

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2017

Bc. Pavel Škoda



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

KOLORIMETR

COLORIMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Škoda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Honec, Ph.D.

BRNO 2017

Diplomová práce

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

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Pavel Škoda

ID: 146110

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Kolorimetr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout kolorimetrický modul pro kontinuální měření barevných vlastností materiálu.

1. Seznamte se s problematikou měření barev materiálů a s používanými barevnými modely.
2. Proveďte rešerši dostupných senzorů a vytipujte vhodný senzor.
3. Navrhněte metodiku snímání a řídicí logiku.
4. Sestavte funkční modul a otestujte na reálných vzorcích, vytvořte GUI aplikaci pro vizualizaci na PC.
5. Zhodnoťte výsledky, stabilitu měřených dat.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Hlaváč, Šonka, Počítačové vidění.

Šonka, Hlaváč, Boyle - IMAGE PROCESSING, ANALYSIS, AND MACHINE VISION,

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 15.5.2017

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

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se věnuje analýze parametrů barev pro jejich následné využití v návrhu přístroje, který bude určen k měření jejich stálosti při kontinuální výrobě. V teoretické části jsou definovány základní pojmy a znalosti potřebné pro pochopení problematiky. Dále jsou v práci popsány jednotlivé součástky a snímače vhodné pro měření barev. Praktická část se věnuje hlavně popisu stavby kolorimetru, jeho jednotlivých částí a tvorby ovládacího programu. Nakonec jsou zde vypsány výsledky testování vytvořeného přípravku a jejich zhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické záření, světlo, barevné modely, měření barev, kolorimetrie, snímače barev, I2C, regulace teploty, Arduino

ABSTRACT

This thesis deals with the analysis of the color parameters for their subsequent use in the design of the device, which will be used to measure their stability in continuous production. The theoretical part defines the basic concepts and knowledge needed to understand the problems. In addition, there are described individual components and sensors suitable for color measurement. The practical part deals mainly with the description of the construction of the colorimeter, its individual parts and the creation of the control program. At the end, there are results of the testing of the product and their overall assessment.

KEYWORDS

Electromagnetic radiation, light, color models, colors measurement, colorimetry, color sensors, I2C, temperature control, Arduino

ŠKODA, Pavel. *Kolorimetr*. Brno, 2017, 89 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce: Ing. Peter Honec, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Kolorimetr“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Peteru Honci, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	12
1 Elektromagnetické záření	13
1.1 Viditelné světlo (Optické záření)	13
1.1.1 RGB	14
1.1.2 CMYK	15
1.1.3 HSV, HSB a HSL	17
1.1.4 YUV	17
2 Měření barev, výběr snímače	19
2.1 Vnímání barev lidským okem	19
2.2 Kolorimetrie	20
2.3 Snímače a senzory optického záření	20
2.3.1 Fotorezistor	21
2.3.2 Polovodičová fotodioda	22
2.3.3 Fototranzistor	23
2.3.4 CCD	23
2.3.5 CMOS	25
2.4 Reálné senzory	26
2.4.1 TCSxxxx	26
2.4.2 Senzory MAZeT	28
2.4.3 Senzory ostatních firem	29
2.4.4 Srovnání senzorů a výběr nejvhodnějšího	31
3 Návrh metodiky snímání, řídicí logika	33
3.1 Hardwarové součásti	33
3.2 Řídicí logika	35
3.3 Metoda snímání	36
4 Praktická realizace	39
4.1 RGB snímač	39
4.1.1 Sériová sběrnice I ² C	39
4.1.2 Připojení a komunikace se snímačem VEML6040	41
4.1.3 Osvětlení	44
4.1.4 Teplotní snímač	45
4.1.5 Kalibrace nasnímaných hodnot	47
4.2 Ovlivňování teploty	49
4.2.1 Regulace teploty	53

4.3	Prvky interakce s uživatelem	60
4.4	Sestavení hardwaru zařízení	61
4.5	PC program	63
4.6	Postup měření - ovládání	66
4.6.1	Měření pomocí hardwarového tlačítka	66
4.6.2	Měření pomocí tlačítka “1 měření”	67
4.6.3	Měření pomocí tlačítka “∞ měření”	67
5	Test výsledného zařízení	68
5.1	Test měření reálných vzorků	68
5.2	Test stálosti naměřených hodnot	69
5.3	Test závislosti naměřené hodnoty na vzdálenosti a okolním osvětlení .	77
5.4	Zhodnocení výsledků	79
5.5	Cenové zhodnocení	80
6	Závěr	81
	Literatura	83
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	85
	Seznam příloh	86
A	Obsah přiloženého CD	87
B	Fotografie vytvořeného zařízení	88
B.1	Příloha A - fotografie výsledného zařízení z levé strany	88
B.2	Příloha B - fotografie spodní strany měřícího přípravku	89
B.3	Příloha C - fotografie vnitřního uspořádání zařízení	89

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Spektrum viditelného světla (dole hodnoty vlnové délky)	14
1.2	Míchání barev u barevného modelu RGB	15
1.3	Míchání barev u barevného modelu CMYK	16
1.4	Barevný model HSV	17
1.5	Barevná plocha U V s hodnotou $Y=0,5$	18
2.1	Průřez lidským okem	19
2.2	Chromatický diagram CIE 1931	21
2.3	Fotorezistor	22
2.4	Řez polovodičovou fotodiodou typu PIN	22
2.5	Architektura CCD čipu	24
2.6	Barevné masky CCD čipu	24
2.7	Hardwarové zapojení CMOS čipu	25
2.8	RGB senzor TCS3200 (foto, citlivost fotodiod na spektrum)	27
2.9	RGB senzor TCS3472 (foto, citlivost fotodiod na spektrum)	27
2.10	Snímač MRGBiCS a jeho citlivost na RGB barvy ve spektru světla	28
2.11	Snímač MTCS-CDCAF a jeho citlivost na barvy ve spektru světla	29
2.12	Citlivost na barvy ve spektru světla u snímače VEML6040	30
2.13	Snímač S9032-02 a jeho citlivost na barvy ve spektru světla	30
3.1	Blokové schéma zapojení výsledného kolorimetru	35
3.2	Blokový diagram popisující posloupnost procesu snímání barev	37
3.3	Blokový diagram popisující posloupnost procesu hlavní snímací smyčky	38
4.1	Příklad komunikace mezi MASTER a SLAVE pomocí sběrnice I ² C	40
4.2	Zapojení jednotlivých pinů snímače VEML6040	41
4.3	Posloupnost odesílaných bajtů pro zápis do snímače VEML6040	42
4.4	Průběh jednotlivých úkonů, které jsou při měření prováděny (bez resetu)	42
4.5	Průběh jednotlivých úkonů, které jsou při měření prováděny (s resetem)	42
4.6	Posloupnost odesílaných bajtů pro vyčítání ze snímače VEML6040	43
4.7	Schéma zapojení LED diod SK6812RGBW	44
4.8	Rozdělení odesílané 32 bitové hodnoty na jednotlivé barvy	45
4.9	Zapojení teploměru jako napěťový dělič	46
4.10	Graf porovnávající naměřené a zprůměrované hodnoty teplot	47
4.11	Návrh desky plošného spoje pro snímač, osvětlení a teploměr (reálné rozměry 32x24mm)	47
4.12	Blokový diagram popisující posloupnost procesu kalibrace	48
4.13	Složení Peltierova článku	50
4.14	Schéma el. obvodu pro řízení Peltierova článku (vlevo přívody ovládaní, shora přívod napájení)	51

4.15	Schéma el. obvodu pro napájení Peltierova článku	52
4.16	Schéma el. obvodu pro ovládání Peltierova článku	53
4.17	Návrh desky plošného spoje pro napájení a ovládání Peltierova článku (reálné rozměry 34x20mm)	53
4.18	Schéma regulace	54
4.19	Porovnání identifikovaných soustav a naměřené přechodové charakte- ristiky (přepočítáno k nule)	55
4.20	Uživatelské rozhraní Identifikačního toolboxu v Matlabu	56
4.21	Uživatelské rozhraní PID Tuner toolboxu v Matlabu	59
4.22	Výstup soustavy při žádané hodnotě 25°C s a bez aplikace anti wind- upu	60
4.23	Zapojení LED diod a tlačítka pro interakci s uživatelem	61
4.24	Rozložení jednotlivých prvků ve výsledném zařízení	62
4.25	Uživatelské rozhraní vizualizační aplikace	64
4.26	Okno upozorňující na přítomnost souboru stejného jména	65
4.27	Okno oznamující neúspěšné (vlevo), nebo úspěšné (vpravo) dokončení kalibrace	65
5.1	ColorCecker, nalevo - originální barvy, napravo - naměřené barvy . .	69
5.2	Hodnoty červené barvy, pokojová teplota, vypnutá regulace teploty .	70
5.3	Hodnoty zelené barvy, pokojová teplota, vypnutá regulace teploty . .	70
5.4	Hodnoty modré barvy, pokojová teplota, vypnutá regulace teploty . .	70
5.5	Hodnoty červené barvy, měřeno při teplotě 10°C, bez regulace teploty	71
5.6	Hodnoty zelené barvy, měřeno při teplotě 10°C, bez regulace teploty .	72
5.7	Hodnoty modré barvy, měřeno při teplotě 10°C, bez regulace teploty .	72
5.8	Hodnoty barev naměřené při změně teploty s vypnutou regulací teploty	72
5.9	Hodnoty červené barvy, pokojová teplota, zapnutá regulace teploty . .	74
5.10	Hodnoty zelené barvy, pokojová teplota, zapnutá regulace teploty . .	74
5.11	Hodnoty modré barvy, pokojová teplota, zapnutá regulace teploty . .	74
5.12	Hodnoty červené barvy, měřeno při teplotě 10°C, s regulací teploty .	75
5.13	Hodnoty zelené barvy, měřeno při teplotě 10°C, s regulací teploty . .	76
5.14	Hodnoty modré barvy, měřeno při teplotě 10°C, s regulací teploty . .	76
5.15	Hodnoty červené barvy, měřeno při změně teploty, s regulací teploty .	76
5.16	Hodnoty zelené barvy, měřeno při změně teploty, s regulací teploty . .	77
5.17	Hodnoty modré barvy, měřeno při změně teploty, s regulací teploty .	77
5.18	Vliv externího osvětlení na hodnotu měřené barvy (60-120s, 180-240s)	78
5.19	Graf vlivu vzdálenosti snímače od měřeného prvku na měřenou hodnotu	79

SEZNAM TABULEK

2.1	Vlastnosti jednotlivých snímačů, část 1	31
2.2	Vlastnosti jednotlivých snímačů, část 2	31
4.1	Časový rozvrh pro přenos dat do LED diod [12]	45
4.2	Logický zápis pro řízení h-můstku	52
4.3	Vzorce pro návrh parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nicholse[4] .	57
5.1	Rozpis cen jednotlivých položek využitých při stavbě snímacího pří- pravku	80

ÚVOD

V dnešní době je důležité aby měl vyráběný výrobek zachovány stejné vlastnosti po celou dobu jeho výroby, která může probíhat i v rámci několika let. Z tohoto důvodu se jak v průmyslu, tak v soukromém sektoru využívá kolorimetrů. Ty kontroly barevnou stálost výrobků, takže je možné v případě odchylky výrobu upravit, případně zastavit a nalézt problematické místo dříve než dojde ke škodě. Využívat je lze také pro zjištění přesných hodnot barev u výrobků, které je třeba replikovat bez dostupné dokumentace.

Cílem této práce je nastudovat a popsat problematiku měření barev reálných předmětů, projít současnou nabídku snímačů barev a na jejich základě navrhnout řídicí logiku a metodiku snímání pro kolorimetr. V následující části pak tento kolorimetr sestavit a otestovat na reálných vzorcích. Posledním úkolem je vytvoření GUI aplikace pro jeho ovládání a vizualizaci hodnot.

V teoretické části jsou nejprve popsány vlastnosti elektromagnetického záření se zaměřením na viditelné spektrum a jeho měření s využitím různých barevných modelů. Na jejich základě pak probíhá popis jednotlivých fotocitlivých součástek, které by bylo teoreticky možné využít pro měření barev. Poslední část této kapitoly je věnována detailnímu porovnání dostupných kolorimetrických senzorů a výběru nejvhodnějšího z nich. V další části je pak popsán návrh hardwarových součástí, řídicí logiky a metody snímání.

Praktická část je soustředěna na popis jednotlivých součástí výsledného kolorimetrického modulu. Hlavně pak na komunikaci se snímačem a LED diodami, kde každý používá jiný druh komunikačního protokolu. Dále je zde popsána kalibrace na snímání správných hodnot a hlavně návrh regulátoru pro regulaci teploty snímací desky, bez níž by docházelo k velkým změnám nasnímaných hodnot. Poslední část praktické realizace je věnována popisu počítačového programu, skrze který se kolorimetrický modul ovládá.

Závěrečná část této práce popisuje test vytvořeného kolorimetru a to hlavně se zaměřením na stálost naměřených výsledků při dlouhodobém měření a jejich následné zhodnocení.

1 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ

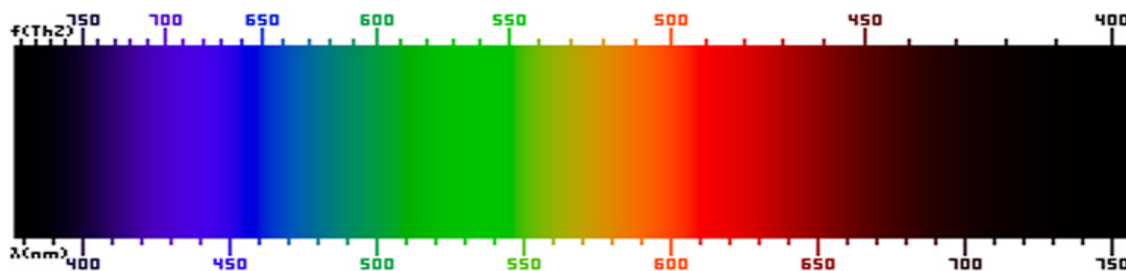
Elektromagnetické záření je příčné postupné vlnění magnetického a elektrického pole. Podle vlnové délky (frekvence) se dá elektromagnetické záření rozdělit do několika samostatných skupin. Některé z těchto skupin nemají však přesně dané hranice, podle které by se dalo přesně určit o jaký druh se jedná, ale mírně se překrývají. Dělení: [1]

- **Gama záření** ($< 10^{-12}\text{m}$) - vzniká v důsledku kvantových přechodů mezi energetickými hladinami jader atomů při jaderných reakcích
- **Rentgenové záření** ($10^{-14} - 10^{-9}\text{m}$) - jedná se o urychlené elektrony, které působí při dopadu druhotné záření (luminiscence rentgenového snímku)
- **Ultrafialové záření** ($10^{-9} - 380 \cdot 10^{-9}\text{m}$) - jeho přirozeným zdrojem je slunce, je využíváno například pro sterilizaci nástrojů ve zdravotnictví
- **Viditelné světlo** ($380 \cdot 10^{-9} - 770 \cdot 10^{-9}\text{m}$) - elektromagnetické záření, které jsme schopni vidět
- **Infračervené záření** ($50 \cdot 10^{-6} - 1000 \cdot 10^{-6}\text{m}$) - využíváno pro dálkové ovládání zařízení, měřitelné pomocí termokamery (určení teploty objektu)
- **Mikrovlnné záření** ($10^{-3} - 10^0\text{m}$) - je absorbováno hmotou, čehož se využívá k jejímu ohřevu (mikrovlnná trouba)
- **Rádiové vlny** ($10^0 - 10^5\text{m}$) - využíváno hlavně ke komunikaci a přenosu dat, vlnová délka se zde mění v závislosti na prostředí, ve kterém je využívána [1]

1.1 Viditelné světlo (Optické záření)

Viditelné světlo je velice úzká část spektra elektromagnetického záření, které jsme schopni zaznamenat vlastními smysly – zrakem. Podle vlnové délky v rozmezí $380 \cdot 10^{-9} - 10^{-7}\text{m}$ lze rozlišit jednotlivé barvy, ze kterých se spektrum viditelného světla skládá:

- 770 až 662nm – červená
- 662 až 597nm – oranžová
- 597 až 577nm – žlutá
- 577 až 492nm – zelená
- 492 až 455nm – modrá
- 455 až 380nm – fialová [1]



Obr. 1.1: Spektrum viditelného světla (dole hodnoty vlnové délky) [13]

Světlo jako takové se ve vakuu šíří konstantní rychlostí, která byla stanovena na $c = 299\,792\,458\text{m/s}$, což je zároveň i nejvyšší možná rychlost, kterou se může objekt pohybovat. Dále na viditelné světlo lze aplikovat optické zákony:

1. V homogenním a izotropním prostředí se světlo šíří přímočaře ve tvaru světelných paprsků
2. Světelné svazky se šíří vzájemně na sobě nezávisle
3. Světelné paprsky se řídí zákonem lomu a zákonem odrazu

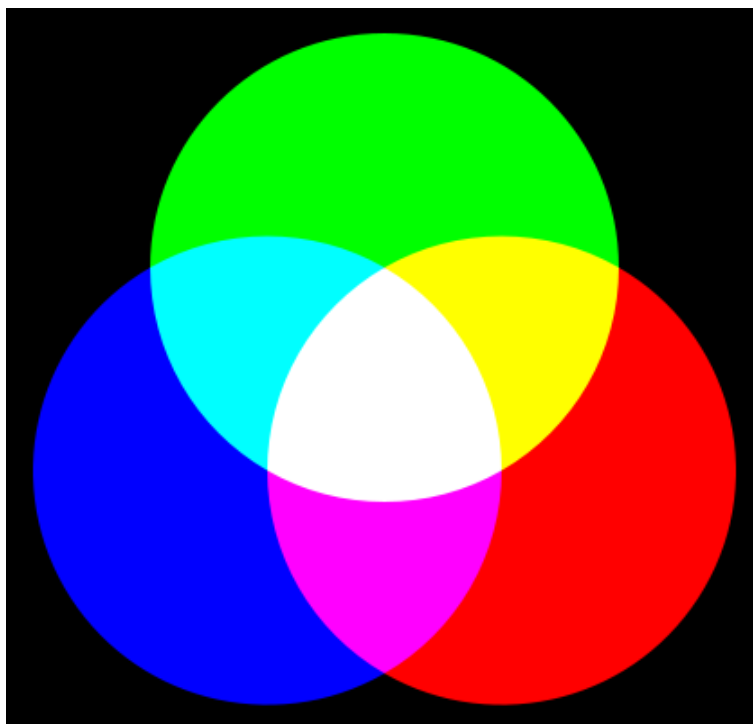
Pro využití barev v průmyslu a vědě bylo nutné stanovit nějaký způsob, podle kterého se budou jednotlivé barvy klasifikovat. Proto vzniklo několik druhů barevných modelů, které pracují buďto s jednotlivými barvami nebo s odstínem, sytostí a jasem.

1.1.1 RGB

Aditivní barevný model RGB (zkratka slov red, green, blue) označuje složení barevného prostoru ze tří základních barev – červené, zelené a modré (Obr. 1.2). Jedná se o v počítačové grafice nejvyžívanější model míchání barev a to hlavně z toho důvodu, že jednotlivé barvy se při jejich využití sčítají a součet všech tří barev dohromady dá barvu bílou.

Využívají jej hlavně zařízení, které vyzařují světlo (monitory, projektory), kde vypnuté barevné pixely mají černou barvu a zapnuté vyzařují barvu daného obrazového bodu. Na monitorech lze zároveň nejlépe demonstrovat skládání barev, při bližším pohledu na monitor jsou zde vidět jednotlivé barevné body poskládané vždy do trojic. Pro zobrazení žluté barvy se pak rozzáří pouze zelený a červený bod, zatímco modrý zůstane zhasnutý.[13]

Pro vyjádření barev RGB modelu se v případě desítkové soustavy nejčastěji využívá 8 bitových čísel (hodnoty 0 až 255) pro každou ze tří barev, což dohromady dává až 16,7mld možných kombinací ($2^8 * 2^8 * 2^8 = 16777216$). V případě šestnáctkové soustavy se barvy zapisují hodnotami od 00 do FF. Výsledné zapsání požadované



Obr. 1.2: Míchání barev u barevného modelu RGB [13]

barvy vypadá například takto (168, 255, 0) v desítkové soustavě, nebo #A8FF00 v šestnáctkové.

Speciálním případem RGB modelu je barevný model RGBA, který je rozšířen o takzvaný alfa kanál A. Ten v sobě nese informaci o průhlednosti daného pixelu a rozsah jeho hodnot je stejná, jako velikost ostatních barev. [13]

1.1.2 CMYK

U barevného modelu CMYK se na rozdíl od RGB barvy nesčítají, ale odečítají, jedná se tedy o subtraktivní model. Skládá se z azurové barvy (cyan), purpurové (magenta) a žluté (yellow).

Využívá se hlavně při tisku, kdy se tiskne na bílý papír, který odráží celé barevné spektrum a jeho překrytím některou z barev se toto spektrum omezí (Obr. 1.3). Pokud je papír překryt všemi třemi barvami, pak je barevné spektrum zcela omezeno a výslednou barvou je černá. Z důvodu nedokonalosti míchání reálných barev, kdy jejich smícháním nevznikne dokonale černá, ale pouze hodně tmavě hnědá a také pro úsporu toneru v tiskárnách se přimíchává ještě černá (klíčová, key). [13]



Obr. 1.3: Míchání barev u barevného modelu CMYK [13]

Pro přepočítání barev z modelu RGB do modelu CMYK se využívá jednoduchých přepočtů:

$$C = 1 - R/255 \quad (1.1)$$

$$M = 1 - G/255 \quad (1.2)$$

$$Y = 1 - B/255 \quad (1.3)$$

V opačném směru, tedy z barevného modelu CMYK do RGB se výpočty provádějí obdobně:

$$R = (1 - C) * 255 \quad (1.4)$$

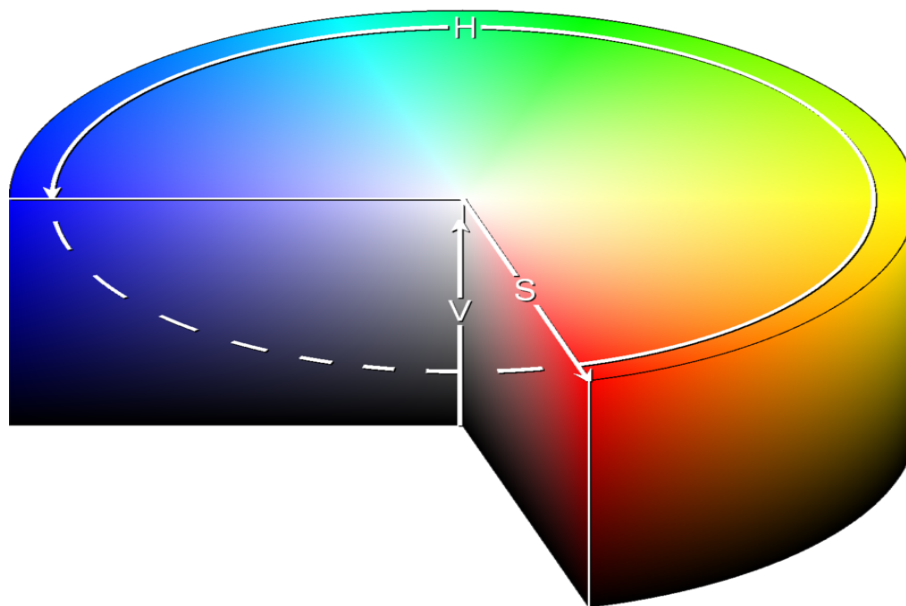
$$G = (1 - M) * 255 \quad (1.5)$$

$$B = (1 - Y) * 255 \quad (1.6)$$

1.1.3 HSV, HSB a HSL

Tyto tři modely jsou asi nejbližší našemu intuitivnímu vnímání barev. Zkratka HSV značí odstín (hue) barvy, sytost (saturation) dané barvy, množství šedi v poměru k odstínu a hodnotu (value), kterou lze chápat jako jas - množství bílého světla.

Pro pochopení tohoto barevného modelu si lze představit barevný koláč (Obr. 1.4), kde po obvodu jsou rozmístěny jednotlivé odstíny barev (H), vzdálenost od středu udává sytost (S) a hloubka koláče je dána jasem (V).



Obr. 1.4: Barevný model HSV[13]

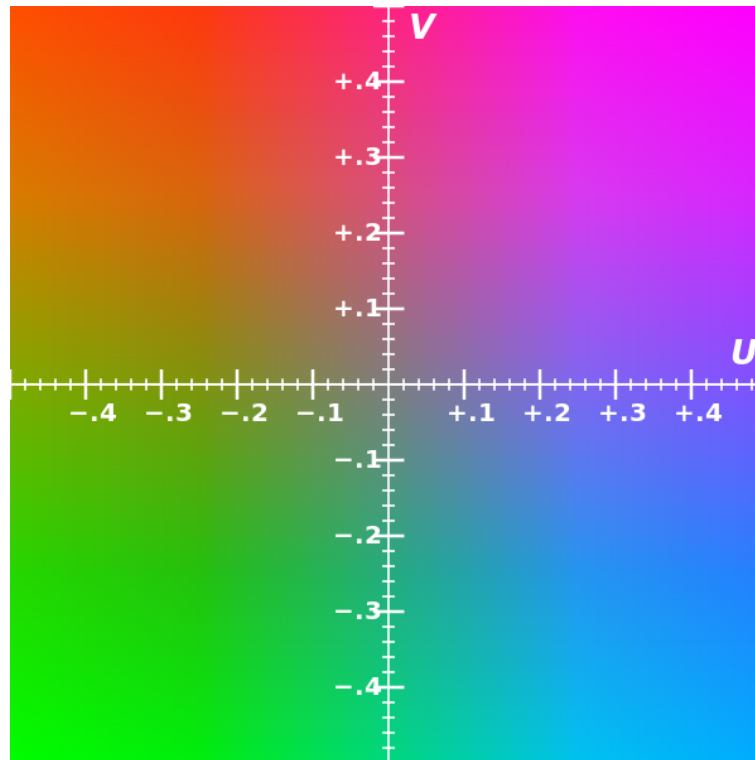
Rozdíl v HSB je pouze v názvu, kde poslední písmeno zkratky B značí přímo jas (brightness). Model HSL je také velice podobný modelu HSV, ale odstraňuje některé jeho nedostatky. Například barevný odstín zde skutečně klesá se zesvětlováním a ztmavováním základní barvy.

Tyto modely se nevyužívají pro ukládání fotografií, ale pro jejich úpravu, kdy se pomocí nich zadávají barvy a ovládá se saturace. [13]

1.1.4 YUV

Model YUV je využíván k televiznímu přenosu a to jak v normě PAL tak v moderním HDTV. K popisu barvy je zde využívána jasová složka Y a barevné složky U a V.

