývá. Celý zdrojový kód s komentáři včetně použitých knihoven je nahraný na příloženém CD.



LEGENDA: Červené bloky znázorňují činnost programu.
 Černé bloky znázorňují výpis na displej.
 Modré bloky znázorňují tlačítka pro ovládání.
 TL1 – ZPĚT, TL2 – ◀, TL3 – ▶, TL4 – OK, TL5 – --, TL6 – +
 TL7 – RESET,

Obr. 5.9 Základní diagram ovládání programu

6 Závěr

V úvodní části bakalářské práce byla souhrnně popsána problematika osvětlovačů ve strojovém vidění. Na základě získaných teoretických poznatků došlo k návrhu osvětlovače s využitím pro různé geometrie osvětlení. Dále byl proveden průzkum osvětlovačů na současném trhu.

Od realizace navrženého osvětlovače, který čítá 40 říditelných LED modulů, se ustoupilo kvůli vlastnostem řídicí jednotky PD3-3024-3-EI, která umí řídit nezávisle pouze 3 výstupy, a přešlo se k návrhu a realizaci řídicí jednotky. Řídicí jednotka není v současnosti kompletně hotová, nicméně došlo k realizaci hlavních částí, kterými jsou spínané řídicí obvody, proudová ochrana a řídicí software.

Během testů první vyrobené DPS docházelo vlivem nevhodně navržených pájecích plošek k defektu některých výkonových součástek při připojení zátěže s velkou parazitní indukčností. Řídicí jednotka je sice určena pro řízení LED světel, které nevykazují induktivní charakter, ale musí být počítáno i s připojením různě dlouhých přívodních kabelů, které mohou parazitní indukčnost zavádět. Návrh druhé desky se snažil těmto problémům zamezit.

Proudová ochrana vždy sepnula s přijatelnou rychlostí, ale zatím se nedokázalo přijít na příčiny nedefinovaných stavů klopného obvodu JK popisovaných v kapitole 5.4.2. Z toho důvodu prozatím nelze potvrdit spolehlivost detekce, a bude nutné tento problém dále řešit.

Řídicí program do Arduina funguje bez problému. Jako určité vylepšení by se jevilo využití běžného počítače, neboť komunikace obsluhy s Arduinem přes tlačítka a dvouřádkový displej není optimální. Na počítači by se mohlo naprogramovat přehlednější a lépe ovladatelné komunikační rozhraní.

