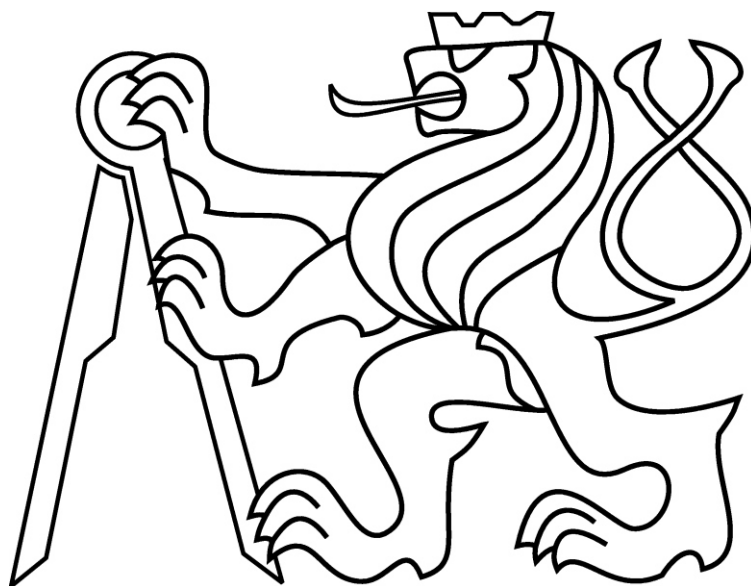


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrotechnologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh osvětlovacího tělesa pro fotoluminiscenci

Design of illumination system for photoluminescence

Jonáš Ehrlich

Vedoucí práce: Mgr. Jakub Holovský, Ph.D.

2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 26. května 2017

.....

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ehrlich** Jméno: **Jonáš** Osobní číslo: **420072**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh osvětlovacího tělesa pro fotoluminiscenci

Název bakalářské práce anglicky:

Design of illumination system for photoluminescence

Pokyny pro vypracování:

1. Rešeršní část
2. Měření rozložení intenzity luminiscenční diody
3. Matematické zpracování softwarem Mathematica
4. Návrh optimálního rozmístění luminiscenčních diod pomocí softwaru
5. Návrh a otestování teplotní stabilizace luminiscenčních diod
6. Zpracování výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] článek: Glatthaar, M., Haunschild, J., Zeidler, R., Demant, M., Greulich, J., Michl, B., Warta, W., Rein, S., Preu, R., 2010. Evaluating luminescence based voltage images of silicon solar cells. Journal of Applied Physics 108, 014501.
[2] kniha: Konrad Mertens, Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice, ISBN: 978-1118634165T.
[3] diplomová práce: Tomáš Baura, ANALÝZA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ POMOCÍ FOTOLUMINISCENCE, vysoké učení technické v Brně, 2012

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Jakub Holovský Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu panu Mgr. Holovskému, Ph.D. za cenné odborné rady a trpělivost při zpracovávání této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Hrzinovi a doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za jejich přínosné podněty.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem osvětlovacího systému, který může být využit pro měření fotoluminiscence. Cílem práce je navrhnout pomocí programu Mathematica takové rozložení luminiscenčních diod, aby výsledná vyzářovací charakteristika byla co nejvíce homogenní. Dále je cílem práce navrhnout, zrealizovat a otestovat chlazení luminiscenčních diod a regulace teploty.

Klíčová slova: osvětlovací těleso, luminiscenční dioda, fotoluminiscence, fotovoltaický článek, Peltierův článek, teplotní regulace, PID regulace

Summary

This bachelor thesis deals with a design of illumination system for photoluminescence using the Mathematica software. This illumination system can be used to measure photoluminescence. Main goal of this thesis is to design a placement of light-emitting diodes so that the resultant light distribution is homogeneous as much as possible. This thesis should also acquainted readers with options of cooling the light-emitting diodes and temperature control. This thesis results in design of temperature control and its verification.

Index Terms: Light-emitting diode, photoluminescence, photovoltaic cell, Peltier element, temperature control, illumination system

Obsah

1. Úvod	1
1.1. Význam fotovoltaiky.....	1
2. Teorie	2
2.1. Energie.....	2
2.2. Elektromagnetické záření.....	2
2.2.1. Radiometrické veličiny	3
2.3. Princip základních jevů.....	4
2.3.1. Fotovoltaický jev	4
2.3.2. Luminiscence.....	4
2.3.3. Termoelektrický jev	4
2.4. Diagnostika fotovoltaických panelů	5
2.5. Měření a regulace teploty	5
2.5.1. PID regulace.....	5
3. Návrh systému.....	6
3.1. Měření vyzařovací charakteristiky LED	8
3.2. Zpracování v SW Mathematica	10
3.3. Teplotní regulace.....	13
3.4. Ověření návrhu.....	19
4. Závěr.....	21
5. Zdroje	22
Seznam symbolů a zkratek	A
Seznam obrázků, tabulek a grafů	B
Přílohy	C

1. Úvod

V dnešní době využíváme zařízení na elektrický proud až na výjimky denně. Ranní uvaření kávy, jízda do práce dopravními prostředky, osvětlení v budovách nebo večerní sledování zpráv v televizi či v přenosném počítači. Elektrická energie se v tepelných elektrárnách vyrábí přes 100 let. Spalováním uhlí se ale do ovzduší dostávají různé škodlivé látky, jako je například oxid uhličitý. A proto se kvůli ochraně životního prostředí klade velký důraz na využívání energie z obnovitelných zdrojů. Těmi jsou například voda, vítr, biomasa nebo Slunce. Aby bylo možno energii ze Slunce využít, je nutné sluneční záření na energii elektrickou přeměnit. K tomu slouží fotovoltaické panely vyrobené nejčastěji z křemíku dopovaného bórem nebo fosforem. Mají účinnost kolem 16 až 23 % a garantovanou životnost až 25 let. Samozřejmě je snaha tyto parametry zvyšovat a předejít snížené účinnosti panelu vlivem poruchy jednoho článku. Existuje několik metod, jak fotovoltaický panel diagnostikovat, tzn. najít poruchu materiálu. Jednou z nich je diagnostika pomocí fotoluminiscence. Při použití této metody je třeba simulovat dopadající sluneční záření na definovanou plochu, v tomto případě definovanou fotovoltaickým článkem. Otázka tedy je, jakým způsobem vytvořit světelný zdroj, který by produkoval stejné množství absorbovaných fotonů ve fotovoltaickém článku jako sluneční záření.

1.1. Význam fotovoltaiky

V minulosti lidé využívali převážně energie fosilních paliv, později se přidala energie z jádra atomu. Tato paliva, ať už se jedná o uhlí nebo radioaktivní uran, jsou jednak vyčerpatelem zdrojem energie, ale také se při jejich spalování dostávají do ovzduší škodlivé látky. Těžební doly, ve kterých se uhlí těží, ničí krajinu. Vyhořelé palivo z jaderných elektráren je nutné skladovat pod zemí do té doby, než se rozpadne. Uran 235 má poločas rozpadu přibližně 700 milionů let. Pokud dojde k havárii, má to dopad na živé organismy v dosahu. Proto se hledají nové možnosti, jak vyrábět elektrickou energii. Energie z obnovitelných zdrojů tyto problémy řeší. Jednou z nich je právě energie ze Slunce. Touto energií se zabývá fotovoltaika.

2. Teorie

2.1. Energie

Energie je pojem, se kterým se setkáváme každý den. Americký fyzik Max Planck definoval energii jako schopnost systému projevit se vnějšími efekty, např. teplem či světlem. Energie každého tělesa se skládá z potenciální a kinetické energie. Ze zákona zachování mechanické energie vyplývá, že co systém přijme, musí někam odejít. To znamená, že součet potenciální a kinetické energie je stále stejný.

$$W = E_{mech} = E_K + E_P$$

Začne-li se těleso pohybovat, přemění se potenciální energie na energii kinetickou. Dodá-li se tělesu energie po určitou dobu, jedná se o elektrickou práci P . Základní jednotka je Watt. [3]

$$P = \frac{W}{t} [Js^{-1} = W]$$

2.2. Elektromagnetické záření

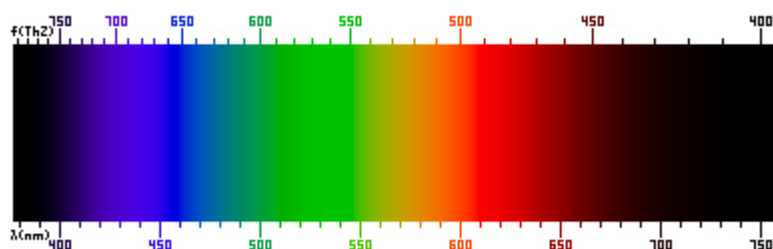
Světlo je elektromagnetické záření, jež se skládá z elektrické a magnetické složky. Toto záření se dá rozložit na složky sinusového průběhu, které jsou určeny frekvencí a vlnovou délkou. Vlnová délka je závislá na rychlosti šíření tohoto záření a frekvenci.

$$\lambda = c \cdot f^{-1}$$

Rychlost šíření elektromagnetického záření je závislá na prostředí, v němž se šíří. Ve vakuu se šíří rychlostí:

$$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Elektromagnetické záření se rozděluje podle vlnové délky a frekvence. Jedná se například o rentgenové, infračervené nebo ultrafialové záření. Soubor takových záření se nazývá spektrum. Na obrázku 2.1 je zobrazeno spektrum viditelného záření. Z obrázku je patrné, že červené světlo vyzařuje na vlnových délkách v rozmezí 625 nm až 740 nm.



Obrázek 2.1: Spektrum viditelného záření [7]

2.2.1. Radiometrické veličiny

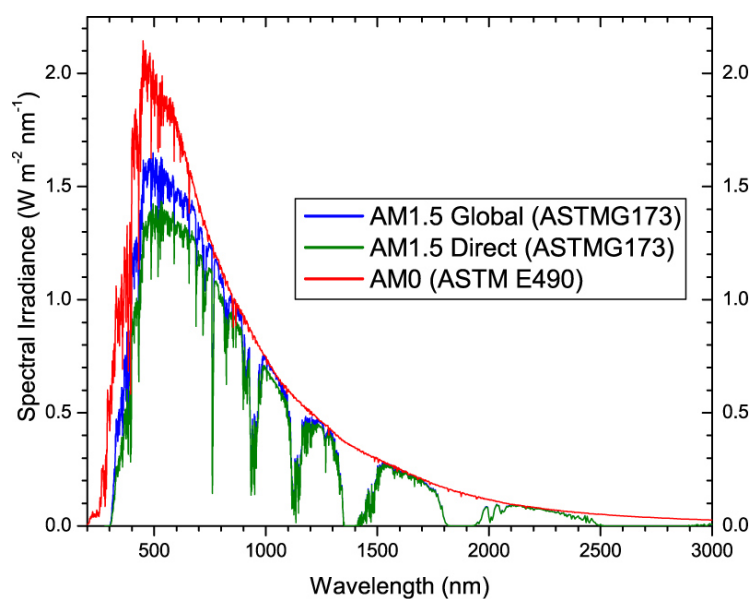
Množství přenesené energie na ozařované těleso určují radiometrické veličiny. Jedná se o zářivý tok, zářivost, ozáření, intenzitu vyzařování a měrnou zářivost. Zářivý tok je definován jako zářením přenesená energie za jednotku času.

$$\phi = \frac{dW}{dt} [W]$$

Další veličinou je intenzita vyzařování. Vyjadřuje vyzářenou energii do volného prostoru z jednotky plochy za jednotku času.

$$M = \frac{d\phi_{eV}}{dA} [W \cdot m^{-2}]$$

Jestliže je třeba porovnat fotovoltaické články, tedy porovnat jednotlivá měření radiometrických veličin, je důležité měřit za stejných podmínek. Pokud tomu tak není, je stanoveno modelové spektrum AM 1.5 (Obrázek 2.2), na které se hodnoty přepočítávají. Spektrum AM 1.5 je změřené pro intenzitu osvětlení 1000 W/m² při teplotě 25 °C.



Obrázek 2.2: Spektrum AM 1.5 [3]

2.3. Princip základních jevů

2.3.1. Fotovoltaický jev

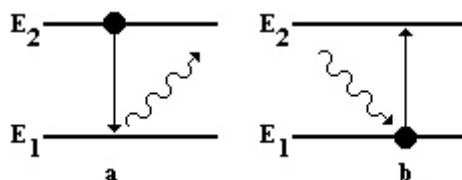
Fotovoltaický jev byl objeven téměř před 200 lety francouzským fyzikem Edmondem Becquerem. Ale až počátkem minulého století byl popsán německým fyzikem Albertem Einsteinem. Energie fotonu je dána jeho frekvencí a Planckovou konstantou h .

$$E = h \cdot f$$

Jedná se o jev, při kterém fotony dopadají na povrch polovodiče. Pokud mají dostatečnou energii, uvolní se z polovodiče elektrony. Ty přejdou do excitovaného stavu, z valenčního pásu do vodivostního, a vytvoří se kladné náboje „díry“. V případě, že je v materiálu vytvořen PN přechod, elektrony budou přitahovány k n-typu a díry k p-typu, a dojde tak k usměrnění pohybu volných částic.