Jeho výhodou je oddělená jasová složka a s tím spojená možnost vyhradit pro chromatickou složku menší šířku přenosového pásma. [14]



Obr. 1.5: Barevná plocha U V s hodnotou $Y=0,5$ [14]

Pro převod mezi tímto barevným modelem a modelem RGB se využívá tohoto maticového výpočtu:

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,147 & -0,289 & 0,436 \\ 0,615 & -0,515 & -0,100 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

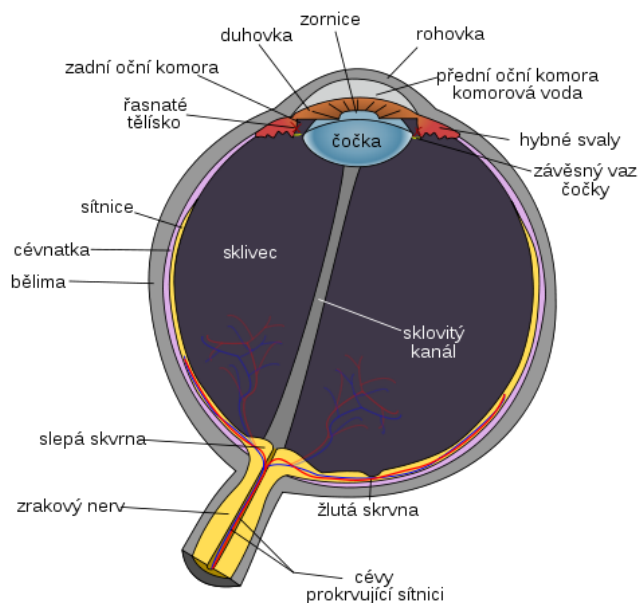
Pro zpětný převod z RGB do YUV pak:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1,137 \\ 1 & -0,397 & -0,580 \\ 1 & 2,034 & 00 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

2 MĚŘENÍ BAREV, VÝBĚR SNÍMAČE

2.1 Vnímání barev lidským okem

Lidské oko je smyslový orgán, jehož hlavním úkolem je zprostředkovat nám obraz okolí. Průřez lidským okem lze vidět na obrázku 2.1. Světlo prochází skrze rohovku, zornici, která se pomocí okolních svalů roztahuje a smršťuje a tím omezuje množství světla vstupujícího do čočky. Ta slouží k zaostření pozorovaného obrazu tak, aby při dopadu na světelné receptory na zadní straně oka nebyl rozmazaný. [13]



Obr. 2.1: Průřez lidským okem [13]

Na zadní straně oka se nachází světelné receptory (buňky), které dělíme na dva druhy - tyčinky a čípky. Tyčinek se nachází v každém oku přibližně 120 milionů a slouží především k vidění za zhoršených podmínek, tzn. za šera a nedostatečného osvětlení. Jejich citlivost je přibližně 10x větší než u čípků. Čípků je v lidském oku 7,5 milionu a lze je rozdělit do tří barevných skupin podobně jako u modelu RGB. [13]

Problém nastává, pokud je nutné přesně specifikovat danou barvu z důvodu její následné reprodukce (příkladem může být barva reálné vázy a její malby). Ať už z důvodu jedinečnosti, nebo vrozené vady vidíme každý barvy s trochu odlišným odstínem, z toho důvodu bylo nezbytné vymyslet systém, pro přesné měření barev, čímž se zabývá kolorimetrie.

2.2 Kolorimetrie

Kolorimetrie je věda zabývající se tvorbou barevných modelů popsanych v kapitole 1, měřením spektrálních vlastností světla a fyziologických vlastností zraku.

Pro potřeby měření barev byly stanoveny nové pojmy:

- **chromatičnost** - využívá se pro vyjádření barevnosti světla. Její velikost je určena spektrálním složením a intenzitou vyzařovaného světla
- **kolorita** - vyjadřuje barevnost předmětů (druhotné záření - odraz), na rozdíl od chromatičnosti bere v potaz i míru odrazivosti či propustnosti předmětů [2]

Pro kvantitativní vyjádření těchto hodnot se využívá trichromatická měrná soustava, vycházející z poznatků o lidském oku. Každou barvu lze v trichromatické měrné soustavě popsat množstvím tří barevných podmětů (trichromatických složek) označovaných velkými písmeny X, Y, Z. Poměr těchto tří barevných podmětů pak udává takzvané trichromatické souřadnice:[2]

$$x = X/(X + Y + Z) \quad (2.1)$$

$$y = Y/(X + Y + Z) \quad (2.2)$$

$$z = Z/(X + Y + Z) \quad (2.3)$$

x - normový podíl červené barvy

y - normový podíl zelené barvy

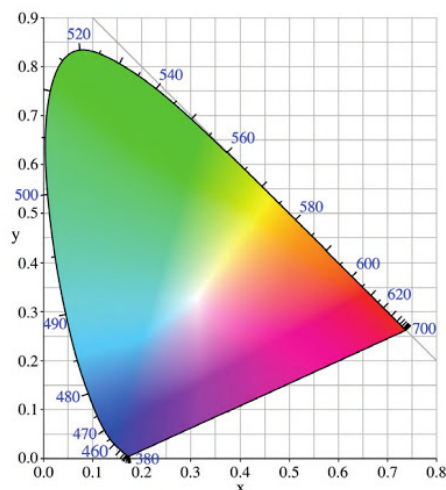
z - normový podíl modré barvy

Využitím trichromatických souřadnic pro které platí rovnost $x + y + z = 1$ vznikne Chromatický diagram, ve kterém jsou všechny čisté spektrální barvy umístěny na obvodu, mezi oběma konci barevného spektra se nachází přímka čistých purpurových barev a v dolní části prochází bílým bodem tzv. čára teplotních zářičů se stupnicí v kelvinech. [13]

2.3 Snímače a senzory optického záření

Při působení elektromagnetického záření na vodivý předmět dochází k pohlcování fotonů a k uvolňování elektronů. Tento proces se nazývá fotoefektem, který lze rozdělit na tři druhy:

1. Vnější fotoefekt (fotoelektrická emise) - při jeho vzniku vystupují elektrony z látky. Je využíván zejména ve fotonkách, televizních kamerách a fotonásobičích.



Obr. 2.2: Chromatický diagram CIE 1931 [13]

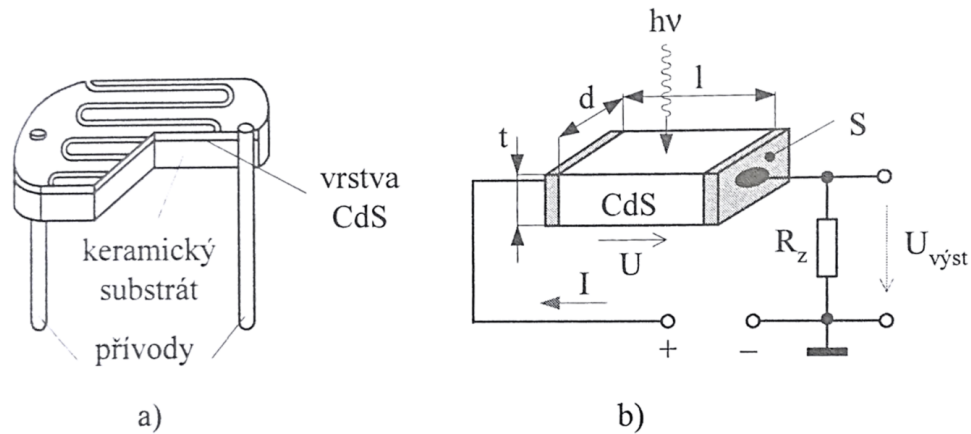
2. Vnitřní fotoelektrický jev, projevující se přechodem elektronů na vyšší energetickou hladinu. V případě polovodičů dochází ke vzniku volného elektrického náboje, u odporových fotonek ke zvýšení vodivosti.
3. Hradlový fotoelektrický jev - způsobuje vznik elektromotorické síly v okolí polovodičového přechodu. [1]

2.3.1 Fotorezistor

Jedná se o velmi citlivý detektor světelného záření, který je založen na fotovodivostním principu. Je tvořen silně dotovaným polovodičem typu N a kontakty po stranách. Při dopadu fotonu se v polovodiči generuje pár elektron díra, díky čemuž se změní elektrická vodivost tohoto prvku a dojde ke změně velikosti protékajícího proudu.

Pro dosažení co největší citlivosti je nutné, aby byla délka kontaktu mezi elektrodami co nejdelší a zároveň aby byly elektrody co možná nejbližší. Z toho důvodu se na substrátu fotorezistoru vytvořila hřebenová struktura, která tyto požadavky splňuje. (Obr. 2.3)

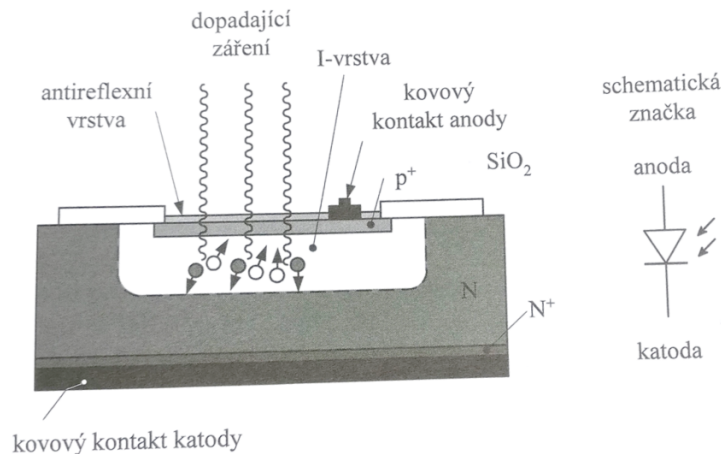
Spektrální citlivost fotorezistoru je velice podobná lidskému oku, což je velice příhodné pro výrobu expozimetrů nebo automatického řízení osvětlení. Nevýhodou je ale světelný paměťový efekt a závislost teplotního koeficientu odporu na osvětlení.



Obr. 2.3: a) reálná struktura fotorezistoru, b) zjednodušená struktura fotorezistoru [1]

2.3.2 Polovodičová fotodioda

V současnosti nejpoužívanějšími polovodičovými fotodiodami jsou PIN a lavinové fotodiody. Při pohledu na průřez PIN fotodiody Obr. 2.4 lze vidět, že se skládá ze silně dotované a světlopropustné oblasti tvořené polovodičem P^+ a druhé části polovodiče typu N^+ . Při dopadu fotonu na polovodičový přechod dojde k uvolnění páru elektron díra, následným pohybem uvolněného elektronu vzniká proud a dochází k nárůstu napětí mezi anodou a katodou. [1]



Obr. 2.4: Řez polovodičovou fotodiodou typu PIN [1]

Lavinové fotodiody je oproti PIN diodě mnohem citlivější, ale její nevýhodou je vyšší šum a potřeba vyššího napájecího napětí.

Křemíkové fotodiody jsou běžně citlivé na záření od infračerveného až po ultrafialové, takže pokrývají celé viditelné spektrum optického záření. I z toho důvodu jsou využívány hlavně v expozimetrech pro měření osvětlení okolí.

2.3.3 Fototranzistor

Jedná se o aktivní polovodičovou součástku tvořenou dvojicí PN přechodů. Jeho funkce je podobná jako u běžného tranzistoru, rozdíl je v tom, že otevírání a uzavírání přechodu není ovládáno napětím na bázi, ale velikostí dopadajícího světelného záření.

Fototranzistor je zkonstruován tak, že světlo pohlcované v oblasti báze zde vytváří stejně jako u fotodiody páry elektron díra. Tyto nosiče náboje jsou však strhávány polem kolektorového přechodu a prochází kolektorem, kde tvoří tzv. primární fotoproud I_C .

V praxi se fototranzistory využívají podobně jako fotodiody v odporovém režimu.

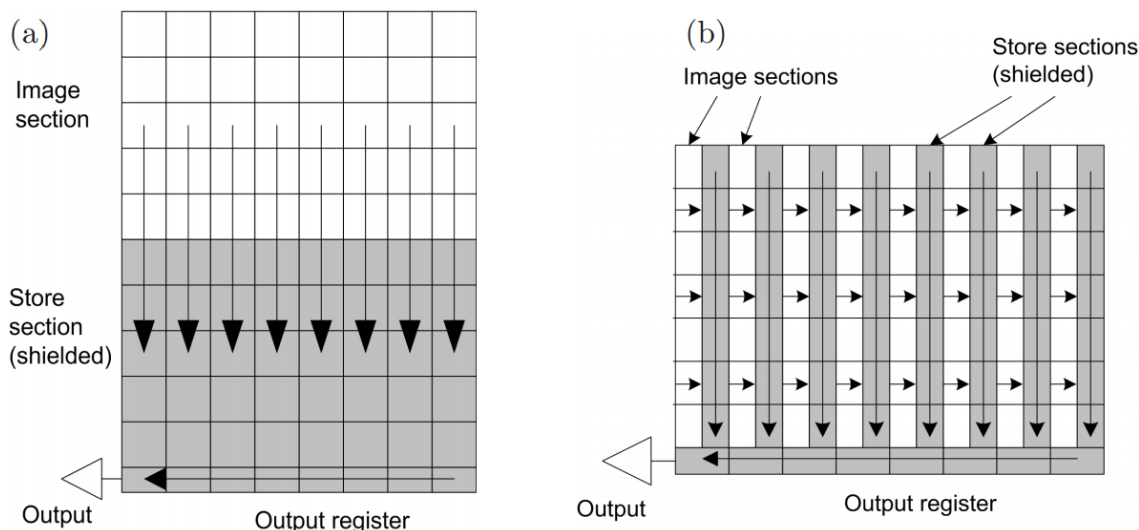
Při potřebě využití vyšších spínacích kmitočtů se využívají fototranzistory řízené polem (FET). Konstrukčně jsou upraveny tak, že světelný tok směřuje do prostoru hradla, kde volné nosiče náboje vyvolají změnu proudu I_G a tím změnu proudu protékajícího zátěží. Jejich hlavní výhodou je kratší doba odezvy, možnost nastavení citlivosti a větší výkonové zesílení. [1]

2.3.4 CCD

CCD snímače (charge-coupled device) se skládají z pravoúhlé mřížky, ve které jsou umístěny jednotlivé fotocitlivé buňky. V každé buňce se dopadem fotonu generuje elektrický náboj, který je poté pomocí horizontálních a vertikálních posuvných registrů přiveden na kondenzátor (převéde náboj na napětí) a následně v A/D převodníku konvertován na digitální signál. Možností sestavení CCD čipu je více, jednou z nich je například tzv. rámečková architektura Obr. 2.5a, kde se po nasnímání snímku jednotlivé náboje posouvají směrem dolů do posuvných registrů. Nevýhodou této metody je, že vyčítání snímku trvá déle a snímač se musí zakrýt, aby na něj nedopadlo světlo, které by způsobilo rozmazání snímku. [1, 19]

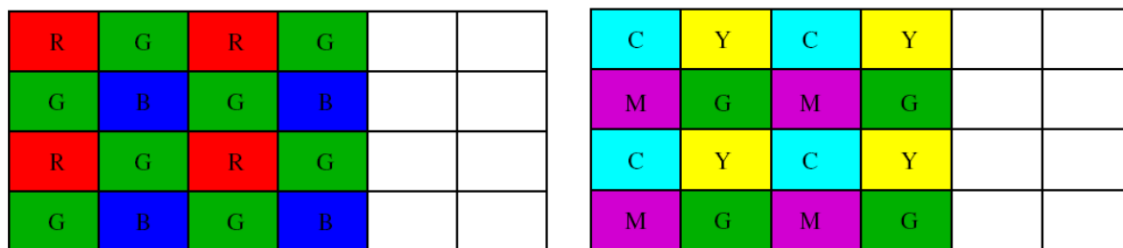
Další možností u architektury CCD čipu je využití meziřádkového posunu. U této metody výroby je napravo od každého sloupce fotocitlivých buněk umístěn vertikální posuvný registr Obr. 2.5b. Výhodou této architektury je, že v pouze jednom kroku jsou vyčteny všechny buňky naráz a není nutné čip zakrývat. Velkou nevýhodou je zvětšení plochy čipu na dvojnásobek, přičemž snímací plocha zůstane stejná, takže se citlivost celého snímače sníží na polovinu.

Samotný CCD čip není schopen rozlišit jednotlivé barvy, protože buňky reagují pouze na intenzitu světla a ne na jeho frekvenci. Z toho důvodu se před sousední



Obr. 2.5: Architektura CCD čipu, a) výčet náboje z čipu do vedlejšího rámečku, b) vertikální registry jsou přímo mezi fotocitlivými buňkami [19]

buňky dávají tři různě barevné filtry (podle konkrétního barevného modelu, obr. 2.6). Díky tomu pak každá buňka vidí jen intenzitu světla dané barvy. Výsledná barva bodu je pak pomocí interpolace údajů z okolních buněk dopočtena. [1, 19]

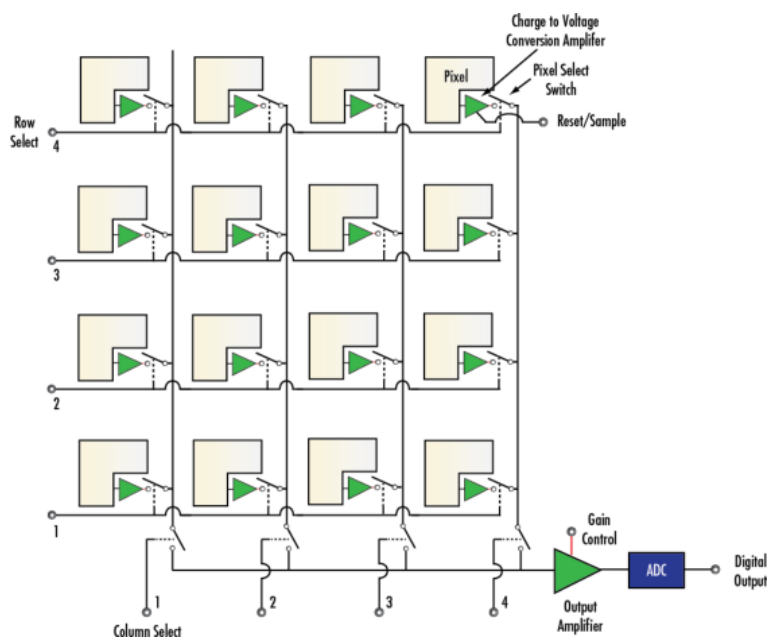


Obr. 2.6: Barevné masky CCD čipu [15]

Mezi výhody CCD čipu patří linearita, velice velká účinnost a nízký šum, který je dán integrační povahou měření. Nevýhodou je možnost vyčítat pouze celý čip najednou namísto pouze vybrané části, omezení rychlosti snímání rychlostí horizontálního posuvného registru, který má zpravidla maximálně 30MHz. Dalšími nevýhodami jsou dynamický odběr a omezený rozsah intenzit daný kapacitou výstupního kondenzátoru.[15]

2.3.5 CMOS

CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) je stejně jako CCD čip tvořen čtvercovou, případně hexagonální sítí světlocitlivých buněk, v tomto případě se jedná o fotodiody. Velkým rozdílem je zde však to, že se každá fotocitlivá buňka vyčítá samostatně. Tím pádem je u každé fotodiody převodník náboje na napětí a výběrový spínač umožňující vyčtení požadované oblasti namísto celého snímku (obr. 2.7). Toho lze využít například při počítačovém zpracování obrazu, kdy vybereme potřebnou část již na počátku a výpočetní jednotka není zbytečně zatěžována zpracováním nepotřebných částí. Toto rozložení čipu má ale neblahý vliv na snímací plochu, která je díky dalším součástkám menší. Proto se u nejnovějších verzí přesunuly tyto části do druhé vrstvy, takže horní vrstva je téměř celá zaplněna fotodiodami.



Obr. 2.7: Hardwarové zapojení CMOS čipu [15]

Čipy CMOS lze rozdělit na pasivní a aktivní, kde pasivní čipy jsou tvořeny pouze fotodiodami a převodníkem náboje na napětí. Oproti tomu jsou aktivní čipy tvořeny ještě zesilovači a obvody odstraňující šum. I přes tato vylepšení ale dosahuje většího šumu než CCD. Vyšší náchylnost na šum se projevuje také při dlouhých expozicích, kdy dochází k tzv. dark current šumu, což znamená, že se na snímači generuje náboj i když není osvětlen. V případě CMOS se jedná o přibližně 100 až $2000\text{pA}/\text{cm}^2$ na rozdíl od CCD, kde jsou tyto hodnoty řádově nižší a to 2 až $10\text{pA}/\text{cm}^2$. [15, 19]

Výroba tohoto čipu je prováděna stejně jako výroba čipů výpočetních, což umožnilo spolu s nižší cenou jeho rychlé rozšíření hlavně do mobilních telefonů a po potlačení šumu také do digitálních fotoaparátů a zrcadlovek.

2.4 Reálné senzory

V případě volby fotorezistoru, fotodiody nebo fototranzistoru se jedná o velice levnou a jednoduchou možnost, jak vytvořit potřebné zařízení. Jejich cena se pohybuje v rámci jednotek korun. Tyto součástky jsou však primárně určeny pro měření jasu a ne barev. Bylo by proto nutné na zařízení využít minimálně 3 snímače naráz a před každý umístit jiný barevný filtr pro omezení ostatních barevných složek světla. Zde ovšem nastává několik problémů, které by bylo nutné řešit, např. zajištění přesného nasměrování všech tří sensorů na stejný bod při různých vzdálenostech nebo volba vhodných barevných filtrů.

Při volbě CCD nebo CMOS čipu, tyto starosti odpadávají z důvodu toho, že vše potřebné je již umístěno na čipu, který zajistí stejné podmínky pro všechny světlocitlivé buňky. Barevný filtr je zde již také umístěn, takže odpadá starost o jeho správný výběr. Zároveň je zde mnohem více měřících bodů na velice malém prostoru, což při následném zprůměrování naměřených hodnot pomáhá zpřesnit měření. Při využití např. fotodiody by to bylo sice také možné, ale zařízení by dosáhlo nekompaktních rozměrů a neúměrně by se zvýšila spotřeba.

Z těchto důvodů se při následném výběru snímačů omezím pouze na ty, které využívají právě CCD nebo CMOS čipy a tím pádem jsou již připraveny pro snímání barev.

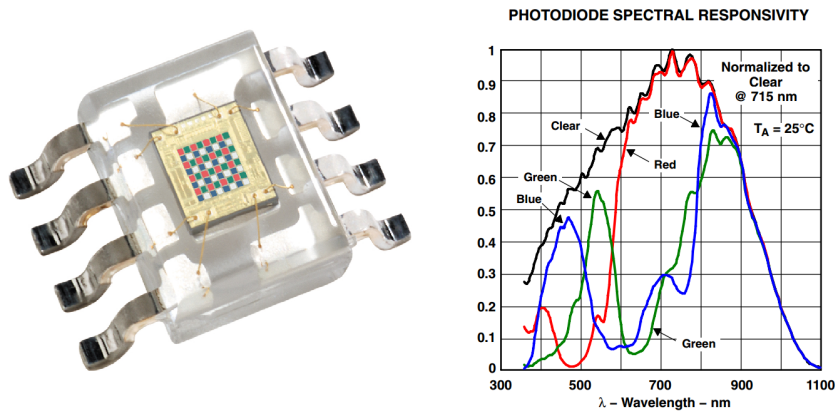
2.4.1 TCSxxxx

TCS3200

Prvním ze sensorů od firmy TAOS Inc. a zároveň jedním z nejlevnějších sensorů (kolem 40Kč) je TCS3200, obr. 2.8. Jedná se o programovatelný CMOS snímač, který převádí snímané světlo na frekvenci. Jako snímací prvek využívá fotodiody, napětí poté přichází do konvertoru, jehož výstupem je obdélníkový signál jehož frekvence odpovídá jasů dané barevné složky.[5]

Jeho snímač se skládá z pole 8 x 8 fotodiody, kde šestnáct jich má modrý filtr, šestnáct červený filtr, šestnáct zelený filtr a zbylých šestnáct je bez filtru. Všechny fotodiody jedné barvy jsou pospojovány paralelně a tak lze přivedením signálu na piny S2 a S3 aktivovat vždy pouze danou barvu a následně odečíst její intenzitu. Jeho parametry jsou:

- Komunikace přímo s mikrokontrolérem
- Napájení 2,7 V až 5 V
- Funkce uspání pro úsporu energie
- Chyba nelinearity typicky 0,2% při 50kHz
- Stablní teplotní koeficient 200ppm/°C[5]

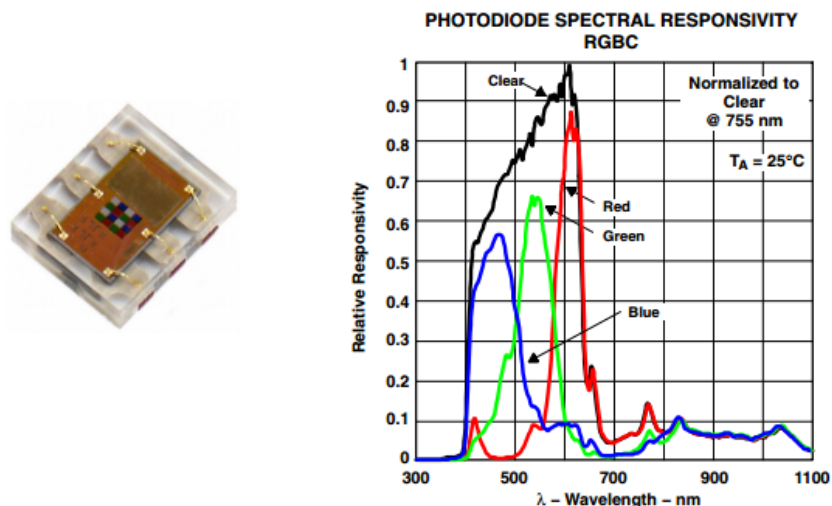


Obr. 2.8: RGB senzor TCS3200 (foto, citlivost fotodiod na spektrum) [5]

TCS3472

Dalším senzorem od této firmy je TCS3472, který je velice podobný předchozímu, ale na rozdíl od něj je zde implementována infračervené světlo blokující vrstva, díky které dosahuje vyšší přesnosti. Dalším rozdílem je využití menší snímací matice a to 3 x 4, kde každé barvě z barevného modelu RGB jsou přiřazeny tři fotodiody a zbylé tři jsou bez barevného filtru. Výstupem ze snímače je 16 bitová hodnota, která v sobě zahrnuje všechny barvy. Jeho cena začíná na přibližně 150Kč.

Komunikace s tímto senzorem probíhá po dvou vodičové I²C sériové sběrnici, maximální rychlostí 400kHz. Díky tomuto průmyslovému standardu je snímač schopen jednoduše komunikovat přímo s připojeným mikrokontrolérem.[6]



Obr. 2.9: RGB senzor TCS3472 (foto, citlivost fotodiod na spektrum)[6]

Parametry:

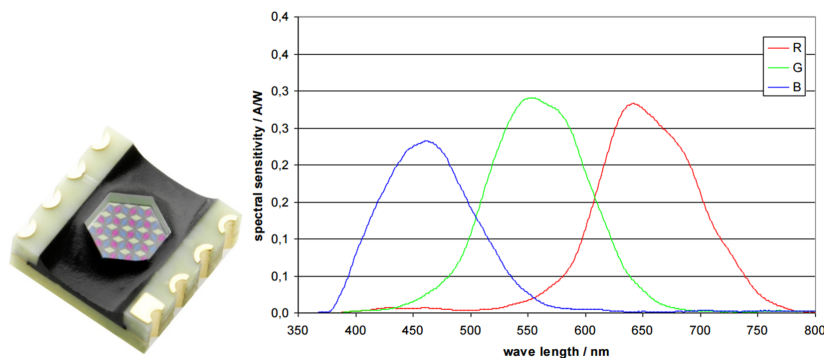
- Komunikace skrze I²C
- Napájení 3,8 V
- Funkce uspaní nebo čekání pro úsporu energie
- Dynamický rozsah 3800000:1
- IR filtr[6]

2.4.2 Senzory MAZeT

MRGBiCS

RGB senzory od firmy MAZeT patří do vyšší třídy snímačů a vyznačují se lepšími vlastnostmi a také vyšší cenou. Jedním z nich je model MRGBiCS. Ten jako snímací plochu využívá matici 19 x 3 fotodiod, které nejsou jako u předchozích sensorů sestaveny do pravidelné čtvercové (obdélníkové) mřížky, ale jsou složeny v hexagonální matici. Vždy jsou červený, zelený a modrý snímač složeny do jednoho šestiúhelníku, jak si lze všimnout na obrázku 2.10 vlevo.