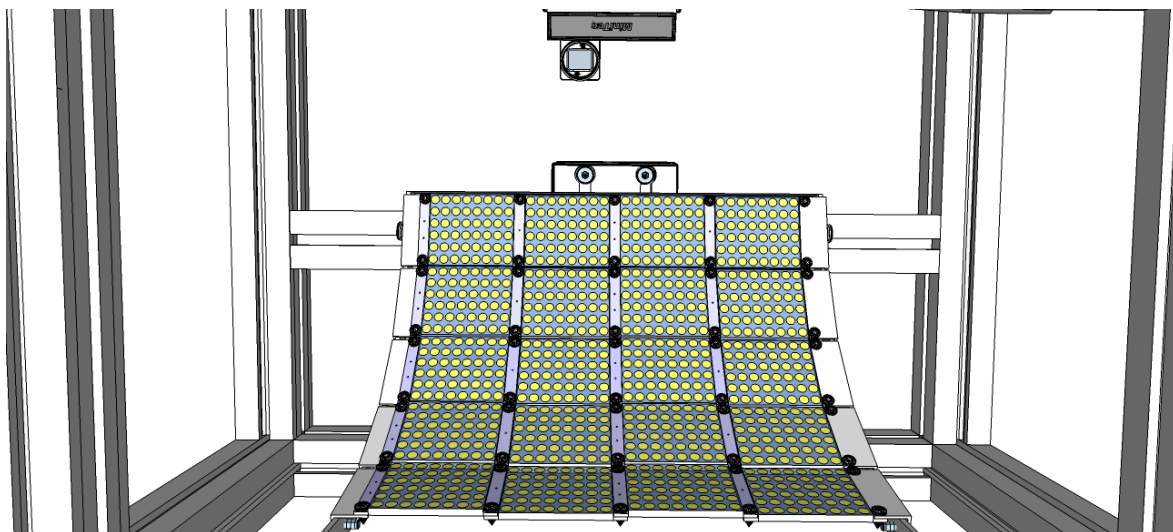
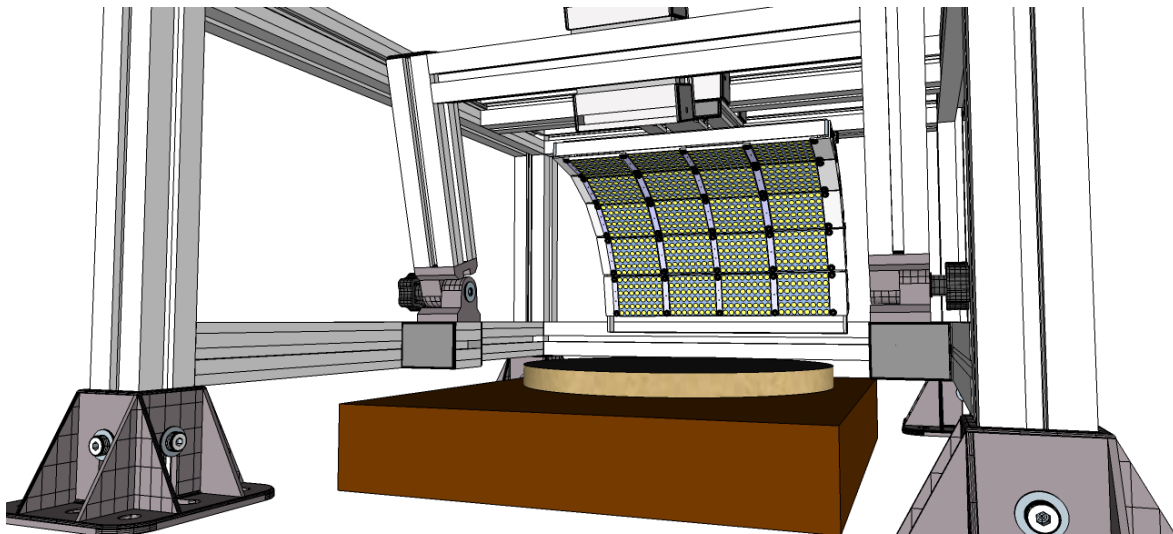
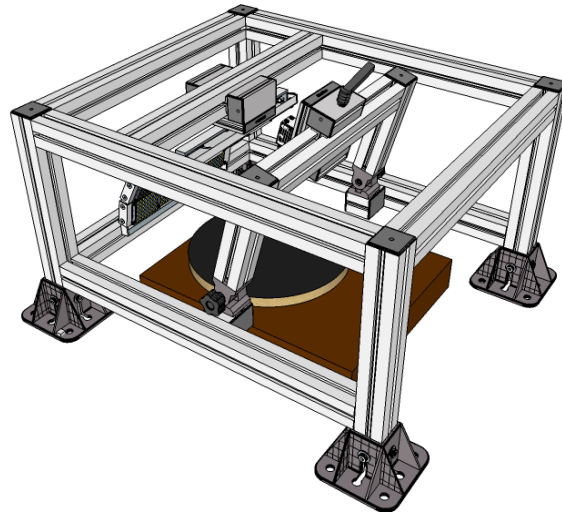
Dalšími kroky autora práce bude otestování druhé prototypové DPS s novým proudovým zdrojem. Na základě výsledků testů dojde k návrhu finální desky, která se již ve třech kopiích nechá vyrobit u profesionální společnosti. Celkové zhotovení osvětlovacího zařízení bude již tématem navazující diplomové práce, která se bude zabývat dotažením rozpracovaného návrhu osvětlovače, včetně implementace kamery.