2.3.2. Luminiscence

Luminiscence je ve své podstatě inverzní děj k fotoelektrickému jevu. Na tomto principu, který je zobrazen na obrázku 2.2, fungují například luminiscenční diody. Základem je přechod elektronu z excitovaného stavu zpět do stavu základního. Aby bylo možno tento přechod uskutečnit, je nutné dodat elektronu energii. Tím přejde elektron do vysoce excitovaného stavu a po chvíli spadne zpět do základního stavu. Přebytečnou energii odevzdá buď ve formě fotonu, nebo ve formě tepla a mluvíme tak o zářivé či nezářivé rekombinaci. energii, která je potřeba k uskutečnění, je možno dodat například pomocí elektrického proudu, potom se tento děj nazývá elektroluminiscence, anebo pomocí světelného záření, pak se nazývá fotoluminiscence. [5]



Obrázek 2.3: Interakce záření s látkou, a-emise, b-absorpce

2.3.3. Termoelektrický jev

Termoelektrický jev je inverzním k Seebeckovu jevu. Nazývá se též Peltierův jev a dochází při něm k provázání transportu náboje a tepla. Uvolněné či přijaté teplo je přímo úměrné stejnosměrnému proudu, který protéká rozhraním dotýkajících se vodičů. Jestli se teplo odevzdá nebo přijme, záleží na polaritě proudu. Konstrukce Peltierova článku se skládá z velkého množství elementů, nejčastěji polovodičových přechodů PN, které jsou zapojené v sérii. Základní veličiny určující jeho vlastnosti jsou Seebeckův koeficient a měrná tepelná vodivost.

2.4. Diagnostika fotovoltaických panelů

Pomocí diagnostických metod fotovoltaických panelů lze objevit vady článků a konektorů. Běžně je lze vyhodnocovat měřením základních obvodových veličin - napětí, proudu a výkonu - nebo měřením elektrické pevnosti. Pokročilejšími metodami jsou např. flash tester, termografie anebo měření pomocí luminiscence (viz kapitola 2.3.2).

2.5. Měření a regulace teploty

Teplota jako základní jednotka soustavy SI je stavová veličina. Základní jednotkou je Kelvin. Existuje několik možností, jak ji změřit. Důležitým faktorem je měřený objekt. Nejčastější způsob měření teploty je pomocí čidel pracujících na principu termoelektrického článku. Ten využívá Seebeckův a Thomsonův jev. Elektromotorické napětí je totiž přímo úměrné teplotě. Měření teploty samotného p-n přechodu polovodičové součástky může být založeno na měření obvodových veličin napětí a proudu tohoto přechodu, a následným vyhodnocením. Dále je možno použít termokameru. Tou lze měřit teplotu například na fotovoltaickém panelu, který má velkou plochu. Výhodou termokamery je možnost měřit rozložení teploty na dané ploše.

Nejvhodnějším způsobem měření teploty na LED je měření pomocí termočlánku nebo měření napětí na diodě, resp. skupině diod s konstantním proudem a následným vyhodnocením těchto parametrů. V prvním případě je třeba zohlednit umístění termočlánku, naopak v případě druhém je měřeno napětí na skupině světelných diod, a proto může vzniknout chyba měření.

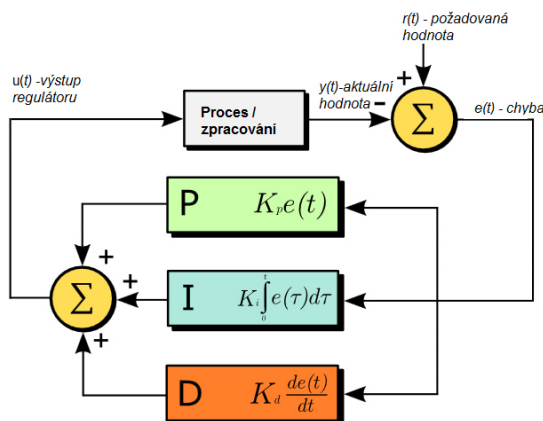
Pro samotné chlazení diody je možno použít komerční PID regulátor. V případě, kdy je potřeba 10 takových zařízení, je lepší použít speciálně vyvinuté zařízení. Například MOSFET tranzistor řízený Arduinem, případně v kombinaci se step-down konvertorem.

2.5.1. PID regulace

V dnešní době je regulace stále častějším tématem v souvislosti s automatizací. Ať už se jedná o usměrnění otáček motoru nebo teploty. Není ale novým tématem. Dobrým příkladem může být využívání proudu vody. Jednoduché zařízení, které je poháněné vodou, bylo jistě známo již ve středověku. Obecně se regulace skládá ze tří částí: senzor, který měří aktuální hodnotu daného parametru, zařízení, skrze které se tento parametr ovlivňuje, a algoritmus srovnávající aktuální hodnotu s požadovanou.

$$e(t) = s(t) - i(t)$$

PID je zkratka pro tříložkovou regulaci - proporciální, integrační a derivační. Použitím kombinace všech složek lze odstranit problémy vzniklé při použití jen jedné složky.

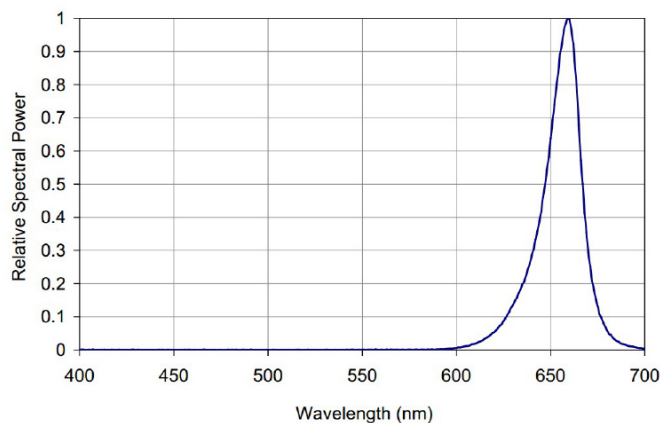


Obrázek 2.4: Schéma PID regulace [9]

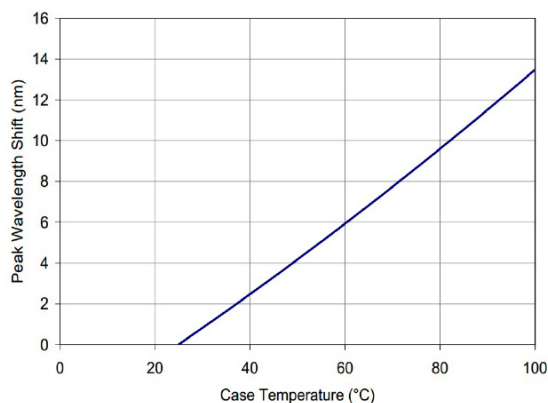
3. Návrh systému

Návrh osvětlovacího tělesa lze rozdělit do dvou základních bodů. Nejprve je třeba určit typ použitého světelného zdroje a následně změřit vyzařovací charakteristiky a zpracovat je. V tomto případě se jedná o luminiscenční diodu. Ta se působením elektrického proudu zahřívá a se změnou teploty se změní vlivem šířky zakázaného pásu vlnová délka, při které má světelný zdroj odlišnou vyzařovací charakteristiku. Zároveň dochází k poklesu zářivé rekombinace, a tím i poklesu světelného výkonu. S tím souvisí druhý bod návrhu, a to návrh vhodného chladicí či regulačního zařízení.

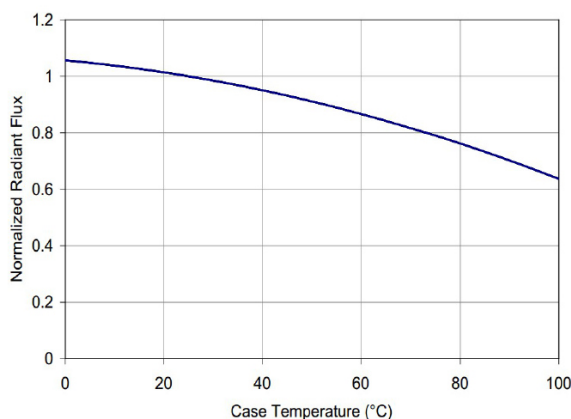
Následující grafy byly získány z katalogového listu červené výkonové diody (Tabulka 3.1) dostupného v e-shopu obchodu conrad.cz. V grafu 3.1 je zobrazena závislost vlnové délky luminiscenční diody na relativním spektrálním výkonu. Z grafu je patrné, že nejvyšší účinnost má při vlnové délce 660 nm. Ta je dána šířkou zakázaného pásu polovodičového materiálu. Šířku zakázaného pásu lze ovlivnit například ohřátím přechodu PN. V grafu 3.2 je zobrazen právě průběh vlnové délky s teplotou přechodu PN. V systému, který je v této práci navrhován, je proto nutné teplotu diody stabilizovat, aby bylo možné spolehlivě kontrolovat její intenzitu i spektrum vyzařování.



Graf 3.1: Závislost relativního spektrálního výkonu na vlnové délce při teplotě 25°C [10]



Graf 3.2: Posun maxima vlnové délky v závislosti na teplotě [10]



Graf 3.3: Závislost intenzity vyzařování na teplotě [10]

Při výběru světelného zdroje a určení jeho parametrů se bere v úvahu oblast používání. V tomto případě má za úkol simulovat množství absorbovaných fotonů slunečního záření na fotovoltaickém článku. Záření dopadající na povrch Země má výkon 1000 W/m^2 , což je standardizovaná hodnota. Celková osvětlená plocha bude čtvercová o rozměrech $16 \times 16 = 256 \text{ cm}^2$, což je velikost fotovoltaického článku.

Pro návrh teplotní regulace je použita červená luminiscenční dioda s parametry uvedenými v tabulce 3.1. Dioda, pro kterou bylo provedeno měření (kapitola 3.1) a následně se zpracována v SW Mathematica (kapitola 3.2), je žluté barvy a má odlišné parametry (Tabulka 3.2). Důvodem změny diody byl nedostatečný počet žlutých diod na skladě obchodu GM electronic. Výhoda červené diody spočívá v tom, že její výkon je asi desetkrát větší. Pak stačí použít desetkrát méně takových diod. Nevýhodou je, že její vyzařovací úhel je větší než 90° . Určitá část vyzařovaného světla, větší než u diody žluté, se tak ztratí.

P_e [W]	10
U_f [V]	11,2
I_f [A]	1
α₀ [°]	110
P_r [W] při 1 A	2,8
R_{jc} [K/W]	1,1
λ [nm]/barva	660 /červená
pouzdro	Star DR-660-10-00-00

Tabulka 3.1: Výkonová dioda Star DR-660-10-00-00

P [W]	1
U_f [V]	2
I_f [mA]	350
α₀ [°]	30
Ω [lm]	11
λ [nm]/barva	590 / žlutá
pouzdro	Star 20mm

Tabulka 3.2: Výkonová dioda STAR S30GY9C

Z Einsteinova fotoelektrického jevu vyplývá, že energie fotonu je nepřímo úměrná vlnové délce záření

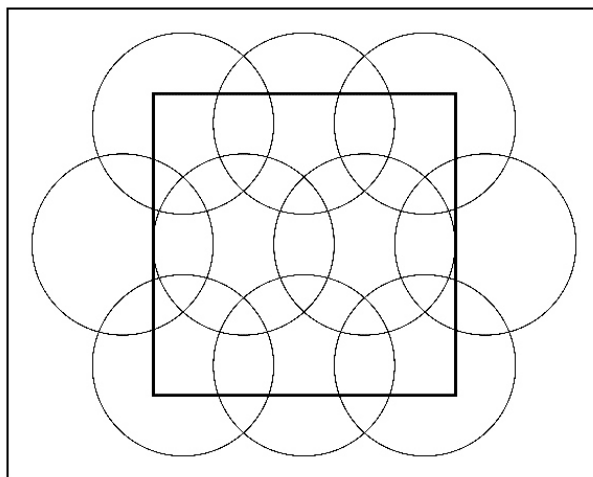
$$h\nu \text{ [eV]} = \frac{hc}{\lambda \text{ [nm]}} = \frac{1240 \text{ Jm}}{\lambda \text{ [nm]}}$$

přičemž Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ a rychlost světla $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Množství emitovaných fotonů diodou se vypočte pomocí vyzařené energie jednoho fotonu,

$$\Phi = \frac{P_r \text{ [mW]}}{h\nu \text{ [eV]}} = \frac{2,8 \text{ W}}{1,88 \text{ eV}} = 1,49 \frac{\text{A}}{\text{e} \cdot \text{cm}^2}$$

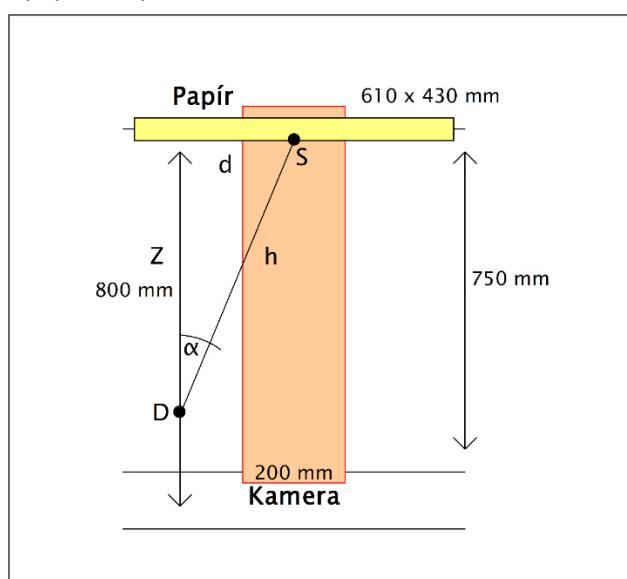
Ideální FV článek z monokrystalického křemíku, který transformuje všechny dopadající fotony na vodivé elektrony má pod standardním osvětlením teoretickou velikost fotonového proudu kolem $\phi = 50 \frac{mA}{e}$ na 1 cm^2 , tedy $12,8 \frac{A}{e}$ na plochu daného fotovoltaického článku 256 cm^2 . Aby bylo teoretického fotonového proudu dosaženo, je potřeba $\frac{12,8 A/e}{1,49 A/e} = 8,59 \doteq 9$ luminiscenčních diod. Uvážili se to, že se část záření ztratí, bude potřeba diod více. Stačit bude 10 luminiscenčních diod. Na obrázku 3.5 je znázorněno jejich možné uspořádání.



