



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## SNÍMAČ CHROMATIČNOSTI OSVĚTLENÍ

LIGHT CHROMATICITY SENSOR

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Rejthar

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

BRNO 2019



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**  
Ústav mikroelektroniky

**Student:** Martin Rejthar

**ID:** 195423

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### **Snímač chromatičnosti osvětlení**

#### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

V rámci bakalářské práce zpracujte teoretické možnosti měření chromatičnosti osvětlení. Zaměřte se na analýzu jednotlivých systémů a vyberte takový způsob měření, který bude možné realizovat s minimálními náklady. Navržené zařízení realizujte, vytvořte ovládací software a ověřte jeho funkčnost měření důležitých parametrů. Dosažené parametry vyhodnoťte.

#### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 30.5.2019

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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**

Práce je zaměřena na problematiku a analýzu kolorimetrie, jakožto vědy zkoumající vlastnosti světelného záření. Rešerše probíhá s cílem zjištění možných metod kvalitativního měření a porovnání vlastností světla. V části věnující se teorii měření barev jsou probrány základní fyzikální principy týkající se dané problematiky. Zkoumány jsou přesahy a možné aplikace těchto teoretických znalostí při realizaci přenosného měřiče. Dále je v práci rozvedena úvaha nad konstrukcí a požadavky na takové měřicí zařízení a nad zpracováním výsledků získaných měření. Zařízení je posléze zkonstruováno a jsou na něm provedena základní měření.

## **Klíčová slova**

*Kolorimetrie, Barevné modely, Osvětlení, Měření vlastnosti světla, konstrukce zařízení*

## **Abstract**

Thesis is aimed on problematics and analysis of colorimetry, as an instrument of exploration of light and its characteristics. Research is made to find plausible methods of measurement and comparing light. First part is focused on theory, to discuss basic physical principles connected to lighting and colorimetry. Possible applications of these theoretical knowledge during the realization of the portable meter are studied. Next part speaks on construction and requirements on such a device and processing of results. Device is later assembled, and the basic measurements are performed.

## **Keywords**

*Colorimetry, Colour Spaces, Arduino, Lighting, Measurement of light characteristics, device construction*

## **Bibliografická citace:**

REJTHAR, Martin. *Snímač chromatičnosti osvětlení* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119444>.

Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Pavel Šteffan.

## **Prohlášení autora o původnosti díla**

*„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Snímač chromatičnosti osvětlení jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.*

V Brně dne: **30. května 2019**

.....  
Jméno a příjmení autora, podpis

## **Poděkování**

*Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé práce.*

V Brně dne: 30.května 2019

.....  
podpis autora

# Obsah

1.	Úvod.....	8
2.	Teorie měření barev .....	9
2.1	Světlo a jeho vlastnosti.....	9
2.2	Lidské vnímání světla .....	10
2.3	Prostory CIE 1931 RGB a XYZ.....	10
2.4	Prostor CIE 1960 UCS .....	12
2.5	Barevná teplota.....	13
2.6	Vliv kvality osvětlení .....	14
3.	Rozbor fotometrických senzorů .....	15
3.1	Komerčně dostupný kolorimetr.....	15
3.2	Požadavky na vlastní kolorimetr .....	16
3.3	Základní charakteristiky převodníků.....	16
3.4	Výběr senzoru světla .....	17
4.	Systém zpracování informací ze senzoru .....	20
4.1	LCD displej .....	20
4.2	Výběr řídicího mikrokontroléru .....	20
4.3	Požadavky na obslužný program .....	21
5.	Ověření konceptu .....	23
5.1	Blokové schéma prototypu.....	23
5.2	Prototyp .....	24
6.	Konstrukce zařízení.....	26
6.1	Zdroj 5 V .....	27
6.2	Zdroj 3,3 V .....	28
6.3	Návrh digitální části zařízení .....	30
6.4	Měření teploty .....	30
6.5	Souhrnné informace o plošném spoji.....	32
6.6	Cena výsledného zařízení.....	33
6.7	Firmware .....	34
7.	Výstupy bakalářské práce .....	35
7.1	Kontrola napěťových měničů.....	35

7.1.1	Výstup z měření napětí na výstupu měničů .....	36
7.2	Čidlo teploty .....	36
7.2.1	Výstup z měření teplotním senzorem .....	37
7.3	Světelný senzor .....	37
7.4	Modul ESP8266 a ThingSpeak .....	40
8.	Závěr .....	45

## Seznam symbolů a zkratek

CIE 1931 RGB	...	Barevný prostor
CIE 1960 UCS	...	Barevný prostor
CIE XYZ	...	Barevný prostor
CIE	...	Mezinárodní organizace pro osvětlování Commission Internationale de l'éclairage
I <sup>2</sup> C	...	Komunikační protokol – Inter-Integrated Circuit
DPS	...	Deska plošného spoje
L	...	Označení pro čípky citlivé na dlouhé vlnové délky
LCD	...	Displej s tekutými krystaly - Liquid Crystal Display
M	...	Označení pro čípky citlivé na střední vlnové délky
S	...	Označení pro čípky citlivé na krátké vlnové délky
SPD	...	Rozložení výkonu ve spektru vlnových délek – Spectral Power Distribution
UCS	...	Rovnoměrný barevný prostor – Uniform Chromaticity Space
$\lambda$	...	Vlnová délka

# 1. Úvod

Vnímání viditelného spektra elektromagnetického záření je majoritním způsobem získávání informací z prostředí, ve kterém se jedinec nachází. Stroje ale takto rozsáhlými možnostmi nedisponují, pokud vůbec na světlo nějakým způsobem reagují. Elektronická zařízení se začínají učit lidskému způsobu vidění světa. Taková zařízení nachází využití například v bezpečnostních systémech. Další prostor pro světlocitlivá zařízení je kvalitativní měření světla. Pro standardizaci popisu barev byly vyvinuty různé barevné prostory. Každý z nich vychází vstříc jiným specifikům konkrétní aplikace, všechny ale jednoznačně přiřazují jednotlivým barvám a odstínům číselné hodnoty. Různé barevné prostory jsou pak využívány jak pro popis barev předmětů například plastových výrobků, tak pro určování kvality obrazovek a displejů.

Věda poskytující způsob, jak fyzikálně popsat lidské vjemy vyvolané pozorováním barev se nazývá kolorimetrie. Přiřazuje barvám jedinečné číselné hodnoty – souřadnice v barevných prostorech. Přístroje pro takové měření jsou nazývány kolorimetry, a nachází uplatnění například v tisku, fotografii nebo při míchání barev. Pro tyto aplikace je společná vysoká přesnost měření. Kolorimetry tak bývají velmi nákladná zařízení. Pokud by bylo možné vytvořit levnější kolorimetr, kolorimetrie by našla využití v dalších, dnes nerentabilních aplikacích, a to i za cenu nižší přesnosti měření.

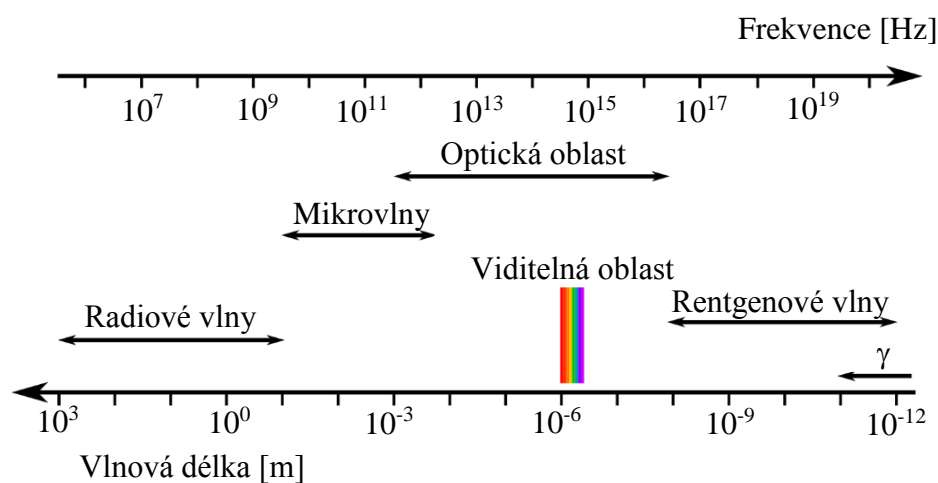
Komplexním problémem při vývoji levného kolorimetru, je snaha nahradit optický hranol, sloužící pro rozklad světla. Tento nákladný postup umožňuje detailnější proměření barevného spektra. Hranol je tedy nahrazen nejméně třemi barevnými filtry. Důsledkem vynechání hranolu je velká diskretizace světelného spektra a z ní pramenící chyba měření, tuto chybu lze korigovat.

Tato práce se zaměří na studii fyzikálních procesů při vnímání světla lidským okem, dále provede selekci různých druhů světelných snímačů, a s využitím tohoto snímače bude navrženo zařízení, které bude schopno určovat barevnou teplotu.