Seznam literatury a informačních zdrojů

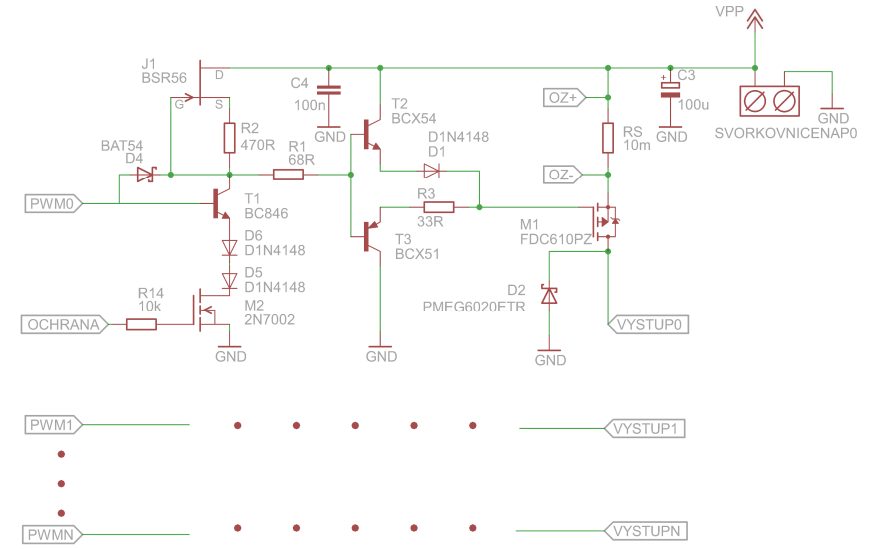
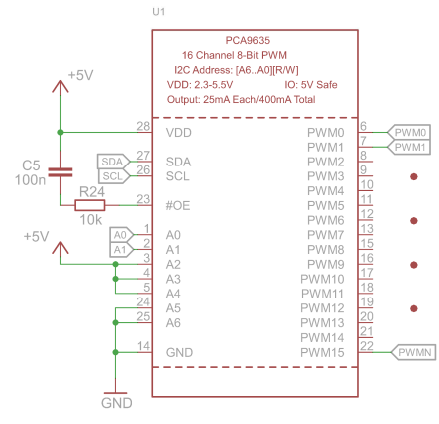
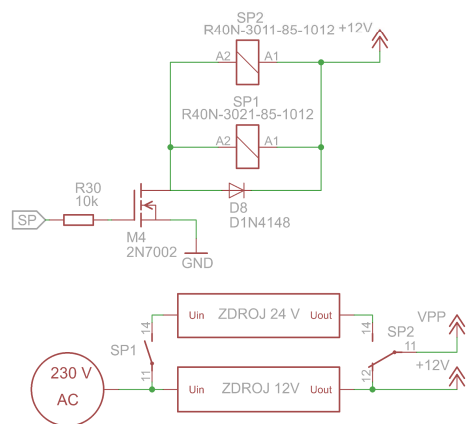
- [1] HORNBERG, Alexander. *Handbook of machine vision*. 1. vyd. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 2006. 823 s. ISBN 3-527-40584-4.
- [2] National Instruments. *A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part I* [online]. Poslední změna 14. 10. 2015. [Cit. 10-4-2016].
Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/6901/en/>
- [3] National Instruments. *A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part II* [online]. Poslední změna 14. 10. 2015. [Cit. 10-4-2016].
Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/6902/en/>
- [4] National Instruments. *A Practical Guide to Machine Vision Lighting - Part III* [online]. Poslední změna 14. 10. 2015. [Cit. 10-4-2016].
Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/6903/en/>
- [5] HAVLE, Otto. Strojové vidění 1: Principy a charakteristiky. *Automa*. 2008, **14**(1), 42-45. ISSN 1210-9592
- [6] HAVLE, Otto. Strojové vidění 4: Osvětlovače. *Automa* 2008, **14**(4) 42-45. ISSN 1210-9592
- [7] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. 1. vyd. Praha: FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3
- [8] ABBAS. Katalog [online]. [Cit. 1. 5. 2016].
Dostupné z: <http://www.analyza-obrazu.cz>
- [9] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky* [online]. [Cit. 1. 5. 2016].
Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/462-polarizace-svetla>
- [10] VODA, Zbyšek & tým HW Kitchen. *Průvodce světem Arduina*. 1. vyd. Bučovice: Nakladatelství Martin Stříž, 2015. 240 s. ISBN 978-80-87106-90-7
- [11] PCA9635. Katalogový list [online]. [Cit. 21. 5. 2016].
Dostupné z http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PCA9635.pdf
- [12] PD3-3024-3-EI. Katalogový list [online]. [Cit. 21. 5. 2016].
Dostupné z http://www.uct.hk/eng/pdf/PD3-3024-3-EI_eng_001.pdf
- [13] MINITEC FRAMING SYSTEMS. Katalog [online]. [Cit. 21. 5. 2016].
Dostupné z http://www.minitecframing.com/Products/MiniTec_Products.html
- [14] Using the I2C Bus, *Robot-electronics.co.uk* [online]. [Cit. 21. 5. 2016].
Dostupné z <http://www.robot-electronics.co.uk/i2c-tutorial>
- [15] PWM, *Arduino.cc* [online]. [Cit. 22. 5. 2016].
Dostupné z <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/PWM>
- [16] FDC610PZ. Katalogový list [online]. [Cit. 22. 5. 2016].
Dostupné z <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/FD/FDC610PZ.pdf>
- [17] TE Connectivity. *Te.com* [online]. [Cit. 23. 5. 2016].
Dostupné z <http://www.te.com/usa-en/home.html>
- [18] 74AC112. Katalogový list [online]. [Cit. 24. 5. 2016]. Dostupné z <http://www.tme.eu/cz/Document/9aec867c1a230c42d604c270b08b1048/CD74AC112M.pdf>
- [19] ŠTÁL, Petr. *Výkonové audio zesilovače pracující ve třídě D*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN, 2008. 200s. ISBN 978-80-7300-230-5
- [20] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce DPS*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství BEN, 2010. 128s ISBN 978-80-7300-266-4