Jednotlivé sektory fotodiod jsou od sebe odděleny speciálními strukturami, které zamezují přeslechům. Součástí snímače je také integrovaný interferenční filtr dále zlepšující jeho snímací vlastnosti.[7]

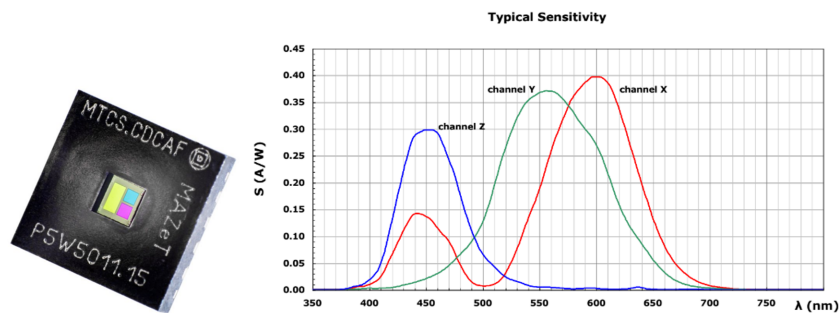


Obr. 2.10: Snímač MRGBiCS a jeho citlivost na RGB barvy ve spektru světla[7]

Jak lze vidět na obrázku 2.10 vpravo, tak na rozdíl od předchozích snímačů, tento netrpí chybnou detekcí barev ve spektrech, ve kterých se již daná barva nenachází. Mezi další výhody tohoto snímače patří rychlý přenos informací (až 500kHz), omezení stárnutí barevných filtrů na minimum, kompaktní rozměry a stabilita ve vysokých teplotách. Tyto vlastnosti jej předurčují k využití v průmyslu, kde je stálost měřených hodnot po dlouhou dobu velice ceněna.[7]

MTCS-CDCAF

MTCS-CDCAF je nízkonapěťový a nízkošumový senzor, který na rozdíl od ostatních senzorů neměří v barevném prostoru RGB, ale v takzvaných skutečných barvách, nebo-li v trichromatických složkách XYZ (více zde: 2.2), které může dále převést do barevného prostoru LUV. Jak si lze všimnout na obrázku 2.11 vlevo, tak pro snímání barev je zde využívána vždy jen jedna fotodioda pro danou barvu.[8]



Obr. 2.11: Snímač MTCS-CDCAF a jeho citlivost na barvy ve spektru světla[8]

Uvnitř čipu je integrovaný převodník s 10 - 24 bitovým rozlišením, ale výstup, který je zde realizován pomocí průmyslového komunikačního standartu sériové sběrnice I²C, je vždy 16 bitový (díky bitovému posunovači). Díky větší ploše snímacích diod dosahuje snímač velice vysoké citlivosti až 0,0005pW/cm². Mezi další jeho vlastnosti patří automatické usnutí mezi měřeními, dynamický rozsah 1:250 000 000, rychlost komunikace 400kHz a integrovaný teplotní senzor sloužící ke zpětné kontrole teploty snímače a případné korekci naměřených hodnot.

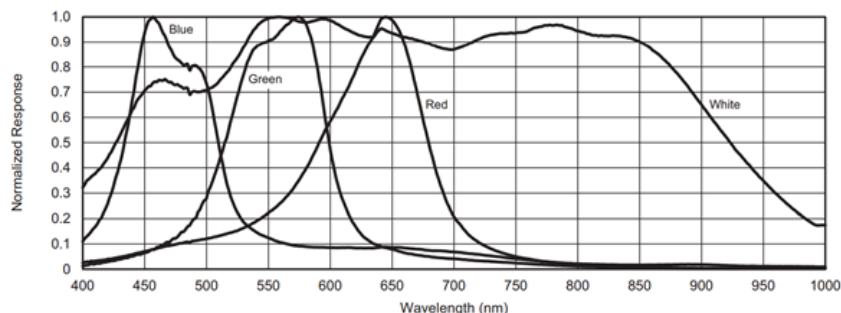
Díky měření v rozdílném barevném prostoru, který více odpovídá tomu jak vidí člověk, se snímač MTCS-CDCAF využívá hlavně pro měření vyzařovaného spektra světelných zdrojů a jejich kalibraci (osvětlení, kalibrace monitorů a projektorů)[8]

2.4.3 Senzory ostatních firem

VEML6040

VEML6040 je snímač vyráběný firmou Vishay Semiconductors, který je schopen snímat tři základní barvy (červenou, zelenou a modrou) a zároveň bílé světlo pomocí fotodiód bez barevného filtru (pro každou část jedna fotodioda). Pro komunikaci s ostatními zařízeními využívá podobně jako některé dříve zmíněné snímače protokolu I²C a 16 bitových hodnot. Jak si lze povšimnout na obrázku 2.12, tak jeho snímací část bez barevného filtru je schopna zaznamenat světlo i v infračervené oblasti až do přibližně 850nm, kdy citlivost začíná klesat.

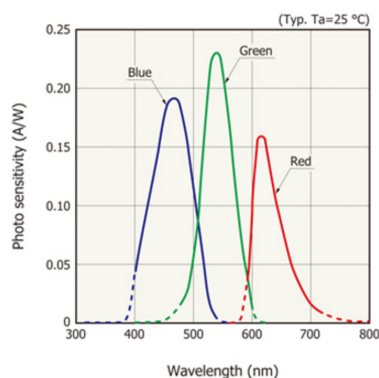
Cena tohoto snímače je velice nízká, pohybuje se kolem 80Kč. Mezi další jeho výhody patří využití technologie FiltronTM ke zdokonalení snímaných hodnot a přiblížení se tak lidskému oku, odolnost vůči blikání zářivkových světel nebo maximální snímací rozsah s krokem 0,007865lux/krok.[9]



Obr. 2.12: Citlivost na barvy ve spektru světla u snímače VEML6040[9]

S9032-02

Tento snímač je velice jednoduchý snímač obsahující pouze tři fotodiody, každou s jedním barevným filtrem, jehož výstupem je napětí na pinech odpovídající dané barvě. Na obrázku 2.13 vpravo si lze povšimnout relativně přesně nasnímaných barevných složek světelného spektra, čehož je dosaženo hlavně pomocí velkých snímacích ploch fotodiód umístěných do kruhu. Díky tomu, že tento senzor nemá žádné pixely bez barevného filtru, tak je jeho citlivost v infračerveném spektru prakticky nulová. Využívá se hlavně pro kontrolu barev monitorů, LCD projektorů, testování barev a jejich detekci.[10]



Obr. 2.13: Snímač S9032-02 a jeho citlivost na barvy ve spektru světla[10]

2.4.4 Srovnání senzorů a výběr nejvhodnějšího

Pro lepší srovnání všech snímačů naráz jsou jejich vlastnosti přehledně vypsány v následující tabulce. Pokud se mi některého ze snímačů nepovedlo v datasheetu dohledat danou hodnotu, případně není tato vlastnost daným typem podporována, tak je namísto ní zapsána pouze pomlčka.

Tab. 2.1: Vlastnosti jednotlivých snímačů, část 1

Snímač	Napájení [V]	Spotřeba [μA] ¹	Výstup	Podpora I ² C	Nejvyšší citlivost při vlnové délce RGB [nm]
TCS3200	5	1400, -, 0,1	frekvence	ne	640, 524, 47
TCS3472	3	235, 65, 2,5	16 bitů	ano	615, 525, 465
MRGBiCS	3,3	-, -, -	napětí	ne	645, 552, 463
MTCS-CDCAF	3,3	1800, 800, 1	16 bitů	ano	609, 555, 452
VEML6040	3,3	200, -, 0.8	16 bitů	ano	650, 550, 450
S9032-02	-	-, -, -	napětí	ne	620, 540, 460

Tab. 2.2: Vlastnosti jednotlivých snímačů, část 2

Snímač	Fotocitlivost RGB [A/W]	Citlivost ozáření RGB [počet/($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)]	Pracovní teplota [°C]	Cena [Kč/kus]
TCS3200	-, -, -	331, 386, 474	-40 až 70	40
TCS3472	-, -, -	19.5, 16.6, 13.8	-30 až 70	150
MRGBiCS	0,33, 0,34, 0,28	-, -, -	-20 až 100	-
MTCS-CDCAF	0,40, 0,37, 0,30	4730, 4392, 8179	-40 až 125	-
VEML6040	-, -, -	96, 74, 56	-40 až 85	64
S9032-02	0,16, 0,23, 0,18	-, -, -	-20 až 85	102

Jak lze vypořádat v předchozích tabulkách s hodnotami (tabulky 2.1, 2.2), tak úplně nejlépe vychází profesionální snímače MTCS-CDCAF(2.4.2) a MRG-ViCS(2.4.2) od firmy MAZeT a to hlavně díky jejich vysoké fotocitlivosti převyšující ostatní několikanásobně a relativně málo se překrývající složkám RGB spektra. Jejich jedinou a zásadní nevýhodou je jejich dostupnost pouze při odběru ve velkém množství, což znamená i několikanásobek ceny, kterou se mi sice nepodařilo zjistit, ale u profesionálních nástrojů nebývá příliš nízká.

¹hodnoty odpovídají zapnutém měření, uspanému senzoru a vypnutému senzoru

Stejnou nevýhodou oplývá i snímač S9032-02(2.4.3), u kterého mi po oslovení výrobce byla zaslána cenová nabídka, ve které byl minimální počet objednaných součástek 20 kusů, takže výsledná cena by vycházela na přibližně 2030Kč.

Vzhledem k tomu, že chci při následující stavbě kolorimetru využít sběrnici I²C, jejíž hlavní přínos je v odstranění přebytečných kabelů (využívá pro komunikaci pouze dvou vodičů a to SDA (serial data) a SCL (serial clock)), tak mé volbě nevyhovuje i snímač TCS3200(2.4.1). Tento senzor totiž využívá pro komunikaci s ovládacím prvkem frekvenci.

Zbývají tedy poslední dva snímače TCS3472(2.4.1) a VEML6040(2.4.3), jejichž vlastnosti se velice podobají. Oba mají velice nízkou spotřebu a podporují sběrnici I²C s 16 bitovými hodnotami. VEML6040 má o něco málo hladší průběhy při rozlišení jednotlivých barev a menší cenu, jeho hlavní výhoda oproti TCS3472 ale spočívá v přibližně čtyřnásobná citlivost na ozáření jednotlivých barevných fotosnímačů. Tato výhoda je pro moji následnou práci velice důležitá z důvodu menší potřeby osvětlení a lepší detekce jednotlivých barev a proto jsem zvolil právě senzor RGB barev VEML6040 vyráběný firmou Vishay Semiconductors.

3 NÁVRH METODIKY SNÍMÁNÍ, ŘÍDÍCÍ LOGIKA

3.1 Hardwarové součásti

Arduino

Jako řídicí jednotka výsledného kolorimetru bude využíván mikrokontrolér Arduino založený na čipu ATmega328P, který je vyráběn firmou Atmel. Speciálně se bude jednat o verzi Arduino nano, mezi jehož vlastnosti patří:

- Napájecí napětí - 5V (USB) / 7-12V (napájecí konektor)
- 22 vstupně výstupních digitálních pinů (6 s podporou PWM)
- 8 vstupních analogových pinů
- Výstupní proud na pin - 20mA
- Flash paměť - 32KB (2KB využito pro bootloader)
- SRAM - 2KB
- EEPROM - 1KB
- Pracovní frekvence - 16MHz

Jeho výhoda spočívá v jednoduché a tzv. ‘userfriendly’ implementaci programovacího jazyka Wiring založeného na jazyku C, díky čemuž jej lze velice snadno využít ke tvorbě zvoleného projektu a díky velkému množství pinů k němu připojit všechny potřebné komponenty. Standardního uspořádání pinů u Arduino nano využívají také ostatní výrobci, kteří pro něj vytvořili nepřebornou sadu tzv. shieldů. Takovýto shield stačí pouze připojit k základní desce a s použitím přidružených knihoven jej snadno obsluhovat.[16]

Pro samotné měření budou k výpočetní jednotce (Arduino nano) připojeny následující komponenty.

Snímač barev

Jak už vyplývá z předchozí kapitoly, tak jsem jako hlavní snímač barev vybral VEML6040, jehož vlastnosti nejvíce odpovídaly potřebám výsledného kolorimetru. A to jak kvalitou a citlivostí snímací části, tak spotřebou a hlavně podporou komunikace s řídicí jednotkou skrze I²C sběrnici.

Osvětlení

Pro správnou práci snímače barev je třeba zajistit dostatek pokud možno co nejvíce homogenního osvětlení. Z toho důvodu budou kolem samotného snímače umístěny

tři LED diody. Ty budou vybírány hlavně podle rozložení intenzity osvětlení na jednotlivé vlnové délky, protože například u běžných bílých led diod se vyskytuje velká špička (až desetinásobek okolních hodnot) v oblasti modrého světla, což by mělo velice zkreslující vliv na měření a bylo by nutné dělat dodatečné úpravy naměřených hodnot.

Teplotní stabilizace

Teplota okolí i teplota samotných měřících a obslužných prvků je pro měření velice důležitá, protože má velký vliv jak na barvu a intenzitu světla emitovaného LED diodami, tak na šum snímače a tím i kvalitu nasnímaných hodnot. Z těchto důvodů bude deska s měřící a osvětlovací soustavou spojena s Peltierovým článkem, pomocí kterého lze regulovat teplotu. Z druhé strany Peltierova článku bude umístěn chladič pro odvedení přebytečného tepla. Současně bude v blízkém okolí měřícího prvku a LED diod umístěn teploměr pro snímání aktuální teploty.

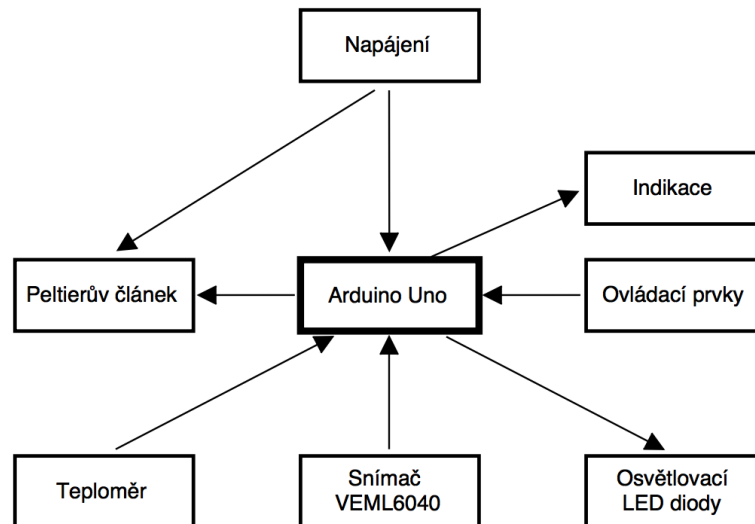
Ovládání a signalizace

Pro ovládání snímacího přípravku bude sloužit jedno tlačítko. Toto tlačítko bude sloužit k provedení snímání barvy. Informovat uživatele o jednotlivých stavech, ve kterých se měřící prvek nachází, budou barevné LED diody. Ty budou indikovat stav přístroje (zapnutý/vypnutý), připravenost ke snímání - zda je dodržena na snímacím prvku správná teplota a proběhly všechny předchozí operace, provedení snímání a míru využití vnitřní paměti.

Blokové schéma

Jak lze vidět na blokovém schématu zakresleném na následujícím obrázku 3.1, tak všechny výše zmíněné součásti budou přímo připojené k Arduinu. Propojení bude provedeno buďto přímým připojením daných prvků na určené piny, nebo pomocí zesilovacích tranzistorů v případě součástek, které ke svému fungování potřebují větší množství proudu. Zde lze uvést například Peltierův článek, který pro správnou funkčnost potřebuje proud až v jednotkách ampérů, což by způsobilo v případě přímého napojení na výstupní piny výpočetní jednotky její přetížení a následné vyhoření.

Poslední z využitých metod pro připojení prvků k výpočetní jednotce je I²C sběrnice, tu bude využívat snímač VEML6040 jak pro příjem informací o spuštění měření, tak pro sdělování naměřených hodnot.



Obr. 3.1: Blokové schéma zapojení výsledného kolorimetru

3.2 Řídící logika

Samotná řídicí logika je vizuálně vyobrazena na obrázku 3.2, ze kterého lze vyčíst posloupnost jednotlivých úkonů, které budou při měření probíhat.

Na začátku je nutné připojit přípravek skrze USB k PC a přivést tak napětí na řídicí a výpočetní prvek (Arduino) a dále na indikační LED diodu, která informuje uživatele o spuštění přístroje a zároveň o dostatečně vysokém napětí v případě napájení z baterií. Po jeho spuštění a provedení všech procesů nezbytných pro správnou funkčnost je spuštěn nahraný program.

První funkcí, kterou tento program provádí je kontrola teploty snímacího prvku a okolních přisvětlovacích diod. V případě, že naměřená teplota neodpovídá povolenému rozmezí, tak je pomocí Peltierova článku upravena. Pokud je dosaženo požadované teploty, je rozsvícena dioda indikující připravenost k měření. V tomto stavu pak přípravek čeká, dokud jej uživatel nepřemístí nad látku, u které chce změřit barvu a nezmáčkne tlačítko pro provedení měření. Pokud čekání trvá déle, než je nastavená limitní hodnota, tak dochází k opětovnému přeměření teploty a případným úpravám. V tomto stavu lze také, skrze sériovou linku, spárovat měřící přípravek s programem v počítači který slouží k následnému zpracování naměřených hodnot.

Po stisknutí snímacího tlačítka, nebo přijetí příkazu z PC, se program přesune k provedení hlavní snímací smyčky, která je vyobrazena na obrázku 3.3. Ta se skládá ze snímací a výpočetní části. Ve snímací části se provádí snímání se spuštěným přisvitkem a následně s vypnutým přisvitkem. Toto snímání se opakuje do té doby, dokud počet opakování neodpovídá nastavené hodnotě. Poté se od sebe odečtou

hodnoty získané s a bez přísvitu a dojde ke zprůměrování výsledných hodnot. Díky tomuto postupu bude dosaženo vyšší přesnosti měření a zároveň bude odstraněn případný vliv okolního osvětlení, které by jej mohlo na základě odrazů od okolních předmětů pozměnit reálnou barvu předmětu.

Výsledkem hlavní snímací smyčky jsou tedy 3 hodnoty v rozsahu 0 až 255 odpovídající jednotlivým složkám barevného prostoru RGB. Ty jsou pak v případě, že příkaz k měření přišel z PC odeslány přes sériovou linku do obslužného programu pro následné zpracování. V případě, že příkaz k měření přišel od tlačítka, tak je nejprve otestováno, zda je ve vnitřní EEPROM paměti ještě volné místo a pokud ano, tak jsou hodnoty umístěny sem. Vnitřní stálá paměť, ve které zůstanou hodnoty i po odpojení napájení, případně provedení restartu disponuje kapacitou 1KB což je dostatečná kapacita pro uložení hodnot z více než 300 měření. Po dokončení zápisu, případně odeslání naměřených hodnot dojde k probliknutí informační LED diody, aby byl uživatel informován o správném provedení měřící procedury.

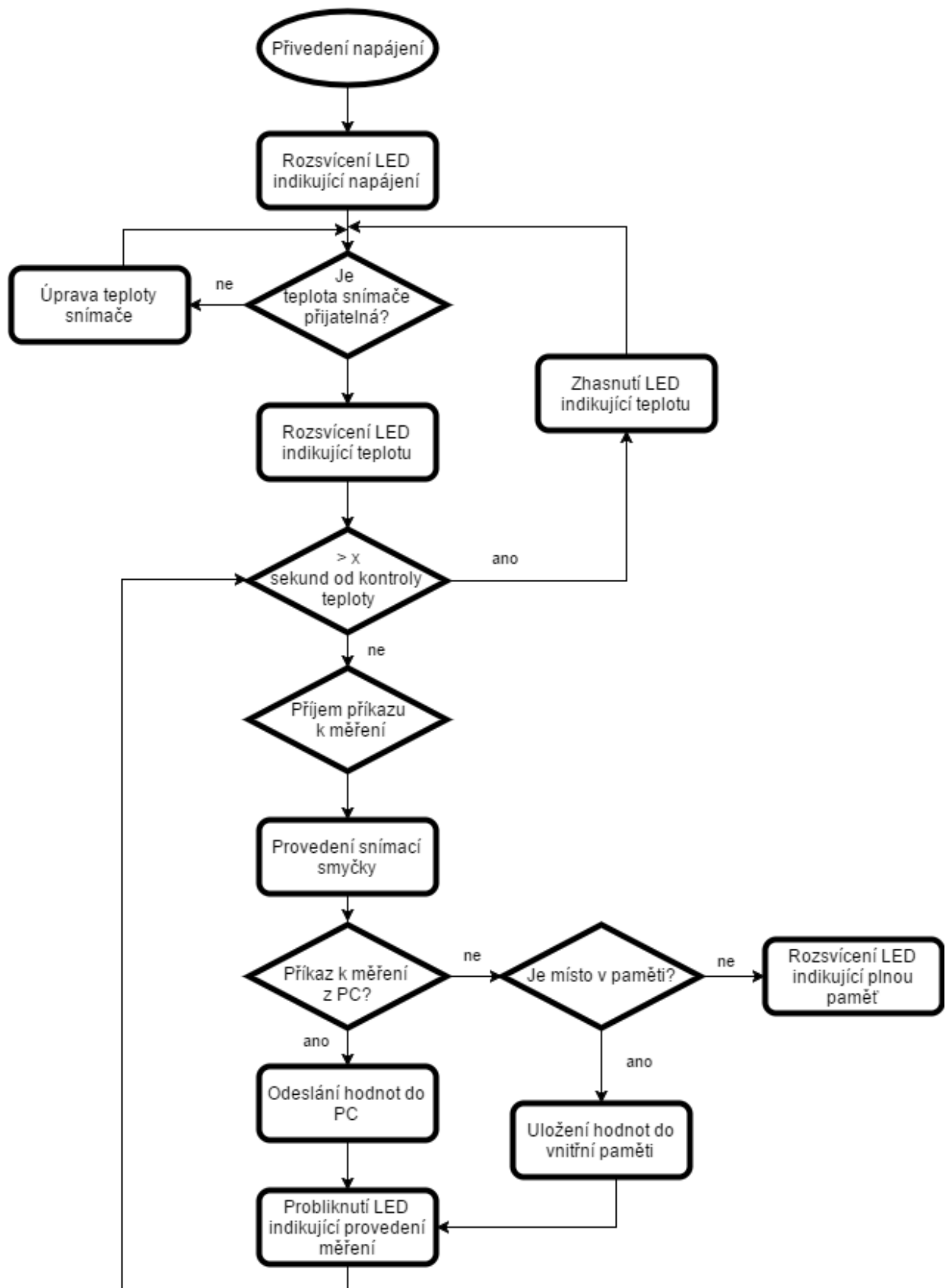
Po správném provedení všech předchozích úkonů je přístroj připraven na další měření, takže čeká na opětovné stisknutí měřícího tlačítka a zároveň v předdefinovaných časových úsecích kontroluje teplotu RGB senzoru VEML6040 a přísvitových diod.

3.3 Metoda snímání

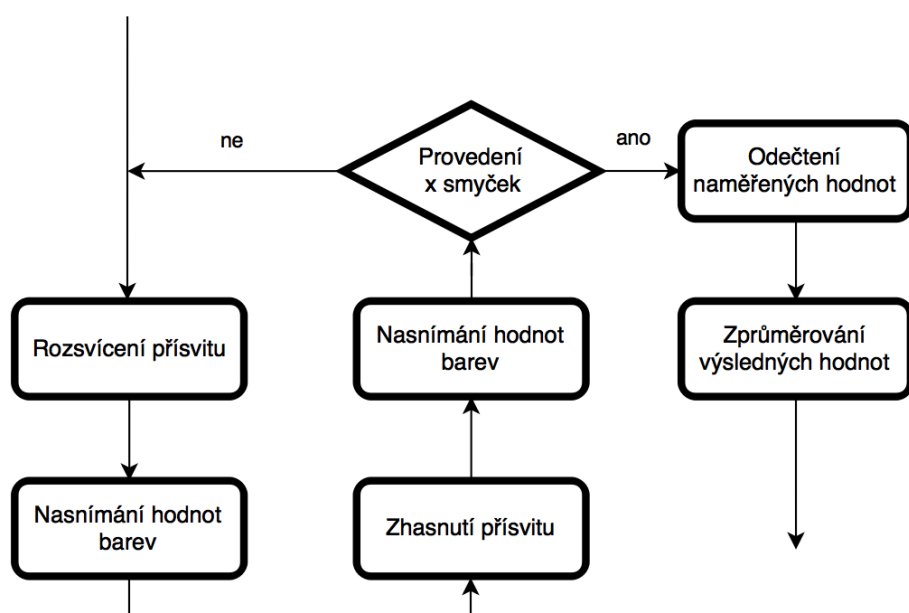
Metoda snímání, která bude využita u vytvořeného kolorimetru je již zběžně popsána v části 3.2. Pro její lepší pochopení ji ale vypíši detailněji do této části.

Základem metody snímání barev pomocí kolorimetru je příprava měřeného přípravku, který by měl být očištěn od špíny a dalších rušivých prvků. Dále by bylo ideální, aby byl povrch měřeného prvku pokud možno matný, protože u lesklých prvků by mohlo docházet k nechtěným odrazům a zkreslení měření.

Po dokončení přípravy měřeného prvku je možné přistoupit přivedení napájení do měřícího přípravku, což se projeví rozsvícením LED diody oznamující spuštěné napájení a poté je nutné vyčkat dokud nedojde ke kontrole a případné úpravě teploty snímače a následnému rozsvícení odpovídající kontrolky. Následně je možné přistoupit k samotnému měření a to tak, že uživatel umístí snímací prvek na měřený materiál a stiskne měřící tlačítko, případně odešle příkaz z PC programu. V následující chvíli dojde k několikrát se opakující smyčce měření, při které se měří jednou s rozsvíceným přísvitem a následně bez něj pro dosažení větší přesnosti. Naměřené hodnoty jsou pak zprůměrovány a uloženy do paměti, případně odeslány do připojeného počítače.



Obr. 3.2: Blokový diagram popisující posloupnost procesu snímání barev



Obr. 3.3: Blokový diagram popisující posloupnost procesu hlavní snímací smyčky

4 PRAKTICKÁ REALIZACE

Tato kapitola je zaměřena na praktickou realizaci kolorimetrického modulu určeného pro kontinuální měření barevných vlastností materiálu při výrobě. Její součástí jsou jednotlivé kapitoly věnované vždy řešení výstavby a komunikace, ať už počítačového programu, nebo Arduina s danou hardwarovou součástí.

4.1 RGB snímač

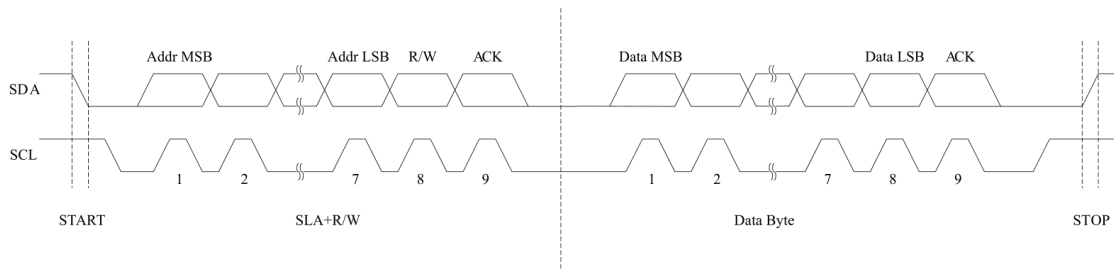
Jak jsem již napsal v kapitole 2.4.4, tak jako nejvhodnější snímač barevného spektra mi ve srovnání vyšel VEMML6040 2.4.3 vyráběný firmou Vishay Semiconductors. Tento snímač je schopen snímat tři základní barvy (červenou, zelenou a modrou) a zároveň bílé světlo pomocí fotodiod bez barevného filtru. Pro komunikaci s řídicí jednotkou je zde využívána sériová sběrnice I²C, skrze kterou snímač po přijetí požadavku na vyčtení naměřených hodnot odešle 16 bitovou hodnotu požadované části barevného spektra.