## 2. Teorie měření barev

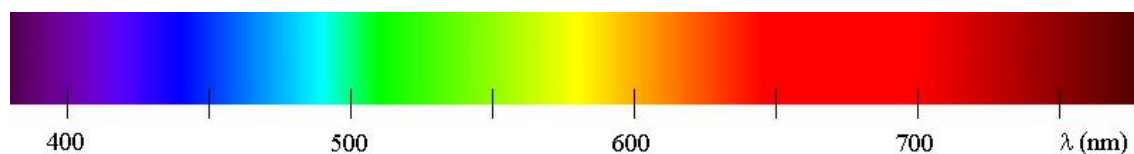
### 2.1 Světlo a jeho vlastnosti

Pojem světlo označuje úzkou část elektromagnetického záření o vlnových délkách 380 – 780 nm. Graf 1 rozděluje elektromagnetické spektrum podle vlnové délky, od radiových vln, přes mikrovlny, do optické oblasti s viditelným pásmem, k vlnám rentgenovým a  $\gamma$  paprskům. Právě na toto úzké spektrum je zaměřen lidský smysl – zrak. [2]



**Graf 1:** Elektromagnetické spektrum [1]

Přírodní denní sluneční světlo se při průchodu hranolem rozloží na barevné spektrum. Na jedné straně se objeví fialová přecházející do modré, dále přes azurovou k zelené a přes žlutou a oranžovou k červené barvě. Tento pokus odhaluje podstatu bílého světla. Vypovídá také o vnímání širokopásmového podnětu lidským okem a mozkiem.



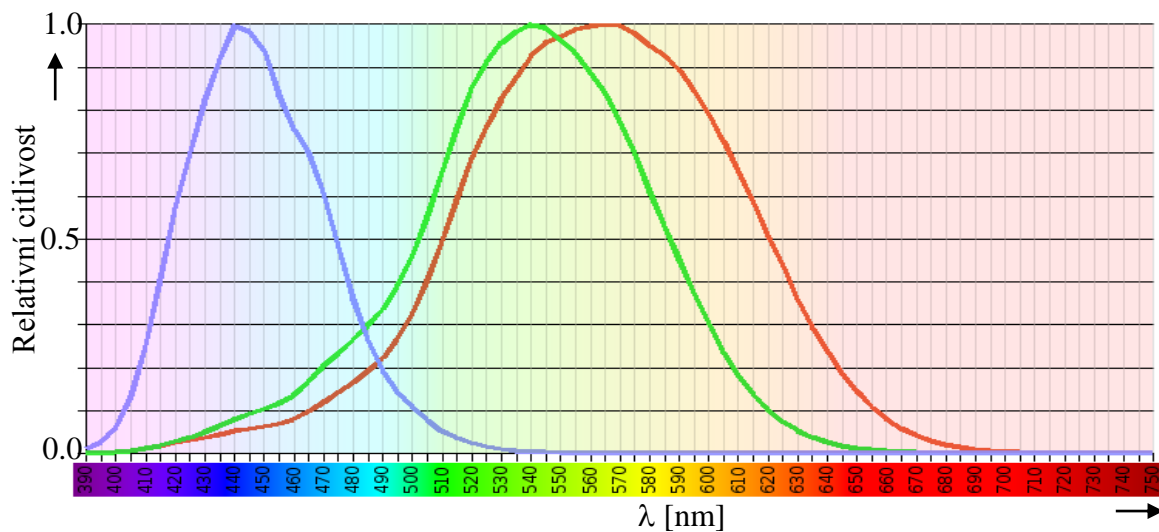
**Obr. 1:** Barevné spektrum [9]

Pokud bílé světlo dopadne například na červený květináč, část záření (kratší vlny) je květináčem pohlcena a jiná část odražena (delší vlny). Barvu předmětů tedy definuje jejich odrazivost, vlastnost předmětů definující, jakou měrou jednotlivé vlnové délky povrch předmětu odráží.

## 2.2 Lidské vnímání světla

Evoluce v lidském oku vytvořila tři druhy buněk citlivých na barevné světlo tzv. čípků. Čípky jsou nazvány dlouhé, střední a krátké podle vlnových délek na které reagují nejcitlivěji. Při nízké intenzitě osvětlení, typicky v noci, barvy přestávají být rozeznatelné. Pro vidění za špatných světelných podmínek existuje v oku ještě další druh světlocitlivých buněk. Tyto buňky jsou nazývány tyčinky a neumožňují barevné vidění.

Graf 2 ukazuje jakým způsobem reagují jednotlivé druhy čípků, modře je zobrazena citlivost čípků S, zeleně čípků M a červeně L.



**Graf 2:** Citlivost čípků na vlnové délky [10]

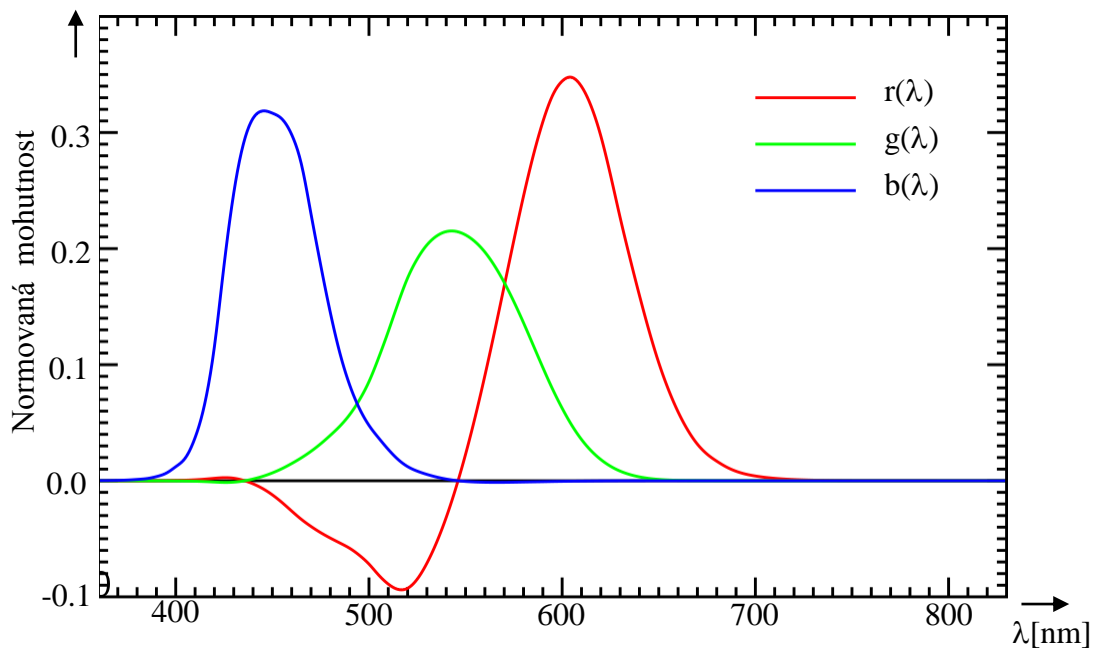
Oční buňky převádí velmi komplexní informaci o spektrálním rozložení výkonu vstupujícího do oka na tři kanály. Tento převod je ztrátový, což znamená, že pro více spektrálních rozložení existuje právě jeden lidský vjem. Tohoto využívají barevné obrazovky, obsahují pouze zdroje červeného, modrého a zeleného světla, které září s nastavitelnou intenzitou. Rozdílná spektrální rozložení výkonu (SPD – Spectral Power Distribution), která vyvolají stejný podnět pro nervovou soustavu jsou nazývány metamery. [2]

## 2.3 Prostory CIE 1931 RGB a XYZ

Model CIE 1931 byl historicky první systém pro měření a reprodukci barevného světla. Vycházel z experimentu se třemi monochromatickými zdroji světla o přesně známé vlnové délce namířené na jeden bod.

Model CIE 1931 definuje jakou intenzitou musí tyto zdroje zářit, aby byl vjem pro člověka stejný jako by svítil jen jeden zdroj s jinou vlnovou délkou. Tento proces literatura nazývá „Colour matching“.

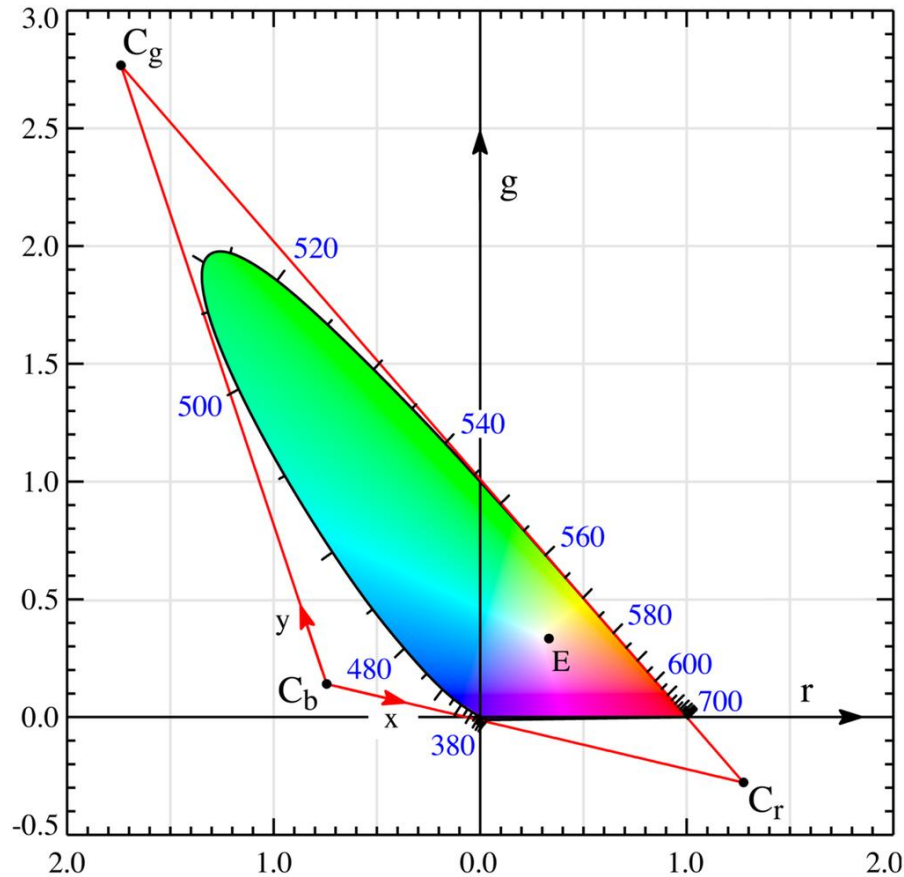
Organizace pro osvětlování (CIE, Commission internationale de l'éclairage) provedla pokus, kde žádala dobrovolníky, aby pomocí regulování výkonu tří barevných lamp mířících na stejné místo reprodukovali barvu jiného zdroje. Zvolené vlnové délky byly 700nm, 546,1nm a 435,8nm, tyto složky se nazývají primární. [3]



**Graf 3:** Závislosti funkcí pro míchání barev celého spektra [3]

Na vodorovné ose grafu 3 jsou vlnové délky, které vnímá lidské oko a na svislé ose je normovaný výkon. Grafy výkonu jsou pro část vlnových délek záporné, tyto vlnové délky, resp. barvy které představují, nelze namíchat pomocí výše zvolených primárních barev. Pro získání informace o celém viditelném spektru byl pokus pozměněn. Nedařilo-li se dosáhnout stejného barevného vjemu, byla přimíchána k referenční barvě jedna z primárních složek, tato mohutnost je pak uvedena se záporným znaménkem.