Přílohy

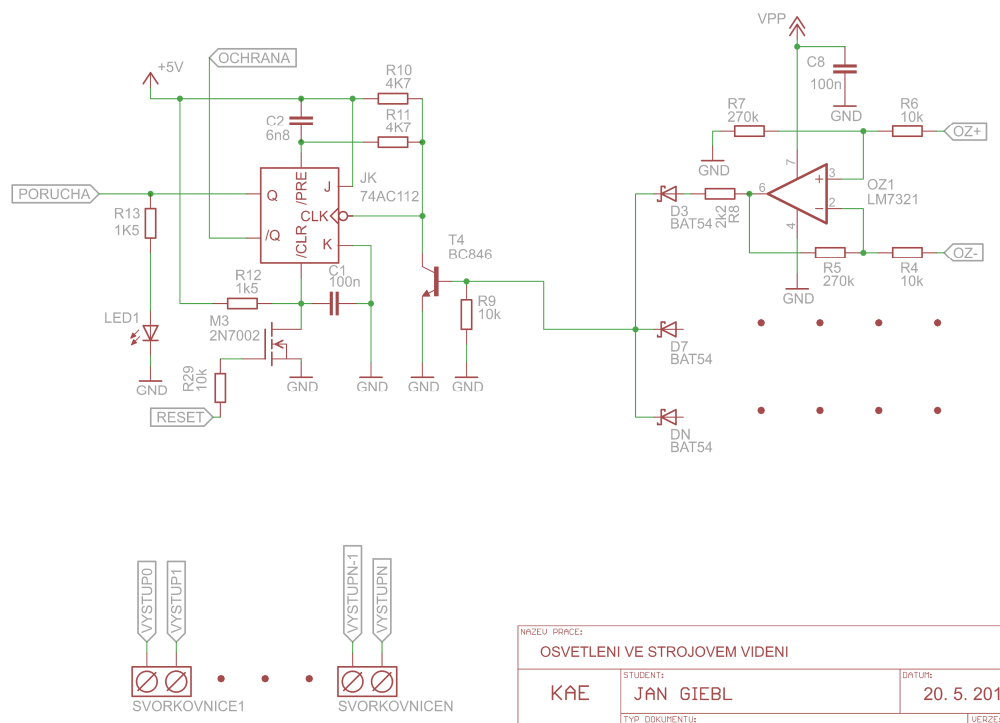
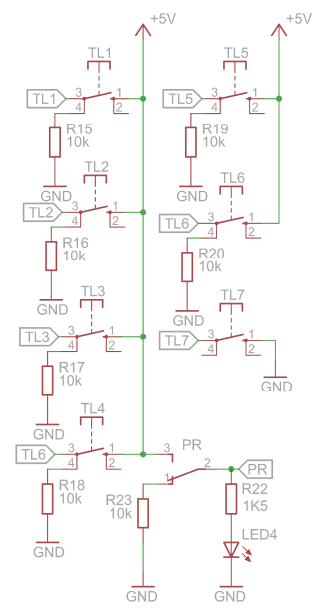
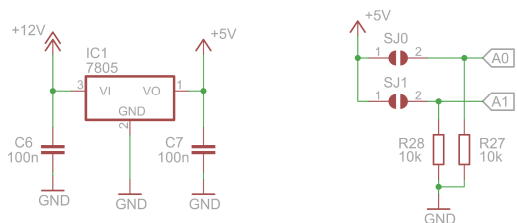
Příloha A – 3D návrh osvětlovače