4.1.1 Sériová sběrnice I²C

Počítačová sériová sběrnice I²C byla vyvinuta firmou Philips a je využívána pro komunikaci mezi různými zařízeními pomocí dvou vodičů SDA a SCL, kde skrze vodič SDA (Synchronous Data) proudí data a skrze SCL (Synchronous Clock) je jak už název napovídá vyslán hodinový signál sloužící k synchronizaci posílaných dat. V případě desky Arduino nano, která využívá jako hlavní výpočetní jednotku čip Atmega328p od firmy Atmel se tato sériová sběrnice jmenuje TWI (Two Wire Interface), kvůli licencování chráněné značky I²C.

Komunikace skrze tuto sběrnici probíhá vždy v režimu Master - Slave, kdy jedno z připojených zařízení je nastaveno jako MASTER (většinou mikrokontrolér) a všechna ostatní jsou nastavena jako SLAVE. Pro přijetí nějakých dat musí nejdříve MASTER odeslat adresu cílového čipu a informaci zda půjde o vysílání, nebo příjem. Velikost odesílané adresy je 7 bitů což umožňuje připojit jako SLAVE až 128 zařízení s různými adresami. Ve většině případů je však adresa pro každé zařízení pevně definovaná a není ji možné změnit, případně je možné změnit pouze její část, což množství připojitelných periférií ještě více omezuje. Všechna ostatní připojená zařízení pak kontrolují, zda je odeslaná adresa shodná s tou jejich a pokud ano, tak očekávají další data, která budou určovat co se od zařízení očekává.[3]

Na obrázku 4.1 je znázorněn průběh jednotlivých odesílaných instrukcí. Jako první je vždy odeslán START bit, který je spolu se STOP bitem jediný, který mění stav SDA linky v době kdy je SCL rovno HIGH, všechny ostatní bity se nastavují



Obr. 4.1: Příklad komunikace mezi MASTER a SLAVE pomocí sběrnice I²C[11]

pouze pokud je SCL ve stavu LOW. Dále je odesláno 7 adresních bitů (od nejvyššího po nejnižší) určujících cílové zařízení a jeden bit R/W, který udává zda budeme do periferního zařízení zapisovat, nebo z něj číst. Následuje reakce SLAVE zařízení v podobě ACK (Acknowledge) bitu, určeného k potvrzení (LOW stav), nebo selhání (HIGH stav) přenosu dat. Pokud bylo potvrzeno správné přijetí dat, tak může s dalším hodinovým pulzem proběhnout odeslání jednoho bajtu dat, který musí být následně druhou stranou potvrzen ve formě ACK bitu. V případě, že je přenos dat dokončen a je požadováno ukončení komunikace, tak MASTER nepotvrdí přijetí posledního bajtu tím, že nechá SDA ve stavu HIGH po dobu ACK. Následně SLAVE musí uvolnit linku a MASTER může vygenerovat STOP bit, který jak jsem již psal mění svou hodnotu na HIGH v době, kdy je ve stavu HIGH i hodinový signál.[3]

Stav signálu na lince SDA i SCL je v klidové době HIGH, kvůli tomu je nutné na obě linky přivést napětí skrze pull-up rezistory. Jejich minimální hodnotu odporu lze vypočítat podle následujícího vztahu:

$$R_p = \frac{V_{CC} - V_{OL(max)}}{I_{OL}} \quad (4.1)$$

kde:

R_p minimální hodnota pull-up rezistoru

V_{cc} napájecí napětí

$V_{OL(max)}$ výstupní napětí, stav LOW

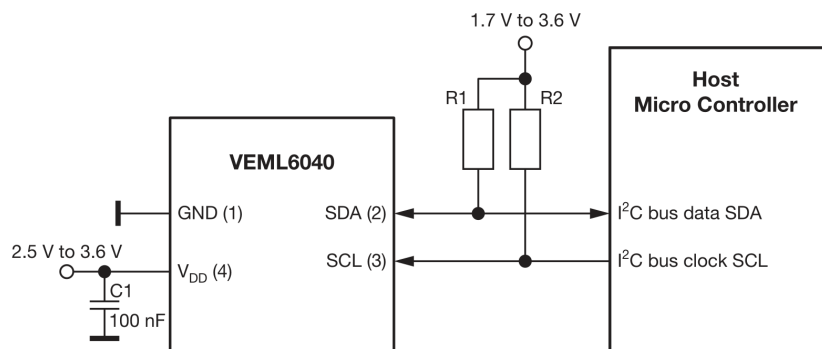
I_{OL} výstupní proud, stav LOW[11]

V případě mnou využívaného čipu Atmega 328p je výsledná minimální hodnota pull-up rezistorů:

$$R_p = \frac{3,3 - 0,4}{3 * 10^{-3}} = 967\Omega \quad (4.2)$$

4.1.2 Připojení a komunikace se snímačem VEML6040

Schéma zapojení měřicího snímače RGB barev jsem převzal z jeho datasheetu, díky tomu je zaručeno, že zapojení je navrženo co možná nejvhodněji pro práci snímače. Jak lze na zapojení vidět 4.2, tak k senzoru jsou přivedeny čtyři vodiče, dva pro napájení a dva pro komunikaci. Mezi napájením (V_{DD}) a zemí (GND) je pak umístěn blokovací kondenzátor o velikosti 100nF sloužící k eliminaci parazitních vlastností přívodů napájení. Na datové linky (SDA a SCL) je skrze již dříve zmíněné pull-up rezistory přivedeno napájení 3,3V, které udržuje v klidovém stavu na těchto vodičích stav HIGH. Jejich velikost je 2,2k Ω , což dostatečně splňuje podmínku z rovnice 4.2, že odpor těchto rezistorů pro připojení periférie k čipu Atmega 328p musí být větší než 967 Ω . Realizované zapojení lze vidět na obrázku 4.11.



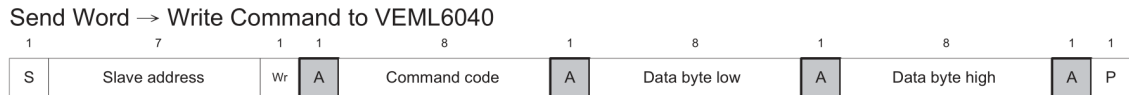
Obr. 4.2: Zapojení jednotlivých pinů snímače VEML6040[9]

Pro zápis a vyčítání hodnot ze senzoru je využíváno předem dané posloupnosti odesílaných bajtů. V případě zápisu je posloupnost znázorněna na obrázku 4.3. Význam jednotlivých částí je pak následující¹:

- **Slave address** - slave adresa snímače (0x10), bit pro zápis
- **Command code** - řekne snímači, že následující bity budou sloužit k jeho konfiguraci (0x00)
- **Data byte low** - spodní část 16 bitového konfiguračního čísla, v mém případě se skládá z příkazu pro povolení barevného senzoru (0x00), vypnutí triggeru (0x00), nastavení automatického měřicího módu (0x00) a nastavení integračního času na 40ms (0x00). Jejich součet pak dává výsledný odesílaný bajt (0x00)
- **Data byte high** - horní část 16 bitového konfiguračního čísla (0x00)

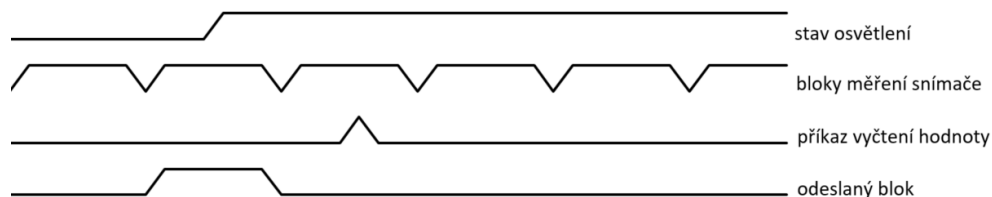
Protože při měření využívám automatického módu měření, tak snímač měří kontinuálně a při požadavku o naměřenou hodnotu odešle hodnotu, kterou naměřil za

¹hodnoty v závorkách odpovídají odesílané hodnotě v hexadecimální soustavě



Obr. 4.3: Posloupnost odesílaných bajtů pro zápis do snímače VEML6040[9]

poslední dokončený časový blok 4.4 a aby došlo k odeslání bloku, který byl naměřen až po rozsvícení LED diod, tak je nutné nastavit dobu čekání na přibližně dvojnásobek integračního času (odeslaný blok v obrázcích 4.4 a 4.5 znamená časové rozmezí, ve kterém byla naintegrovaná hodnota, která je po přijetí příkazu odeslána). Z toho důvodu snímači vždy těsně před začátkem měření zašlu příkaz pro vypnutí a ihned poté příkaz pro zapnutí (reset). Tímto úkonem je dosaženo vymazání předchozích hodnot a začátek nového měřícího okna. Následně je možné správně načasovat vyčtení bloku dat, jehož měření bylo zahájeno po znovuaktivaci snímače a zkrátit tak čas měření až o polovinu. V hodnotách odesílaných do snímače to znamená, že pro vypnutí snímače se v části Data byte low zašle namísto hodnoty 0x00 hodnota 0x01.



Obr. 4.4: Průběh jednotlivých úkonů, které jsou při měření prováděny (bez resetu)



Obr. 4.5: Průběh jednotlivých úkonů, které jsou při měření prováděny (s resetem)

Pro vyčítání naměřených hodnot je posloupnost odesílaných příkazů následující (obrázek 4.6):

- **Slave address** - slave adresa snímače (0x10), bit pro zápis
- **Command code** - určí barvu, jejíž naměřenou hodnotu bude snímač odesílat. Červená (0x08), zelená (0x09), modrá (0x0A), bílá (0x0B)
- **Slave address** - slave adresa snímače (0x10), bit pro čtení

- **Data byte low** - dolní část 16 bitové hodnoty naměřené barvy
- **Data byte high** - horní část 16 bitové hodnoty naměřené barvy



Obr. 4.6: Posloupnost odesílaných bajtů pro vyčítání ze snímače VEML6040[9]

U obou směrů komunikace, jak zápis konfigurace, tak čtení hodnot, jsou pak součástí:

- **S** - startovací podmínka
- **A** - bit potvrzující přijetí dat
- **P** - stop podmínka

Pro jednodušší komunikaci mezi snímačem a mikrokontrolérem jsem vytvořil knihovnu I2C.h, ve které jsou tyto posloupnosti zahrnuty a v samotném kódu už stačí jen pomocí konstruktoru vytvořit vhodně pojmenovaný objekt (`I2C sensor`), spustit komunikaci (`sensor.start()`), zapsat do něj vybranou konfiguraci (`sensor.zap-satVEML(0x00)`) a následně vyčítat naměřené hodnoty (`sensor.cistVEML(0x08)`).

Při spuštění komunikace se jako jedna z hlavních částí nastavuje rychlost komunikace na 100kHz, se kterou budou zařízení posílat data a to pomocí vzorce 4.3 z datasheetu čipu Atmega 328p [11]:

$$SCL_{frekvence} = \frac{frekvenceCPU}{16 + 2(TWRB) * (požadovanárychlost)} \quad (4.3)$$

Po úpravě tohoto vzorce je výsledkem hodnota odpovídající požadované rychlosti, která se zapíše do TWRB registru:

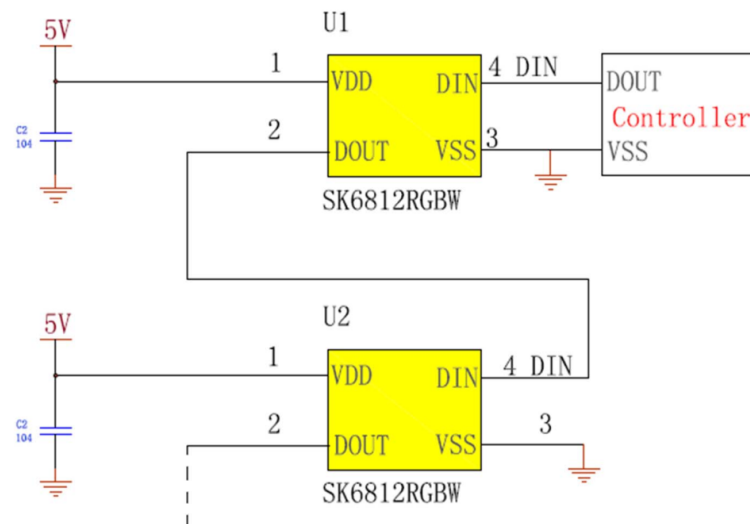
$$TWRB = \frac{frekvenceCPU}{(požadovanárychlost) - 16} = \frac{16000000}{(100000) - 16} = 72 \quad (4.4)$$

Součástí měřicího cyklu je také zprůměrování naměřených hodnot. To probíhá tak, že snímač čtyřikrát naměří RGB hodnoty barev a následně je z nich udělán průměr se zaokrouhlením na celé hodnoty. Díky tomu je dosaženo vyšší přesnosti měření, kdy se neuplatní případné menší zákmity ve výsledcích. Nevýhodou tohoto zprůměrování naměřených hodnot je čtyřnásobné zpomalení měřicího cyklu. V reálných hodnotách to znamená, že jedno měření nyní trvá přibližně 0,5s, namísto původních 0,160s (nejedná se o čtyřnásobek času, protože se neuplatní zpoždění některých neopakujících se prvků).

4.1.3 Osvětlení

Pro osvětlení a tím pádem i zlepšení snímací funkce senzoru jsem využil 3 RGBW SMD LED diody, které jsem rozmístil okolo snímače, každou s posunem o 120° aby bylo osvětlení rovnoměrné 4.11. Přesné označení diod je SK6812RGBW a mezi jejich největší výhodou lze započítat to, že nevyužívají pro každou barvu vlastní spojení se zdrojem, ale využívají NRZ (Non Return to Zero) komunikaci. Díky tomu lze jednotlivé diody řadit do série a využít k jejich ovládní pouze jeden vodič namísto tří pro každou diodu v případě ovládní pomocí jednotlivých vodičů.

Schéma zapojení diod 4.7 je podobné jako u snímače, skládá se z napájení (V_{DD}), uzemnění (GND) a dvou datových vodičů, vstupního (DIN) a výstupního (DOUT), který vede do další diody. Současně je také u každé diody umístěn blokovací kondenzátor o velikosti 100nF.



Obr. 4.7: Schéma zapojení LED diod SK6812RGBW[12]

Při komunikaci s diodami jsou do nich odesílány 32 bitové hodnoty. Každé číslo se skládá ze čtyř částí, prvních osm bitů udává hodnotu pro červenou diodu, druhých osm bitů pro zelenou diodu, třetích osm pro modrou diodu a zbývající bity určují jas bílé diody, jak je znázorněno na obrázku 4.8. Díky tomu lze nastavit u každé barvy až 256 jasových úrovní. Bohužel z mě neznámých důvodů mi v objednávce byly doručeny diody s jiným pořadím barev a to GRB namísto RGB, takže při odesílání hodnot je nutné zaměnit hodnoty pro červenou a zelenou barvu, jinak fungují naprosto stejně.

Odesílání jednotlivých bitů probíhá podle časového rozvrhu v tabulce 4.1. Tyto hodnoty se však po zadání do mého kódu rozcházely se skutečností a docházelo k náhodným výpadkům osvětlení, záměně barev, nebo změně jasu diod. Proto jsem

R7	R6	R5	R4	R3	R2	R1	R0	G7	G6	G5	G4
G3	G2	G1	G0	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
W7	W6	W5	W4	W3	W2	W1	W0				

Obr. 4.8: Rozdělení odesílané 32 bitové hodnoty na jednotlivé barvy[12]

v části kódu, která se stará o odesílání hodnot zakázal přerušování a upravil časování podle hodnot naměřených na osciloskopu.

Tab. 4.1: Časový rozvrh pro přenos dat do LED diod [12]

	doporučené hodnoty času	tolerance	upravené hodnoty času
0, čas stavu HIGH	0,3 μ s	\pm 0,15 μ s	0,15 μ s
0, čas stavu LOW	0,9 μ s	\pm 0,15 μ s	0,35 μ s
1, čas stavu HIGH	0,6 μ s	\pm 0,15 μ s	0,40 μ s
1, čas stavu LOW	0,6 μ s	\pm 0,15 μ s	0,20 μ s
reset, čas stavu LOW	80 μ s	-	-

Samotné odesílání hodnot do LED diod probíhá tak, že se postupně odešlou 32 bitové hodnoty pro všechny diody, pak následuje reset a pak je možné zaslat novou sadu hodnot. V případě, že se hodnoty jednotlivých barev nemění, je možné zaslat hodnoty jen jednou a diody tuto hodnotu udrží po dobu stabilního napájení.

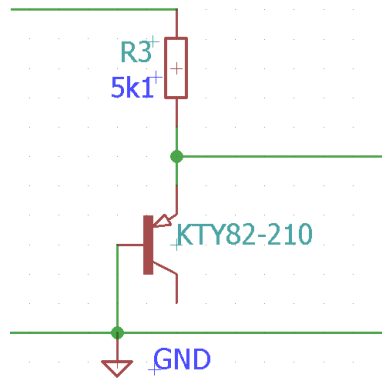
4.1.4 Teplotní snímač

Měření teploty na desce se snímačem je důležité hlavně kvůli změně svítivosti, ke které dochází u LED diod se změnou teploty. Naměřené výsledky jsou dále využity pro regulaci teploty pomocí Peltierova článku.

Pro měření teploty na snímací desce jsem využil PTC termistor KTY82-210, což je vlastně rezistor s teplotně závislým odporem, který roste spolu s teplotou. Této vlastnosti jsem využil a zapojil termistor spolu s rezistorem o velikosti 5,1k Ω jako napěťový dělič 4.9 na jehož vstupu je 5V a velikost napětí na výstupu odpovídá teplotě okolí.

Hodnoty napětí naměřené na analogovém vstupu Arduina je nutné přepočítat na teplotu pomocí soustavy několika rovnic.

Nejprve je nutné přepočítat vstupní hodnoty na rozsah 0 až 5 podle velikosti vstupního napětí 4.5, protože vstupní hodnoty jsou v rozmezí 0 až 1023 díky 10 bitovému A/D převodníku (2^{10} hodnot) a následně vypočítat odpovídající velikost



Obr. 4.9: Zapojení teploměru jako napěťový dělič

odporu termistoru 4.6 z poměru vstupního a výstupního napětí a odporu pevného rezistoru. Posledním krokem je podle tabulky hodnot odporu pro danou teplotu z datasheetu termistoru, vypočítat odpovídající teplotu okolí 4.7.

$$U = \frac{(vstup) * 5}{1024} [V] \quad (4.5)$$

$$R = \frac{U * 5100}{5 - U} [\Omega] \quad (4.6)$$

$$T = \frac{R - 1639,8}{14,967} [^{\circ}C] \quad (4.7)$$

Sloučením těchto tří rovnic do jedné pomocí symbolického toolboxu v Matlabu jsem získal rovnici, jejímž vstupem je naměřená hodnota a výstupem je teplota okolí.

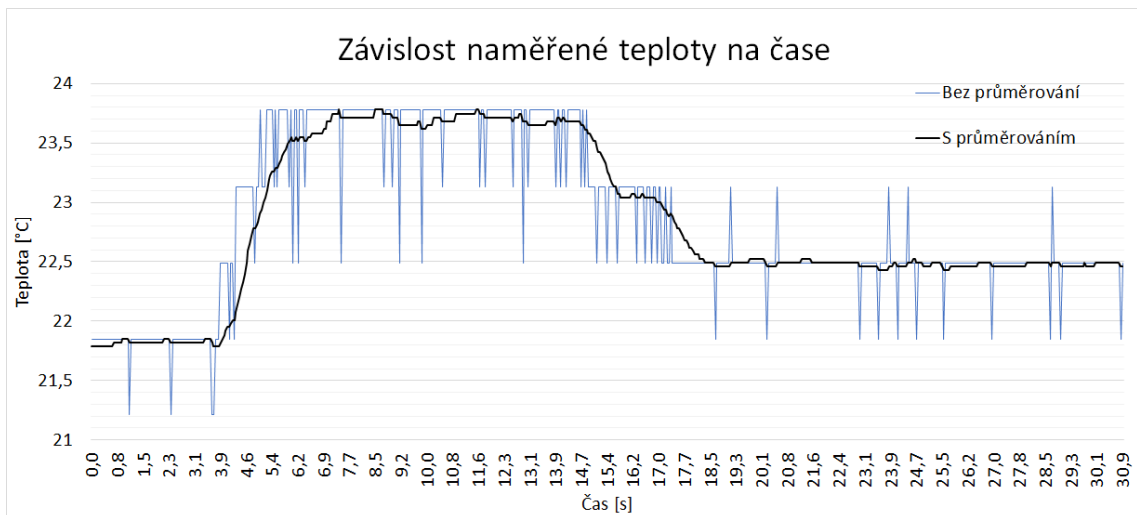
$$T = -\frac{(11233 * vstup - 2798592) * 200}{(vstup - 1024) * 4989} [^{\circ}C] \quad (4.8)$$

Výstupní rozlišení této měřicí soustavy je $\pm 0,6^{\circ}C$, což způsobuje hlavně při růstu, nebo poklesu teplot ve výstupních hodnotách velké skoky. Z toho důvodu jsem do kódu přidal průměrování naměřené teploty pomocí součtu posledních dvaceti hodnot 4.9. Díky tomu se náhodné změny výstupu projeví pouze jako 1/20 rozlišení měřicí soustavy, což znamená $\pm 0,03^{\circ}C$

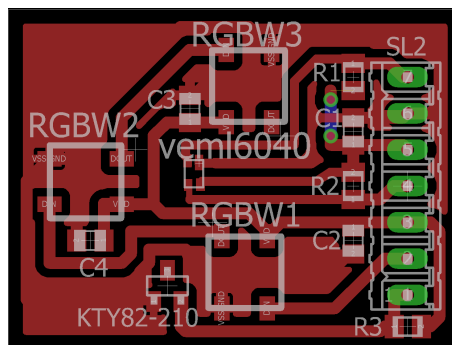
$$T_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i [^{\circ}C] \quad (4.9)$$

kde:

T teplota
n počet průměrovaných hodnot



Obr. 4.10: Graf porovnávající naměřené a zprůměrované hodnoty teplot



Obr. 4.11: Návrh desky plošného spoje pro snímač, osvětlení a teploměr (reálné rozměry 32x24mm)

4.1.5 Kalibrace nasnímaných hodnot

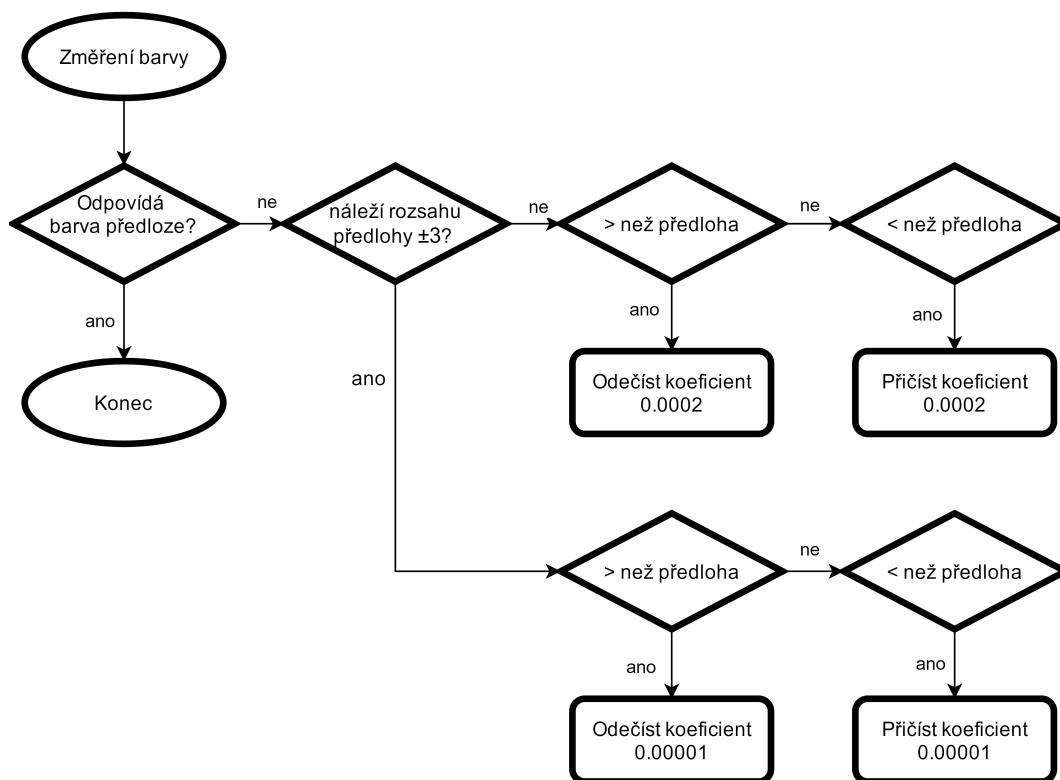
Kalibrace barevného snímače je ve většině případů prováděna skrze nastavování jeho integrační doby. To však u snímače VEM16040 není dost dobře proveditelné kvůli omezenému množství integračních časů na šest výchozích hodnot (40ms, 80ms, 160ms, 320ms, 640ms a 1280ms).

Defaultně jsem proto nastavil nejkratší integrační čas 40ms pro co nejrychlejší průběh měření a nadále kalibrace nasnímaných hodnot probíhala pomocí změny jasu přísvitových RGBW diod.

Samotná kalibrace probíhala v nekonečném cyklu, kde se postupně upravoval jas LED diod tak, aby hodnota naměřená snímačem odpovídala požadované hodnotě. Při každém průběhu tedy byla naměřena hodnota barev s aktuálním jasnem diod a

podle toho jestli byly naměřené hodnoty vyšší nebo nižší se buďto zvýšil nebo snížil jas. A právě toto byl největší problém této metody, protože jedno měření trvá přibližně 110ms, takže ve výsledku trvala kalibrace velice dlouho a v případě okrajových hodnot rozsahu 0 - 255 docházelo k přetečení hodnoty maximálního/minimálního jasu a často se pak stalo, že kalibrace skončila neúspěchem.

Z těchto důvodů jsem se rozhodl využít jinou metodu kalibrace a to nastavení zesílení snímače. Tato metoda spočívá v tom, že hodnota získaná z měření je vynásobena určitým koeficientem (zesílením) tak, aby výsledek byl roven požadovanému číslu. Průběh kalibrace je znázorněn na blokovém diagramu 4.12. Z něj lze vyčíst, že se jedná o jednoduchou iterační metodu, kdy se koeficient na základě naměřené barvy neustále upravuje buďto pomocí hodnoty 0,0002, když je příliš vzdálen cílové hodnotě, nebo pomocí hodnoty 0,00001 pokud barva náleží do rozsahu ± 3 požadované hodnoty.



Obr. 4.12: Blokový diagram popisující posloupnost procesu kalibrace

Oproti metodě s úpravou jasu LED diod má tato metoda velkou výhodu v tom, že měření barvy je provedeno pouze jednou na začátku a zbytek úprav už probíhá pouze na softwarové úrovni. Výsledkem je tedy velice rychlá kalibrace (max. 2s), díky které je možné bez větších potíží nakalibrovat i hodnoty na okraji barevného rozsahu. Další výhodou je eliminace vzájemného ovlivňování jednotlivých barev, ke kterému

docházelo u změn jasu, kdy např. zelená barva diody svým spektrem zasahuje do červené i modré a při změně jejího jasu bylo nutné provést úpravy i u ostatních barev. Celý tento proces se musel několikrát opakovat, dokud nebylo dosaženo optimálních hodnot, což vedlo jen k dalšímu prodloužení intervalu kalibrace.

Hodnoty, které jsou výsledkem této procedury jsou v případě, že je její provedení úspěšné uloženy do stálé EEPROM paměti. Díky tomu je možné navázat na předchozí měření i po výpadku proudu bez provádění další kalibrace.