Obrázek 3.1: Příklad uspořádání luminiscenčních diod

3.1. Měření vyzařovací charakteristiky LED

Měření vyzařovací charakteristiky bylo prováděno v místnosti bez přístupu světla. Uspořádání během měření je znázorněno na obrázku 3.1. Kamera, fotoaparát, je umístěna ve vzdálenosti 750 mm od stínítka, papíru velikosti A2. Mezi kamerou a papírem je třeba nechat volný prostor o ploše, která odpovídá zkoumanému FV článku, tedy 200 mm. Vzdálenost středu papíru od průmětu luminiscenční diody na papír je při všech měření stále stejná, a to 200 mm. Podmínkou pro další zpracování je, aby střed papíru odpovídal středu snímku.



Obrázek 3.2: Sestava pro snímání charakteristik luminiscenční diody

Diodu poté lze přibližovat či oddalovat od papíru směrem ke kameře, přičemž závisí na vzdálenosti od středu stínítka a úhlu, pod kterým na něj svítí. Níže (Tabulka 3.3) je uvedených 10 různých poloh, pro které jsou zaznamenány vyzařovací charakteristiky. Pro zvolenou vzdálenost středu papíru od diody je možné podle Pythagorovy věty platné v pravouhlém trojúhelníku dopočítat v jaké výšce a pod jakým úhlem se nachází.

h [cm]	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Z [cm]	28,7	34,6	40,3	45,8	51,2	56,6	61,8	67	72,3	77,5
α [°]	34,85	30	26,39	23,58	21,32	19,47	17,92	16,6	15,47	14,48

Tabulka 3.1: Seznam charakteristik luminiscenční diody, pro různou výšku a úhel

- d = 200 mm, tj. vzdálenost

středu papíru od průmětu diody na papír

- Výpočet:

$$\alpha[h_]= \text{Round}\left[\frac{\alpha/. \text{Solve}\{\{\alpha == \text{ArcSin}\left[\frac{d}{h}\right] < 90\}, \alpha\} /. C[1] \rightarrow 0}{2\pi} * 360., 0.01\right]$$

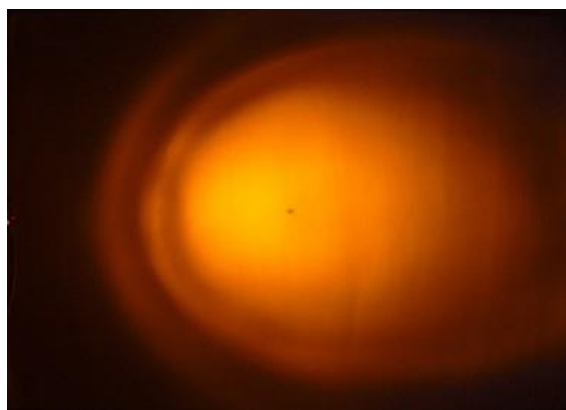
$$Z = \sqrt{h^2 - d^2}$$

K měření vyzařovací charakteristiky je použita výkonová dioda žluté barvy STAR S30GY9C s parametry uvedenými v tabulce 3.2.

Vyzařovací charakteristika byla snímána pomocí digitálního fotoaparátu a následně upravena v počítači pomocí SW Mathematica.

Pro snímání vyzařovací charakteristiky ze stínítka byl použit fotoaparát zn. Panasonic, typ Lumix DMC-FZ8, s nastavenými parametry citlivosti ISO 400, ohniskové vzdálenosti F3.6 a času expozice. Rozlišení fotoaparátu je 7M.

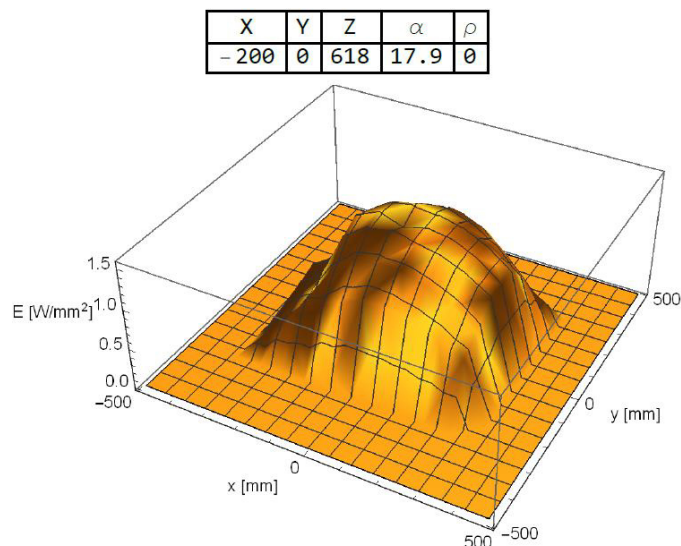
Kvalita charakteristiky je dána jak použitým světelným zdrojem, tak i snímací technikou. Aby výsledný obraz obsahoval co nejméně šumu, je třeba nastavit dobře citlivost a čas expozice. Dále je nutné snímat při dobrém zatemnění, aby nedošlo k interferenci s okolním světlem. Bylo naměřeno 10 vyzařovacích charakteristik při různém vyzařovacím úhlu a výšce.



Obrázek 3.3: Snímek charakteristiky luminiscenční diody pro h=35cm

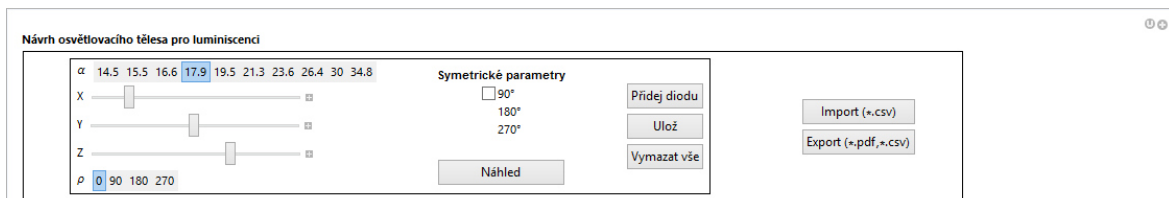
3.2. Zpracování v SW Mathematica

Naměřené vyzařovací charakteristiky byly dále zpracovány v SW Mathematica. Celý program je rozdělen do tří částí. Za prvé se jedná o program (Příloha 1.1), který převádí snímek do maticové formy. Přičímž jeden pixel odpovídá jednomu sloupci a řádku. Pro rychlejší práci s těmito maticemi je vhodné nejprve snímek zmenšit na 375 x 267 pixelů. To lze udělat například pomocí softwaru Jpeg Resampler 2010. Výstupem tohoto programu je řada souborů ve formátu CSV, přičemž v jednom souboru jsou uložena data pro jednu charakteristiku. Ta je definována 5 parametry. Prvním z nich je úhel, pod kterým luminiscenční dioda svítí na fotovoltaický článek, druhým je úhel otočení a zbylé tři parametry určují pozici luminiscenční diody. Ta je v tomto případě taková, aby střed snímku odpovídal středu vyzařovací charakteristiky. To znamená, že parametry Y a Z jsou nulové a parametr X je rovný -200 (Obrázek 3.4).



Obrázek 3.4: Příklad charakteristiky luminiscenční diody

Vstupem druhé části programu (Příloha 1.2) je těchto 5 parametrů. Prvními dvěma zmíněnými parametry se zvolí jeden konkrétní soubor. Další tři parametry určují novou pozici luminiscenční diody. Posun je pak dán rozdílem základní pozice diody od nové, uživatelem zadané pozice. Následně lze celkem jednoduše skládat jednotlivé charakteristiky dohromady. Výsledkem této části programu je interaktivní rozhraní (Obrázek 3.5), ve kterém lze snadno zadávat vstupní parametry a přidávat či odebírat nové luminiscenční diody do systému.



Obrázek 3.5: Uživatelské rozhraní v SW Mathematica

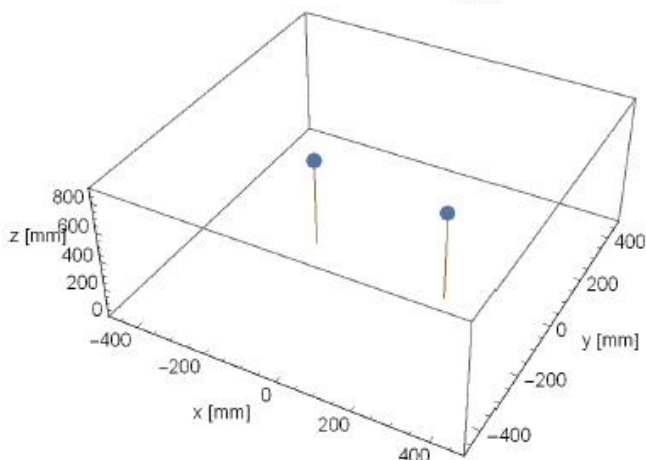
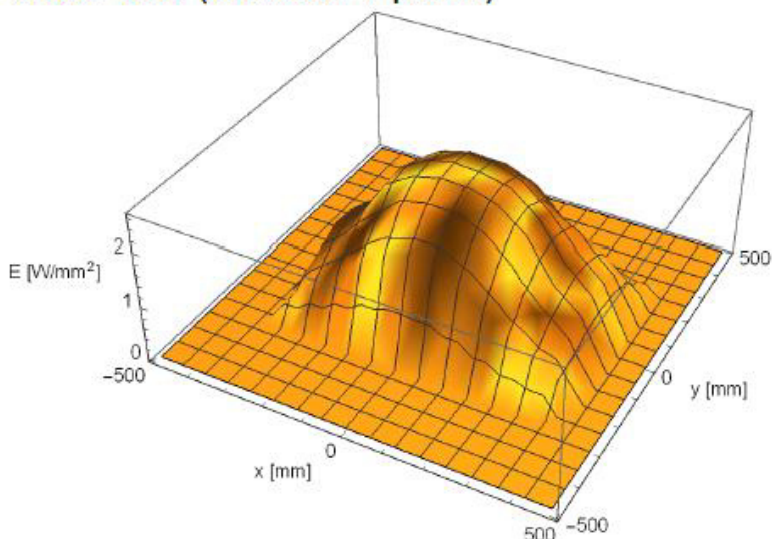
Uživatel zároveň vidí jak parametry aktuální přidávané diody a její charakteristiku, tak parametry všech diod v systému a jejich výslednou charakteristiku. Dále je možné zobrazit výřez výsledné charakteristiky odpovídající fotovoltaickému článku o délce jeho strany 200 mm. Na tomto výřezu je počítána homogenita charakteristiky. Aby byla výsledná charakteristika co nejvíce homogenní, musí být splněny dvě základní podmínky. Za prvé průměr intenzity je maximálně možný a za druhé je rozdíl průměru intenzity a aktuální intenzita je co nejmenší a konstantní pro všechny body.

Poslední část programu (Příloha 1.3) navazuje na druhou část. Zajišťuje export vyzářovacích charakteristik do PDF souborů. Dále je možné vygenerovat do souboru ve formátu CSV seznam použitých luminiscenčních diod, ve kterém sloupce představují jednotlivé vstupní parametry.

Pokud je nutné měnit pozici a otočení luminiscenční diody, je třeba vyřešit v druhé části programu (Příloha 1.2) několik problémů s tím spojených. Jestliže je třeba změnit pozici na ose X či Y, stačí zadat nové hodnoty. Při změně pozice na ose Z, je třeba zahrnout do výpočtu dvě věci. Za prvé to, že intenzita je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti. Za druhé platí, že se změnou luminiscenční diody na ose Z se mění velikost plochy charakteristiky. Pokud se vzdálenost diody od stínítka zvětší, pak se dioda od stínítka oddaluje a plocha charakteristiky se zvětší. To znamená, že se musí charakteristika posunout zpět do bodu P, průřezu luminiscenční diody na stínítku. Na obrázku 3.6 je vidět ukázka složení dvou luminiscenčních diod s různými parametry.