Při míchání barev lze pouze regulovat výkon primárních složek, což je v grafu 4 ilustrováno přímkou. Pro míchání všech možných barev viditelných lidským okem pomocí tří primárních složek, je nutné zvolit tyto složky mimo viditelné barvy. Pro eliminaci problému se záporným výkonem, byly definovány imaginární primární barvy a označeny XYZ. Lze přepočítat lineární transformaci z prostoru CIE RGB do CIE XYZ.



**Graf 4:** Model CIE 1931 RGB s vyznačenými imaginárními barvami, které slouží jako primární barvy modelu XYZ [3]

Vztah pro transformaci RGB do XYZ je

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{0,17697} \begin{pmatrix} 0,49000 & 0,31000 & 0,20000 \\ 0,17697 & 0,81240 & 0,01063 \\ 0,00000 & 0,01000 & 0,99000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (1)$$

## 2.4 Prostor CIE 1960 UCS

Tento model vznikl později, protože dřívější modely nerespektovaly vnímané rozdíly mezi barvami. V barevném prostoru CIE RGB modrá a červená jsou blízko sebe, zatímco zelená je vzdálená. Pro transformaci souřadnic do tohoto systému je nutné nejprve nalézt souřadnice barvy v modelu CIE XYZ z rovnice 1.

Přepočet do souřadnic probíhá podle rovnic

$$u = \frac{4x}{12y - 2x + 3}, \quad (2)$$

$$v = \frac{6y}{12y - 2x + 3}, \quad (3)$$

kde:  $x = \frac{X}{X+Y+Z}$ ,  $y = \frac{Y}{X+Y+Z}$ , X, Y jsou hodnoty vypočítané v minulé kapitole.

## 2.5 Barevná teplota

Lze najít teplotu, při které bude zářit ideální černý zářič stejnou barvou jako září zkoumaný zdroj světla. Z důvodu porovnávání k termodynamické teplotě černého zářiče, je udávána v jednotce Kelvin. Norma definuje zdroje bílého světla podle barevné teploty na teplé (< 3 000 K), neutrální (3 300 K – 5 300 K) a chladné (> 5 300 K)[4].

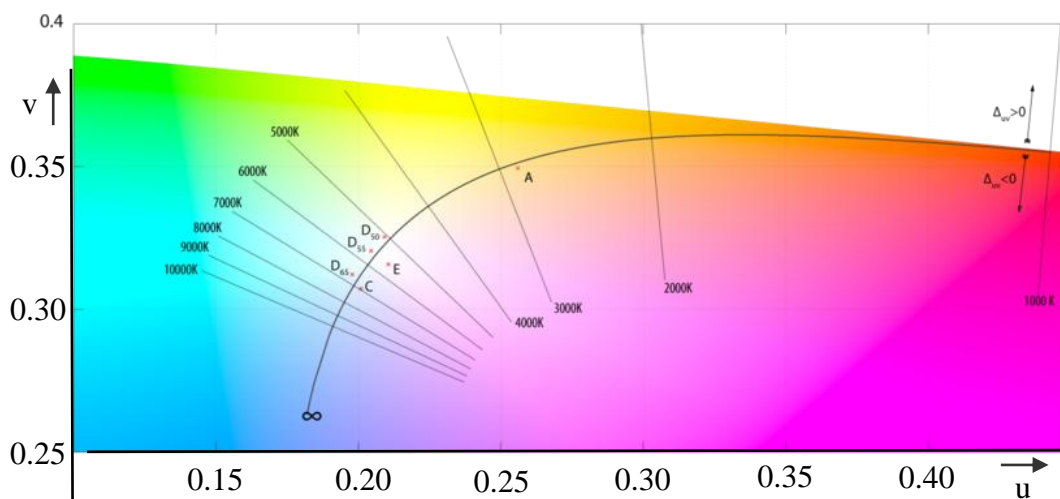
**Tab. 1:** Druhy zdrojů světla a jejich barevná teplota [5]

Zdroj	Barevná teplota [K]	Barevný tón
Svíčka	1850	Teplý (< 3 000 K)
Běžná žárovka	2800 – 2900	
Halogenová žárovka	2900 – 3000	
Slunce při východu a západu	2450 – 3500	
Oblouková lampa	4100	Neutrální (3 300 K – 5 300 K)
Denní světla na obzoru	5000	
Zářivky	6000	Chladný (> 5 300 K)
Iluminant D65	6500	
Zatažená obloha	6500 – 7500	
Modrá obloha	25000	

V tabulce 1 jsou uvedeny běžné zdroje světla a jejich barevná teplota a rozřazení podle normy.

Do barevného modelu je možné vynést křivku, která charakterizuje barvu absolutně černého zářiče v závislosti na jeho teplotě, tato křivka je literaturou označována „Planckian locus“ - Planckova oblast. Barevná teplota se potom určuje hledáním nejbližšího bodu na této křivce. Pro tento účel není vhodné používat barevný model CIE 1931, kde vnímaný rozdíl dvou barev neodpovídá vzdálenosti těchto barev v grafu. Vznikly proto modely UCS (Uniform chromaticity space), z nichž se dodnes pro hledání CCT (Correlated Colour Temperature) používá CIE 1960 UCS. Hlavní výhodou použití tohoto modelu je, že izotermy (čáry spojující odstíny se stejnou termodynamickou

teplotou) jsou kolmé ke křivce změny barvy černého zářiče. Na grafu 5 je výřez z barevného prostoru CIE 1960 UCS s vyznačenou Plackovou oblastí a s izotermami kolnými k této křivce. Délky izoterm byly stanoveny tak, aby rozdíl souřadnice zkoumané barvy a nejbližšího bodu na křivce nebyl větší než  $\pm 0,05$ . Izotermy jsou na grafu 5 vyobrazeny pro rozsah teplot 1000 K – 10 000 K s krokem 1000 K. [6]



**Graf 5:** Výřez modelu CIE 1960 s Plackovou oblastí a izotermami [6]

## 2.6 Vliv kvality osvětlení

Světelné podmínky v prostředí, kde člověk vykonává činnost přímo působí na jeho výkonnost. Mění totiž přirozený cirkadiální cyklus, podle kterého se řídí aktivní fáze člověka, typicky přes den a klidová fáze v noci. Právě narušení tohoto cyklu má za následek vznik různých poruch spánku nebo metabolismu. Hladina osvětlení v prostředí ovlivňuje produkci hormonu, který ovlivňuje spánek a bdělost jedince. [7]

Největší vliv má na biologické cykly světlo na hranici modrého viditelného a ultrafialového spektra, protože při východu slunce paprsky prochází silnější vrstvou atmosféry, a tedy jsou delší vlnové délky pohlcovány. Modré světlo s delší vlnovou délkou naopak povzbuzuje, což je dáno pozicí slunce výše nad obzorem, obloha je v takovou dobu světla modrá.

Na základě těchto okolností bývají do výrobních prostor, kanceláří a laboratoří instalována světla s vyšší barevnou teplotou. Naopak do místností určených k odpočinku a uklidnění se používají světla s nižší barevnou teplotou.

### 3. Rozbor fotometrických senzorů

S využitím teoretických poznatků z minulé kapitoly pracují zařízení pro měření vlastností světla, tento obor se nazývá fotometrie. Důsledkem snižování ceny polovodičových součástek citlivých na světlo, se fotometrie rozšiřuje do dalších odvětví průmyslu. Měřením fotometrických veličin je prováděna například kontrola kvality výrobku. Objevují se také systémy pro řízení umělého osvětlení, které mají zlepšovat pracovní prostředí.

Přístroje schopné zjišťovat barvy nebo měřit vlastnosti bílého světla se nazývají kolorimetry. Komerčně dostupné kolorimetry se vyznačují vysokou přesností a mnoha možnostmi interpretace měřených výsledků. Jsou tedy zaměřeny na vysoce přesná laboratorní měření. Vysoká kvalita zpracování se odráží ve výsledné ceně přístroje, která se pohybuje v desetitisících korun.

Existují ale aplikace, kde velmi přesná a rychlá zařízení nejsou vhodná. Například regulace výkonu umělého osvětlení, kde je přímo nežádoucí znát okamžité světelné podmínky a náklady na výrobu musí být minimalizovány. Kapitola se tedy dále věnuje stanovení požadavků, které musí integrovaný obvod pro takový kolorimetr splňovat.