4.2 Ovlivňování teploty

Sestava pro ovlivňování teploty sestává ze dvou hlavních částí, měření aktuální teploty a její následné ovlivňování na základě získaných hodnot. Měření teploty bylo popsáno v kapitole 4.1.4, proto se tato část bude zabývat pouze ovlivňováním teploty měřicí desky 4.11.

K ovlivňování teploty využívám Peltierův článek, jehož základní princip spočívá ve změně teploty styčných ploch dvou v sérii zapojených vodičů, kterými prochází proud. Díky tomu články typu TEC (thermoelectric cooler) pracují jako tepelné čerpadlo, kdy na chladné straně teplo odebírá a na teplé straně jej opět vydává.

Samotný Peltierův článek se skládá v závislosti na jeho velikosti z několika desítek až stovek tělísek vyrobených z polovodičů a spojovacího můstku pro přívod elektrické energie a absorbování tepelné energie 4.13. Po obou stranách jsou pak umístěny izolační keramické destičky sloužící k přenosu tepla a energie je přiváděna pomocí dvou vodičů (ve většině případů červený a černý), u nichž při změně polaritě dojde k záměně teplé a studené strany článku. Mezi největší výhody článku patří:[17]

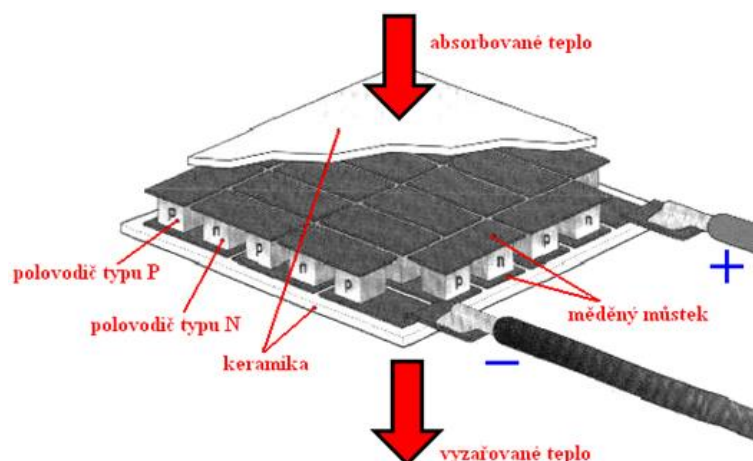
- malé rozměry
- snadná regulace výkonu
- žádné pohyblivé součásti a s tím související tichý provoz
- snadná změna směru toku tepla

Nevýhody:

- velká spotřeba proudu
- menší rozdíl mezi studenou a teplou stranou článku - potřeba chladiče
- vyšší účinnost teplé strany oproti studené (součet příkonu článku a odebraného tepla)

Pro jeho řízení jsem sestavil elektrický obvod skládající se ze tří částí, napájecí, ovládací a řídicí.

Řídicí část tohoto obvodu je určena pro přepínání směru tečení proudu (reverzaci), která způsobí záměnu chladicí a hřející strany Peltierova článku. Tuto záměnu plusového a minusového kontaktu by bylo možné provést pomocí dvoustavového relé, ale protože jsem chtěl vytvořit obvod co nejméně náchylný na poruchy a tedy i



Obr. 4.13: Složení Peltierova článku[17]

prostý všech pohyblivých součástí, raději jsem namísto relé použít h-můstek složený z tranzistorů.

Samotný h-můstek jak lze vidět na obrázku 4.14, je složen ze čtyř unipolárních tranzistorů, dvou s kanálem typu P a dvou s kanálem typu N. Jejich největší výhodou je, že při použití řízení PWM (Pulse Width Modulation - pulzně šířková modulace) signálem jsou buďto plně otevřené a jejich vnitřní odpor je téměř nulový, nebo jsou plně zavřené a neprotéká jimi žádný proud. Díky tomu na nich dochází pouze k minimálním ztrátám a není je proto nutné chladit.

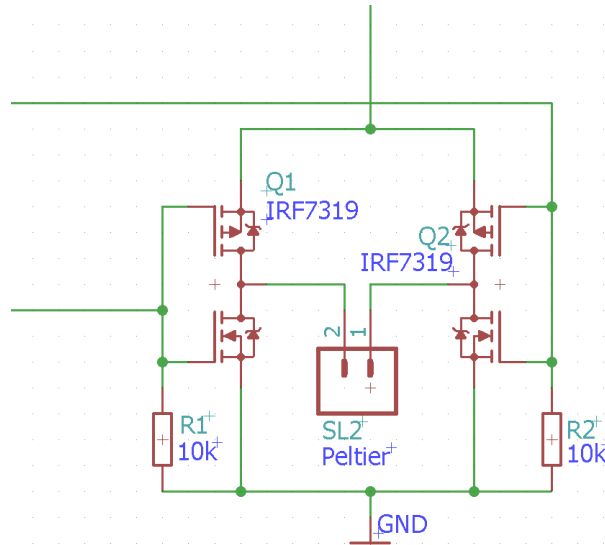
Funkce h-můstku spočívá v tom, že v případě že je na obou ovládacích přívodech (vodiče vedené zleva 4.14) nulové napětí je napětí ze zdroje (přivedené shora 4.14) vedeno skrze oba horní tranzistory na obě svorky a rozdíl jejich potenciálů je tak nulový. V případě přivedení ovládacího signálu na jeden z ovládacích vodičů dojde na jeho straně k uzavření horního tranzistoru s kanálem typu P a otevření spodního tranzistoru s N kanálem. Proud poté prochází od napájení, skrze horní tranzistor na který nebylo přivedeno napětí, svorky pro Peltierův článek a spodní tranzistor otevřený pomocí přivedeného napětí. V případě přivedení signálu na druhý ovládací vodič je postup obdobný, pouze na prostředních svorkách se změnila polarita napětí.

Pro zajištění co největší podobnosti součástek na jedné straně a tím i minimalizaci možnosti, že by došlo k nevhodnému sepnutí a následně ke zkratu, jsem využil unipolární tranzistor IRF7319, což je osmi nožičková součástka, která má již v sobě integrované oba typy tranzistorů (značeno Q1-2 na desce plošného spoje 4.17). Součástí návrhu jsou ještě dva rezistory R1 a R2 o velikosti $10\text{k}\Omega$, které slouží k udržení nulového napětí na ovládacích přívodech v klidovém stavu.

Napájecí část 4.15 sestává z napájecích svorek a proudového zdroje, který je vytvořen pomocí integrovaného obvodu LM317. Ten jsem využil hlavně pro ome-

zení proudu odebíraného peltierovým článkem na maximálně 1A a tím i ochranu připojeného zdroje proti přetížení.

Hlavní částí napájení, jak jsem již zmínil, je integrovaný obvod LM317 zapojený jako proudový zdroj 4.15 s maximálním výstupním proudem 1A. Toho je dosaženo díky velikosti odporu regulačního rezistoru R5 a pomocí výpočtu z rovnice 4.10, kde se využívá vlastnosti obvodu LM317, který si udržuje mezi piny ADJ a OUT stále napětí 1,25V. Součástí jsou i blokovací kondenzátory C1 a C2 pro eliminaci indukčních vlastností přívodů.



Obr. 4.14: Schéma el. obvodu pro řízení Peltierova článku (vlevo přívody ovládací, shora přívod napájení)

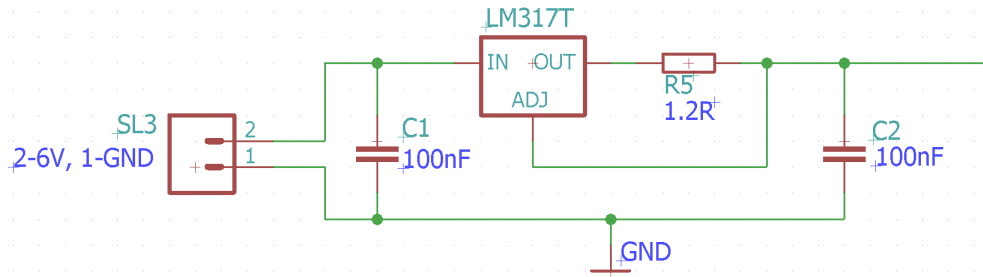
$$R = \frac{U}{I} = \frac{1,25}{1} = 1,25\Omega \quad (4.10)$$

kde:

- R.....výsledný odpor
- U.....napětí mezi piny ADJ a OUT obvodu LM317
- I.....požadovaný výstupní proud

Kvůli většímu odběru proudu Peltierovým článkem, je v případě využití regulace teploty, nutné použít samostatné napájení o velikosti minimálně 5V (DC) a alespoň 1A.

Z důvodu co nejsnadnějšího ovládací h-můstku jsem mezi jeho ovládací přívody a výstup arduina vložil ještě soustavu logických obvodů NOR 4.16, díky kterým lze kontrolovat funkčnost můstku pomocí dvou výstupů. První z nich slouží pro přenos



Obr. 4.15: Schéma el. obvodu pro napájení Peltierova článku

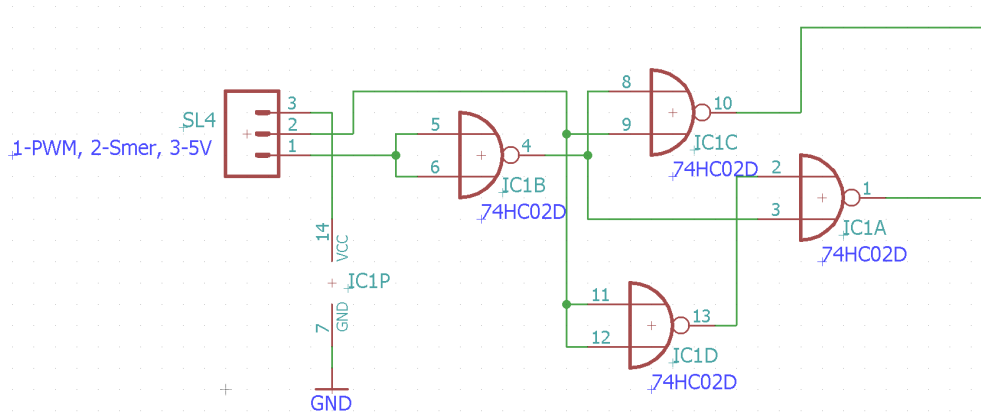
PWM signálu a druhý pro ovládání směru přenosu tepla. Pro návrh jsem využil logický zápis vstupů a stavů 4.2 a následně Booleovu algebru, specificky dvojitou negací, pro převod násobení na součet, aby bylo možné sestavit obvod ze čtyř NORů v integrovaném obvodu 74HC02D 4.11, 4.12. Výsledný elektronický obvod regulátoru je složen na jedné desce plošného spoje 4.17.

Tab. 4.2: Logický zápis pro řízení h-můstku

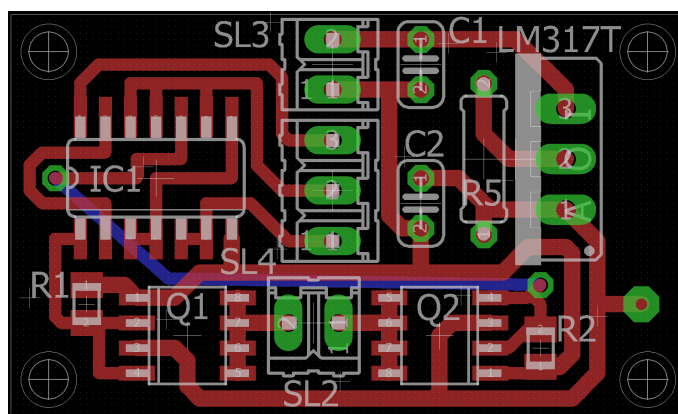
a (Směr)	b (PWM)	X	Y
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	1	0	0

$$X = \bar{a} * b = \overline{\bar{a} * \bar{b}} = \overline{a + \bar{b}}; \quad (4.11)$$

$$Y = a * b = \overline{\bar{a} * \bar{b}} = \overline{a + \bar{b}}; \quad (4.12)$$



Obr. 4.16: Schéma el. obvodu pro ovládání Peltierova článku

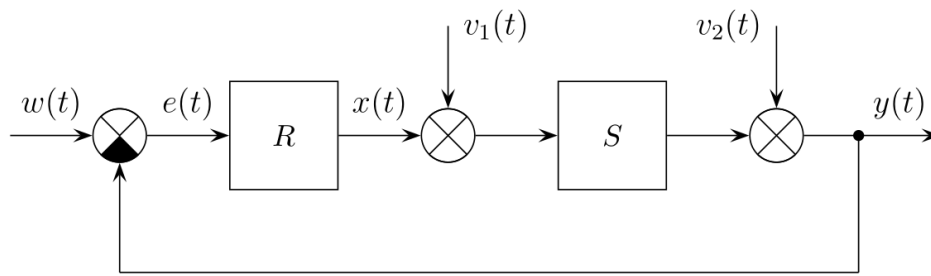


Obr. 4.17: Návrh desky plošného spoje pro napájení a ovládání Peltierova článku (reálné rozměry 34x20mm)

4.2.1 Regulace teploty

Regulace je proces automatického udržování výstupní veličiny na požadované hodnotě a zároveň co možná největší zrychlení přechodného děje. Toho je dosaženo pomocí vložení bloku regulátoru mezi vstup požadované hodnoty a soustavy 4.18. Na tomto obrázku zpětnovazebního zapojení regulačního schématu je také vidět jednotlivé vstupní a výstupní veličiny:

- $w(t)$ - žádaná hodnota, určuje například požadovanou teplotu
- $e(t)$ - regulační odchylka, rozdíl žádané hodnoty a aktuální výstupní hodnoty
- $x(t)$ - akční veličina, hodnota odesílaná z regulátoru (R) do soustavy (S)
- $y(t)$ - regulovaná veličina, výstupní veličina regulované soustavy
- $v_{1,2}(t)$ - poruchy působící na různých místech regulované soustavy[4]



Obr. 4.18: Schéma regulace[4]

V mém případě je vstupem požadovaná výstupní teplota a výstupem napětí ovlivňující množství tepla, které Peltierův článek přenese buďto na desku s měřicí soustavou, nebo od ní. Regulátorem je ovládací deska Arduina, na níž probíhají veškeré výpočty.

Prvním krokem, který je nutné provést pro regulaci nějaké soustavy je její identifikace, což je vlastně převedení vlastností soustavy do matematického zápisu, na který se bude následně navrhovat regulátor. Pro identifikaci lze využít buďto analytické metody (formulace diferenciálních a diferenčních rovnic), nebo experimentálně (měřeními statických a dynamických vlastností reálného objektu). Experimentální identifikaci lze realizovat přivedením jednotkového impulzu na vstup soustavy. Tato metoda se ale příliš nepoužívá z důvodu obtížné realizace. Namísto jednotkového impulzu je jednodušší využít jednotkový skok, po jehož přivedení na vstup soustavy dostaneme přechodovou charakteristiku. Je však nutné dodržet nulové počáteční podmínky a pokud možno odstranit působení poruch na soustavu.[4]

Pro měření přechodové charakteristiky je nutné, aby vstupní hodnota měla dostatečný vliv na soustavu a způsobila tak měřitelnou odezvu. Druhým požadavkem je zařízení, které bude zaznamenávat výstupní hodnoty. To se v dnešní době nejčastěji skládá z dostatečně rychlého A/D převodníku a mikroprocesoru.

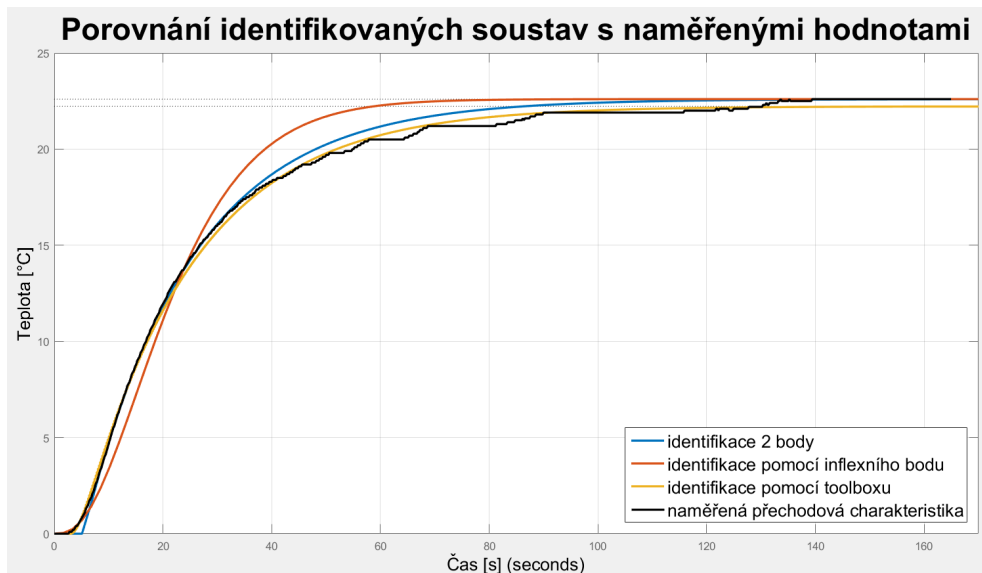
Pro získání přechodové charakteristiky jsem tedy připojil Peltierův článek, umístěný v jeho konečné pozici, skrze ovládací elektroniku k externímu zdroji a měřicímu prvku (Arduinu). Po ustálení teploty jsem spustil záznam měření výstupní hodnoty (teplota z teploměru 4.1.4) a na jeho vstup vyslal maximální možnou hodnotu PWM signálu - 255. Výsledkem byla rostoucí měřená teplota. Záznam měřené výstupní hodnoty jsem zastavil až po jejím ustálení na konečné hodnotě. Naměřené výstupní hodnoty jsem nakonec ještě přepočítal, aby nejnižší hodnota byla rovna nule.

Získání rovnice z přechodové charakteristiky jsem provedl pomocí několika metod. První použitou metodou byla aproximace dvoubodovou metodou se započítáním zpoždění, jako druhou jsem použil metodu aproximace přechodové charakte-

ristiky a jako poslední jsem využil System Identification Toolbox, který je součástí matlabu.

Jak lze vidět na obrázku 4.19, tak nejlepšího přiblížení k původní soustavě dosáhly identifikace pomocí dvou bodů a pomocí toolboxu v matlabu. Proto budu v následující části popisovat pouze tyto dvě metody.

V případě aproximace dvoubodovou metodou se využívá výčtu dvou násobků výstupu (násobky 0,7 a 0,33), pomocí kterých se určí, kdy bylo těchto násobků hodnot dosaženo. V mém případě se $y_{0,7} = 15,8^{\circ}\text{C}$ a $y_{0,33} = 7,45^{\circ}\text{C}$, z čehož jsem odvodil hodnoty času $t_{0,7} = 29,1\text{s}$ a $t_{0,33} = 13,2\text{s}$. Z určených hodnot dvou časů jsem následně vypočítal hodnotu dopravního zpoždění T_d 4.13 a časovou konstantu T_1 4.14. Jako poslední hodnotu jsem spočítal zesílení K 4.15, které se určí jako podíl výstupní a vstupní hodnoty v čase nekonečno (pro reálné měření jsou postačující hodnoty po dostatečném ustálení).[18]



Obr. 4.19: Porovnání identifikovaných soustav a naměřené přechodové charakteristiky (přepočítáno k nule)

$$T_d = 1,498 * t_{0,33} - 0,498 * t_{0,7} = 1,498 * 13,2 - 0,498 * 29,1 = 5,3557[18] \quad (4.13)$$

$$T_1 = 1,245 * (t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245 * (29,1 - 13,2) = 19,7603[18] \quad (4.14)$$

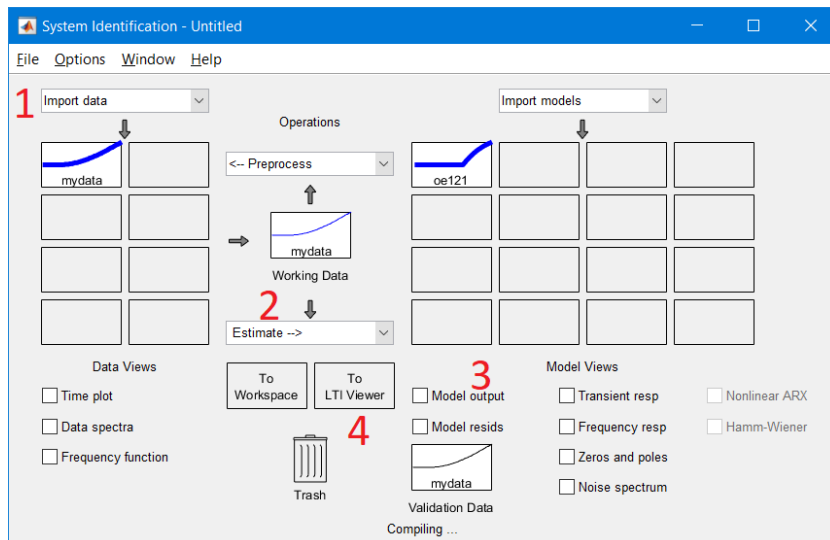
$$K = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} = \frac{22,6}{255} = 0,0886[18] \quad (4.15)$$

Výsledný přenos systému F_s identifikovaného pomocí dvoubodové metody je:

$$F_s = \frac{K}{T_1 p + 1} * e^{-T_{dp}} = \frac{0.0886}{19,7603p + 1} * e^{-5,3557p} \quad (4.16)$$

Provedení identifikace naměřeného přenosu soustavy pomocí toolboxu v matlabu je velice jednoduché, stačí jej spustit pomocí příkazu `ident`. Tím dojde ke spuštění nového okna 4.20 a k identifikaci stačí provést následující čtyři kroky, které jsou na obrázku zvýrazněny červenými čísly.

- **1** - naimportovat data, tzn. vložit proměnou s výstupními hodnotami, proměnou se vstupními hodnotami a nastavit správnou vzorkovací frekvenci, která byla pro nasnímání použita
- **2** - vybrat položku Polynomial Models a v novém okně nastavit dopravní zpoždění, případně použitou metodu
- **3** - zatrhnutím kolonky Model output se vykreslí výsledek aproximace a lze jej tak jednoduše zkontrolovat
- **4** - přetažením nejvhodnější aproximace na kolonku To LTI Viewer se znovu zobrazí průběh systému a jeho aproximace, ale v tomto okně lze uložit hodnoty identifikované soustavy do Workspace v matlabu a nadále s nimi pracovat



Obr. 4.20: Uživatelské rozhraní Identifikačního toolboxu v Matlabu

Rovnice soustavy získaná tímto postupem je zadána v diskretním tvaru:

$$F_z = \frac{8,989 * 10^{-5} z^{-1}}{1 - 1.855 z^{-1} + 0.8859 z^{-2}} * z^{-15} \quad (4.17)$$

Při návrhu regulátoru jsem se rozhodl použít PID regulátor 4.18, respektive jeho diskretní verzi PSD. Tento regulátor se skládá ze tří částí, proporcionální, integrační

a derivační. Proporcionální složka slouží pouze k zesílení vstupní hodnoty a v případě použití samotného P regulátoru se hodně projevuje působení poruch. Integrovaná složka regulátoru je přímo úměrná integrálu regulační odchylky, v praxi se využívá hlavně kvůli její schopnosti plně eliminovat regulační odchylku. Její nevýhodou je zpomalení regulačního děje a možné zhoršení stability. Poslední částí je derivační složka jejíž akční veličina je přímo úměrná derivaci regulační odchylky. Její hlavní výhodou je zrychlení regulačního děje, na druhé straně ale zesiluje šum, což může u citlivějších součástí vadit.[4]

$$F_r = K_R(1 + T_{Dp} + \frac{1}{T_I p}) \quad (4.18)$$

kde:

K_R zesílení regulátoru
 T_I časová konstanta integrační složky
 T_D časová konstanta derivační složky

Na rovnice identifikovaných systému jsem v následujícím kroku navrhl regulátory. Stejně jako v případě identifikace jsem využil více metod a to Ziegler-Nicholovu metodu pro návrh regulátoru na soustavu identifikovanou pomocí dvoubodové metody a na soustavu získanou pomocí matlabu jsem použil jeho další nástroj a to PID Tuner.

Ziegler-Nichols je velice jednoduchá metoda, která je v praxi velice hojně používána. Její princip lze shrnout do následujících tří kroků. Zaprvé, vyřadíme integrační a derivační složku regulátoru. Zadruhé zvyšujeme zesílení proporcionální složky tak dlouho dokud nedosáhneme meze stability. Hodnota zesílení K_R , při které meze stability dosáhneme se nazývá kritické zesílení K_{krit} a perioda vzniklých netlumených kmitů se nazývá kritická perioda T_{krit} . Třetím krokem je vypočítat jednotlivé složky PID regulátoru dosazením kritického zesílení a periody do následující tabulky 4.3. [4]

Tab. 4.3: Vzorce pro návrh parametrů regulátoru metodou Ziegler-Nicholse[4]

Typ regulátoru	K_R	T_I	T_D
P	$K_R = 0,5K_{krit}$	-	-
PI	$K_R = 0,45K_{krit}$	$T_I = 0,85T_{krit}$	-
PD	doladíme na optimální hodnotu	-	$T_D = 0,12T_{krit}$
PID	$K_R = 0,6K_{krit}$	$T_I = 0,5T_{krit}$	$T_D = 0,125T_{krit}$

Pro výpočet kritického zesílení jsem využil matlabovský příkaz $[K_r, F_k, w_k, wf] = \text{margin}(Fs)$, který jej uloží do proměnné K_r . Výpočet kritické periody se pak provádí pomocí tohoto vzorce $T_k = 2\pi/w_k$.

Výpočty jednotlivých konstant PID regulátoru tedy jsou:

$$K_R = 0,6K_{krit} = 0,6 * 72,7778 = 43,6667 \quad (4.19)$$

$$T_I = 0,5T_{krit} = 0,5 * 19,4907 = 9,7453 \quad (4.20)$$

$$T_D = 0,125T_{krit} = 0,125 * 19,4907 = 2,4363 \quad (4.21)$$

Z těchto časových konstant a konstanty zesílení je ještě nutné vypočítat jednotlivé části PID regulátoru, které se poté vkládají do kódu v Arduinu, sloužícímu k řízení regulace.

Proporcionální složka regulátoru P_R se dle rovnice 4.18 přímo rovná zesílení K_R 4.25. Integrovaná složka je rovna podílu zesílení a časové integrační konstanty 4.26, poslední derivační složka se rovná násobku zesílení a časové derivační konstanty 4.27.

$$P_R = K_R = 43,6667 \quad (4.22)$$

$$I_R = \frac{K_R}{T_I} = \frac{43,6667}{9,7453} = 4,4808 \quad (4.23)$$

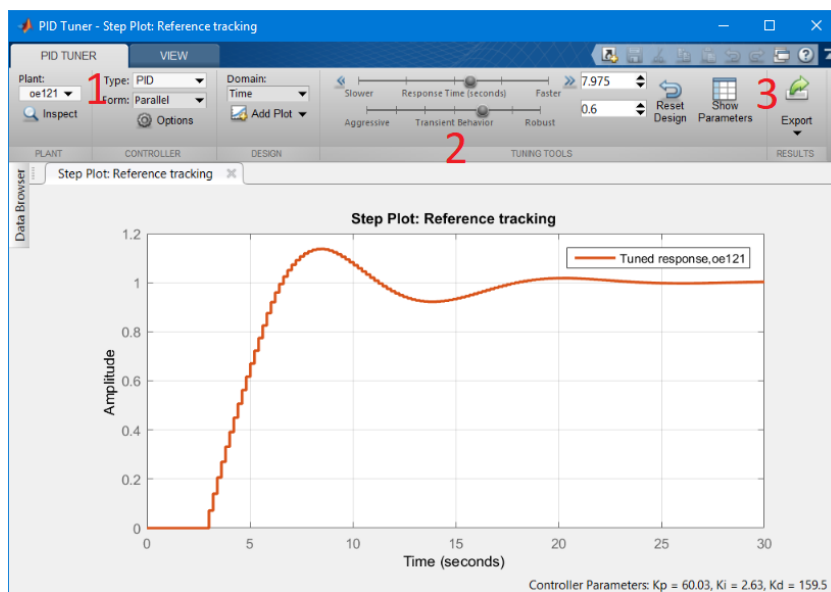
$$D_R = K_R * T_D = 43,6667 * 2,4363 = 106,3867 \quad (4.24)$$

Návrh regulátoru pomocí nástroje PID tuner je obdobně jednoduchý jako při využití matlabovského nástroje pro identifikaci soustavy. Tento nástroj se spouští příkazem `pidTuner(Fs)`, kde Fs označuje soustavu, pro kterou chceme navrhovat regulátor (je možno její zadání provést až ve vyskočivším okně) 4.21. Jednotlivé kroky jsou popsány čísly od 1 do 3. Prvním krokem je nastavit typ regulátoru, který chceme navrhovat, v tomto případě PID. V druhém kroku pomocí posuvných ovládacích prvků nastavujeme rychlost výsledného zpětnovazebního zapojení a jeho robustnost. Jakmile jsme spokojeni se zobrazenou přechodovou charakteristikou, tak přejdeme k třetímu kroku, kterým je vyexportování hodnot regulátoru do workspace Matlabu. Tato hodnota (kontejner) obsahuje již vypočítané složky PID regulátoru.

$$P_R = 60,0275 \quad (4.25)$$

$$I_R = 2,6295 \quad (4.26)$$

$$D_R = 159,5396 \quad (4.27)$$



Obr. 4.21: Uživatelské rozhraní PID Tuner toolboxu v Matlabu

Zde je vidět rozdíl hlavně ve velikosti derivační složky, která je oproti prvnímu regulátoru větší přibližně o jednu třetinu, což má za následek zrychlení regulačního děje.