Aktuální soubor diod (intenzita + poloha)

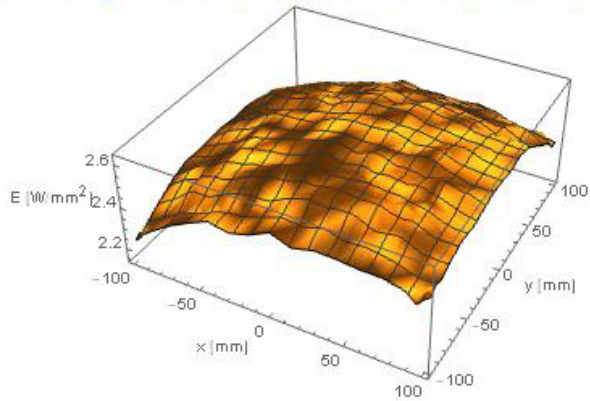
X	Y	Z	α	ρ
-180	10	618	19.5	0
215	-30	618	19.5	180



Obrázek 3.6: Příklad složení více luminiscenčních diod a grafické znázornění jejich umístění

Pro názornost je na dalším obrázku (Obrázek 3.7) zobrazen výřez odpovídající velikosti fotovoltaického článku. Dále tu jsou uvedeny hodnoty charakterizující homogenitu pole. Průměrná hodnota intenzity záření na této ploše je $2,5 \text{ W/m}^2$, maximální odchylka od této průměrné hodnoty je $0,37 \text{ W/m}^2$.

Velikost fotovoltaického článku o rozměrech 200 x 200 mm



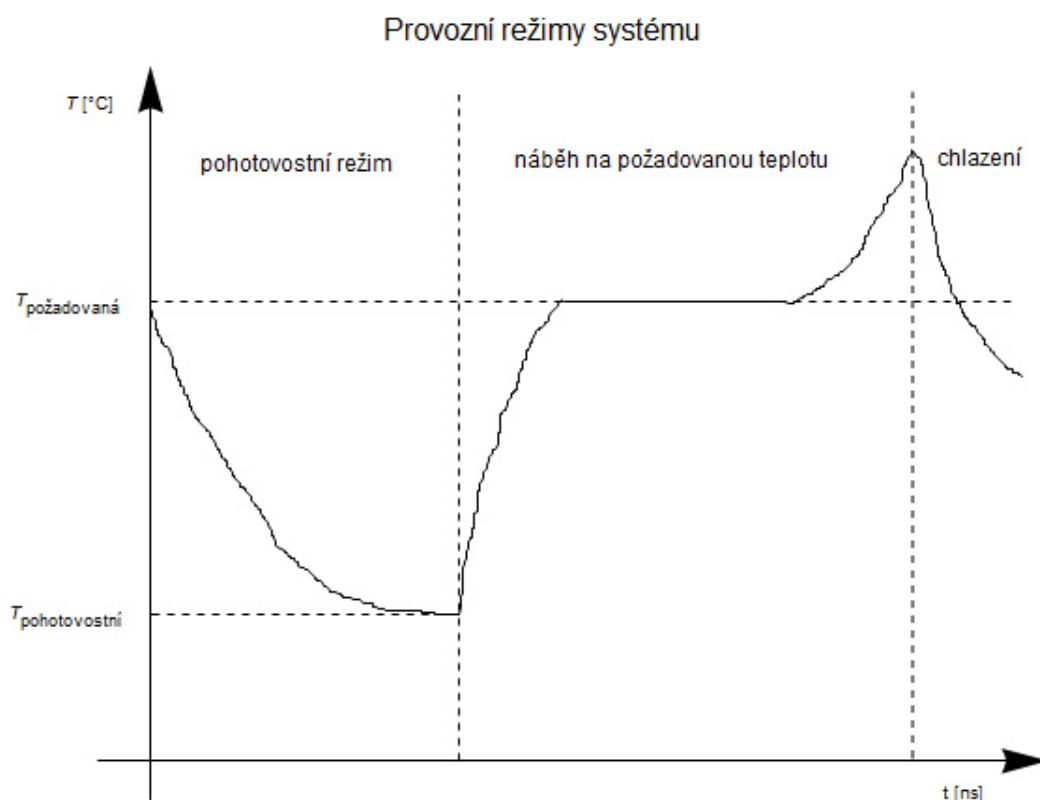
Homogenita pole

Průměrná hodnota:	2.52043
Max. odchylka od průměrné hodnoty:	0.37945

Obrázek 3.7: Velikost fotovoltaického článku (200 x 200 mm), výpočet homogenity

3.3. Teplotní regulace

Cílem je dosáhnout následujícího (Graf 3.3) provozního režimu. Po zapnutí teplotní regulace dojde nejprve k vychlazení na pohotovostní teplotu. Při zapnutí luminiscenční diody začne teplota narůstat a teplotní regulace se bude snažit dosáhnout požadované teploty. Ta je vyšší než teplota pohotovostní. Dosažení požadované teploty bude signalizováno uživateli, aby mohl provést fotoluminiscenční měření, které by mělo být provedeno během několika nanosekund. Pokud dojde k přehřátí, tj. nasycení tepelných kapacit systému, a chlazení již dále nebude schopno udržovat teplotu, bude opět vydána signalizace uživateli, aby diody vypnul. Systém se pak ochladí zpět na pohotovostní teplotu a bude připraven pro další měření.

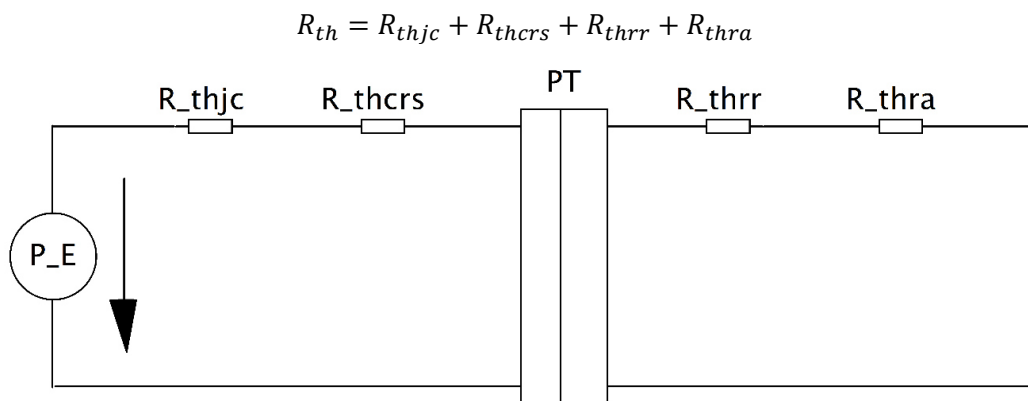


Graf 3.4: Provozní režimy systému

Systém lze popsat pomocí energetické bilance. Veškerou energii, kterou systém přijme, někam odevzdá, nebo se uvolní ve formě tepla.

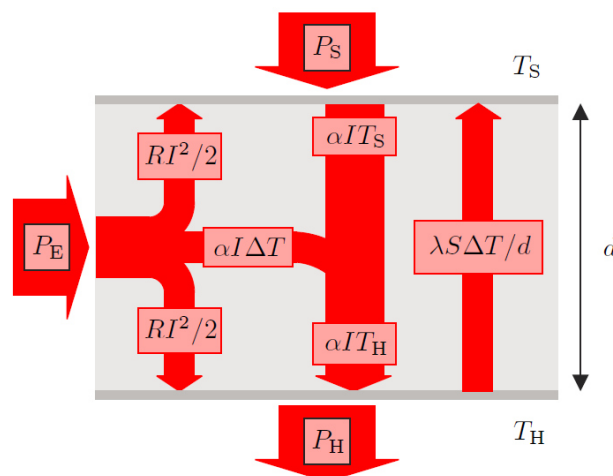
Vstupní energie je v tomto případě získávána pomocí napájecích zdrojů. Část energie bude dodána na Peltierův článek a část se přemění v tepelné ztráty, a právě ty jsou důležité pro dimenzování jednotlivých součástí a návrh chladicího zařízení.

Aby bylo možno teplotu luminiscenční diody stabilizovat, je dioda chlazena pomocí Peltierova článku. Ten ale musí přebytečné teplo někam odevzdat, k tomu účelu je zde použit pasivní chladič. Pro návrh takového chladiče je potřeba spočítat hodnotu tepelného odporu na jednotlivých prvcích soustavy (Obrázek 3.8). Jedná se o tepelný odpor přechodu pouzdra a polovodiče R_{thjc} luminiscenční diody, způsob uchycení diody na Peltierově článku. Tepelný odpor Peltierova článku na teplé R_{thcrs} a studené R_{thrr} straně, způsob uchycení Peltierova článku na chladič a tepelný odpor chladiče R_{thra} . Celkový tepelný odpor R_{th} chladiče by pak neměl být menší než tepelný odpor soustavy.



Obrázek 3.8: Schéma pro výpočet velikosti chladiče

Pro uchycení luminiscenční diody na Peltierův článek a tohoto článku na chladič je nejlepší použít teplovodivou stříbrnou pastu. Použitím jiných spojovacích materiálů by se zvýšil tepelný odpor soustavy. Tepelný odpor diody je 1,1 K/W, tepelný odpor chladiče je 4,8 K/W. Dále je nutné spočítat, jaký bude ztrátový výkon na studené a teplé straně Peltierova článku. Ten lze spočítat z tepelné bilance Peltierova článku (Obrázek 3.9). Tepelný výkon diody, který je potřeba uchlazit, je 11,2 W. K tomu je třeba připočítat výkon Peltierova článku, který je ovšem proměnný. Je jisté, že systém se nebude moci vychladit v kontinuálním režimu, ale bude muset pracovat v režimu pulzním, při němž do bilance vstupují i tepelné kapacity komponentů.



Obrázek 3.9: Energetická bilance na Peltierově článku

Hlavním ovládacím prvkem celého systému (Příloha 2) je elektronická platforma Arduino Mega 2560 (Obrázek 3.10) a regulační obvod (Obrázek 3.11) obsluhující Peltierovy články.



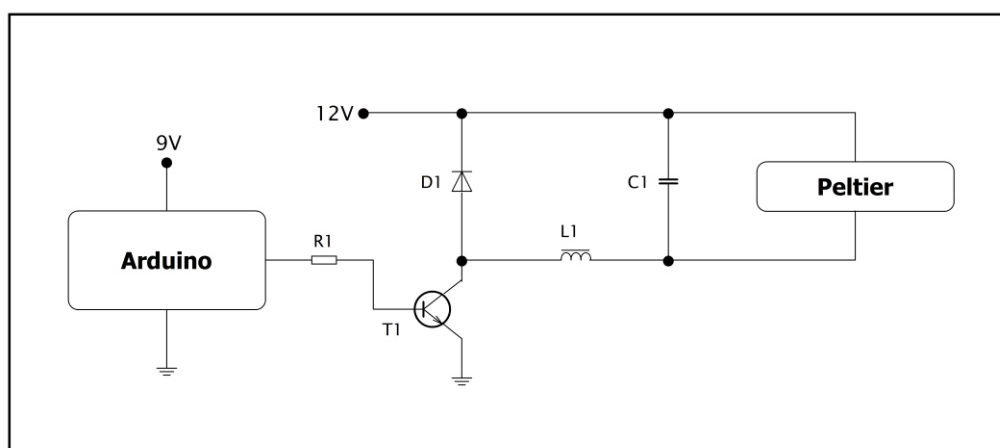
Obrázek 3.10: Arduino MEGA R3 2560 [11]

Tato platforma je snadno ovladatelná, obsahuje grafické prostředí a umožňuje pulsně-šířkovou modulaci (PWM). Ta je potřebná k PID regulaci. Dalším důležitým prvkem je sada obsahující výkonový step-down měnič, chladič, teplotní čidlo, Peltierův článek a luminiscenční diodu. Peltierův článek jako základní regulační prvek byl vybrán pro svou jednoduchost a možnost rychlého spínání.

Princip teplotní regulace a chlazení luminiscenčních diod se skládá ze dvou kroků. Prvním krokem je měření teploty na diodách a druhým samotný proces regulace, chlazení či ohřívání.

Měření teploty je zprostředkováno teplotním čidlem DALLAS DS18B20. Výhodou tohoto řešení je, že těchto teplotních čidel lze do série zapojit asi 50 kusů a že připojením k platformě Arduino je možné přímo číst teplotu. Není potřeba žádný další převod. Kromě programového řešení je nutno vyřešit umístění tohoto čidla. Nejvhodnější je umístění takové, aby čidlo snímalo průměrnou teplotu diody.