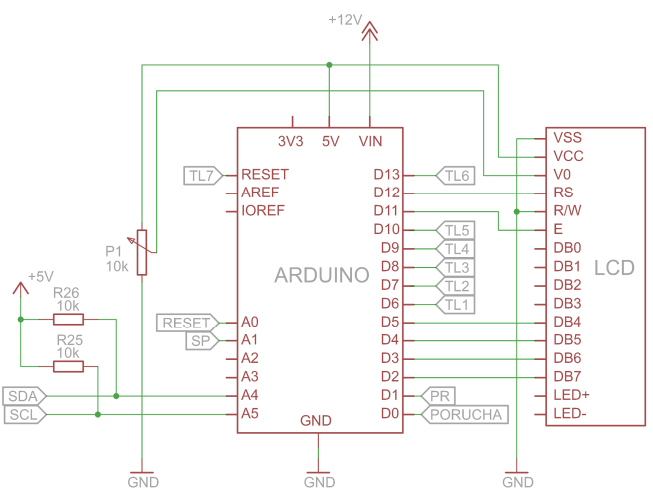
A



B



C



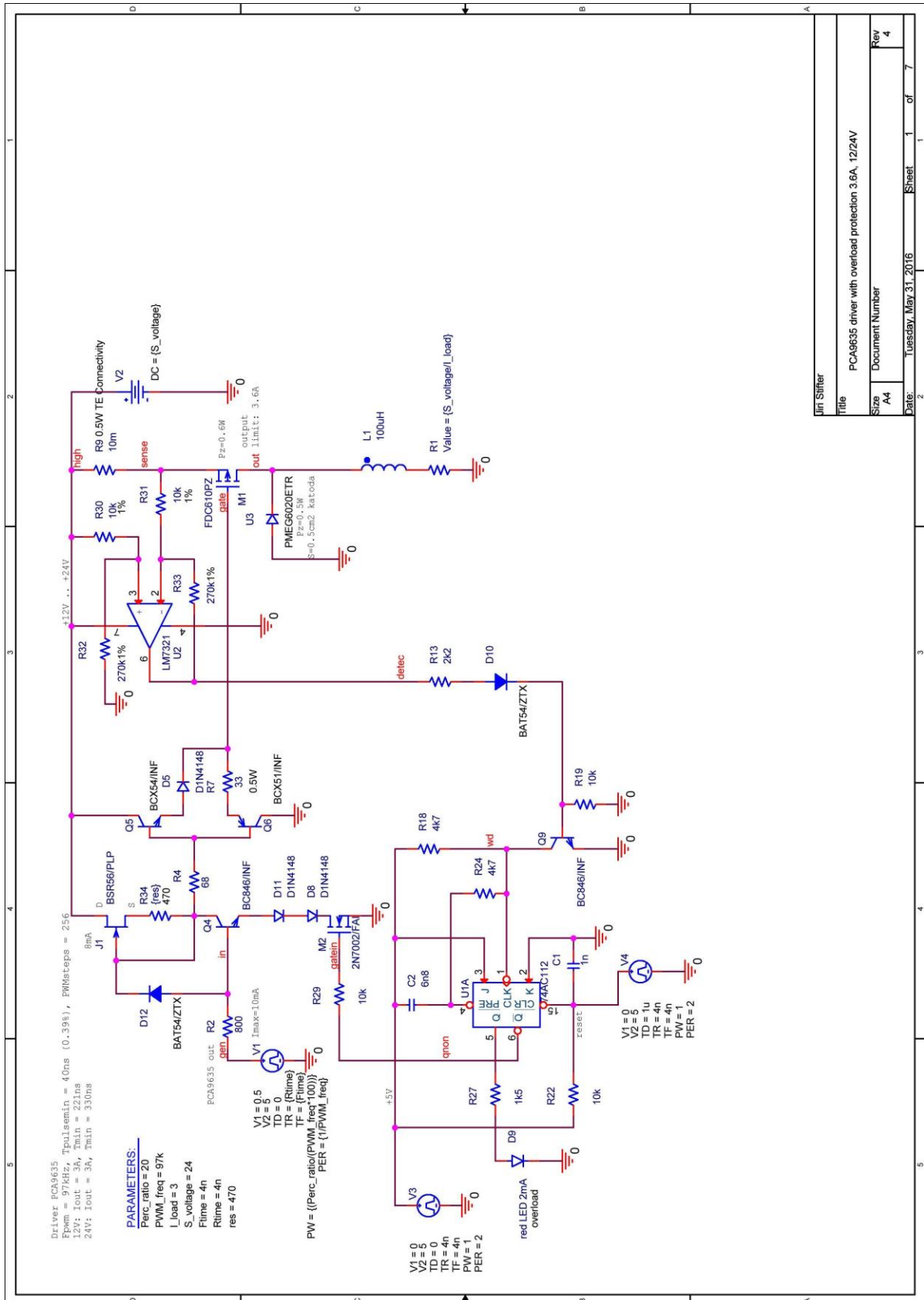
D

E

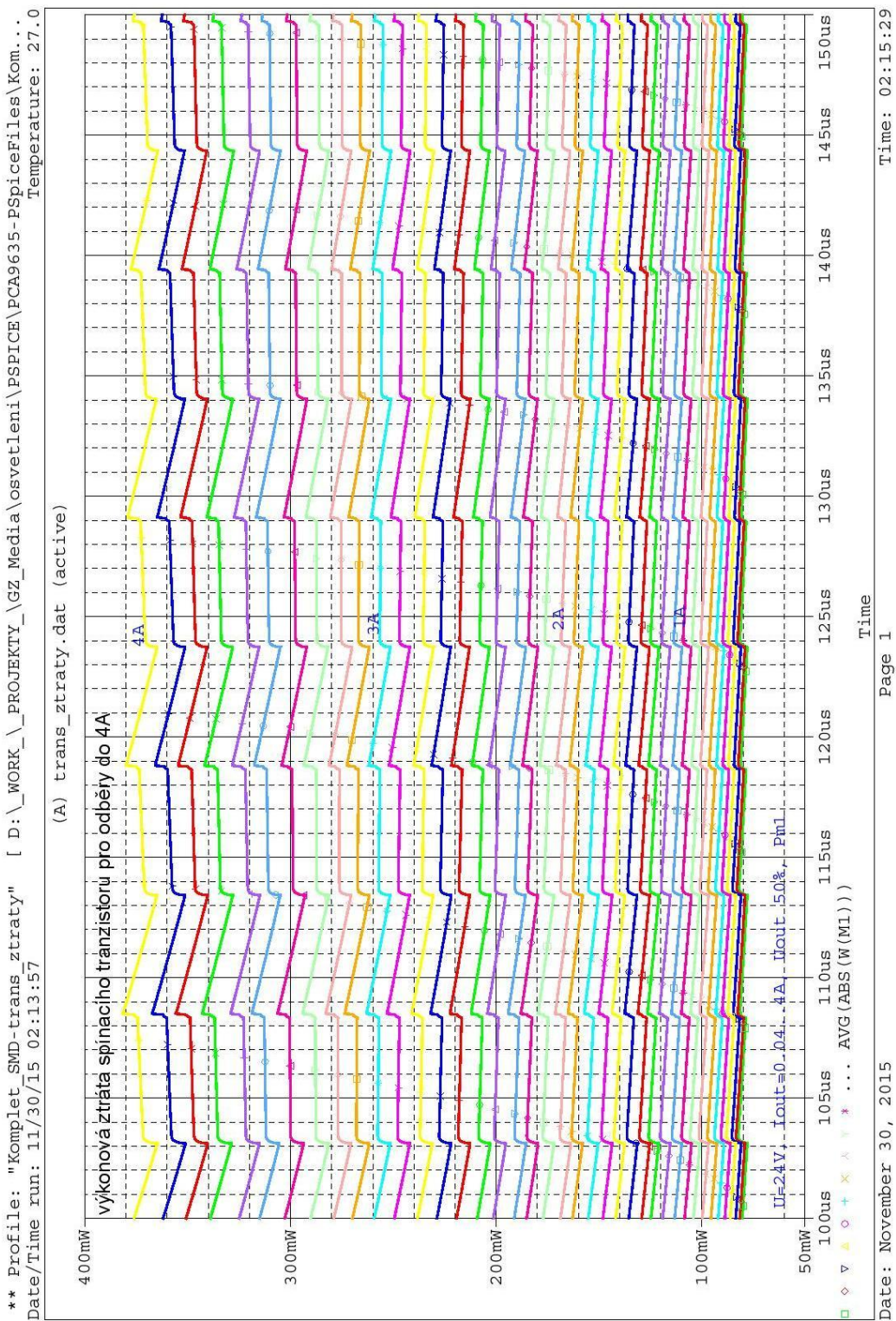
NAZEV PRACE:			
OSVETLENI VE STROJOVEM VIDENI			
STUDENT:	DATA:		
KAE	JAN GIEBL	20. 5. 2016	
TYP DOKUMENTU:	VERZE:		
BP	PRILOHA B		1.0
NAZEV:	STRANA:		
2016	KOMPLETNÍ SCHEMA ZAPOJENÍ S JEDNÍM PCA9635	1/1	