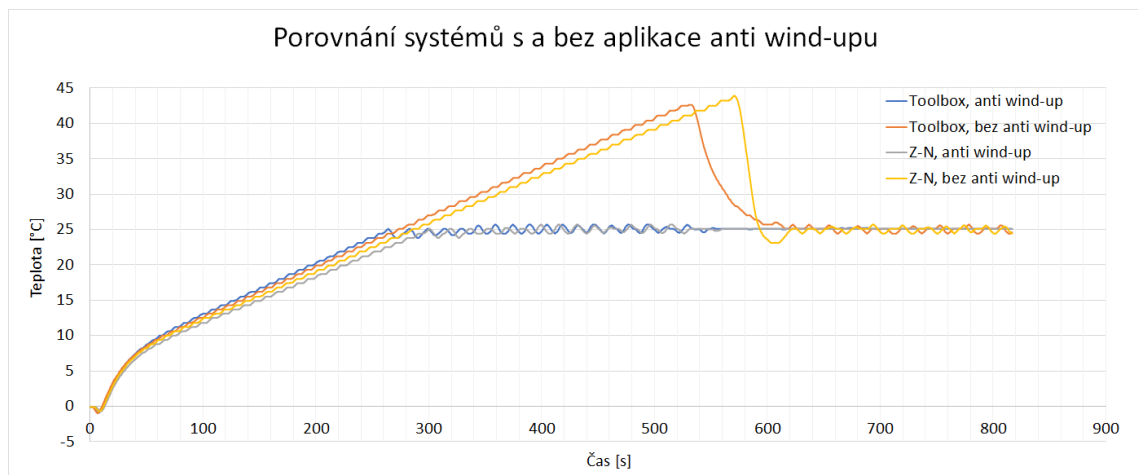
Při reálném nasazení těchto regulátorů ovšem nastává problém s tím, že při regulování teploty z přibližně 0°C na 25°C po dosažení požadované hodnoty pokračuje systém ve vyhřívání až na téměř dvojnásobnou hodnotu, kde začne teplotu omezovat a vrátí se k požadovaným 25°C jak je vidět na grafu 4.22.

Tento jev je způsoben omezením, které je na výstupu (± 255) a nedovoluje tak regulátoru poslat do soustavy větší akční zásah. V případě proporcionální a derivační složky regulátoru to nemá na jejich hodnotu žádný vliv, problém nastává u integrační části, která po celou dobu zvedání teploty až do hodnoty 25°C integruje hodnoty a při dosažení požadované teploty je zde naintegrovaná tak vysoká hodnota, že její odintegrování zabere spoustu dalšího času, přičemž do soustavy je stále odesílána vysoká hodnota a teplota stoupá. Klesat začne až po dostatečném odintegrování konstanty což má za následek náhlý pád teploty. Z toho důvodu se v reálných nasazeních regulátorů používá anti wind-up, což je omezení maximální hodnoty integrační konstanty na ± 255 , díky čemuž po dosažení požadované hodnoty není nutné odintegrovávat vysoké hodnoty a nedojde tak k vysokému překmitu u výstupní hodnoty. Na grafu 4.22 pak lze vidět, že výstupní hodnota se prakticky okamžitě po dosažení požadované hodnoty zastavila a nadále nenarůstala. Lze zde

vidět pouze kmitání v rámci $\pm 0,5^\circ\text{C}$ po dobu než se zařízení plně prohřeje a teplota se neustálí.

Rozdíl mezi soustavou s regulátorem navrženým pomocí matlabovského toolboxu a pomocí metody Ziegler–Nichols je díky anti wind-upu téměř nulový (hlavní rozdíl by byl v rychlosti dosažení požadované hodnoty, což se díky omezení výstupní hodnoty a integrační konstanty neprojeví). Jediný rozdíl lze pozorovat v mírně rozdílném času, kdy systémy dosáhly 25°C . To lze ale posoudit jako vliv okolní teploty v lednici, kde test probíhal a mohlo dojít k sepnutí jejího chlazení.

Jako výsledný regulátor, jehož hodnoty jsem aplikoval do algoritmu arduina jsem zvolil regulátor navržený metodou Ziegler–Nichols, který přesto, že dosáhl v grafu 4.22 požadované hodnoty později než regulátor navržený pomocí toolboxu, tak dokázal plně vyregulovat výstupní hodnotu ve stejný čas (doba po kterou hodnota kmitá je tedy kratší).



Obr. 4.22: Výstup soustavy při žádané hodnotě 25°C s a bez aplikace anti wind-upu

4.3 Prvky interakce s uživatelem

Mezi prvky, skrze které bude probíhat interakce mezi uživatelem a zařízením patří tlačítko pro ruční měření a LED diody pro informování o jednotlivých stavech.

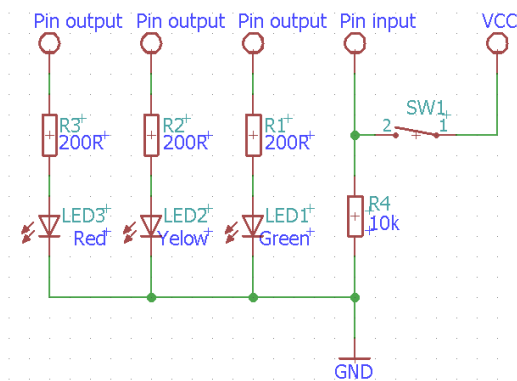
Jak lze vidět na zapojení 4.23, tak nejsou soustředěny na desce plošného spoje, ale jsou umístěny samostatně. Spínač má za úkol při stisknutí přivést na vstupní pin arduina napětí, zatímco v klidovém stavu musí být na pinu napětí nulové. To je udržováno pomocí rezistoru s vnitřním odporem $10\text{k}\Omega$. Led diody jsou jedním kontaktem připojeny skrze rezistory k pinům, které budou určovat, zda mají svítit nebo ne a druhým kontaktem ke společné zemi. Rezistory o velikosti 200Ω 4.28 jsou

zde pro omezení proudu, který budou diody odebírat (více než 20mA na jeden pin by mohlo řídicí čip poškodit).

$$R = \frac{U_Z - U_D}{I_D} = \frac{5 - 3}{0,01} = 200\Omega \quad (4.28)$$

kde:

U_Z napájecí napětí
 U_D napětí na diodě
 I_D proud odebíraný diodou



Obr. 4.23: Zapojení LED diod a tlačítka pro interakci s uživatelem

4.4 Sestavení hardwaru zařízení

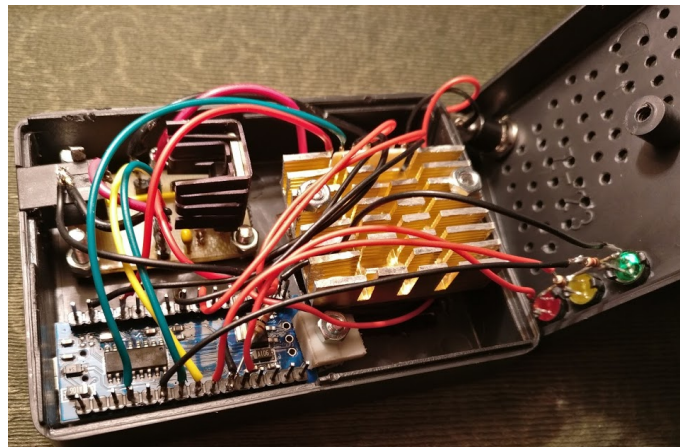
Pro sestavení součástí zařízení do jednoho přípravku jsem zvolil umístění všech prvků do jedné krabičky s označením KP19. Jedná se o plastovou krabičku s rozměry 84x59x30mm skládající se ze dvou dílů, které drží pohromadě jeden vrut 4.24. Jednotlivé desky plošných spojů jsem ke krabičce přichytil pomocí šroubů, případně plastových úchytek, které jsem využil pro arduino, které v sobě nemělo žádné otvory pro uchycení. Na desku, na které je umístěn měřící prvek jsem připevnil peltierův článek a z jeho druhé strany pak chladič pro odvod přebytečného tepla (4.24, velký žlutý chladič). Mezi jejich styčné plochy jsem ještě natřel trochu teplo vodivé pasty pro lepší přenos tepla mezi jednotlivými prvky. Stejně tak jsem umístil chladič na integrovaný obvod LM317, který se výrazně zahřívá kvůli úbytku napětí, který na něm vzniká (4.24, černý chladič vlevo nahoře).

Jako průzor pro měřící soustavu jsem ve spodní straně krabičky vyřízl kruhový otvor a zakryl jej plexisklem kvůli lepší teplotní regulaci. Přední hrana přípravku obsahuje dva konektory a to mini USB, které slouží k připojení zařízení k počítači

a pak souosý konektor s rozměry 5,5x2,1mm pro napájení peltierova článku pomocí stabilizovaného napětí 5-7V a alespoň 1A. Při větším napájecím napětí by bylo nutné upravit velikost rezistoru mezi zdrojem a pinem arduina (popsáno dále).

Horní strana zařízení obsahuje tři LED diody (4.24, víko napravo), červenou pro indikaci plnosti interní paměti, žlutou, která problikne po každém provedeném měření a zelenou, která se rozsvítí po připojení napájení k arduinu (a jeho naběhnutí). Signalizuje tak funkčnost ovládacího obvodu. Spolu s diodami je zde umístěno ještě tlačítko pro měření hodnot a téměř jedna polovina horní strany je napříč pokryta otvory, které slouží k odvětrávání přebytečného tepla při zapnutí regulaci teploty.

Posledním prvkem, který jsem při sestavování přidal je spojení mezi napájením peltierova článku a vstupním pinem arduina přes rezistor 33Ω , které slouží k zjištění, zda bylo napájení připojeno a v případě že ano, tak je spuštěna regulace teploty.



Obr. 4.24: Rozložení jednotlivých prvků ve výsledném zařízení

V případě Arduina nano jsem pro komunikaci s ostatními prvky využil následující piny (A - analogový, D - digitální):

- **5V** - zdroj 5V
- **3,3V** - zdroj 3,3V pro napájení snímače VEML6040
- **GND** - propojení se společnou zemí
- **A0** - vstup teploměru
- **A2** - vstup pro kontrolu připojení napájení regulace
- **A4** - SDA (I²C komunikace)
- **A5** - SCL (I²C komunikace)
- **D2** - ovládání červené LED
- **D3** - vstup měřicího tlačítka
- **D4** - ovládání žluté LED
- **D5** - odesílání hodnot regulace (velikost)

- **D6** - odesílání hodnot regulace (směr)
- **D7** - ovládání zelené LED
- **D9** - odesílání 32 bitových hodnot do LED

4.5 PC program

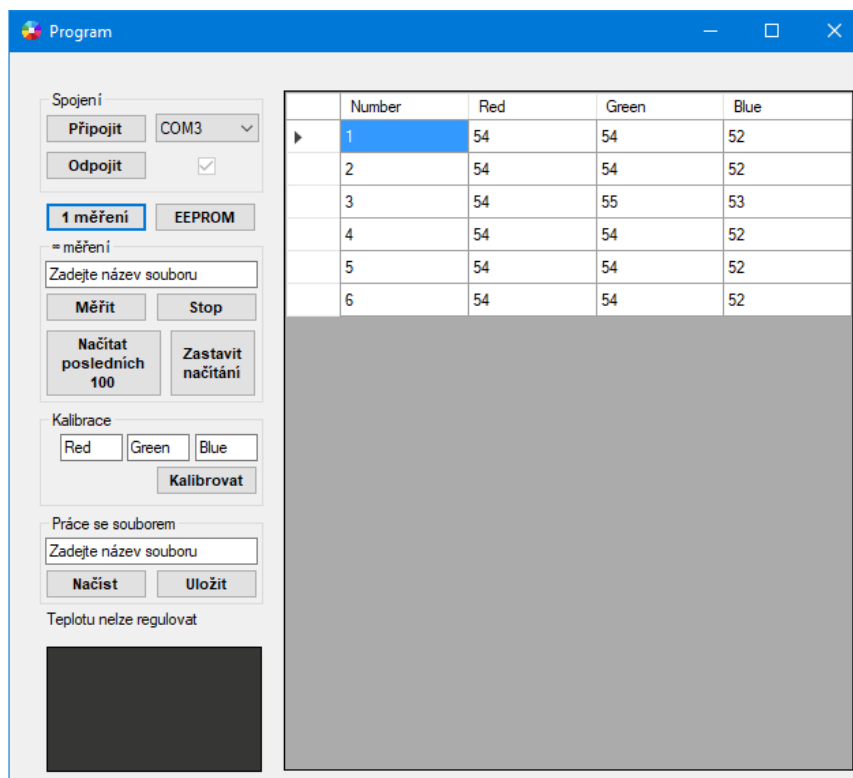
Součástí zadání mé diplomové práce byl úkol vytvořit uživatelsky přívětivou aplikaci (GUI) pro vizualizaci naměřených hodnot v počítači.

Pro její tvorbu jsem se rozhodl využít programovacího jazyka C++ a nástroje Visual Studio 2015, ve kterém lze tvořit uživatelské prostředí jednoduše pomocí přesouvání jednotlivých ovládacích prvků po obrazovce.

Jak lze vidět na obrázku 4.25, tak aplikace se skládá ze dvou hlavních částí a to ovládací na levé straně a vizualizační na pravé.

Ovládací část je rozdělena na několik jednotlivých bloků, které obsahují prvky pro práci ve stejné oblasti. První blok jsem nazval Spojení a slouží k navázání spojení programu s Arduinem. Jak už název napovídá, tak tlačítko “Připojit” slouží ke samotnému navázání spojení skrze COM port určený ve vedlejším menu. Pro správný chod komunikace mezi programem a mikrokontrolérem jsem využil knihovnu Serial.h ze stránek playground.arduino.cc a nadále využívám její příkazy pro navázání komunikace zápis a vyčítání hodnot. Po výběru správného COM portu, který je defaultně nastaven na COM3, a stisku tlačítka připojit je proveden pokus o navázání komunikace a v případě úspěchu je zobrazeno zatržítka v malém čtverečku. Současně s tím dojde k povolení ostatních ovládacích prvků, které bez navázané komunikace nemohou plnit svou funkci. Kliknutím na tlačítko “Odpojit” dojde k ukončení komunikace, uvolnění portu pro případné ostatní aplikace, vymazání zatržítka ze čtverečku a znovuzablokování ostatních tlačítek.

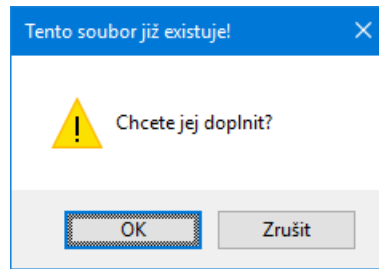
Po navázání komunikace jsou jak jsem již psal odblokována tlačítka určená k samotnému ovládání arduina. První dvojicí jsou tlačítka “1 měření” a “EEPROM”. Pomocí prvního tlačítka lze provést jedno samostatné měření například pro zkontrolování správnosti kalibrace. Výsledek měření je vždy zobrazen ve vedlejší tabulce a pokud jsou zde již nějaké hodnoty zobrazeny, tak jej přidá na novou pozici bez smazání předchozích hodnot. Druhé z tlačítek slouží k vyčtení hodnot uložených ve stálé EEPROM paměti, do které byly uloženy po provedení měření pomocí tlačítka umístěného na měřícím prvku. Po jeho stisknutí dojde ke kontrole, zda jsou v paměti nějaké hodnoty uloženy. Pokud ne, tak se žádný další úkon neprovede a v tabulce zůstanou původní hodnoty. Pokud ano, tak jsou současné hodnoty v tabulce vymazány a namísto nich jsou vyčteny hodnoty z EEPROM paměti arduina.



Obr. 4.25: Uživatelské rozhraní vizualizační aplikace

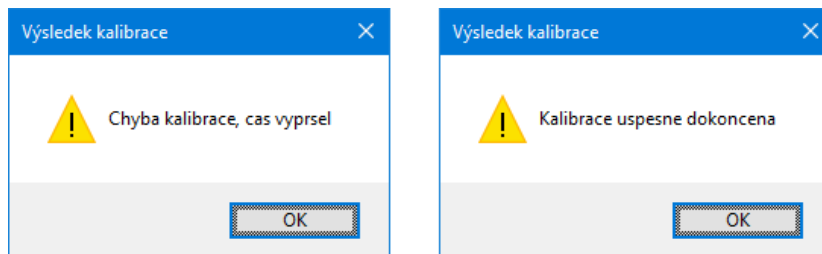
Dalším blokem, který slučuje několik ovládacích prvků se stejným zaměřením je blok “∞ měření”. Tyto položky jsou určeny k ovládání nekonečné smyčky měření. Prvním prvkem je kolonka pro zadání názvu souboru, do kterého se budou měřené hodnoty ihned ukládat. Jako formát, pod kterým se budou naměřené hodnoty ukládat jsem zvolil CSV, hlavně kvůli jeho jednoduchosti a možnosti jej otevřít a upravit v téměř jakémkoli programu včetně MS Office Excel, a nadále s daty pracovat. Čísla jsou zde ukládána po třech ve formátu R,G,B poté následuje další řádek atd. Tlačítkem “Měřit” lze spustit nekonečnou smyčku měření s tím, že nejprve je zkontrolována přítomnost zadaného souboru a pokud je nalezena shoda, tak je uživateli nabídnuta možnost, skrze vyskakující okno 4.26, jej doplnit o nové hodnoty, nebo změnit zadaný název. Následně je spuštěno měření hodnot, které jsou narozdíl od tlačítka “1 měření” ihned ukládány do souboru. V případě, že je chce uživatel průběžně sledovat, tak to lze provést pomocí tlačítka “Načítat posledních 100”, které dělá přesně to co je na něm napsáno, v dvousekundovém cyklu stále načítá posledních 100 hodnot ze souboru, jehož název byl zadán do kolonky nahoře. Načítání hodnot je možné zastavit buďto pomocí tlačítka “Zastavit načítání”, nebo tlačítkem “Stop”, což má za následek i zastavení průběhu měření.

Třetím blokem je “Kalibrace” která slouží, po stisku tlačítka “Kalibrovat”, k



Obr. 4.26: Okno upozorňující na přítomnost souboru stejného jména

odeslání hodnot požadovaných RGB barev zadaných do příslušných kolonek a následnému vyčkání na zprávu z mikroprocesoru 4.27, která buďto oznámí úspěšné dokončení procesu, nebo uplynutí časového okna. Do kolonek pro zadávání hodnot barev se zadávají pouze čísla v rozsahu 0 - 255.



Obr. 4.27: Okno oznamující neúspěšné (vlevo), nebo úspěšné (vpravo) dokončení kalibrace

Jednou z posledních částí, které může uživatel obsluhovat, je “Práce se souborem”. Zde je stejně jako v případě nekonečné měřící smyčky nutné nejprve zadat název souboru se kterým se bude pracovat a následně pomocí tlačítka “Načíst” provést načtení hodnot do vedlejší tabulky. Toto načítání hodnot může zabrat delší čas, v mém testu, kdy jsem zadal příkaz pro načtení souboru s obsahem 500 000 RGB hodnot trvalo načítání přibližně 8s než došlo k zobrazení hodnot. V případě, že zadaný soubor neexistuje, tak je zobrazeno vyskakující okno se stylem podobným jako na obrázku 4.27, obsahující text “Zadaný soubor neexistuje! Zadejte jiný název”. Všechny hodnoty, které jsou zobrazeny v tabulce napravo lze kdykoli uložit, po zadání názvu souboru, tlačítkem “Uložit”. Pokud se stane a soubor téhož názvu již existuje, pak je zobrazeno okno na obrázku 4.26 a uživatel si stejně jako u nekonečné měřící smyčky může vybrat následující postup.

Dole pod všemi ovládacími prvky je ještě umístěno zobrazení naměřené teploty a vizualizace barev. Naměřená teplota je zobrazována pouze pokud je připojeno napájení regulace a pokud ano, tak pouze do doby než je teplota vyregulována

(na tuto informaci doporučuji vyčkat), poté už žádné další hodnoty teplot nejsou přijímány a nemůže se stát, že by došlo k jejich záměně s naměřenou hodnotou barvy. Vizualizace barvy, jak už její název napovídá, zobrazuje barvu v aktuálně vybraném řádku. V případě probíhajícího měření a zapnutého zobrazování vždy zobrazuje poslední naměřenou barvu.

Jak jsem již mnohokrát zmínil, tak v pravé části programu se nachází tabulka, ve které se zobrazují naměřené hodnoty, nebo hodnoty vyčtené ze souboru. Tabulka je rozdělena na čtyři sloupce: Number, Red, Green, Blue, zobrazující pořadí naměřené hodnoty a jednotlivé složky RGB spektra. Čísla jednotlivých naměřených hodnot jsou přiřazována až ve chvíli jejího vykreslování, takže se nikam neukládají. Jedinou věcí, kterou má zde uživatel povoleno provádět je promazávání řádků pomocí klávesy Delete, v případě že toto promazání provede, tak je nutné hodnoty znovu uložit.

4.6 Postup měření - ovládání

Měření je možné provádět třemi různými způsoby a to pomocí hardwarového tlačítka na přípravku 4.6.1 a pomocí dvou tlačítek v programu - “1 měření” 4.6.2 a “∞ měření” 4.6.3. V každém případě je dobré nejprve připojit zařízení k počítači, spárovat s ovládacím programem a provést kalibraci na požadované hodnoty. U všech tří postupů měření pak po provedení samotného měření dojde k probliknutí žluté LED diody na přípravku.

4.6.1 Měření pomocí hardwarového tlačítka

Měření hodnot pomocí hardwarového tlačítka lze využít například pro kontrolu kvality výrobků ve skladu, kdy se pro napájení přípravku použijí baterie a zařízení se stane přenosným. Samotný průběh měření je následující, uživatel přiloží přípravek k měřenému vzorku a stiskne tlačítko, tím dojde k nasnímání barevné hodnoty a jejímu uložení do trvalé paměti. Takto je možné provést až 300 měření, což je způsobeno omezením velikosti EEPROM paměti na 1kB, $3 \cdot 1B \cdot 300 = 900$ bajtů, zbylé místo je určeno pro ukládání jasových hodnot LED diod a případné další proměnné. Dosažení 225 (3/4 plné paměti) hodnot uložených ve vnitřní paměti je uživateli indikováno pomocí blikání červené ledky, po zaplnění celé paměti, tj. uložení 300 hodnot zůstane tato dioda svítit a při dalším měření bude docházet pouze k přepisování poslední hodnoty.

Jakmile uživatel naměří všechny potřebné hodnoty, tak připojí zařízení k počítači a po navázání spojení s programem a kliknutí na tlačítko EEPROM dojde k

vyčtení všech uložených hodnot do tabulky v programu, odkud je možné je uložit do zvoleného souboru.

4.6.2 Měření pomocí tlačítka “1 měření”

Tento styl měření je kombinací stylu měření pomocí hardwarového tlačítka a nekonečného měření, protože uživatel musí mít zařízení připojeno k počítači, ale v každém cyklu provede pouze jedno měření. Prvním krokem je připojení zařízení pomocí USB kabelu k PC a kliknutím na tlačítko “Připojit” navázat spojení. Poté je v případě že je připojeno i napájení pro teplotní regulaci nutné vyčkat dokud nebude zobrazena tato zpráva “Teplota vyregulována na $25\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ”. Jinak by mohlo docházet k záměnám hodnot barev a teploty. Pokud napájení regulace teploty připojeno není, tak se zobrazí zpráva “Teplotu nelze regulovat” a uživatel může začít okamžitě měřit.

Kliknutím na tlačítko “1 měření” dojde k odeslání příkazu pro začátek měření a po jeho dokončení se v tabulce programu zobrazí výsledné hodnoty. V případě měření, kdy v tabulce už nějaké hodnoty jsou se nové pouze zařadí na novou pozici za ostatní. Hodnoty v tabulce je nutné pro jejich zachování manuálně uložit.

4.6.3 Měření pomocí tlačítka “ ∞ měření”

Nekonečná smyčka měření vyvolaná stiskem tlačítka “ ∞ měření” je určena pro dlouhodobé měření kvality výroby například na výrobní lince, kdy pod snímačem prochází měřený výrobek. Postup je podobný jako u předchozí metody, rozdíl je v tom, že po spuštění se provádí měření stále dokola a výsledné hodnoty nejsou automaticky zobrazovány v tabulce v programu. Pro jejich zobrazení je nutné využít tlačítka “Načítat posledních 100”, které bude následně v dvousekundovém cyklu načítat posledních 100 uložených hodnot. Tuto metodu jsem zvolil kvůli tomu, že pokud spustím dlouhodobé měření, tak si můžu v mezičase načíst soubor s hodnotami z minulého dne a pracovat s nimi. Pokud je cyklus načítání posledních 100 hodnot spuštěn, tak jej lze zastavit kliknutím na “Zastavit načítání” nebo tlačítkem “Stop”, které současně zastaví i měření hodnot.

Pokud má uživatel načteny v programu tyto hodnoty, tak je nemusí ukládat (pokud je nepozměnil), protože jak jsem již psal se hodnoty nejprve ukládají do souboru a až pak zobrazují v programu.

5 TEST VÝSLEDNÉHO ZAŘÍZENÍ

Test kvality zařízení je nutné provádět pro zjištění konstrukčních vad a možnosti odstranit je ještě před zahájením sériové výroby. Současně s tím jsou zjišťovány vlastnosti zařízení a jejich dlouhodobá stálost. Díky nim lze následně určit výsledné parametry pro srovnání s ostatními zařízeními se stejným zaměřením.

5.1 Test měření reálných vzorků

Pro měření reálných vzorků jsem využil tzv. ColorChecker (5.1, nalevo) zapůjčený od vedoucího mé práce. Jedná se o soustavu dvaceti čtyř barevných obdélníků rozdělených do čtyř skupin. První skupina na horním řádku se skládá z přírodních barev jako je světlá kůže nebo modrý květ. Druhou skupinou jsou smíšené barvy (oranžová, fialová), ve třetím řádku se nachází základní barvy modelů RGB a CMY. Poslední řádek je obsazen šesti odstíny šedi od bílé po černou. Běžně je využíván fotografy pro správné nastavení fotoaparátu a zjednodušení následné úpravy fotek. V mém případě jsem na ColorCheckeru testoval kalibraci na jednotlivé barvy a následně i měření hodnot ostatních barev při nakalibrování na jednu z nich.