Na základě stanovených parametrů bylo nalezeno několik integrovaných obvodů. Vlastnosti těchto obvodů budou porovnány a dopady těchto vlastností budou zhodnoceny s ohledem na další vývoj zařízení. Cílem tohoto postupu je vybrat nejlevnější integrovaný obvod, se kterým bude možná realizace zařízení. Výběr obvodu dále určí požadavky pro systém zpracování informací, které budou uvedeny v závěru kapitoly.

#### 3.1 Komerčně dostupný kolorimetr

Výrobce SEKONIC, zaměřující se na výrobu přístrojů pro profesionální fotografy, nabízí ve svém portfoliu produktů kolorimetr. Jedná se o přístroj Sekonic C-7000 SpectroMaster s pořizovací cenou třicet tisíc korun. Vysokou pořizovací cenu vysvětluje optický hranol. Ruční, přenosný přístroj je napájen pomocí tužkových baterií nebo připojitelným zdrojem napětí. Hlava se senzorem je připojena k přístroji pomocí kloubu, který umožňuje její otáčení. Přístroj se po každém spuštění kalibruje. Po stisknutí tlačítka na pravé straně začne měření, které trvá asi deset sekund. Naměřené hodnoty zpracuje a zobrazí na barevném dotykovém displeji. Mezi zobrazované informace patří CIE 1931 barevný prostor s vyznačenou souřadnicí, barevná teplota a intenzita osvětlení.

## 3.2 Požadavky na vlastní kolorimetr

Při návrhu vlastního kolorimetru je hlavním kritériem cena výsledného zařízení. Návrh bude směřovat ke kompaktnosti a jednoduchosti obsluhy. Zobrazovat výsledky měření bude textový LCD displej v podobě souřadnic CIE XYZ a nalezené barevné teploty. Napájení bude řešeno USB konektorem, což umožní napájení z PC, ze zásuvky s adaptérem nebo pomocí přenosného powerbanku.

Senzor je uvažováno v budoucnosti využívat pro řízení barvy osvětlení v místnosti. Takový systém by se skládal jak z části senzorké, tak z části akční. Akční člen by na základě měření řídil zdroje světla o známých parametrech. Mohl by obsahovat buďto zdroj červeného, zeleného a modrého světla nebo zdroj teplého a studeného bílého světla nebo jejich libovolné kombinace.

## 3.3 Základní charakteristiky převodníků

Základním požadavkem na senzor je jeho schopnost převádět intenzitu dopadajícího záření na lépe zpracovatelné elektrické veličiny. Vstupující světlo do senzoru dopadá na matici barevných filtrů, pod kterými se nachází fotodiody, které převádí dopadající záření na proud. Takto získaný signál je zpracováván několika metodami

- Převodníky světlo-napětí

Tuto skupinu tvoří jednoduché fotometrické senzory, sloužící například pro detekci světlo/tma.

- Převodníky světlo-frekvence

Umožňují lepší zpracování výsledků měření mikroprocesorovou technikou a zároveň poskytují možnost aplikace v čistě analogových obvodech. V této skupině se objevují komplexnější senzory rozlišující několik světelných složek.

- Převodníky světlo-digitální signál

Do této skupiny patří největší množství senzorů. Jejich výhodou je nízká náročnost na výpočetní čas, protože měření zpracovávají samy a výsledky odesílají pouze na vyžádání od mikrokontroléru, většinou pomocí sběrnice I<sup>2</sup>C.

U všech převodníků je dále definována závislost výstupní veličiny na úhlu, pod kterým záření dopadá na čip. Aktivní zóna senzoru může být provedena na straně vývodů ze součástky. V substrátu, ke kterému je taková součástka připájena, je nutné vyhotovit otvor. Hrany otvoru dále omezují úhly, pod kterými je měření stále validní.

### 3.4 Výběr senzoru světla

Hlavním kritériem pro výběr měřicího integrovaného obvodu je jeho citlivost na světlo a schopnost separace dopadajícího záření. Do výběru byly zahrnuty tři typy IO. Tabulka 2 srovnává jejich vlastnosti a na základě tohoto zhodnocení určuje ideální aplikaci těchto senzorů.

**Tab. 2:** Porovnání jednotlivých převodníků světlo – elektrický signál [11][12][13]

	OPT3006 YMFT	TCS3200	TCS3430
Nap. Napětí	1,6 V - 3,6 V	2,7 V - 5,5 V	1,7 V - 2,0 V
Barevné kanály	1	4	5
Komunikační protokol	I <sup>2</sup> C	Frekvence	I <sup>2</sup> C
Cena	45,5 Kč	83,46 Kč	*
Aplikace	luxmetry	měření barvy světla	měření barevné teploty
Měřená veličina	intenzita osvětlení	intenzita barevných složek	intenzita podle XYZ

Obvod OPT3006 byl do výběru zařazen, protože může sloužit k regulaci umělého osvětlení. Jelikož nedisponuje barevnou maticí filtrů, nelze pomocí něj určovat spektrální složení světla. Charakteristika světelného filtru použitého v tomto IO je nastavena tak, aby výstup ze senzoru popisoval intenzitu osvětlení vnímanou člověkem. Využití takového senzoru je například v přístrojích pro měření intenzity osvětlení, kterou pro specifické prostory definují platné normy.

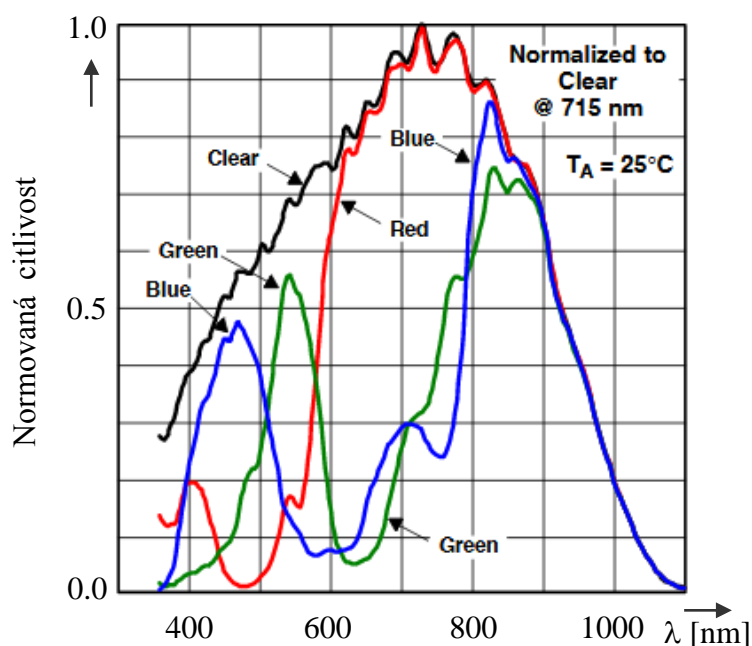
Ideálním IO pro realizaci kolorimetru je TCS3430, kterého citlivost na vlnové délky odpovídá barevnému modelu CIE XYZ. Výsledky tak dodává přímo kompatibilní s tímto barevným prostorem, odpadá proto hledání kalibrační matice pro měření různých druhů zdrojů světla. Naměřená data jsou přenášena do mikrokontroléru pomocí I<sup>2</sup>C protokolu, čímž snižuje nároky na režii. V době vypracovávání není na skladech.

Náhradou byl určen TCS3200, který disponuje jinou maticí barevných filtrů. Obvod tedy pracuje s jiným barevným prostorem než standardním CIE XYZ. Výsledek takového měření je nutné transformovat, namapovat do standardního barevného prostoru.

Je tedy nutné najít koeficienty do převodní matice. Proces hledání těchto koeficientů spočívá v zjišťování odezvy senzoru na různé barevné podněty. Pomocí vhodné transformační matice lze dosáhnout lepších výsledků než s TCS3430. Převodní výpočty později provádí mikrokontroler, čímž se zvyšují nároky na jeho výpočetní výkon.

Výstupem z tohoto senzoru je obdélníkový signál s frekvencí přímo úměrnou intenzitě dopadajícího záření na zvolený kanál. Jeden kanál je tvořen šesti fotodiodami, před kterými je zařazen filtr se stejnou charakteristikou. Kanály jsou od sebe odlišeny charakteristikou filtrů, a tedy každý kanál reaguje na jinou část světelného spektra. Přepínání mezi všemi čtyřmi kanály řídí mikrokontroler pomocí vývodů S2 a S3.