Příloha C – Simulace provedené panem Ing. Jiřím Stifterem, Ph.D

C.1 - Zapojení v programu PSpice ze kterého simulace vychází

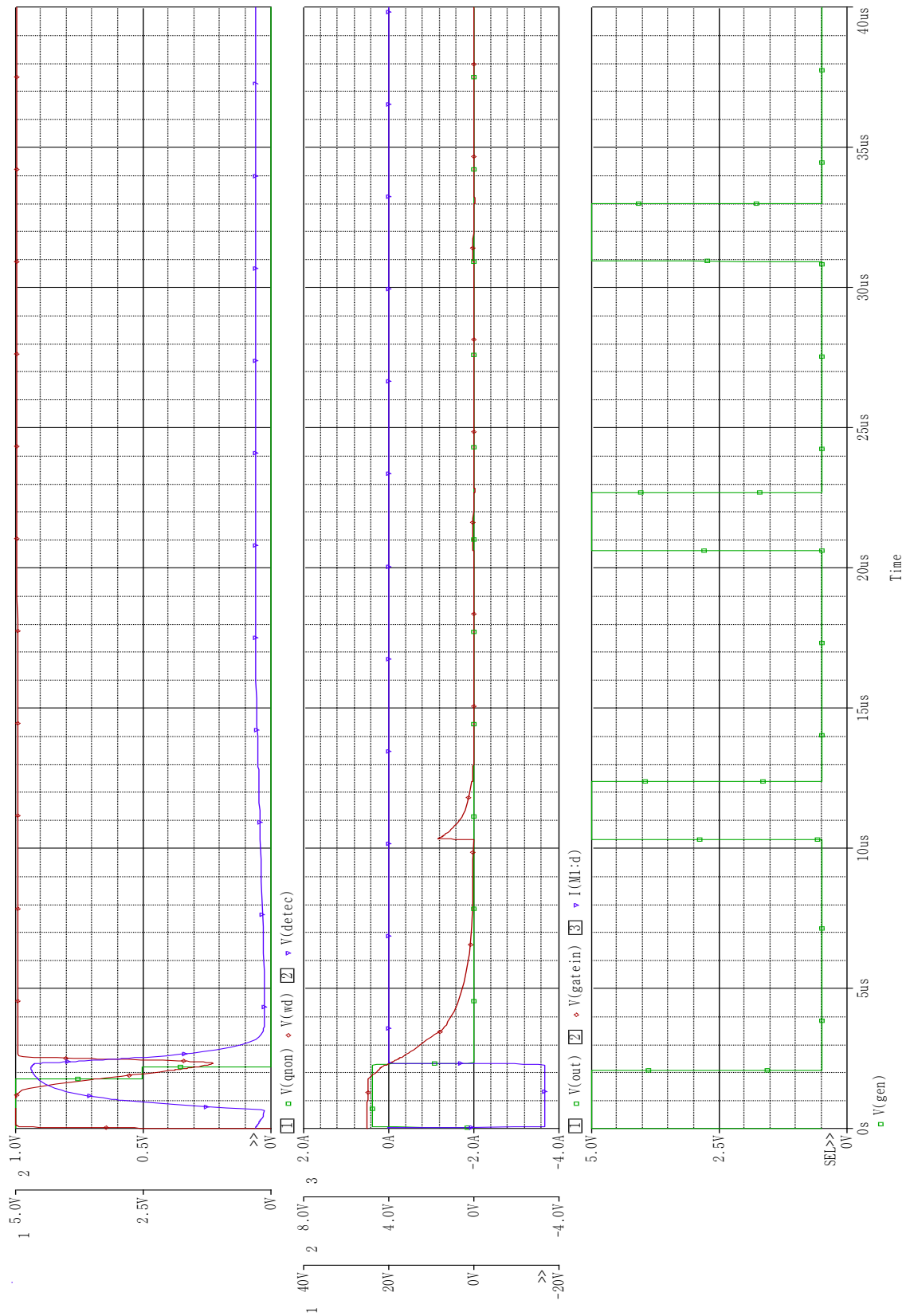


C.2 - výkonová ztráta spínacího tranzistoru pro odběry do 4A

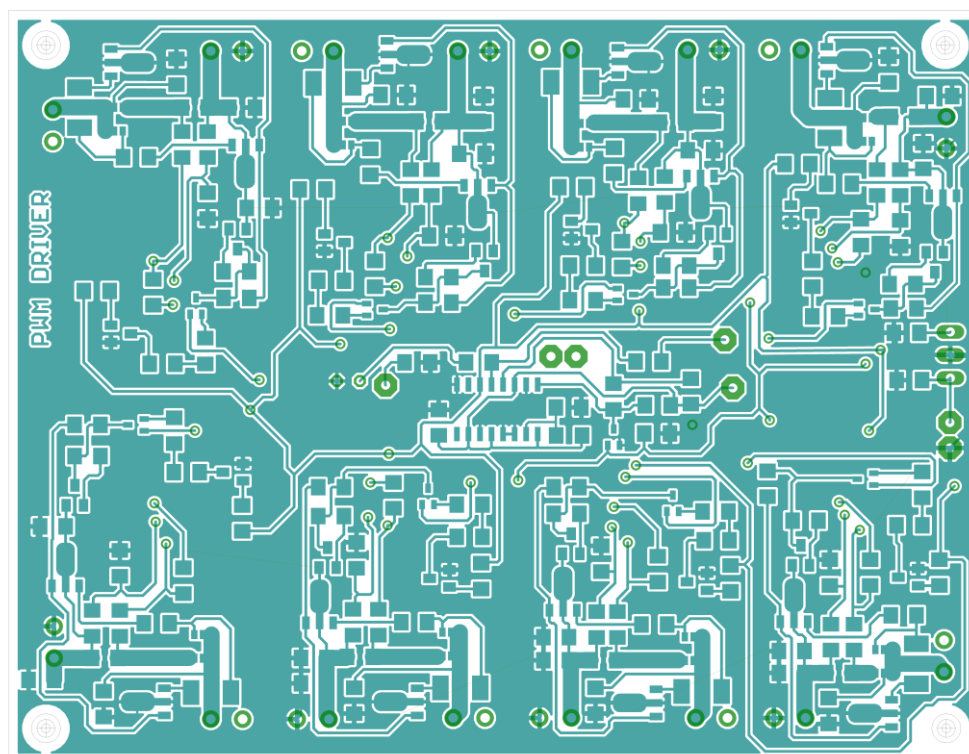


C.3 - Zpoždění ochran pro čistou reálnou zátěž

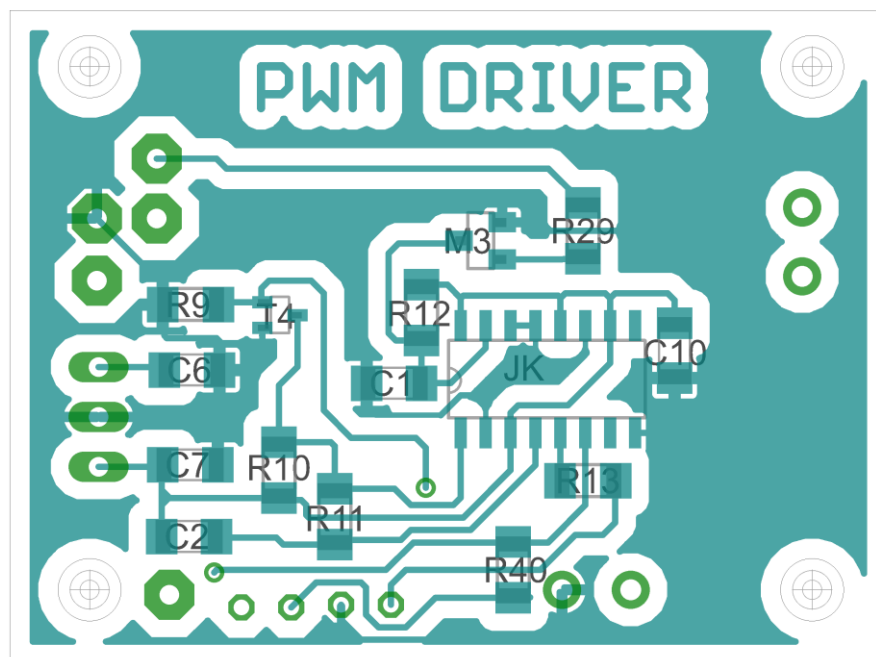
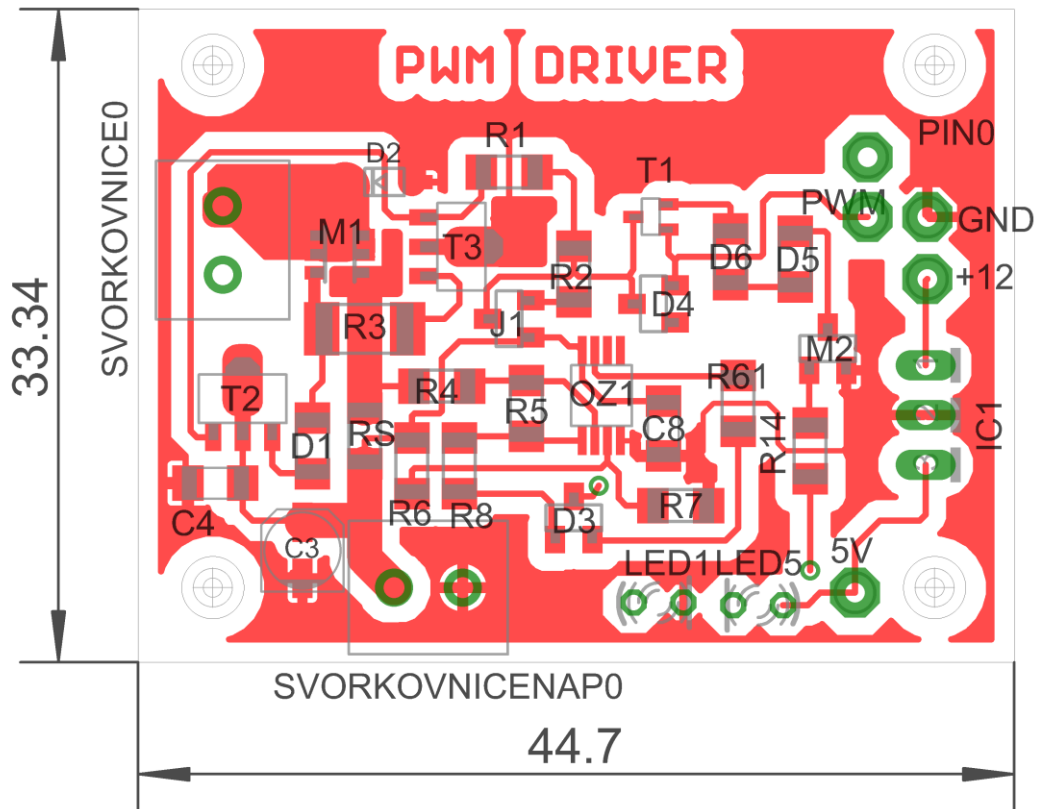
Odběr 3,7 A, napájení 24V, střída 20%, Ftime = 4ns, Rtime = 4ns



Příloha D – Motiv první prototypové DPS s budičem PCA9635, proudovou ochranou a šestnácti výkonovými obvody



Příloha E – Motiv druhé prototypové DPS s jedním výkonovým obvodem a proudovou ochranou včetně rozmístěných součástek



Příloha F – CD

Přiložené CD obsahuje tyto adresáře.

- Osvětlovač – obsahuje soubor Osvetlovac.skp (zdrojový soubor programu SketchUp Pro 2016) a obrázky osvětlovače.
- Program – obsahuje BP_program.ino (zdrojový soubor programu Arduino IDE) a složku s použitou knihovnou PCA9635.
- Simulace – obsahuje grafické výstupy simulací, na které není v textu přímo odkazováno, ale jsou také důležité.
- Katalogové listy – obsahuje katalogové listy některých použitých součástek (PCA 9635, FDC610PZ, aj.).