V případě testu kalibrace jsem zkoušel postupně nakalibrovat snímač na všechny barvy a následně provést několik měření. U všech vzorků barev bylo provedení kalibrace na danou kombinaci RGB barev úspěšné a bylo možné provést měření konkrétní barvy. Při nich docházelo stejně jako při měření stability naměřených hodnot ke kmitání v rámci ± 1 od nakalibrované hodnoty.

Druhým prováděným testem je měření hodnot ostatních barev při nakalibrování na jednu z nich. Při tomto testu se projevilo, že zařízení je primárně určeno pro kontinuální měření barevných vlastností materiálů a ne pro určování hodnot různých barev. Jak lze vidět na obrázku (5.1, napravo), tak přípravek je schopen rozpoznat přibližně jednotlivé barvy ColorCheckeru, ale ne jejich přesné hodnoty. U naměřených hodnot velice záleží na kterou barvu se provede prvotní kalibrace, protože pokud je provedena kalibrace například na žlutou barvu, tak ve výsledku se nastaví nejnižší násobící koeficient u zelené a červené (jejich spojením vznikne žlutá). Díky tomu mají pak všechny ostatní měřené barvy žlutý nádech. Zde zobrazenou tabulku barev (5.1, napravo) jsem naměřil při kalibraci na hodnoty 121, 121, 122 což je hodnota čtvrté barvy zleva v posledním řádku.



Obr. 5.1: ColorChecker, nalevo - originální barvy, napravo - naměřené barvy

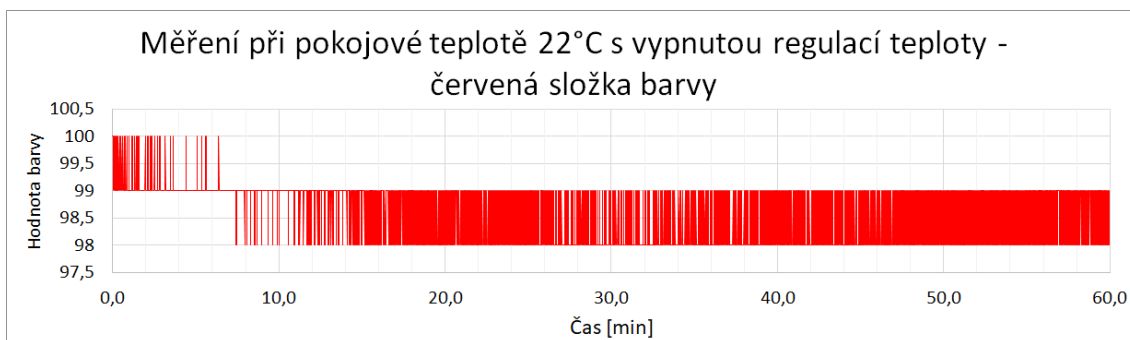
5.2 Test stálosti naměřených hodnot

Test stálosti naměřených hodnot jsem prováděl po dobu jedné hodiny nejprve v prostředí se stálou teplotou 10°C a poté v místnosti s teplotou přibližně 22°C. U obou teplot jsem provedl dva testy, jeden s vypnutou regulací teploty a druhý se zapnutou regulací teploty. Speciálním případem je pak test se změnou okolní teploty, kdy jsem měřící zařízení vychladil tak, aby ukazovalo stabilně 1°C, následně provedl kalibraci a přesunul zařízení z chladného prostředí do teplého (opět s vypnutou a zapnutou regulací teploty).

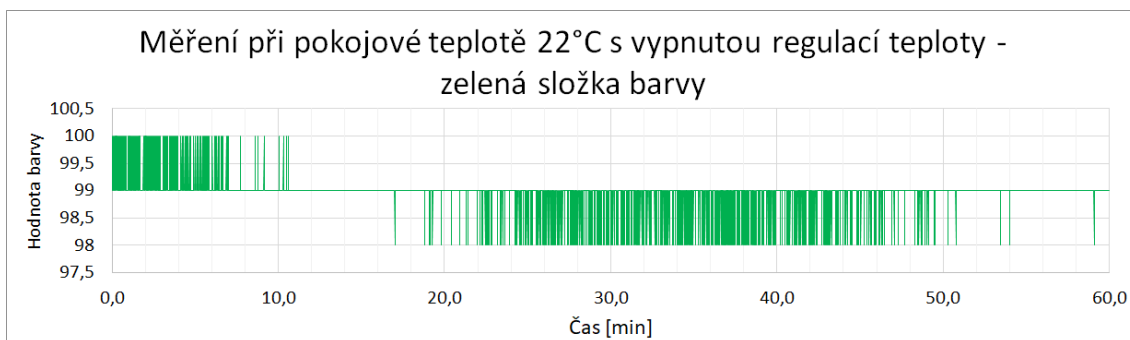
Testy probíhaly podle následujících kroků:

- **1** - Měřící přípravek jsem umístil do prostředí se stanovenou teplotou a následně jsem vyčkal, za stálého měření vnitřní teploty, až dosáhne teploty okolí
- **2** - V případě, že se jednalo o typ měření se spuštěnou regulací teploty na 25°C, tak jsem ji po ustálení na teplotu okolí zapnul a vyčkal až se v PC programu objeví hlášení o jejím vyregulování
- **3** - Nastavil jsem hodnoty RGB, na které mělo být zařízení nakalibrováno (100, 100, 100) a provedl kalibraci
- **4** - Pomocí tlačítka “Měřit” ve skupině “∞ měření” jsem spustil kontinuální měření a následně čekal než uběhne stanovený čas po kterém jsem měření zastavil tlačítkem “Stop”.

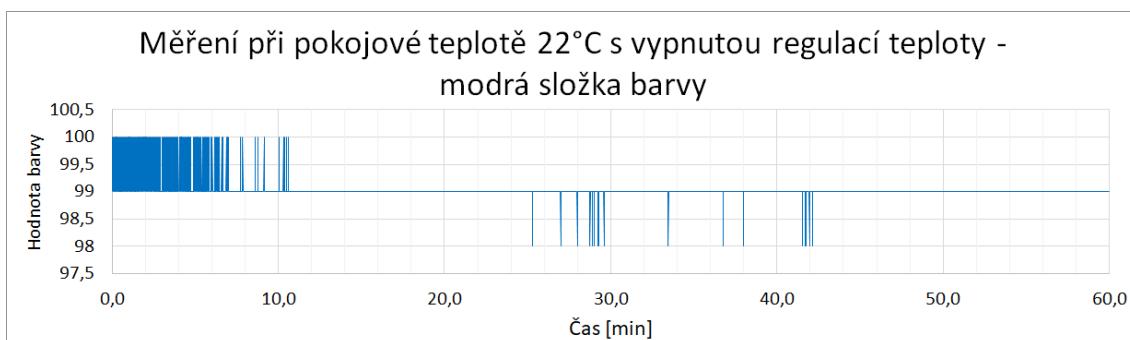
Jak lze vidět na naměřených hodnotách jednotlivých barev 5.2, 5.3 a 5.4, které jsem kvůli vzájemnému překrývání rozdělil do jednotlivých grafů, tak při měření v pokojové teplotě došlo k největší změně naměřených hodnot v průběhu prvních deseti minut, kdy se zvýšila teplota LED diod a jejich jas začal klesat. Následkem toho přestalo docházet ke kmitání naměřených hodnot mezi 100 a 99 a hodnota se ustálila na čísle 99. S následujícím růstem teploty až k hodnotě 24°C naměřené po dokončení testu, docházelo k dalšímu snižování svítivosti a naměřené hodnoty



Obr. 5.2: Hodnoty červené barvy, pokojová teplota, vypnutá regulace teploty



Obr. 5.3: Hodnoty zelené barvy, pokojová teplota, vypnutá regulace teploty

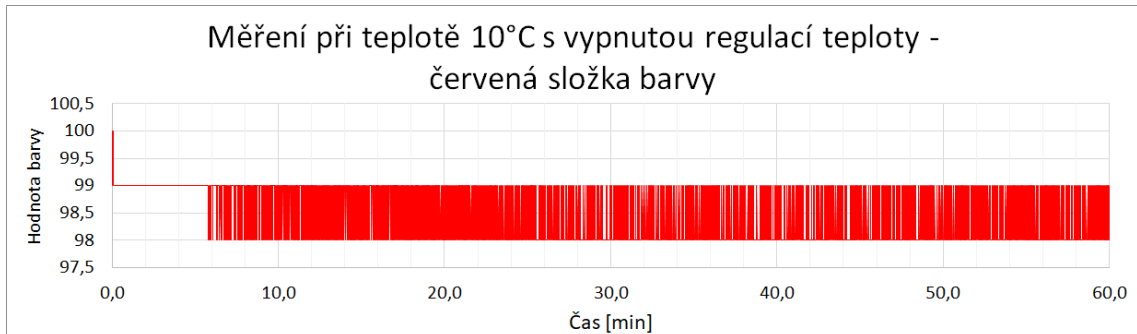


Obr. 5.4: Hodnoty modré barvy, pokojová teplota, vypnutá regulace teploty

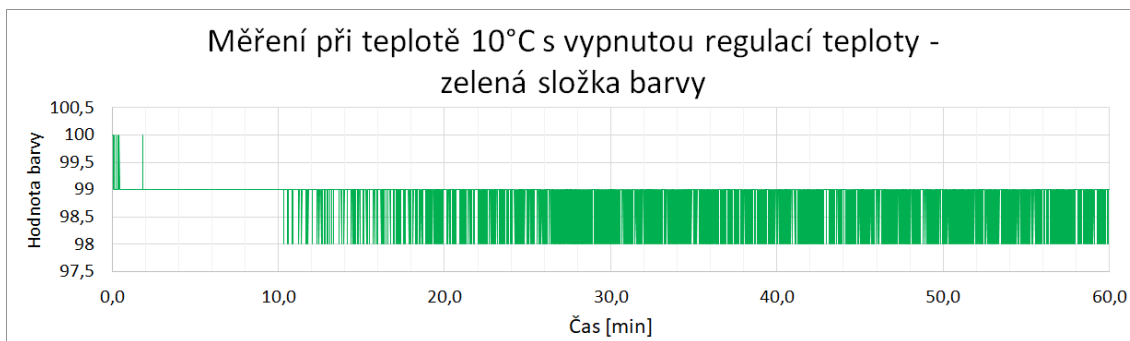
barev začaly kmitat mezi hodnotami 99 a 98. Největší změnou prošla během měření hodnota červené barvy 5.2, která ke konci pravidelně kmitala mezi hodnotami 99 a 98, zatímco zelená barva 5.3 takto kmitala pouze v časovém rozmezí 18 - 50min a pak se téměř ustálila na hodnotě 99. U modré barvy 5.4 došlo pouze v polovině měření k několika zákmitům k hodnotě 98, ale jinak byla od desáté minuty téměř stále stabilní.

V případě měření při teplotě 10°C je situace obdobná. Po chvíli provozu se začala zvyšovat teplota diod a snižoval se jas a s tím i hodnoty naměřených barev. Rozdíl oproti měření při pokojové teplotě je hlavně v tom, že zde je průběh všech tří barev velice podobný - všechny kmitají velice silně mezi hodnotami 98 a 99.

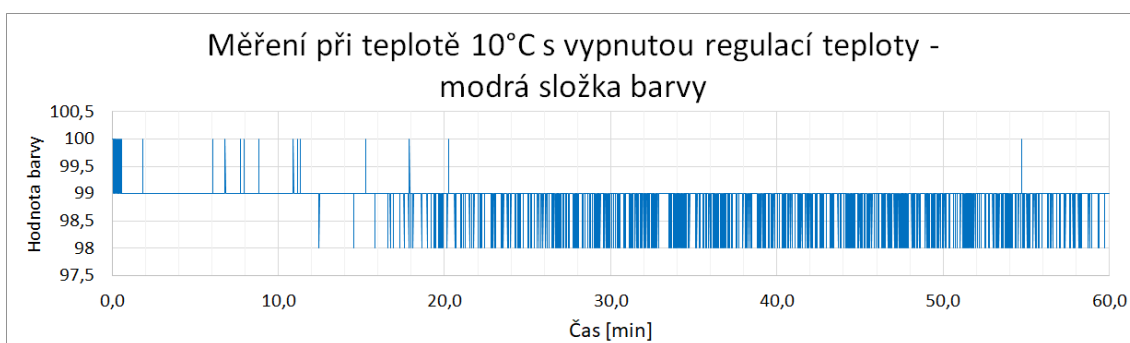
Největší rozdíly v naměřených hodnotách lze pozorovat u grafu 5.8, kdy jsem provedl kalibraci hodnot po ustálení teploty na 1°C a pro následné měření jsem přesunul snímač do místnosti vyhřáté na 22°C, takže v průběhu měření došlo k významné změně teploty. Tato změna teploty o přibližně 20°C vyústila v postupné snižování svítivosti diod a spolu s tím i k významné změně naměřených hodnot z původních 100 až 101 na 96 až 97 pro zelenou složku, 95 až 96 pro modrou složku a 94 až 95 pro červenou složku barvy. Na tomto grafu je také dobře vidět rozdílnou citlivost jednotlivých barev u LED diod na změnu její teploty, která je nejvyšší u červené barvy a nejnižší u zelené.



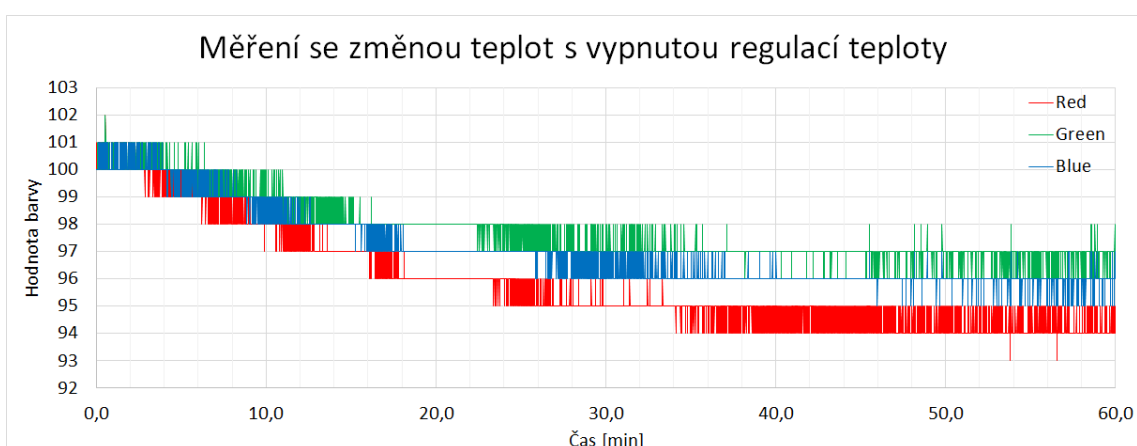
Obr. 5.5: Hodnoty červené barvy, měřeno při teplotě 10°C, bez regulace teploty



Obr. 5.6: Hodnoty zelené barvy, měřeno při teplotě 10°C, bez regulace teploty



Obr. 5.7: Hodnoty modré barvy, měřeno při teplotě 10°C, bez regulace teploty

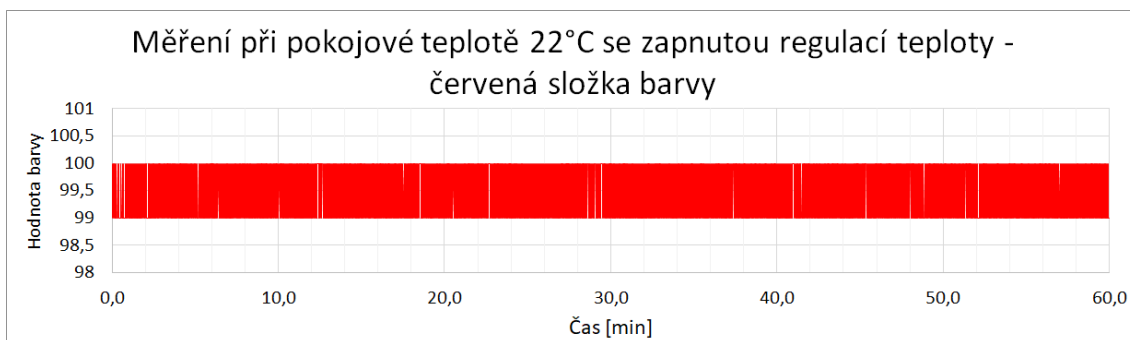


Obr. 5.8: Hodnoty barev naměřené při změně teploty s vypnutou regulací teploty

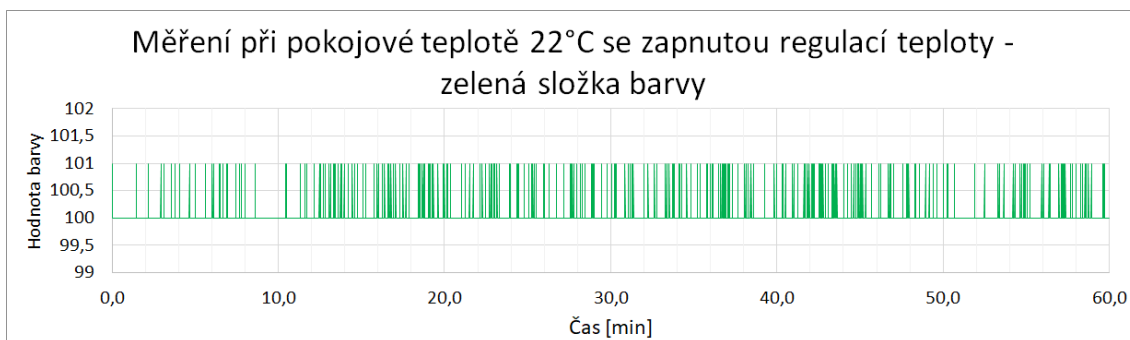
Jako největší problém při dlouhodobém měření stálosti hodnot se zapnutou regulací teploty, se ukázalo být proudové omezení na 1A, při kterém na integrovaném obvodu LM317 vznikaly tepelné ztráty o velikosti přibližně 2W (výstupní proud 1A vynásobený přibližně 2V o které se sníží vstupní napětí). V době kdy nebyly všechny desky plošných spojů uzavřeny v krabici se tento obvod stačil chladit díky proudění vzduchu okolo připevněného chladiče, ale po přemístění do krabičky se i přes větrací otvory nedokázal dostatečně ochladit a dosahoval nebezpečných hodnot. Dalším problémem bylo, že teplo vyzařované z jeho chladiče významně ohřívalo i ostatní součástky a spolu s nimi i regulovanou soustavu. Z regulačního hlediska by se dalo říci, že se jednalo o neustále narůstající poruchu, která vstupovala do regulační smyčky a navrženy regulátor díky ní neustále kmital a nebyl schopen dosáhnout ustálené hodnoty, případně neustále na plný výkon chladil desku se snímačem, čímž odebíral větší proud a integrovaný obvod se o to více ohříval.

Z toho důvodu jsem se rozhodl pro přidání malého ventilátoru, který odsává teplý vzduch z krabičky ven. Současně s tím jsem zaslepil některé větrací otvory na horní straně a přivrtal další na straně boční, aby vstupující vzduch proudil okolo integrovaného obvodu LM317 a tím jej ochlazoval. Ventilátor je ke svorkám napájení regulace, pro snížení otáček a tím i hlučnosti, připojen přes rezistor o velikosti 33Ω. Díky přímému spojení se svorkami je možné jej využít jako kontrolu, zda je skutečně na regulační obvod přivedeno napětí. Jeho odběr je dle údaje z datasheetu 112mA. Díky této nízké hodnotě a využitému zdroji, který je schopen dodávat proud až 1,2A nedojde k ovlivnění kvality regulace a není tak nutné přepočítávat konstanty regulátorů.

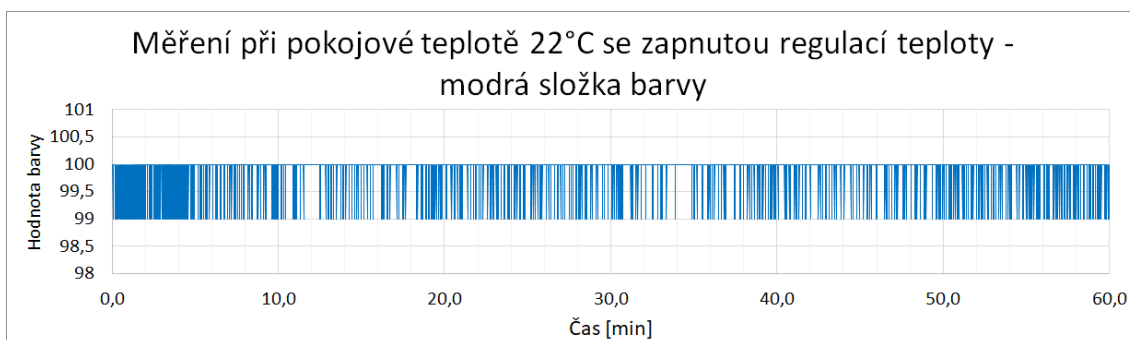
Jak lze vidět na následujících grafech 5.9, 5.10, 5.11, tak se zapnutou regulací teploty při měření za pokojové teploty jsou hodnoty barev mnohem stabilnější a kmitají v pouze v rozsahu dvou hodnot (99 - 100 červená a modrá, 100 - 101 zelená), na rozdíl od měření bez regulace, kde po zahřátí LED diod došlo k většímu odklonu od kalibrované hodnoty. Nejhorší stabilitu stejně jako v předchozích měřeních vykazuje červená barva, která kmitá prakticky neustále na rozdíl od zelené a modré, u kterých je vidět, že hlavní hodnota je 100 a od ní se měřená veličina odchyluje.



Obr. 5.9: Hodnoty červené barvy, pokojová teplota, zapnutá regulace teploty



Obr. 5.10: Hodnoty zelené barvy, pokojová teplota, zapnutá regulace teploty

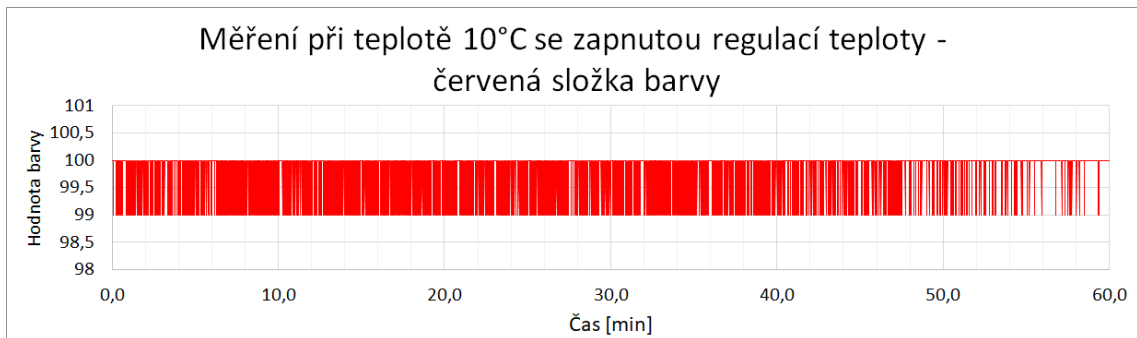


Obr. 5.11: Hodnoty modré barvy, pokojová teplota, zapnutá regulace teploty

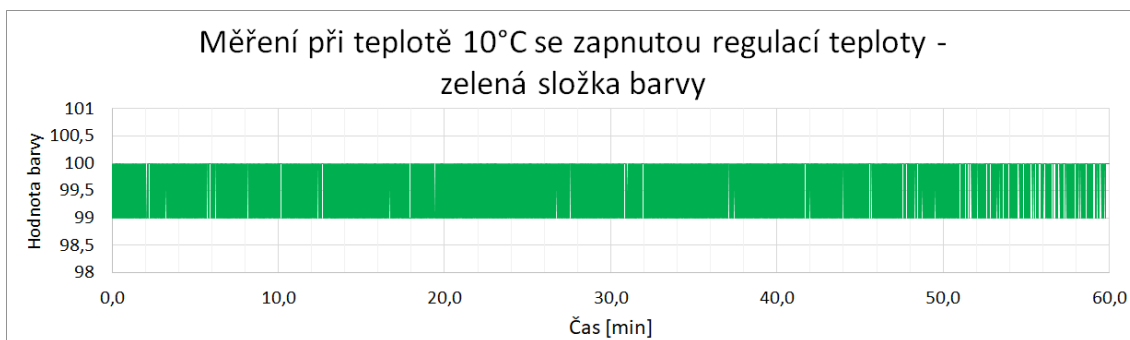
V případě měření stability nakalibrovaných hodnot za teploty 10°C došlo stejně jako u předchozího měření se zapnutou regulací k omezení kmitání. To je u všech tří složek barvy 5.12, 5.13, 5.14 velice silné po skoro celou dobu měření. Pouze u červené a modré barvy ke konci došlo k částečné stabilizaci hodnot na čísle 100 (lze pozorovat méně odchylek). U zelené barvy lze tento jev sice také pozorovat, ale není tak silný. Tato pozvolná změna hodnot směrem nahoru je následkem zvýšení jasu LED diod v důsledku snížení teploty. To může být způsobeno spuštěním chladicího procesu v ledničce, kde test probíhal.

Posledním testem stability naměřených hodnot, který jsem v této sekci provedl je měření při změně teploty z 1°C na 22°C se zapnutou regulací teploty. Podle postupu sepsaného v počáteční části kapitoly jsem tedy nejprve vychladil zařízení na stabilní 1°C, následně spustil regulaci teploty a počkal až PC program ukáže informaci o jejím vyregulování. Poté jsem přesunul zařízení do 22°C a spustil měření.

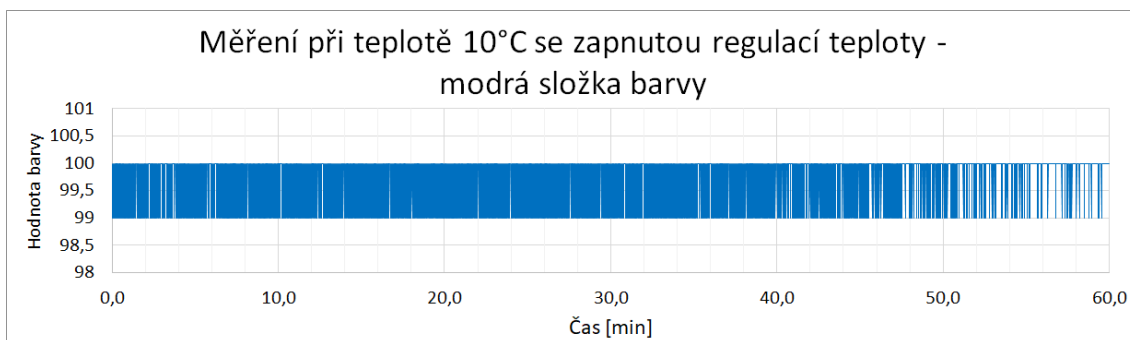
Naměřené hodnoty, které je možné vidět v grafech 5.15, 5.16 a 5.17, mají v porovnání s hodnotami naměřenými bez zapnuté regulace teploty 5.8 mnohem stabilnější průběh a to i přes to, že u všech tří barev došlo k poklesu měřené hodnoty. V tomto případě se rozdíl měřených hodnot na začátku a na konci přibližně 3,5x menší než v předchozím měření. Největší rozdíl hodnot lze pozorovat tak jako u ostatních měření u červené barvy, u které došlo ke změně rozsahu ve kterém hodnota barvy kmitá už přibližně v polovině měření, zatímco u zelené barvy to bylo až přibližně ve 45 minutě a u modré složky barvy až v posledních deseti minutách měření.