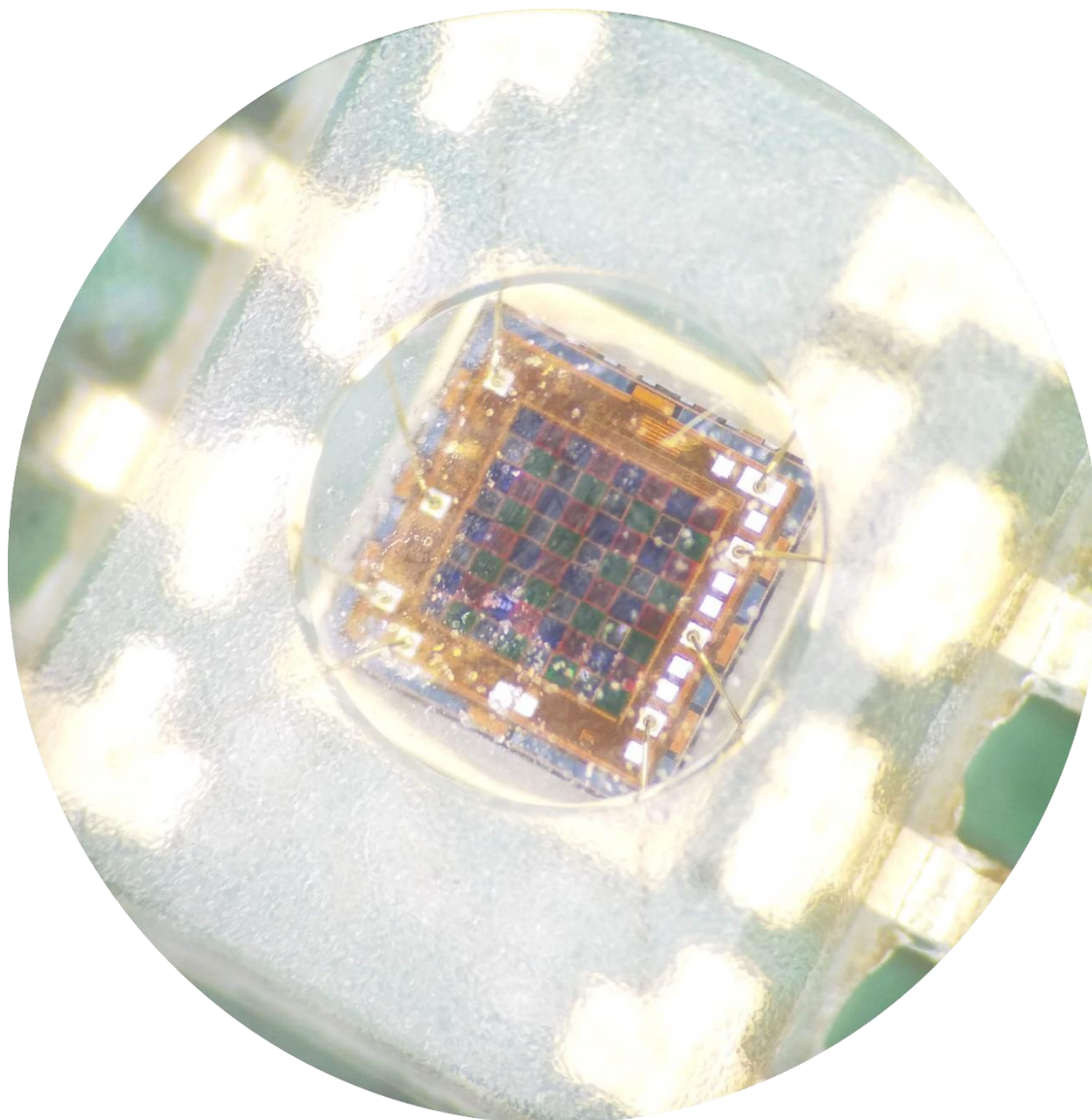
Graf 6 zobrazuje citlivosti jednotlivých kanálů v závislosti na vlnové délce. Z grafu je vidět nedostatek tohoto senzoru, nefiltruje dopadající infračervené záření. Protože na toto nežádoucí záření reagují kanály velmi intenzivně, lze pomocí porovnávání výsledků z jednotlivých kanálů, určit kdy k takovému ovlivnění došlo.



**Graf 6:** Spektrální citlivost obvodu TCS3200 [12]

Zjišťování intenzity probíhá počítáním nástupných hran za jednotku času. Tato perioda stanovuje délku měření. Příliš krátká doba bude mít za následek nepřesná měření například vlivem přechodných dějů.

Pod mikroskopem je možné pozorovat aktivní plochu snímače a před ni vloženou matici barevných filtrů. Vidět jsou i jednotlivé bondovací drátky zabezpečující vodivé spojení křemíkového čipu k vývodům integrovaného obvodu.



**Obr. 2:** Detail aktivní plochy světelného senzoru

## 4. Systém zpracování informací ze senzoru

Pro zpracování informace z převodníku světlo – frekvence by bylo možné použít čistě analogový obvod. Výstup obvodu mohl být připojen k filtru typu horní propust, a řídicí signály S2 a S3 by mohl přepínat obvod s komparátorem. Toto řešení by ale neumožnilo zobrazení výsledků výpočtů na displeji.

Činnost takového komplexního analogového obvodu dokáže nahradit dobře zvolený mikrokontroler. Minulá kapitola definovala mnoho požadavků na zpracování a zobrazení výsledků. Toto shrnutí vstupuje do procesu výběru vhodného mikrokontroleru.

### 4.1 LCD displej

Aby bylo výsledné zařízení více kompaktní a nemuselo být připojeno k počítači pro zobrazování výsledků měření, je zamýšleno zobrazovat statistiky měření pomocí textového displeje. Záměrem je na displeji zobrazovat výsledky z měření barevné teploty. V případě, kdy bude probíhat měření, zobrazit na displeji informaci o průběhu měření. Bez této informace by uživatel snadno nabyl dojmu, že v průběhu měření zařízení přestalo pracovat. Zobrazované znaky musí být dostatečně velké pro snadnou čitelnost. Komfort dále zlepší podsvícení displeje.

### 4.2 Výběr řídicího mikrokontroléru

Nároky na mikrokontroler jsou dány periferiemi, se kterými bude spolupracovat. V minulé kapitole byl zvolen senzor, který definuje největší počet nároků. Dále představu upřesňuje předpokládané využití výrobku.

- Kompatibilní napájecí úroveň
- Počet pinů pro komunikaci s displejem a snímacím IO
- Paměť pro uložení koeficientů transformační matice
- Výpočetní výkon pro transformace barevných prostorů

Výběr je podřízen snaze o nízkou spotřebu elektrické energie a nízké pořizovací náklady. Porovnávány byly tři mikrokontroléry, které zastupují rozdílné architektury a splňují stanovená kritéria.

**Tab. 3:** Srovnání jednotlivých mikrokontrolerů [14][15][16]

	MKE02Z32VQH2	MSP430FR4133	ATMEGA328P
Šířka sběrnice	32 b	16 b	8 b
Čítače	32 b	2, 16 b každý	16 b + 2 x 8 b
AD převodníky	12 b	10 b	10 b
Napájecí napětí	5 V	3,3 V	5 V
Max frekvence	20 MHz	16 MHz	16 MHz
V/V porty		60	23
Klidový proud		1 mA	9 mA
Provedení	SMD QFP-64	SMD LQFP-64	SMD TQFP-32
Cena	72,80 Kč	68 Kč	44 Kč

Všechny mikrokontroléry zařazené do srovnání byly vybrány podle kritérií stanovených dříve. Všechny z těchto obvodů jsou použitelné pro realizaci zařízení. Důležité vlastnosti těchto obvodů jsou uvedeny pro přehlednost v tabulce 3. Pro výsledné zařízení byl vybrán takový obvod, který lze pořídit s nejnižšími náklady.

ATmega328P-AU nabízí právě dostatečný výpočetní výkon pro zpracování měřených hodnot a také počet pinů pro propojení se senzorem a displejem LCD. Je možné oba napájet stejným napájecím napětím, odpadá tak generátor různých napájecích napětí a převodník logických úrovní.

### 4.3 Požadavky na obslužný program

Program musí odpovídat požadavkům, které vyplývají ze zamýšleného využití výrobku a z vybraných komponent. Použitý senzor vyžaduje přepínání měřeného kanálu. Program tedy zvolí měřený kanál a po vhodně zvolenou dobu počítá nástupné hrany signálu generovaného senzorem. Po uběhnutí této doby musí program zvolit další kanál a zjistit počet impulsů z dalšího barevného kanálu. Proces se opakuje pro všechny čtyři kanály. Při měření vysokých intenzit, by mohl být počet nástupných hran příliš vysoký, registr mikrokontroléru by mohl přetéct. Senzor umožňuje mikrokontroleru volit děličku výstupní frekvence, která sníží počet impulsů. Se znalostí vlastností zvolené děličky lze v programu vynásobit počet impulsů koeficientem dělení, čímž získá původní počet impulsů. Tímto je proces měření dokončen.

V běhu programu navazuje prvotní zpracování měřených dat, například zahození prvního impulsu nebo porovnání aktuálního měření s předchozími hodnotami. Měřením jsou zjištěny intenzity dopadajícího záření. Jelikož výsledek měření není kompatibilní s barevným modelem CIE XYZ, nelze na základě těchto hodnot určit souřadnice

ve standardních barevných prostorech, není tedy možné hledat barevnou teplotu. Výsledky je nutné transformovat pomocí matice

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A \times \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}, \quad (4)$$

kde X, Y, Z jsou souřadnice CIE XYZ, R, G, B jsou naměřené výsledky a A je transformační matice

$$A = \begin{pmatrix} K1_r & K1_g & K1_b \\ K2_r & K2_g & K2_b \\ K3_r & K3_g & K3_b \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_1 & G_1 & B_1 \\ R_2 & G_2 & B_2 \\ R_3 & G_3 & B_3 \end{pmatrix}^{-1}, \quad (5)$$

kde Kx jsou koeficienty r, g, b, naměřené kalibračním přístrojem a R, G, B jsou naměřené hodnoty přístrojem, pro který zjišťujeme transformační matici A. Tento postup pro transformaci byl nalezen v článku [17] Nalezení koeficientů bude předmětem pokračování vývoje kolorimetru.