Regulační proces začíná v platformě Arduino. Vstupním parametrem je aktuální hodnota na luminiscenční diodě, kterou program porovná s nastavenou požadovanou teplotou. Výsledkem tohoto algoritmu jsou dvě možnosti. Buď je teplota diody nižší než požadovaná, anebo teplotu požadovanou převyšuje. V druhém případě se zvýší duty factor PWM signálu. PWM signálem je spínán tranzistor MOSFET výkonového step-down měniče. To umožní zvýšit výkon Peltierova článku. Účelem step-down měniče je za prvé případná korekce napětí a proudu, aby bylo možné použít napájecí zdroj s nižším proudem, za druhé možnost napájení Peltierova článku stejnosměrným proudem. Schéma použitého nejjednoduššího měniče je na následujícím obrázku (Obrázek 3.111).



Obrázek 3.11: Schéma regulačního obvodu

Při návrhu tohoto obvodu se využívá základních principů. Jako polovodičová dioda je zde použita kvůli nízkému prahovému napětí Schottkyho dioda. Kvůli případnému přepětí je nutné diodu dimenzovat alespoň na dvojnásobné napětí, tedy 20V. V případě tlumivky a kondenzátoru je nutné vzít v úvahu frekvenci, se kterou se bude step-down měnič spínat. Bude-li příkon Peltierova článku 30 W, bude to odpovídat práci 30 mJ vykonané za 1 ms, tedy frekvenci 1 kHz. Pokud by se tedy Peltierův článek spínal s frekvencí 40 kHz, vykonaná práce činí jen 1,5 mJ. Ta odpovídá energii uchovávané v těchto součástkách. Velikost napětí a proudu je dán podle parametrů Peltierova článku (Tabulka 3.2).

Pro tlumivku platí:

$$E = \frac{1}{2} LI^2$$

Z výpočtu vyplývá, že je potřeba indukčnost o velikosti 150 μH , což odpovídá hodnotě tlumivky použité ve step-down měniči.

Obdobně pro kondenzátor platí:

$$E = \frac{1}{2} CU^2$$

Velikost kapacity bude 15 μF . Elektrolytický kondenzátor o velikosti 68 μF je dostačující.

Pro ztrátový výkon spínacích ztrát v tranzistoru je potřeba vzít v úvahu zjednodušené schéma na obrázku 3.8, kde je Peltierův článek, jehož parametry jsou v tabulce 3.2, reprezentován rezistorem.

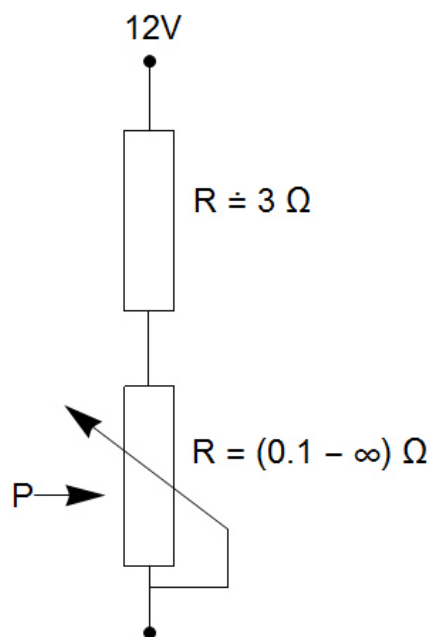
T_H [$^{\circ}\text{C}$]	50
Q_{\max} [W]	16
ΔT_{\max} [$^{\circ}\text{C}$]	75
I_{\max} [A]	3,2
U_{\max} [V]	9,2
R_{Th}	2,75

Tabulka 3.2: Peltierův článek TEC1-071030-30X30 W150mm

Vyjde se ze základní rovnice:

$$P = UI, \text{ kde } I = \frac{U}{3 \Omega + R}$$

$$P = \frac{U^2}{(3 \Omega + R)} - \frac{U_{Pelt}^2}{3 \Omega}$$



Obrázek 3.12: Schéma pro výpočet spínacích ztrát na tranzistoru

Napětí na Peltierově článku se spočítá pomocí napěťového děliče jako

$$U_{Pelt} = U \frac{3 \Omega}{3 \Omega + R}$$

a spínací ztráty na tranzistoru lze popsat jako ztráty na Peltierově článku odečtené od celkových ztrát v systému, bude-li horní limit ztrátového výkonu obdélkový průběh (Graf 3.5).

$$P = \frac{U^2}{(3 \Omega + R)} - \frac{3 \Omega U^2}{(3 \Omega + R)^2}$$

Spínací ztráty na tranzistoru budou maximální tehdy, pokud bude první derivace ztrát rovna nule.

$$\frac{\partial P}{\partial R} = \frac{6U^2}{(3\Omega + R)^3} - \frac{U^2}{(3\Omega + R)^2} = 0$$

$$R = 3 \Omega$$

Dosadí-li se maximální odpor na tranzistoru během jeho spínání do původní rovnice

$$P = \frac{12V^2}{(3\Omega + 3\Omega)} - \frac{3\Omega 12V^2}{(3\Omega + 3\Omega)^2} = 12 \text{ W},$$

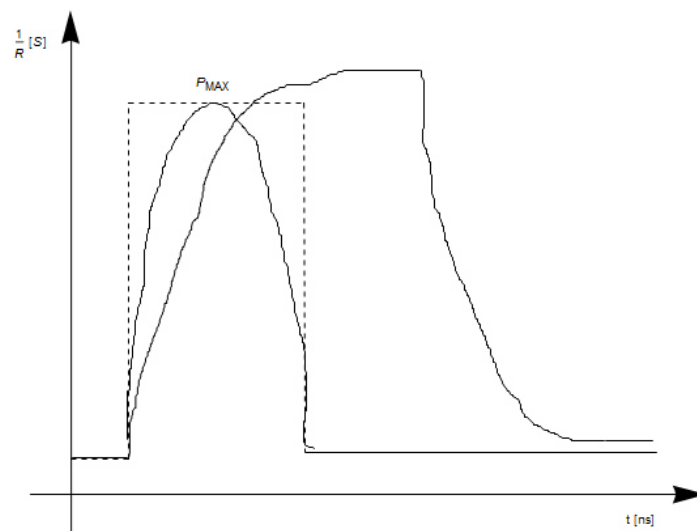
maximálně možný ztrátový výkon na tranzistoru (Tabulka 3.3) bude 12 W.

V_{DS} [V]	100
R_{DS} [Ω]	0,09
I_{DS} [A]	17
P_D [W]	70
T_c [°C]	25
V_{GS(th)} [V]	2-4
R_{θJG} [°C/W]	2,15
R_{θGS} [°C/W]	0,50
R_{θJA} [°C/W]	62
t_r [ns]	22
t_f [ns]	25

Tabulka 3.3: Tranzistor IRF530, N-kanál, pouzdro TO220AB

K určení celkových průměrných ztrát na tranzistoru je třeba vzít v úvahu poměr doby překmitu tranzistoru z uzavřeného do otevřeného stavu a zpět k době jedné periody modulace. Frekvence spínání step-down měniče je 20 kHz.

$$\frac{t_r + t_f}{1/f} = \frac{22 \text{ ns} + 25 \text{ ns}}{\frac{1}{20} \text{ kHz}} = 47 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 0.00094$$

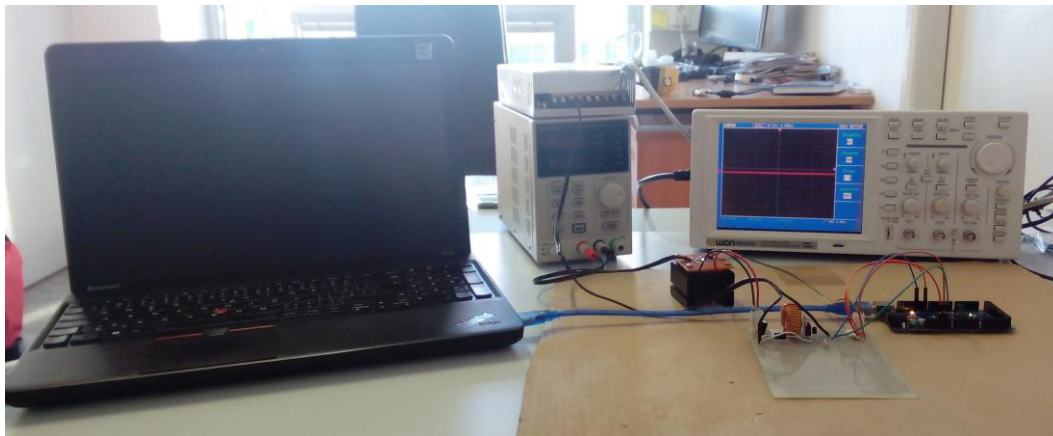


Graf 3.5: Průběh vodivosti a ztrátového výkonu tranzistoru v průběhu spínání v závislosti na čase

Celkový ztrátový výkon tedy vyháží $12 \text{ W} \cdot 0,00094 = 11,3 \text{ mW}$, což se vychladí bez chladiče.

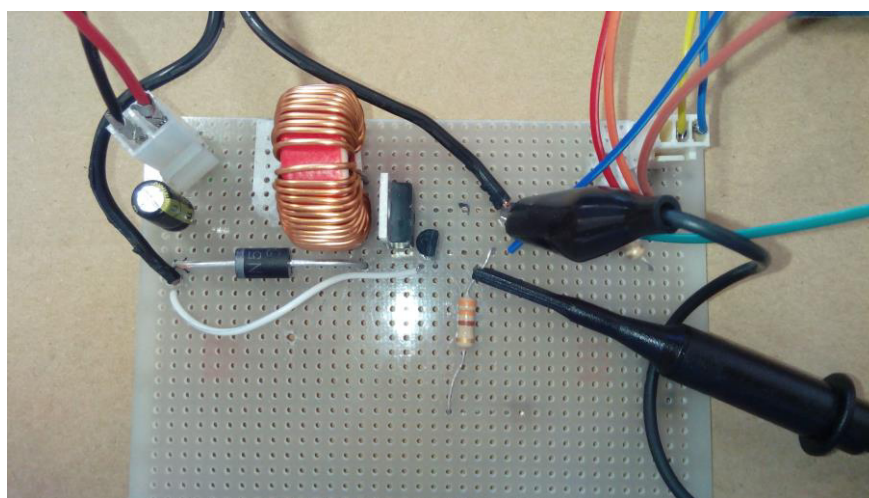
3.4. Ověření návrhu

Na obrázku 3.13 je testovací uspořádání teplotní regulace pro jednu luminiscenční diodu. Byla navrhuta deska plošných spojů pro systém 10 takových zařízení (Příloha 3). Při ověřování návrhu byly součástky osazeny na nepájivém plošném spoji.



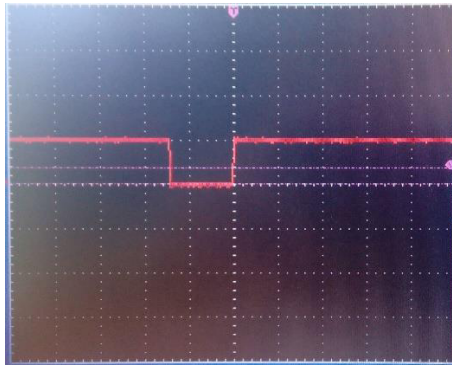
Obrázek 3.13: Uspořádání při ověření teplotní regulace

Měřením (viz zapojení na Obrázku 3.14) napětí mezi kolektorem a emitorem spínacího tranzistoru pomocí osciloskopu bylo ověřeno, že tranzistor je možné účinně otevřít řídicím signálem z Arduina. Dále bylo automatickým čtením teploty rovněž pomocí Arduina ověřeno, že teplotní regulace je schopna ochladit luminiscenční diodu na požadovanou teplotu pod teplotou okolí.



Obrázek 3.14: Zapojení regulačního obvodu na nepájivém plošném spoji

Obrázek 3.15 je příkladem výstupu PWM signálu z Arduina v době, kdy Peltierův článek chladil.



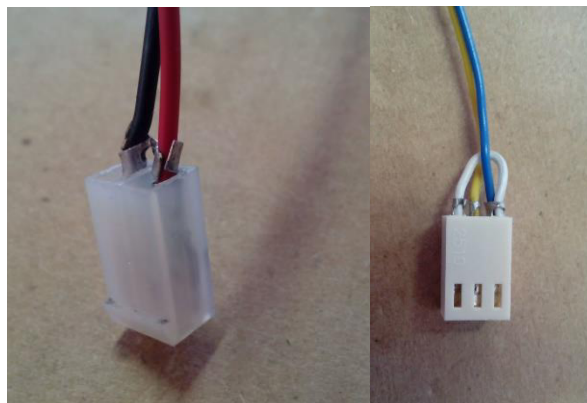
Obrázek 3.15: PWM signál na výstupu z Arduina během teplotní regulace

Zapojení luminiscenční diody (Obrázek 3.16) bylo provedeno podle katalogového listu GM electronic (Příloha 6).



Obrázek 3.16: Zapojení chladič - Peltierův článek - luminiscenční dioda - teplotní čidlo

Na následujícím obrázku 3.17 je zobrazen způsob uchycení kabelů napájení Peltierova článku a kabelů spojujících teplotní čidlo z Arduinem.