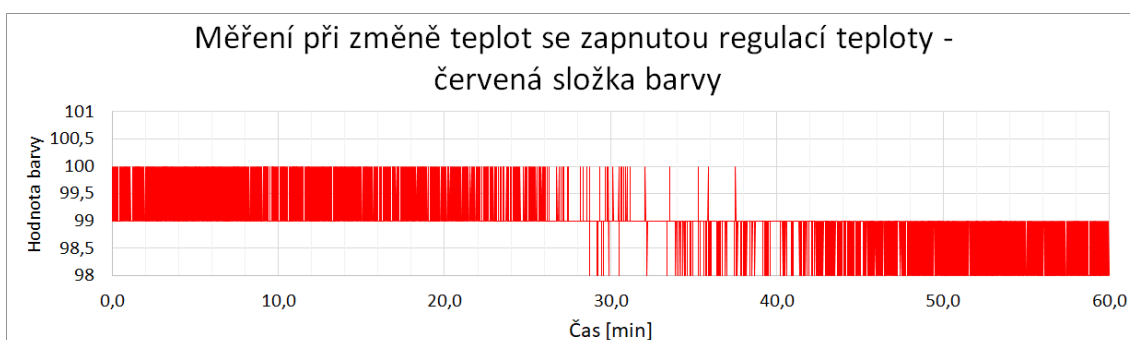
Obr. 5.12: Hodnoty červené barvy, měřeno při teplotě 10°C, s regulací teploty



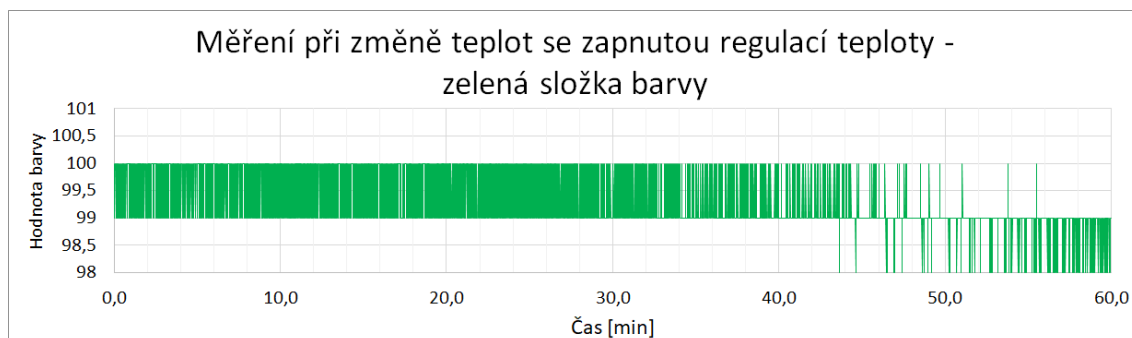
Obr. 5.13: Hodnoty zelené barvy, měřeno při teplotě 10°C, s regulací teploty



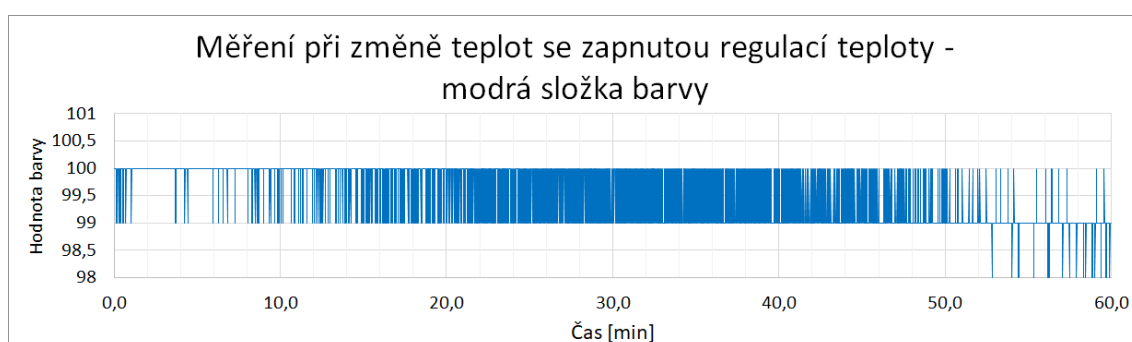
Obr. 5.14: Hodnoty modré barvy, měřeno při teplotě 10°C, s regulací teploty



Obr. 5.15: Hodnoty červené barvy, měřeno při změně teploty, s regulací teploty



Obr. 5.16: Hodnoty zelené barvy měřeno při změně teploty, s regulací teploty



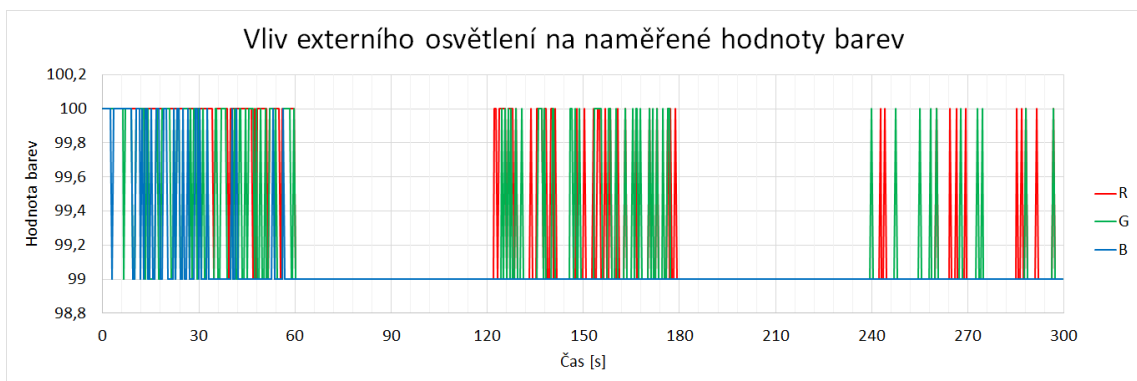
Obr. 5.17: Hodnoty modré barvy, měřeno při změně teploty, s regulací teploty

5.3 Test závislosti naměřené hodnoty na vzdálenosti a okolním osvětlení

Další testy, které jsem provedl na zařízení, je vliv externího osvětlení na naměřené hodnoty barev a test závislosti naměřené hodnoty na vzdálenosti vzorku od snímače. Obě měření probíhala bez zapnuté regulace teploty.

V prvním testu, měření vlivu okolního osvětlení na naměřené hodnoty barev, jsem snímací přípravek umístil na 4 nožičky, aby byl od vzorku ve stálé vzdálenosti 0,75cm. Následně jsem provedl kalibraci snímače na stejné hodnoty jako v případě dlouhodobého měření (tedy 100, 100, 100) a spustil měření, které probíhalo po dobu pěti minut. Během měření jsem pak střídal stavy, kdy bylo externí osvětlení zhasnuto a kdy bylo rozsvíceno. Nutno podotknout, že měření probíhalo za dne v nezatemněné místnosti, takže i v částech bez externího osvětlení je vliv běžného denního světla.

Graf 5.18 ve kterém jsou vykresleny naměřené hodnoty, lze rozdělit na tři části bez osvětlení (0-60s, 120-180s a 240-300s) a dvě části s osvětlením (60-120s a 180-240s). Jak si lze na tomto grafu povšimnout, tak po aplikaci externího osvětlení na měřený vzorek došlo k ustálení výstupních hodnot na čísle 99, namísto stále kmitající hodnoty mezi 100 a 99. Výsledkem testu s externím osvětlením, které by mohlo ovlivnit měřené hodnoty je tedy relativní chyba měření 1%, což je zajištěno hlavně měřením ve dvou fázích, kdy se nejprve nasnímá hodnota s rozsvícenými LED diodami (těmi určenými k měření) a následně bez nich. Tím, že se hodnota naměřená bez rozsvícených diod odečte od té s rozsvícenými, dojde k odstranění okolních vlivů z hodnoty a ty se tak do ní nepromítnou, případně je jejich vliv minimální.

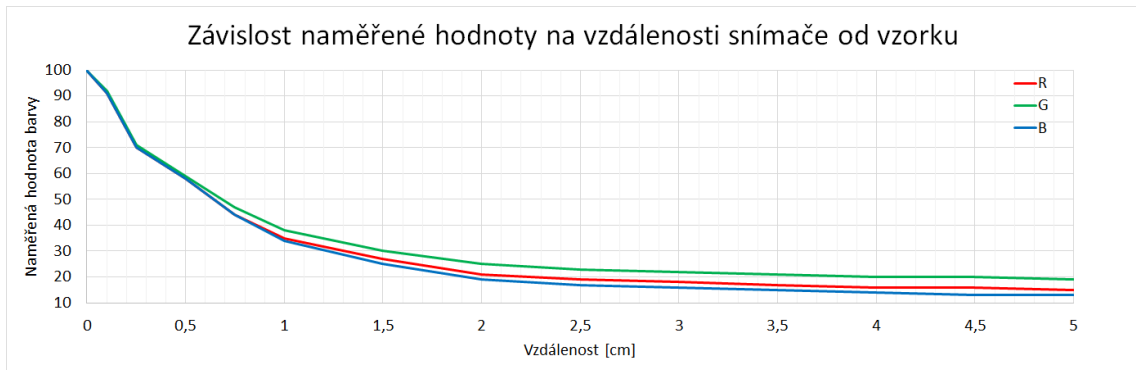


Obr. 5.18: Vliv externího osvětlení na hodnotu měřené barvy (60-120s, 180-240s)

V případě testu vlivu vzdálenosti, jsem zařízení umístil na snímaný vzorek, provedl kalibraci snímače na hodnoty 100, 100, 100 a následně provedl měření při nulové vzdálenosti. Následně jsem pomocí podložek vytvořil mezi zařízením a vzorkem 1mm mezeru a provedl další měření. Takto jsem postupoval ještě u následujících vzdáleností : 2,5mm, 5mm, 7,5mm, 1cm a následně s krokem 0,5cm až do vzdálenosti 5cm. Po vykreslení těchto bodů do jednoho grafu 5.19 lze jednoduše podle tvaru křivky odvodit, že velikost naměřené hodnoty barvy se vzdáleností exponenciálně klesá.

Z toho důvodu by bylo vhodné v případě reálného nasazení tohoto snímacího přípravku k němu ještě přidat měření vzdálenosti od snímaného vzorku a následně naměřenou hodnotu barvy podle toho přepočítat. Pro měření vzdálenosti by se dal využít například IR nebo ultrazvukový senzor. Nevýhodou využití IR, nebo jakéhokoli jiného světelného snímače je, že jeho umístění by muselo být dostatečně vzdálené od senzoru, aby při měření nedocházelo k nasnímání světla, které k měření vzdálenosti využívá. Tím pádem by se zvětšila i minimální velikost měřeného vzorku (aktuálně 2x2cm), který by musel obsáhnout jak snímač barvy, tak snímač pro měření vzdálenosti. Z těchto důvodů by byl ideálnější ultrazvukový senzor, který měřenou

barvu nijak neovlivní a díky tomu je možné jej umístit do bezprostřední blízkosti snímače barvy a ovlivnit tak potřebnou velikost vzorku jen minimálně.



Obr. 5.19: Graf vlivu vzdálenosti snímače od měřeného prvku na měřenou hodnotu

5.4 Zhodnocení výsledků

Z naměřených hodnot, které jsem vynesl do grafů v předchozí části této práce 5.2 lze vypožorovat, že měření prováděná bez zapnuté regulace teploty snímacích prvků, jak už jsem několikrát napsal, jsou více náchylná na samovolné ohřívání jednotlivých součástí a tím na změnu jejich vlastností. Hlavním problémem jsou zde LED diody, které se při svícení zahřívají čímž dochází ke snižování jejich jasů a tím pádem i ke změně naměřených hodnot. Při velké změně teplot o dvě desítky stupňů 5.8 dochází již k velice významným změnám hodnot (v nejhorším případě z původního rozsahu 101 - 100 na 95 - 94).

V druhé části, kde jsou vyneseny hodnoty naměřené za použití regulace teploty měřící soustavy pomocí peltierova článku, se již vliv samovolného ohřívání LED diod neuplatňuje a naměřené hodnoty jsou tak ustáleny v rozsahu 99 - 100 případně 100 - 101. Jediným rozdílem je opět měření při velké změně teplot, kdy sice došlo ke změně rozsahu kmitání naměřené hodnoty, ale ne tak velké jako v případě měření bez zapnuté regulace teploty.

Výsledkem této práce je tedy zařízení, které je v případě přivedeného napájení pro regulaci teploty schopno dlouhodobě měřit barevné vlastnosti materiálu s přesností ± 1 .

5.5 Cenové zhodnocení

V následující tabulce 5.1 jsou vypsané jednotlivé součástky, které byly využity při stavbě měřicího zařízení, jejich množství a cena.

Tab. 5.1: Rozpis cen jednotlivých položek využitých při stavbě snímacího přípravku

Položka	množství	cena za kus [Kč]	celková cena [Kč]
Krabička plastová KP19	1	45	45
Šroubky 3x19	5	0,4	2
Šroubky 3x30	2	0,65	0,65
Vrut 3x30	1	0,15	0,15
LED dioda barevná	3	2,3	6,9
Tlačítko	1	11	11
Arduino nano (klon)	1	67	67
Tlačítko	1	11	11
Napájecí souosý konektor (samec)	1	12	12
Napájecí souosý konektor (samice)	1	5,6	5,6
Peltierův článek 25x25mm	1	145	145
Snímač VEML6040	1	42	42
LED SK6812RGBW	3	10,05	40,2
Kondenzátor 100nF SMD	4	1	4
Kondenzátor 100nF vývodové	2	1,5	3
Rezistory SMD (různé)	5	1	5
Rezistory vývodové (různé)	3	1,9	5,7
Termistor KTY820-210	1	20	20
LM317T	1	9,5	9,5
NOR 74HC02 SMD	1	6,8	6,8
Unip. tranzistor IRF7319	2	15	30
Ventilátor 30x30mm	1	160	153
Celková cena	-	-	625,5

Součástí tabulky nejsou položky, které jsem měl doma a běžně je využívám pro tvorbu různých obvodů jako chladič pro peltierův článek, nebo desky plošných spojů a nástroje potřebné k jejich vyleptání. Výsledná cena dosahuje právě této hodnoty hlavně z důvodu nakupování jednotlivých součástek v maloobchodě, kde je ke každé přičtena marže. Při nákupu součástek pro výrobu většího množství výrobků by bylo možné aplikovat množstevní slevy a u některých by mohla cena klesnout až na setinu hodnoty uvedené v tabulce (hlavně u rezistorů a kondenzátorů).

6 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo seznámit se s problematikou měření barev reálných předmětů pomocí kolorimetru, následně projít současnou nabídku snímačů barev a na jejich základě navrhnout řídicí logiku a metodiku snímání pro kolorimetr. Praktickou částí práce bylo následné sestavení navrženého zařízení, vytvoření PC programu pro jeho ovládání a vizualizaci hodnot a provedení výsledných testů.

V první části jsem se zaměřil na teoretický rozbor elektromagnetického záření a jeho viditelné části - optického záření. Součástí této kapitoly je i rozdělení jednotlivých barevných modelů, z nichž mezi nejpoužívanější v průmyslu patří model RGB, ve kterém se jednotlivé složky spektra sčítají a CMYK, kde se naopak barevné složky odečítají.

Druhá část se zabývá měřením barev a popisem k tomu používaných snímačů. Je zde popsáno, jak vidí barvy člověk a v čem spočívá kolorimetrie. Následně jsou zde popsány jednotlivé snímače, které jsou využívány pro snímání viditelného spektra elektromagnetického záření. Zaměřuji se zde jak na běžné součástky, kterými jsou například fotorezistor nebo fotodioda, tak na CCD a CMOS snímače, které lze chápat jako soubor několika jednotlivých komponent (fotodioda, posuvný registr, výstupní kondenzátor). Následně jsem na základě aktuální nabídky trhu vybral několik snímačů barev, které se běžně používají a popsal jejich nejdůležitější vlastnosti. Z těchto snímačů jsem nakonec vybral nejvhodnější, kterým se ukázal být VEML6040 a to jak na základě jeho vlastností, tak na základě jeho dostupnosti a mých požadavků pro následné sestavení kolorimetrického přípravku.

V třetí kapitole jsem se zaměřil na návrh řídicí logiky a metodiky snímání. Obecně jsem zde popsal hardwarové součásti, které budou využity pro následnou stavbu kolorimetru. Mezi jejich hlavní části patří Arduino nano, které je pro stavbu vhodné jak svými vlastnostmi, tak jeho dostupností a snadnou obsluhou. Bude zde sloužit jako výpočetní jednotka, ke které budou připojeny všechny ostatní komponenty a v případě potřeby bude komunikovat skrze sériovou linku s počítačem. Dále je zde vyobrazeno blokové schéma popisující posloupnost jednotlivých úkonů v rámci přípravy a průběhu měření. Jako poslední jsem krátce popsal metodu snímání, ve které je uvedeno jakým způsobem a metodami bude probíhat měření pomocí kolorimetru.

Navazující praktická část se soustředí na popis zapojení jednotlivých hardwarových komponent a návrh plošných spojů na kterých jsou umístěny. Mezi hlavní části, které zde popisují patří deska se snímacími prvky obsahující senzor barev VEML6040, přísvitové LED diody a teploměr. V této části také popisují kalibraci snímače na zvolené metody pomocí změny koeficientu, kterým se následně násobí naměřené hodnoty. Druhou popisovanou částí je deska plošného spoje, která je ur-

čena k ovládání peltierova článku a následnou regulaci teploty. Součástí regulace je detailní postup, který jsem využil k identifikaci systému a následnému návrhu regulátoru pomocí Toolboxu v Matlabu a metodou Ziegler-Nichols. Kvůli proudovému omezení na maximálně 1A však byla jejich výsledná rychlost velice podobná, takže jsem zvolil regulátor navržený metodou Ziegler-Nichols. Poslední část čtvrté kapitoly je zaměřena na popis a ovládání počítačového programu vytvořeného pro vizualizaci naměřených hodnot a obsluhu měřícího přípravku.

Závěrečná část diplomové práce je zaměřena na testování vytvořeného zařízení. U každého testu, který jsem provedl jsem následně vytvořil graf naměřených hodnot a popsal jej. Z těchto měření vyplývá, že vytvořený měřící přípravek je schopen při zapnuté regulaci teploty měřící soustavy provádět kontinuální měření barevných vlastností materiálu s přesností ± 1 . V případě vypnuté regulace teploty se přesnost měření zhorší vlivem samovolného ohřívání LED diod a následného snižování jejich jasů. Toto měření je tedy vhodnější spíše pro provádění jednotlivých měření, než pro kontinuální měření. Posledními testy, které jsem prováděl bylo měření vlivu okolního osvětlení a vlivu vzdálenosti od vzorku na naměřenou barvu. Zde jsem zjistil, že vliv změny okolního osvětlení je na vykresleném grafu znatelný, ale nedochází při něm k vybočení z rozsahu hodnot, které jsou měřeny bez něj. Měření vlivu vzdálenosti vzorku od snímače na naměřenou hodnotu ukázalo, že při zvětšující se vzdálenosti se získaná čísla exponenciálně snižují. Proto by bylo vhodné při reálném nasazení přípravku přidat měření vzdálenosti od vzorku a výsledné hodnoty podle toho přepočítat.

LITERATURA

- [1] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007. Senzory neelektrických veličin. ISBN 978-80-7300-193-3.
- [2] DANNHOFFEROVÁ, Jana. *Velká kniha barev: kompletní průvodce pro grafiky, fotografy a designéry*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2012. ISBN 978-80-251-3785-7.
- [3] BRADÁČ, Zdeněk. *Materiály dostupné k předmětu - Počítače pro řízení MPOR*. Brno, 2016.
- [4] BLAHA, Petr a Petr VAVŘÍN. *Řízení a regulace I: Základy regulace lineárních systémů - spojitě a diskrétní* [online]. Brno, 2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/rizeniaregulace1/prednasky>
- [5] TAOS Inc. TCS320, TCS3210 Programmable color light-to-frequency converter. 2009. Dostupné také z: <http://www.mouser.com/catalog/specsheets/TCS3200-E11.pdf>
- [6] TAOS Inc. TCS3472 color light-to-digital converter with IR filter. 2012. Dostupné také z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TCS34725.pdf>
- [7] MAZET GMBH. MRGBiCS: Integrated RGB sensor. 2016. Dostupné také z: http://www.mazet.de//media/k2/attachments/db10301e_MRGBiCS_V2_1.pdf
- [8] MAZET GMBH. MTCS-CDCAF: XYZ True Color Sensor with I2C Interface. 2016. Dostupné také z: http://www.mazet.de//media/k2/attachments/db15405e_MTCS-CDCAF_V1_44_1473058773.pdf
- [9] VISHAY SEMICONDUCTORS. VEML6040: RGBW Color Sensor with I2C Interface. 2016. Dostupné také z: <http://www.vishay.com/docs/84276/veml6040.pdf>
- [10] MAHAMATSU. S9032-02: RGB color sensor. 2016. Dostupné také z: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s9032-02_kspd1067e.pdf
- [11] ATMEL Corporation. ATmega328/P: 8-bit AVR Microcontrollers. San Jose, 2016. Dostupné také z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf

- [12] DONGGUANG OPSCO OPTOELECTRONICS CO. SK6812RGBW: Integrated light source intelligent control of chip-on-top SMD type LED. Qishi-zhen, Tung-kuan, Kuang-tung, China, 2015. Dostupné také z: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2757/p2757_SK6812RGBW_REV01.pdf
- [13] ČÁPKA, David. Úvod do počítačové grafiky - Základy optiky, barevné modely. *ITnetwork.cz* [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-10-26]. Dostupné z: <http://www.itnetwork.cz/grafika/uvod-do-pocitacove-grafiky-optika-modely>
- [14] YUV. Wikipedie: Otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 2016-10-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=YUV&oldid=13860047>
- [15] HORÁK, Karel, Miloslav RICHTER, Petr PETYOVSKY a Peter HONEC. Přednáškové slidy [online]. VUT v Brně, 2015 [cit. 2016-11-16]. Dostupné z: <http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/>
- [16] Arduino [online]. 2016 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc>
- [17] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Peltierův jev. Encyklopedie fyziky [online]. 2006 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [18] Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik. Katedra automatizační techniky a řízení: Fakulta strojní VŠB - Technická univerzita Ostrava [online]. Ostrava [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm#ma3
- [19] WALTHAM, Nick. CCD and CMOS sensors. Observing Photons in Space. New York, NY: Springer New York, 2013, , 423. DOI: 10.1007/978-1-4614-7804-1_23. ISBN 978-1-4614-7803-4. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-7804-1_23

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

GUI	uživatelské prostředí počítačového programu
LED	light-emitting diode - světlo emitující dioda
RGB	barevný model složený z barev červená, zelená modrá
CMYK	barevný model složený z barev azurová, purpurová, žlutá
HSV	také HSB a HSL jsou barevné modely založené na lidském vidění
YUV	barevný model využívaný k televiznímu přenosu
CCD	charge-coupled device - snímač světla s vázanými náboji
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor - světelný snímač s CMOS technologií
EEPROM	Elektronicky mazatelná paměť pouze pro čtení
I ² C	počítačová sériová sběrnice
SDA	datový kanál I ² C sběrnice
SCL	hodinový signál I ² C sběrnice
HIGH	stav při kterém je hodnota vyčtena jako 1
LOW	stav při kterém je hodnota vyčtena jako 0
ACK	Acknowledge - potvrzovací bit využívaný v I ² C
R_p	minimální hodnota pull-up rezistoru
V_{CC}	minimální hodnota pull-up rezistoru napájecí napětí
V_{OL}	výstupní napětí, stav LOW
I_{OL}	výstupní proud, stav LOW
NRZ	Non Return To Zero - komunikace bez návratu k nule
T_n	hodnota zprůměrované teploty
TEC	thermoelectric cooler - peltieruv článek určený k chlazení
PWM	Pulse Width Modulation - pulzně šířková modulace
T_d	zpoždění identifikovaného systému
T_1	časová konstanta identifikovaného systému
K	zesílení identifikovaného systému
F_s	přenos soustavy
F_r	přenos regulátoru
K_R	zesílení regulátoru
T_I	časová konstanta integrační složky regulátoru
T_D	časová konstanta derivační složky regulátoru
P_R	proporcionální složka regulátoru
I_R	integrační složka regulátoru
D_R	derivační složka regulátoru
CSV	souborový formát sloužící pro ukládání hodnot oddělených čárkou

SEZNAM PŘÍLOH

A	Obsah přiloženého CD	87
B	Fotografie vytvořeného zařízení	88
B.1	Příloha A - fotografie výsledného zařízení z levé strany	88
B.2	Příloha B - fotografie spodní strany měřícího přípravku	89
B.3	Příloha C - fotografie vnitřního uspořádání zařízení	89

A OBSAH PŘILOŽENÉHO CD

V následujícím stromě jsou vypsány jednotlivé soubory umístěné na přiloženém CD

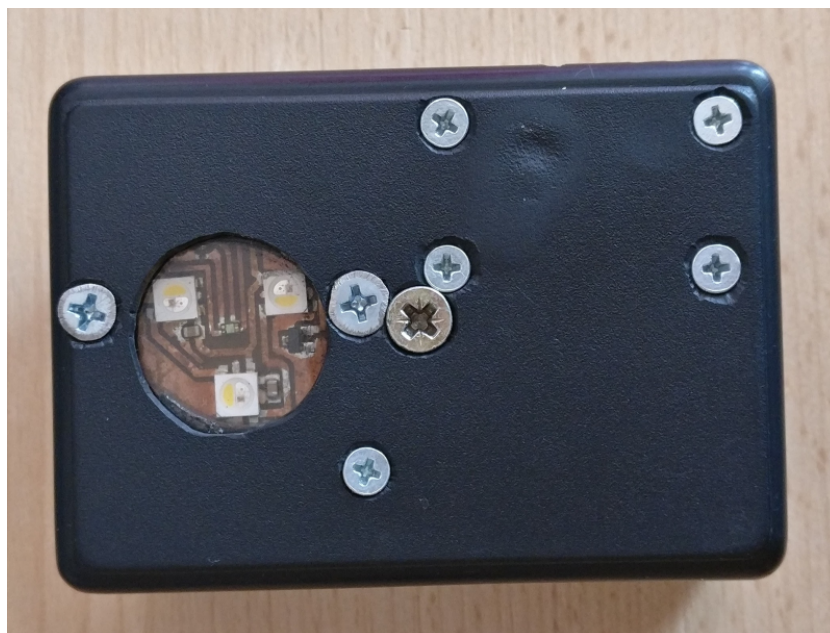
```
/
├── Fotografie výsledného zařízení ..... fotografie snímacího přípravku
│   ├── Fotografie s připojeným napájením a USB kabelem.jpg
│   ├── Fotografie spodní strany.jpg
│   ├── Fotografie vnitřního uspořádání 2.jpg
│   ├── Fotografie vnitřního uspořádání.jpg
│   └── Fotografie z boku.jpg
├── Návrhy desek plošných spojů
│   ├── Peltier ..... Návrh plošného spoje pro ovládání Peltierova článku
│   │   ├── peltier.brd
│   │   └── peltier.sch
│   └── Snimac ..... Návrh plošného spoje pro desku se snímači
│       ├── snimac.brd
│       └── snimac.sch
├── Zdrojové soubory PC programu
│   ├── Debug
│   ├── Program ..... Obsahuje zdrojové kódy programu
│   ├── Release
│   │   └── Program.exe ..... Spustitelný soubor PC programu
│   └── Program.sln
├── Zdrojové soubory pro Arduino
│   ├── diplomka
│   │   ├── ard-lib.cpp
│   │   ├── ard-lib.h
│   │   ├── diplomka.ino
│   │   ├── I2C.cpp
│   │   └── I2C.h
└── Pavel Škoda - Kolorimetr ..... Elektronická verze diplomové práce
```


B FOTOGRAFIE VYTVOŘENÉHO ZAŘÍZENÍ

B.1 Příloha A - fotografie výsledného zařízení z levé strany



B.2 Příloha B - fotografie spodní strany měřicího přípravku



B.3 Příloha C - fotografie vnitřního uspořádání zařízení