Dále byla v požadavcích nastíněna možnost zobrazování na LCD displeji. Výsledný program tedy musí vykonávat všechny tyto funkce:

- Přepínat barevné kanály senzoru a zjistit počet impulsů
- Převézt impulsy do souřadnic barevného modelu XYZ
- Vypočítat barevnou teplotu
- Zobrazit výsledek měření na display a odeslat na sériovou linku

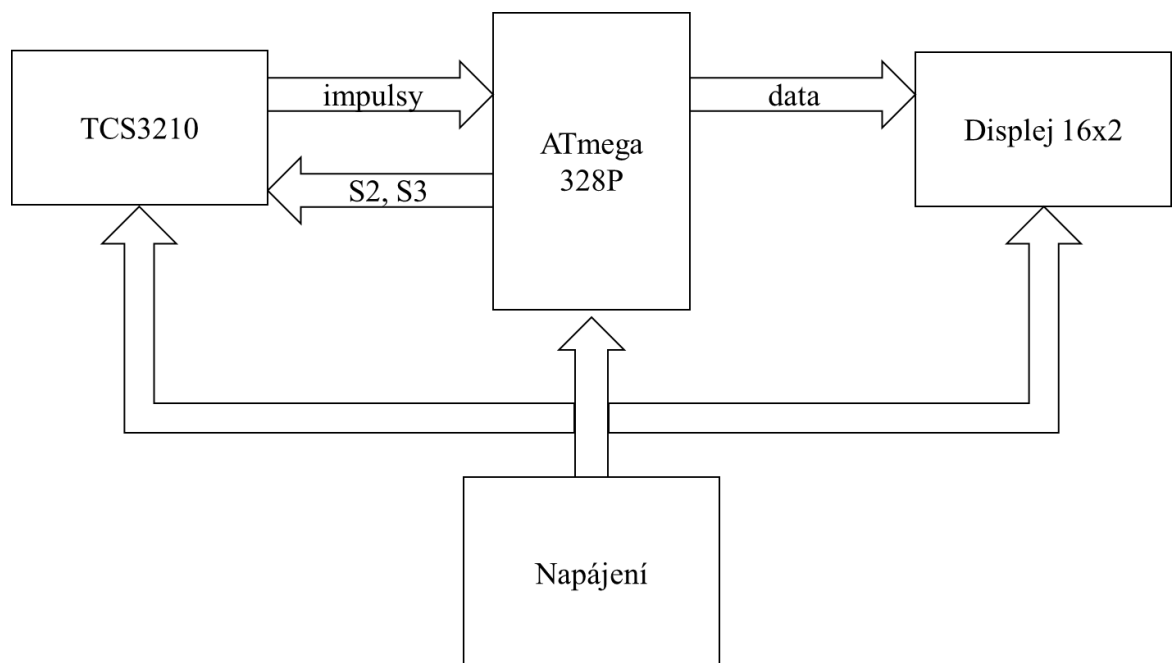
## 5. Ověření konceptu

Výstupy z předchozích kapitol dohromady tvoří celek, kterého funkčnost je možné ověřit. Tímto postupem by mohly být odhaleny nedokonalosti zařízení, které by mohly bránit ve využívání přístroje. Pro ověření konceptu je nutné sestavit blokové schéma zapojení jednotlivých komponent a vytvořit vývojový diagram popisující obslužný program pro mikrokontrolér.

Pro ověření funkčnosti jednotlivých komponent byly pořízeny samostatné moduly využívající jednotlivé komponenty, ze kterých se bude výsledné zařízení skládat. Tyto moduly nijak nemění principy funkce součástí, ale usnadňují jejich propojení pomocí několika málo vodičů.

### 5.1 Blokové schéma prototypu

Blokové schéma znázorňuje vazby mezi jednotlivými komponenty navrhovaného zařízení. Pomocí schématu lze vytvořit všechna fyzická propojení tak, aby výsledné zapojení fungovalo podle dříve probíraných nároků na funkci zařízení. Navržené schéma na obrázku 2, bude fungovat jak pro pokusné zapojení, pro ověření konceptu, tak pro finální zařízení se schopností určovat barevnou teplotu.






**Obr. 3:** Blokové schéma kolorimetru

Řídící blok ATmega328P je v návrhu umístěn doprostřed a znázorňuje vybraný mikrokontrolér. Tento ovládá proces měření snímačem TCS3200 pomocí signálů S2 a S3

Senzor podle řídicích signálů přepíná měřené kanály a výsledky odesílá zpět do mikrokontroléru, protože výstupní veličinou je frekvence obdélníkového signálu, je tato vazba označena šipkou s nápisem „impulsy“. Mikrokontroler podle řídicích signálů provádí nad vstupními informacemi výpočty. Do tohoto procesu mohou vstupovat transformační matice, pro přepočítání do barevného systému CIE XYZ a dále výpočty pro zjišťování barevné teploty. Ověřovací vzorek se těmito pokročilými funkcemi nezabývá.

## 5.2 Prototyp

Stavba prototypu měla za cíl ověřit všechny funkční bloky a propojení mezi nimi. Sestavení proběhlo podle blokového schématu. Do mikrokontroléru byl nahrán ověřovací software, který zobrazoval počty impulsů z jednotlivých kanálů. Prototyp tedy nebude schopen určovat barevnou teplotu ani souřadnice v prostoru CIE XYZ. Po sestavení ověřovacího vzorku byla ověřena funkce zařízení tak, že senzor i tříbarevná LED dioda byly vloženy do boxu, pro minimalizaci vlivu okolního světla. Postupně na senzor dopadaly červená, zelená a modrá barva z LED diody. Test byl považován za úspěšný, pokud při svitu červenou barvou vzroste na displeji zobrazovaná hodnota u písmene R, podobně pro další barvy.

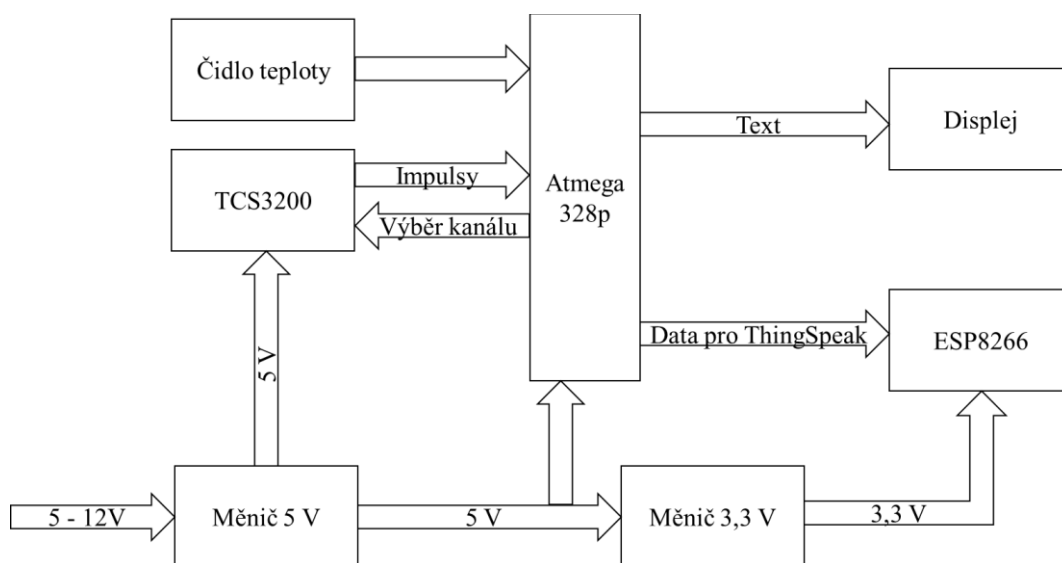
A)		Osvit senzoru červenou LED
B)		Osvit senzoru zelenou LED
C)		Osvit senzoru modrou LED

**Obr. 4:** Fotografie displeje po expozici senzoru různými barvami

Obrázky 5 A, B, C zobrazují tři různé výstupy na displej prototypu. Postupně byl senzor exponován třemi barvami světla. Zdrojem světla byla RGB LED dioda. Výsledky z tohoto měření odpovídají předpokladům, senzor reaguje na jednotlivé barvy a výsledky jsou zobrazovány podle programu v mikrokontroléru. Pokud není LED v činnosti, zobrazované hodnoty jsou nulové. Protože se charakteristiky barevných filtrů senzoru TCS3200 překrývají, dochází při osvětlení k expozici všech kanálů. Dominantně však reaguje pouze kanál korespondující s barvou záření.

## 6. Konstrukce zařízení

Prototyp vytvořený v minulé kapitole ověřil základní funkce zařízení. Provedení prototypu ale neodpovídalo požadavkům moderní doby na elektrotechnické zařízení. Proto bylo nutné navrhnout plošný spoj. Před návrhem plošného spoje bylo vytvořeno nové blokové schéma, jelikož se finální zařízení bude v několika aspektech lišit od prototypu. Do nového blokového schématu byly dodány bloky měření teploty a modul ESP8266. Blokové schéma je zobrazeno na obrázku 6.



**Obr. 5:** Blokové schéma finálního návrhu zařízení

Deska plošného spoje zajišťuje elektrické propojení a zároveň fyzickou podporu součástkám. Odvádí odpadní teplo a zlepšuje tak spolehlivost. Základní požadavek na nízkou cenu zařízení určuje také malou plochu navrhované DPS a využití součástek pro povrchovou montáž.

Plocha plošného spoje byla rozdělena na dvě přibližně stejně velké části, v první části je osazen zdroj napájecího napětí 5 V a ve druhé sídlí mikrokontrolér, čip citlivý na světlo, displej a další podpůrné pasivní prvky. Také jsou v této části hřebenové vývody pro programování mikrokontroléru a ladění řídicího software. Pro kompatibilitu zařízení s internetem věcí, byl na DPS připraven port pro připojení Wi-Fi modulu ESP 8266, pro který bylo nutné navrhnout 3,3 V zdroj napájení.