Obrázek 3.17: Způsob uchycení kabelů (pomocí konektorů se zámkem)

4. Závěr

V rámci této bakalářské práce byl navržen základní koncept osvětlovací soustavy a její teplotní regulace. Byly vybrány a nakoupeny veškeré součástky pro stavbu celého systému. Dále byla provedena testovací měření rozložení intenzity luminiscenční diody. Tato měření byla softwarově zpracována pomocí speciálně napsaného programu v SW Mathematica, který umožňuje simulovat rozložení intenzity skupiny diod. Byly analyzovány chladicí i ztrátové výkony a také sestaven výkonový měnič ovládaný PWM signálem z mikroprocesoru Arduino Mega, který zároveň čte teplotu změřenou teplotním čidlem.

Na sestrojeném systému byla experimentálně ověřena funkčnost čtení teploty, chlazení a automatické teplotní regulace pro jednu luminiscenční diodu. Toto ověření proběhlo úspěšně. Výstupem této práce je tedy otestování funkčnosti osvětlovacího systému pro jednu luminiscenční diodu. Dále je výstupem práce dostatečně odborný rozbor, veškerá dokumentace i popis potřebných součástek (Příloha 3) pro úspěšné dokončení osvětlovacího tělesa, které je tvořeno deseti takovými systémy. Výstupy této práce mohou být dále použity pro sestavení celého systému.

5. Zdroje

- [1] kniha: Konrad Mertens, Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice, ISBN: 978-1118634165
- [2] diplomová práce: Tomáš Baura, ANALÝZA FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ POMOCÍ FOTOLUMINISCENCE, Vysoké učení technické v Brně, 2012
- [3] PVEDUCATION. PVEDUCATION. [online]. [cit. 2016-12-22]. Dostupné z: <http://www.pveducation.org/>
- [4] <http://fyzika.jreichl.com/>
- [5] <http://www.chemie.uni-jena.de/institute/oc/weiss/lumineszenz.htm>
- [6] <https://www.arduinoforum.de/arduino-Thread-PID-PWM-geregelte-L%C3%BCftersteuerung-mit-Dallas-18B20?page=2>
- [7] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/06/Srgbspectrum.png>
- [8] <http://slideplayer.cz/slide/11454899/>
- [9] bakalářská práce: Simon Nieswand, A Peltier cooling systém for SiPM temperature stabilization, die Rheinisch- Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2012
- [10] <https://www.gme.cz/>
- [11] http://www.hwpro.cz/oc/index.php?route=product/product&product_id=124

Seznam symbolů a zkratk

SW Mathematica

FV článek

CSV

program Mathematica

fotovoltaický článek

Comma-separated values (hodnoty oddělené čárkami)

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

$c = 3,8 \cdot 10^8 \text{ m/s}^2$

Planckova konstanta

rychlost světla

λ [nm]

α_0 [°]

P [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1} = \text{W}$]

W [J]

f [Hz]

G [S] = $\frac{1}{R}$ [Ω]

U [V]

I [A]

vlnová délka

vyzařovací úhel

elektrická práce

mechanická energie

frekvence

vodivost

napětí

proud

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázek 2.1: Spektrum viditelného záření [7].....	2
Obrázek 2.2: Spektrum AM 1.5 [3].....	3
Obrázek 2.3: Interakce záření s látkou, a-emise, b-absorpce	4
Obrázek 2.4: Schéma PID regulace [9]	5
Obrázek 3.1: Příklad uspořádání luminiscenčních diod	8
Obrázek 3.2: Sestava pro snímání charakteristik luminiscenční diody	8
Obrázek 3.3: Snímek charakteristiky luminiscenční diody pro h=35cm.....	9
Obrázek 3.4: Příklad charakteristiky luminiscenční diody.....	10
Obrázek 3.5: Uživatelské rozhraní v SW Mathematica	10
Obrázek 3.6: Příklad složení více luminiscenčních diod a grafické znázornění jejich umístění.....	11
Obrázek 3.7: Velikost fotovoltaického článku (200 x 200 mm), výpočet homogenity.....	12
Obrázek 3.8: Schéma pro výpočet velikosti chladiče	14
Obrázek 3.9: Energetická bilance na Peltierově článku	14
Obrázek 3.10: Arduino MEGA R3 2560 [11]	15
Obrázek 3.11: Schéma regulačního obvodu.....	15
Obrázek 3.12: Schéma pro výpočet spínacích ztrát na tranzistoru	16
Obrázek 3.13: Uspořádání při ověření teplotní regulace	19
Obrázek 3.14: Zapojení regulačního obvodu na nepájivém plošném spoji	19
Obrázek 3.15: PWM signál na výstupu z Arduina během teplotní regulace.....	20
Obrázek 3.16: Zapojení chladič - Peltierův článek - luminiscenční dioda - teplotní čidlo	20
Obrázek 3.17: Způsob uchycení kabelů (pomocí konektorů se zámkem).....	20
Graf 3.1: Závislost relativního spektrálního výkonu na vlnové délce při teplotě 25°C [10]	6
Graf 3.2: Posun maxima vlnové délky v závislosti na teplotě [10]	6
Graf 3.3: Závislost intenzity vyzařování na teplotě [10]	7
Graf 3.4: Provozní režimy systému.....	13
Graf 3.5: Průběh vodivosti a ztrátového výkonu tranzistoru v průběhu spínání v závislosti na čase	18
Tabulka 3.1: Seznam charakteristik luminiscenční diody, pro různou výšku a úhel	9
Tabulka 3.2: Peltierův článek TEC1-071030-30X30 W150mm.....	16
Tabulka 3.3: Tranzistor IRF530, N-kanál, pouzdro TO220AB	17

Přílohy

1. SW Mathematica (zdrojové kódy)
 - 1.1. Program č. 1 - generování CSV souborů
 - 1.2. Program č. 2 - hlavní program
 - 1.3. Program č. 3 - export a import

2. Schéma teplotní regulace
3. Seznam materiálu
4. Návrh plošného spoje
 - 4.1. schéma
 - 4.2. pohled ze strany spojů
 - 4.3. pohled ze strany součástek

5. Arduino - program pro teplotní regulaci [6]
6. Zapojení luminiscenční diody [10]

1. SW Mathematica (zdrojové kódy)

1.1 Program č. 1 - Generování CSV souborů

```
(*Definiční hodnoty*)
(*Podkladový papír*)
(*Generace CSV souborů_α,h*)

(*Nactení fotografií*)
OBR[delka_] := Import[
  StringJoin["C:\\Users\\Yrjo\\Desktop\\LED ZLUTA kopie\\A2\\Resampled_01MP\\A",
    delka, ".JPG"]];

poleSnimku = Table[OBR[ToString[delka]], {delka, 35, 80, 5}];

(*1.distribuce pro jednotlivé úhly*)
d = 20;

uhel[delka_] := Round[
$$\frac{\alpha /. \text{Solve}[\{\alpha == \text{ArcSin}[\frac{d}{\text{delka}}] < 90\}, \alpha] /. \text{C}[1] \rightarrow 0}{2 \pi} * 360., 0.1];$$


a[nana_] := ImageDimensions[poleSnimku[[nana]]][[1]];
b[nana_] := ImageDimensions[poleSnimku[[nana]]][[2]];
f[XORIG][nana_] := Table[
  Total[PixelValue[poleSnimku[[nana]], {m, n}], {m, 1, a[nana]}, {n, 1, b[nana]}];
dist[delka_, nana_] := Export[StringJoin[
  "C:\\Users\\Yrjo\\Desktop\\LED ZLUTA kopie\\Distribuce_(uhel, otoceni)\\A2_",
  ToString[uhel[delka][[1]]], ".0.txt"], f[XORIG][nana], "CSV"]

Table[dist[30 + 5 * nana, 1 * nana], {nana, 1, 10}];
```


1.2 Program č. 2 - Hlavní program

```
ClearAll;
```

```
d = 200; (*vzdálenost středu papíru od průmětu bodu P*)
```

0. Inicializace

1. Načtení charakteristiky z CSV souboru

2. Přepočítání px → mm

X. Výřez 400 x 400 mm vyřešeno viz 5

3. Najít bod P - po interpolaci

4. Definice rotace

5. Doplnění na čtverec, interpolace [zvětšení/zmenšení], posun a otočení

```
f[xsquare][alpha_] := ArrayPad[Load[alpha], {{ $\frac{a-b}{2}$ }, {0}}];
```

```
f[xotoc][alpha_, rho_] := rotate[rho, f[xsquare][alpha]];
```

```
f[xresample][Z_, alpha_, rho_] :=
```

```
  (ArrayResample[f[xotoc][alpha, rho], Scaled[zmena[Z, alpha]], Resampling -> "Cubic"]);
```

$(zmena[Z, alpha])^2$

```
f[xposun][X_, Y_, Z_, alpha_, rho_] := RotateLeft[CenterArray[
```

```
  f[xresample][Z, alpha, rho], {600, 600}], {Round[ $\frac{(1-Y)}{px}$ ], Round[- $\frac{(k+X)}{px}$ ]}];
```

```
(*f[xposun][X_, Y_, Z_, alpha_] := RotateLeft[ArrayPad[f[xresample][Z, alpha],
```

```
  {{600 - Length[f[xresample][Z, alpha][[All, 1]]], 0},
```

```
  {600 - Length[f[xresample][Z, alpha][[All, 1]]], 0}]]],
```

```
  { $\frac{Y}{px} + \text{Round}[\frac{600 - \text{Length}[f[xresample][Z, alpha][[All, 1]]]}{2}]$ ,
```

```
  Round[(moveZ[Z, alpha] -  $\frac{X}{px} + \text{Round}[\frac{600 - \text{Length}[f[xresample][Z, alpha][[All, 1]]]}{2}]$ )]]; *)
```

```
(*Výpočet homogeneity*)
```

```
FV := Table[hra2[a, b], {a, -100, 100}, {b, -100, 100}];
```

```
pocetPrvku := Length[FV[[1, All]]] * Length[FV[[All, 1]]];
```

```
prumer := Total[Total[FV]] / pocetPrvku;
```

```
odchylka := Max[Abs[FV - prumer]];
```

6. Grafy

7. Action

8. Hlavní program

```

main := Manipulate[v = Grid[{
  {Style["Aktuální dioda (intenzita + poloha)", Bold]},
  {diody = {X, Y, Z,  $\alpha$ ,  $\rho$ };
  Grid[Join[{name, diody}], Frame  $\rightarrow$  All],
  Switch[ $\rho$ ,
    0, k = 200 + moveZ[Z,  $\alpha$ ],
    90, l = 200 + moveZ[Z,  $\alpha$ ],
    180, k = -200 - moveZ[Z,  $\alpha$ ],
    270, l = -200 - moveZ[Z,  $\alpha$ ]];
  hra = ListInterpolation[
    f[xposun][X, Y, Z,  $\alpha$ ,  $\rho$ ], {{-300 px, 300 px}, {-300 px, 300 px}}];
  Plot3D[hra[y, x], {x, -300 px, 300 px}, {y, -300 px, 300 px},
    AxesLabel  $\rightarrow$  {"x [mm]", "y [mm]", "E [W/mm2"]}, ImageSize  $\rightarrow$  Medium],
  rozlozeni[{{X, Y, Z}}],

  {Style["Aktuální soubor diod (intenzita + poloha)", Bold]},
  {Grid[Join[{name}, tab, {diody}], Frame  $\rightarrow$  All],
  puntik = {X, Y, Z};
  fce = graf + f[xposun][X, Y, Z,  $\alpha$ ,  $\rho$ ];
  hra2 = ListInterpolation[fce, {{-300 px, 300 px}, {-300 px, 300 px}}];
  Plot3D[hra2[y, x], {x, -300 px, 300 px}, {y, -300 px, 300 px},
    AxesLabel  $\rightarrow$  {"x [mm]", "y [mm]", "E [W/mm2"]}, ImageSize  $\rightarrow$  Medium],
  rozlozeni[Join[{puntik}, body]]
  },
  {Style["Velikost fotovoltaického článku o rozměrech 200 x 200 mm", Bold]},
  {pp = Plot3D[hra2[y, x], {x, -100, 100}, {y, -100, 100},
    AxesLabel  $\rightarrow$  {"x [mm]", "y [mm]", "E [W/mm2"]}, ImageSize  $\rightarrow$  Medium]}
  {Style["Homogenita pole", Bold]}, {"Průměrná hodnota: ", prumer},
  {"Max. odchylka od průměrné hodnoty: ", odchylka}
  }];
k = l = 0;
If[export, Export[filePath, v]; export = False];
v, {{export, False}, None},

Style["Návrh osvětlovacího tělesa pro luminiscenci", Bold],
Grid[{{
  Grid[{
    {Row[{nastav, symetrizuj, provést}, Spacer[50]]}},
    Alignment  $\rightarrow$  Left, Frame  $\rightarrow$  True],
  Grid[{{
    Column[{Button["Import (*.csv)"],
      Button["Export (*.pdf, *.csv)", Print[CreateDialog[exportuj]]]}]}]}],
  Frame  $\rightarrow$  True, Spacings  $\rightarrow$  {8, 1}, Alignment  $\rightarrow$  Left],
ContinuousAction  $\rightarrow$  None];