## ■ Zdroj 5 V

Aby bylo možné napájet zařízení širokým rozsahem napětí a zároveň aby nevznikalo nepřiměřené množství tepla, bylo nutné navrhnout spínaný DC – DC měnič. Základním principem takového měniče je střídavé nabíjení a vybíjení setrvačného prvku (cívky). Měnič pracuje ve dvou fázích. V první je zdroj napětí připojen k sériové kombinaci cívky a zátěže. V této fázi se kolem cívky vytváří magnetické pole, které ve druhé fázi, po odpojení napájecího zdroje, vytvoří na cívce elektrické napětí.

Připojování a odpojování napájecího napětí řídí integrovaný obvod. V zahraniční literatuře označovaný „buck converter“. Tento obvod má také za úkol měnit poměr mezi dobou kdy je zdroj připojen nebo odpojen. Tento poměr se nazývá střída a její velikost je úměrná výstupnímu napětí a připojené zátěži. Integrovaný obvod sleduje napětí za kapacitorem, a podle porovnání s vnitřní referencí řídí střidu. Díky tomu je schopen pracovat s různými vstupními napětími. Připojení další zátěže paralelně k výstupní kapacitě má za následek rychlejší pokles napětí ve zpětné vazbě, a tedy změnu střídy. Takto je docíleno stabilizace výstupního napětí.

Výše popsaný princip změny napětí efektivně využívá energii dodávanou zdrojem, nikde nedochází k přeměně přebytečné energie na teplo, jako u lineárních regulátorů.

Kritéria pro výběr vhodného buck converteru vyplývají z předpokládaného proudového odběru součástí jím napájených, požadavku na povrchovou montáž, pro odvod odpadního tepla a nízké ceny. Níže je uveden seznam součástí s nejvyšším proudovým odběrem a jejich maximální spotřeba, která je určena podle dat z katalogových listů:

- Mikrokontrolér – maximální spotřeba 250 mW [16]
- Světelný senzor – maximální spotřeba 10 mW [8]
- Wi-Fi modul – proudová spotřeba 850 mW [21]

Teoretická maximální spotřeba těchto součástí nepřesáhne 2 W i se zahrnutím spotřeby pasivních prvků, což definuje proudové kritérium integrovaného obvodu.

Níže v tabulce 4 jsou shrnuty charakteristiky různých integrovaných obvodů, z tohoto porovnání byl vybrán nejvhodnější.

**Tab. 4:** Porovnání obvodů pro řízení spínaného zdroje

	LM2575	LM2575	MIC4575
Výrobce	ON Semi	Texas Instruments	Microchip
Spínací frekvence	52 kHz	52 kHz	200 kHz
Výstupní proud	1 A	1 A	1 A
Pouzdro	TO 263	TO 263	TO 263
Cena	48,8 Kč	74,8 Kč	67,8 Kč

Výrobce integrovaného obvodu pro řízení DC – DC měniče udává v katalogovém listu nominální hodnoty induktoru pro různá rozpětí napájecích napětí, stejně jako doporučené rozmístění induktoru a filtračních kapacit na desce plošného spoje. Podle tohoto doporučení byla zvolena cívka o indukčnosti 330 $\mu$ H, která odpovídá napájecímu napětí 7 V až 24 V. O filtraci vstupního i výstupního napětí se starají elektrolytické kondenzátory, vstupní s kapacitou 100  $\mu$ F a výstupní s kapacitou 330  $\mu$ F. Kapacity byly také zvoleny podle doporučení výrobce.

## ■ Zdroj 3,3 V

Volitelné rozšíření zařízení, připojení modulu pro komunikaci výsledků měření přes Wi-Fi přineslo požadavek na vytvoření 3,3 V napájecí větve. Napájení této větve bylo vyřešeno lineárním regulátorem s nominální hodnotou výstupního napětí 3,3 V. Lineární regulátor byl zapojen za měnič popsany v minulé kapitole, tedy úbytek napětí na něm bude 1,7 V. Tento nižší úbytek napětí a maximální proudový odběr udávaný výrobcem modulu ESP 8266 je 170 mA a obhazuje použití lineárního regulátoru, jelikož ztrátové teplo bude malé [21]. Spínaný měnič si vyžádal polovinu plochy na DPS, zatímco obvod s regulátorem využil volný prostor mezi ostatními součástkami, díky čemuž nebylo nutné zvětšovat plošný spoj.

Principem činnosti lineárních regulátorů je využití tranzistoru jako jedné poloviny napět'ového děliče. Výstupní napětí z regulátoru je porovnáváno s jeho vnitřním zdrojem referenčního napětí. Tato zpětná vazba upravuje napětí na řídicí elektrodě tranzistoru, čímž se mění dělicí poměr napět'ového děliče a v konečném důsledku mění výstupní napětí.

Jelikož jedinou součástí napájenou z této napěťové větve je Wi-Fi modul, byl výběr správného regulátoru jednodušší a odpadá analýza maximálních proudových odběrů. Jelikož pro zařízení musí být schopno pracovat bez připojeného Wi-Fi modulu, bylo nutné hledat takový regulátor, který bez zátěže nebude oscilovat. Regulátor vhodný pro aplikaci v zařízení musí splňovat tyto požadavky: nízké  $U_{DO}$ , pouzdro pro povrchovou montáž, nízká cena, maximální výstupní proud 0,5 A a schopnost regulovat s odpojenou zátěží. Výstupní proud je volen tak, aby i při maximální zátěži nebyl regulátor provozován v limitním režimu, což si klade za cíl zvýšit spolehlivost výsledného zařízení.

V tabulce 5 je uvedeno několik regulátorů, pro porovnání charakteristik jednotlivých integrovaných obvodů. Výstupem z tabulky bude vhodný integrovaný obvod pro využití v zařízení [18] [19] [20].

**Tab. 5:** Srovnání několika lineárních regulátorů

	MCP1825	MIC5239	MIC5209
Regulace bez zátěže	Ne	Ne	Ano
Výstupní proud	500 mA	500 mA	500 mA
$U_{DO}$	210 mV	350 mV	350 mV
Pouzdro	SOT 223-3	SOT 223-3	SOT 223-3
Cena	11,6 Kč	59,9 Kč	27,8 Kč

Kvůli požadavku na stabilitu při odpojené zátěži nebylo možné využít nejlevnější součástky. Byla proto nalezena alternativní součástka, která splňuje veškerá kritéria, za cenu zvýšené nákupní ceny.

Výrobce zvoleného regulátoru v datovém listu definuje, jaké kondenzátory je nutné připojit paralelně k vstupním a výstupním vývodům pro zabránění oscilací obvodu. Výstupní kondenzátor musí vykazovat nízký ekvivalentní sériový odpor (ESR), aby se předešlo rozkmitání obvodu, tuto podmínku plní tantalové kondenzátory [19]. Vstupní kondenzátor není výrobcem vyžadován, nicméně pro zajištění bezproblémové funkce byl zařazen paralelní kapacitor 100 nF. Na výstupní kondenzátor je kladena podmínka nízkého ESR, tudíž byl zvolen tantalový kapacitor s kapacitou 22  $\mu$ F.

## ■ Návrh digitální části zařízení

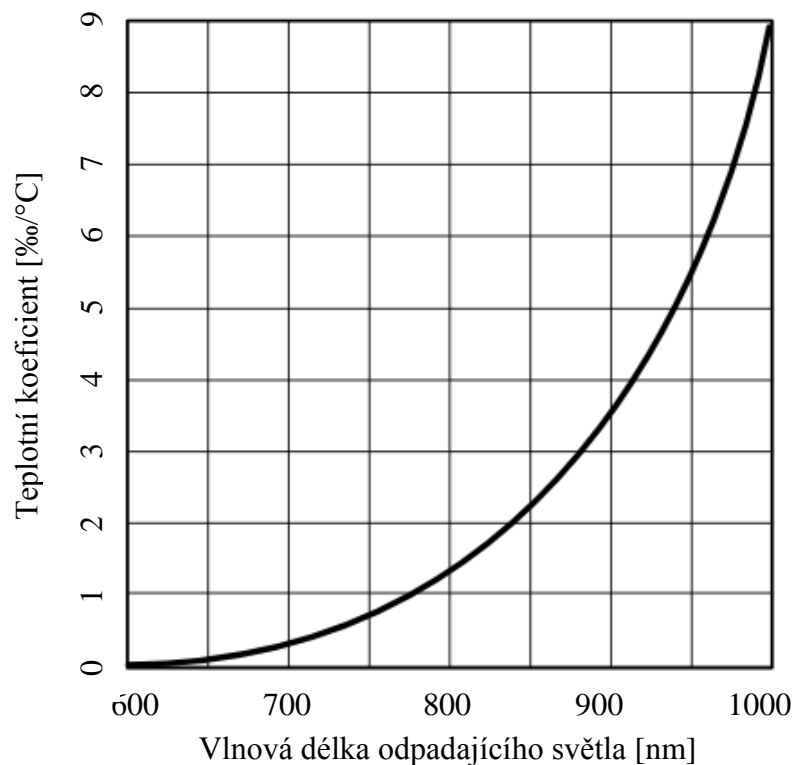
Digitální část zařízení je tvořena mikrokontrolérem, světelným senzorem a displejem. Všechny tyto součásti jsou napájeny ze spínaného zdroje 5 V. DPS tvoří propojovací strukturu mezi těmito součástmi a zabezpečuje elektricky vodivé spojení. Souhrn potřebných signálů byl uveden v kapitole pojednávající o vlastnostech světelného snímače. Pro zajištění nerušené komunikace mezi světelným snímačem a mikrokontrolérem bylo nutné zajistit krátkou délku propojů.