```

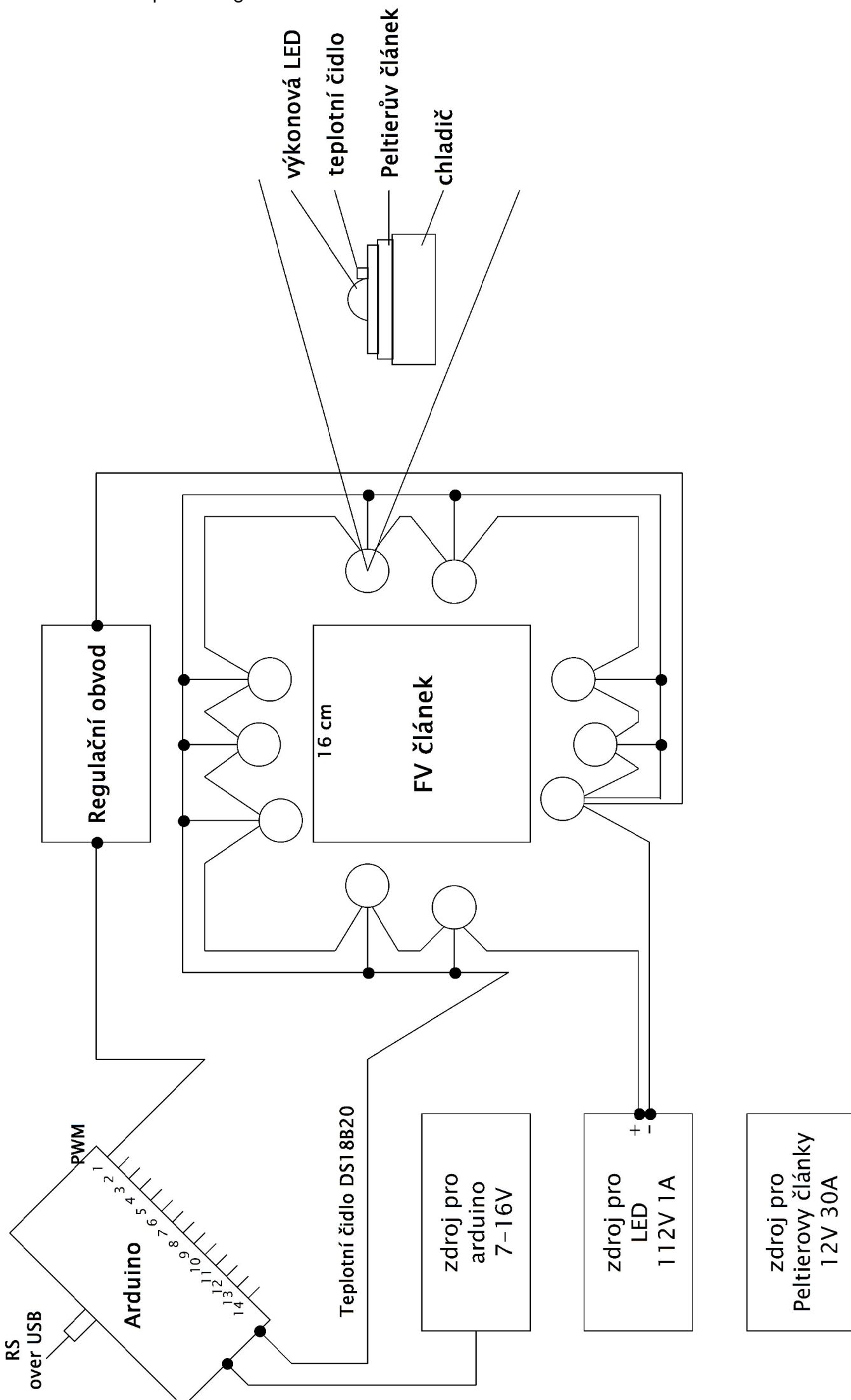
1.3 Program č. 3 - Export a import

```
In[6]:= ClearAll;
```

```
In[12]:= souborDiod = Grid[{
  {v[[1, 3]][[1]], SpanFromLeft},
  {v[[1, 4]][[1]], v[[1, 4]][[2]]},
  {SpanFromAbove, v[[1, 4]][[3]]}}];
aktuálníDioda = Grid[{
  {v[[1, 2]][[1]]},
  {v[[1, 2]][[2]]}}];
uloz := Switch[valuesPicked,
  "Aktuální dioda", Export["LED.pdf", aktuálníDioda],
  "Soubor diod", Export["LEDs.pdf", souborDiod],
  "Komplet", Export["komplet.pdf", v],
  "Výpis diod (seznam)", Export["vypis.csv", tab]];
exportuj := Grid[{
  {Text[Style["Exportovat", Bold]]},
  {RadioButtonBar[Dynamic@valuesPicked, {"Aktuální dioda", "Soubor diod",
    "Komplet", "Výpis diod (seznam)"}, Appearance → "Vertical"]},
  {Button["EXPORT (.pdf, .csv)", uloz]}}];

In[11]:= import := Button["Import (.csv)",
  file = SystemDialogInput["FileOpen", {NotebookDirectory[] <> "data\\",
    {"Data files" → {"*.txt"}}}, WindowTitle → "Zvolte soubor k otevření:"];
If[file ≠ "$Canceled", {data = Get[file]}];
If[file, pes], Method → "Queued"];
```

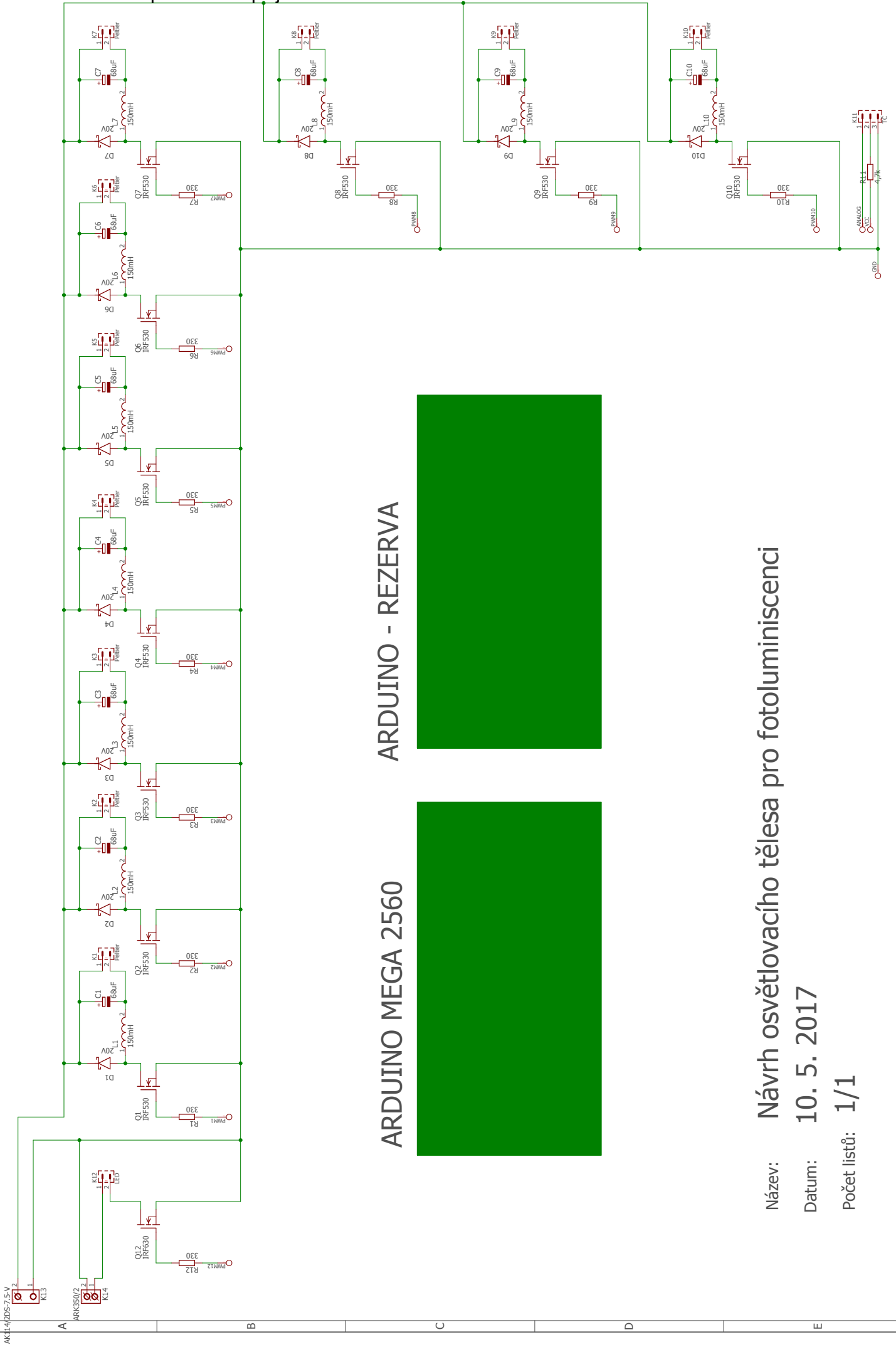
2. Schéma teplotní regulace



3. Seznam materiálu

Položka	Označení	Obj.č. Kód produktu	Počet [ks]	Cena za 1 ks [Kč]	Obchod [odkaz]
Teplotní čidlo	DS18B20	SA0029	10	45	santy.cz
Arduino 14PWM	Mega 2560 R3	SA0089	1	559	santy.cz
Dupont káblíky	20cm, 20ks, M-F	7-SA0033-M-F	1	55	santy.cz
Napáj. adaptér	9V 1A pro Mega, Uno	SA0174	1	148	santy.cz
Výkonová dioda	Star DR660-10-00-00	491298	10	969	conrad.cz
<i>Optika pro Luxeon</i>	Z5 Carlo 10413 26,8°, matná	183209	1	44	conrad.cz
<i>Optika pro Luxeon</i>	Z5 Carlo 10412 16,1°, čirá	183211	1	46	conrad.cz
<i>Optika pro Luxeon</i>	Z5 Carlo 10414 40,6°, matná	183213	1	52	conrad.cz
Tlumivka 150μH	FI 7447076	7447076	10	149	conrad.cz
Rezistor 330Ω	uhlíkový rezistor 330	405191	10	2,70	conrad.cz
Rezistor 4,7kΩ	uhlíkový rezistor 4,7k	405337	2	2,70	conrad.cz
Kabel TČ	VFL 4x0,15	651-354	5m	136	gme.cz
Kabel Pelt.	VM00VH-H	651-259	25m	240	gme.cz
Konektor	PFH02-03P	800-085	20	1,50	gme.cz
Kontakt	PFF02-01F	800-112	50	1,30	gme.cz
Peltier	TEC1-071030S	601-037	10	177	gme.cz
Tranzistor	IRF530 TO220AB	213-029	10	15	gme.cz
Chladič	V68-50SA	620-059	10	98	gme.cz
Kapacitor 68μF	CE 68u/25VIT	123-965	10	2,40	gme.cz
Dioda 20V/3A	1N5820	223-002	10	3,5	gme.cz
konektor pelt. d.	PSH04-02PG	800-196	15	1,90	gme.cz
konektor pelt. k.	PFH04-02P	800-204	15	1,10	gme.cz
kontakt pelt.	PFF04-01FT	800-043	15	1,50	gme.cz
kontektor TČ	PSH02-03PG	800-164	2	1,90	gme.cz
bužírka pelt.	KSS F0927F-4	656-235	2m	50	gme.cz
bužírka TČ	KSS F0927F-10	656-232	1m	43	gme.cz
pojistka	F 5A 5x20	633-154	5	3,70	gme.cz
Svorkovnice LED	ARK 350/2 Blue	841-154	1	4,20	gme.cz
Svorkovnice Pelt.	PTR AK 114/2DS-7.5	821-373	1	10	gme.cz
Programovatelný napájecí zdroj	Korad KA6003P	101347	2	5 929	hotair.cz
Průmyslový napájecí zdroj	P-360-12 12V 30A 360W	101989	1	726	hotair.cz
Teplovodivá stříbrná pasta					
<i>Celkem [počet kusů - cena]:</i>			28 777,40		

4.1. Návrh plošného spoje - schéma



ARDUINO - REZERVA

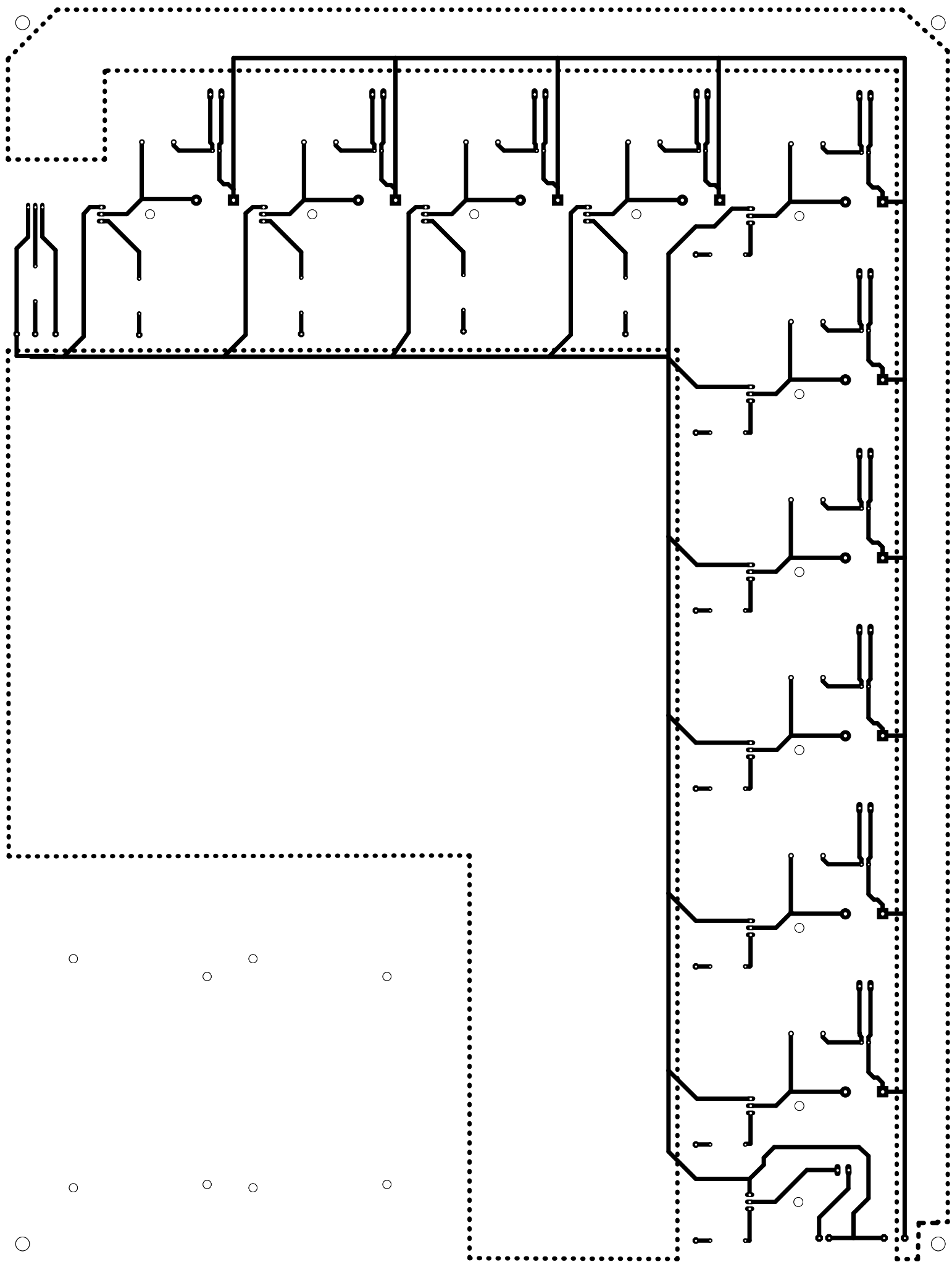
ARDUINO MEGA 2560

Název: Návrh osvětlovacího tělesa pro fotoluminiscenci

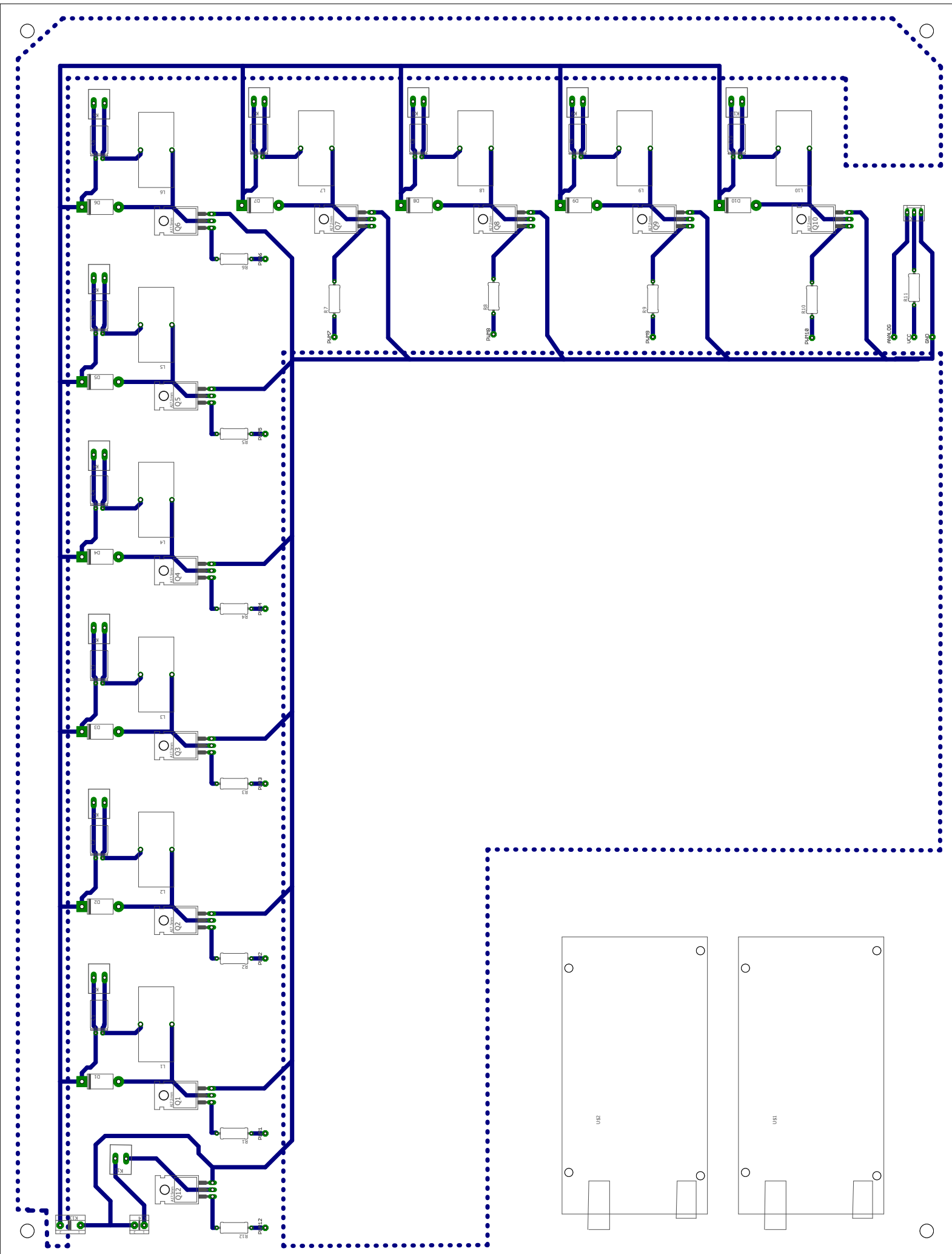
Datum: 10. 5. 2017

Počet listů: 1/1

4.2 Návrh plošného spoje - DPS ze strany spojů



4.3 Návrh plošného spoje - pohled ze strany součástek



5. Arduino - program pro teplotní regulaci

```
#include <OneWire.h>;
#include <DallasTemperature.h>;
#include <PID_v1.h>;
#include <PWM.h>

//Definitions
#define FAN 11 // Output pin for fan
#define ONE_WIRE_BUS 8 // Temperature Input is on Pin 8
#define KRITISCH 50.00 //Critical temperature to ignore PID and turn on fans

//Setup Temperature Sensor
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

int32_t frequency = 25000; //frequency (in Hz)

//PID SETUP
double Setpoint, Input, Output; //I/O
for PID
double aggKp=40, aggKi=2, aggKd=10;
//original: aggKp=40, aggKi=2, aggKd=10, Aggressive Turning, 50, 20, 20
double consKp=20, consKi=1, consKd=5;
//original consKp=20, consKi=1, consKd=5, Conservative Turning, 20, 10, 10
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, consKp, consKi, consKd, REVERSE);
//Initialize PID

void setup()
{
  //Temperature Setup
  Serial.begin(9600); //Begin serial communication
  sensors.begin();
  sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get temperatures
  Input = sensors.getTempCByIndex(0); //Set Input to Current Temperature
  Setpoint = 35.00; //Eingestellte Temperatur

  myPID.SetMode(AUTOMATIC);

  //initialize all timers except for 0, to save time keeping functions
  InitTimersSafe();

  //sets the frequency for the specified pin
  bool success = SetPinFrequencySafe(FAN, frequency);

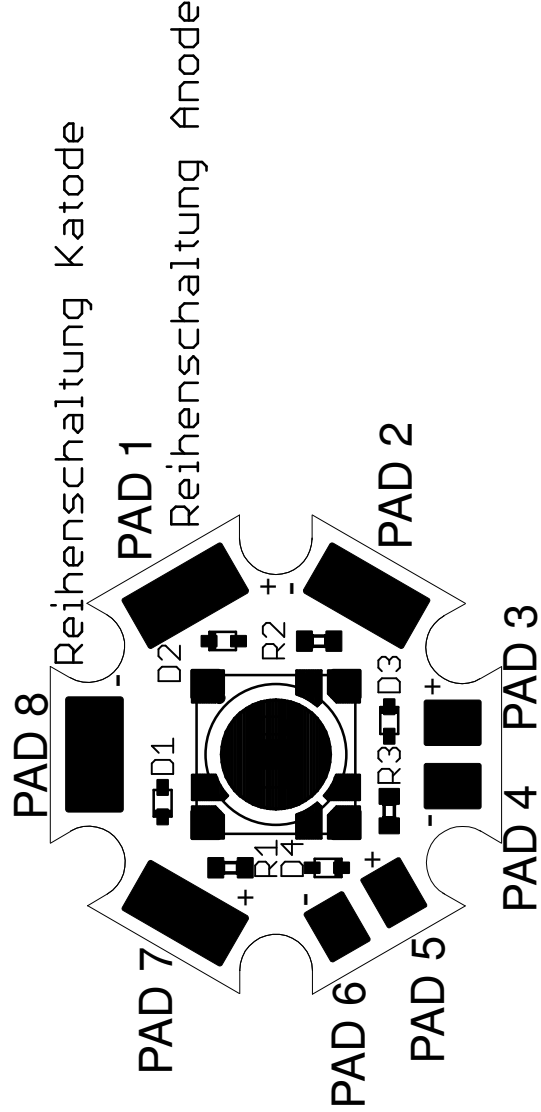
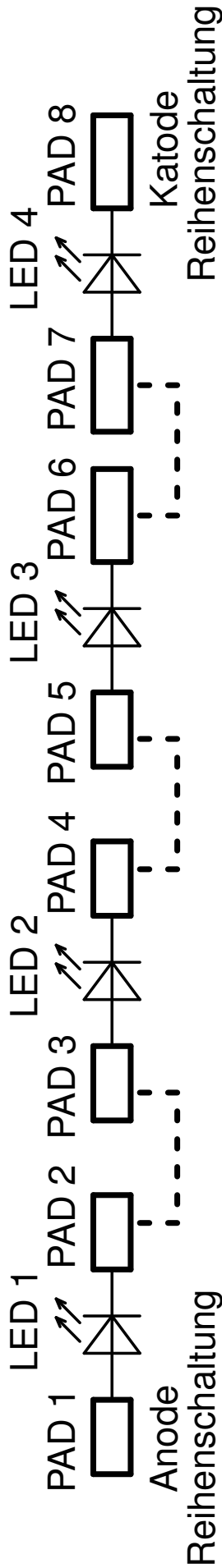
  pinMode(FAN, OUTPUT); // Output PWM 0-255
}
```

```
void loop()
{
  //Temperatur ziehen und als Input für PID nutzen
  sensors.requestTemperatures();
  Input=sensors.getTempCByIndex(0);

  Serial.print("Temperature is: ");
  Serial.println(sensors.getTempCByIndex(0));

  //Compute PID value
  double gap = abs(Setpoint-Input); //entfernung zur eingestellten Temperatur
  if(gap < 1)
  {
    //nah am Setpoint --> KONSERVATIVES REGELN
    myPID.SetTunings(consKp, consKi, consKd);
  }
  else
  {
    //weit weg vom Setpoint --> AGGRESSIVES REGELN
    myPID.SetTunings(aggKp, aggKi, aggKd);
  }
  myPID.Compute();
  pwmWrite(FAN,0);
  //PID Output wenn nicht Kritisch
  if (34 < Input < KRITISCH)
    pwmWrite(FAN, Output);
  else
    pwmWrite(FAN,255);
  }
```

Anschlußbelegung LED Starplatine 10W



Betrieb als Einzeldioden über die jeweiligen PADS.
 R1 bis R3 (0 Ohm) sind Platzhalter für eine Reihenschaltung
 Die Dioden D1 bis D4 dienen als ESD- und Verpolschutz.