Dále pro činnost mikrokontroléru bylo nutné připojit oscilátor tvořený krystalem a dvojice filtračních kondenzátorů. Délka vodičů připojujících oscilátor musí být nejmenší možná, jinak hrozí zašumění hodinového signálu. Frekvence oscilátoru byla zvolena podle výrobce mikrokontroléru [16],

V blízkosti mikrokontroléru byly umístěny na plošném spoji také hřebenové vývody pro programování a ladění firmware. Vyvedeny byly signály RXD, TXD, MOSI, MISO, SCK a RESET, stejně jako GND a +5V. Díky těmto signálům je možné nejen mikrokontrolér programovat, ale také napájet celé zařízení v případě poruchy v napájecí části. Hřebenové vývody byly umístěny po obvodu desky plošného spoje tak, aby nepřekážely dopadajícímu světlu na senzor, což platí i pro rozšiřující Wi-Fi modul. Displej je k zařízení připojen pomocí čtyř vodičů, dva pro napájení a dva pro sériovou komunikaci. Připojení displeje k desce plošného spoje je možné dvěma způsoby, pro snadnou změnu orientace textu. V rámci firmwaru je možné nastavovat různou velikost a druhy fontů.

## ■ Měření teploty

Jelikož světelný snímač využívá fotoelektrický jev, je měření ovlivněno teplotou okolní atmosféry, ve které se měření provádí. Závislost změny výsledku měření dokumentuje výrobce v katalogovém listu [12].



**Graf 7:** Závislost chyby měření při změně teploty pro jednotlivé vlnové délky TCS3200 [12]

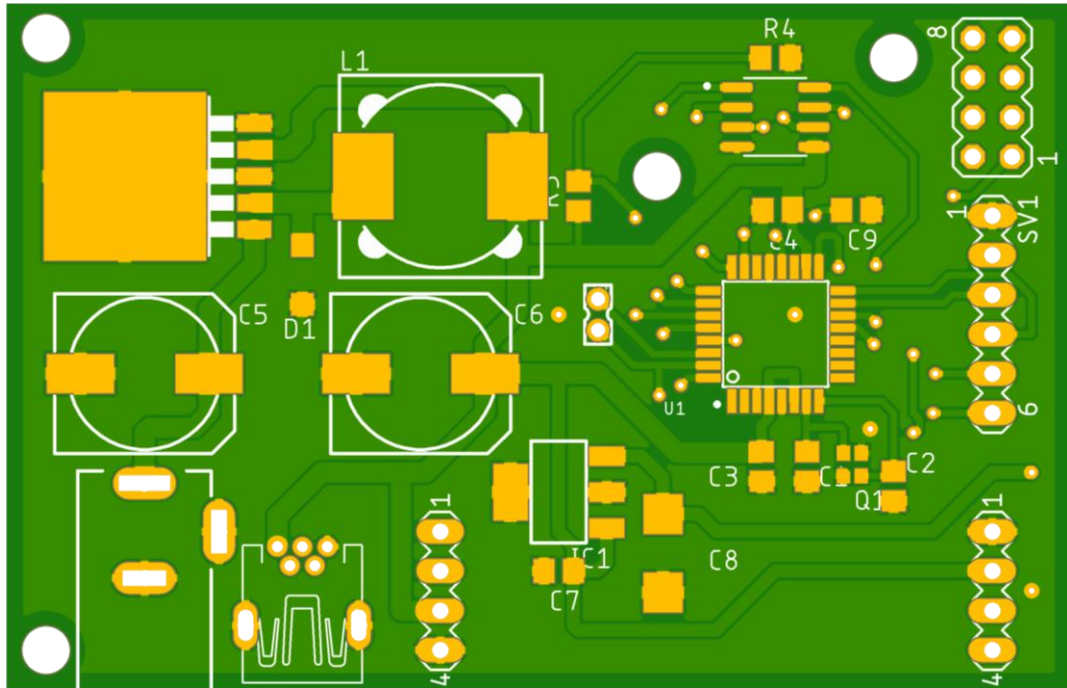
Zpočátku návrhu bylo uvažováno měření teploty čipu pomocí měření proudu protékajícího skrze ochranné diody na křemíkovém substrátu. Tyto diody jsou v běžném pracovním režimu připojeny v závěrném směru. V případě změny napětí na chráněném pinu nad napájecí napětí nebo pod napětí svorky GND, dojde k otevření jedné z ochranných diod, vytvoří se vodivá cesta pro odvod nebezpečného proudu a nedojde tak k poškození čipu. Princip metody spočívá v připojení zápornějšího napětí než napětí na pinu GND měřeného čipu a následném měření proudu ochrannou diodou, který je závislý na teplotě PN přechodu. Teplota změřená touto metodou odpovídá teplotě přímo na čipu, čímž je velice přesná, jelikož teplo nemusí přestupovat přes několik vrstev materiálů. Metoda vyžaduje možnost nastavení pinů integrovaného obvodu do režimu vysoké impedance, jinak hrozí poškození čipu z důvodu přepólování. Realizace takového měření vyžaduje zdroj vhodného napětí, dále řídicí logiku, která bude měřící napětí připojovat pouze v okamžiku měření a převodník proudu na napětí, aby bylo možné toto měření provádět mikrokontrolérem.

Při uvažování chyby způsobené změnou teploty substrátu, která v pásmu viditelného světla podle výrobce neroste nad 1000 ppm/°C, a zahrnutí dalších výdajů na nákup několika dalších součástek, je taková metoda značně nevýhodná. Konstrukce zařízení by se dále prodražila, jelikož by bylo nutné navrhnout plošný spoj větší o plochu využitou měřicím obvodem.

Z těchto důvodů bylo využito jiného způsobu měření teploty zařízení, a to pomocí termistoru umístěného v blízkosti světelného snímače. Elektrický odpor termistoru klesá s teplotou, je-li takový termistor součástí napěťového děliče, je výstupní napětí funkcí teploty. Velikost tohoto napětí je snímána AD převodníkem integrovaným v mikrokontroléru. Teplota naměřená tímto způsobem neodpovídá přímo teplotě na křemíku senzoru, ale teplotě jeho bezprostředního okolí. Proud protékající senzorem uváděný v předchozích odstavcích nezpůsobí přílišné přehřívání integrovaného obvodu. Jeho teplota je tedy ovlivňována teplotou okolí atmosféry a plošného spoje, kterou měří sousedící termistor.

## 6.5 Souhrnné informace o plošném spoji

Na desku plošného spoje byly umístěny všechny dříve analyzované součásti. Při rozmisťování jednotlivých prvků byl brán ohled na odpadní teplo vznikající zejména v obvodech generujících napájecí napětí. Z pohledu elektromagnetické kompatibility byla využita technika rozlité mědi, pro vytvoření dobře vodivé plochy nulového potenciálu. Do plošného spoje jsou v okolí světelného snímače vytvořeny kruhové otvory o průměru 3 mm, pro možnost připojení optického zařízení před aktivní plochu senzoru. Další kruhové otvory jsou v levé části DPS, připraveny pro montáž plastových nožiček, aby nedošlo k vyzkratování signálových cest o vodivou podložku. Výsledné rozměry DPS jsou 45 mm × 70 mm (v. × š.) a plocha tedy 31,5 cm<sup>2</sup>.



**Obr. 6:** Návrh plošného spoje

Obrázek 6 dobře ilustruje rozdělení plochy na dvě podobně velké části, vlevo část zdroje a vpravo část digitální. Většina konektorů je seřazena v pravé části desky, z důvodu snadného přístupu světla k aktivní ploše senzoru. Výjimku tvoří ve spodní části umístěný port displeje. Dva porty po čtyřech vodičích umožňují snadnou změnu orientace textu na displeji, což zlepšuje čitelnost displeje při odečítání hodnoty.

Zařízení může být napájeno jedním ze tří konektorů, dva z nich obchází zdroj 5 V umístěný na DPS. Jedná se o konektor mini USB a hřebenový kontakt v pravé části desky. Konektor jack umístěný v levém rohu DPS je připojen ke vstupu 5 V zdroje, a tedy k němu může být připojeno napájecí napětí různých hodnot.

## 6.6 Cena výsledného zařízení

Při výběru všech součástí byl kladen velký důraz, na minimalizaci cen, což se projevilo i v návrhu desky plošného spoje, pro úsporu plochy jsou umístěny součástky i ze spodní strany. Optimalizace nákladů však byla prováděna s ohledem na kvalitu součástí, použity byly komponenty renomovaných výrobců, aby se předešlo ztrátě spolehlivosti. Tabulka 6 přehledně zobrazuje ceny jednotlivých součástí.

**Tab. 6:** Přehled cen jednotlivých dílů

Položka	Cena v CZK (s DPH)
Pasivní součástky	150,-
Mikrokontrolér	41,3
Světelný senzor	42,6
DC-DC měnič	48,8
3,3 V regulátor	27,-
Displej	210,-
Deska plošného spoje	740,-
Celkem	1 260,-

Největší položkou byla zakázková výroba plošného spoje, jelikož výrobce si účtuje do výměry 1 dm<sup>2</sup> stále jednotnou cenu.

## 6.7 Firmware

Firmware nahraný v mikrokontroléru byl navržen tak, aby měření probíhalo bez zásahů uživatele, ihned po připojení napájecího napětí. Firmware tedy v první řadě inicializuje sériovou komunikaci pro Wi-Fi modul a dále nastavuje piny jako vstupní a výstupní. Poté inicializuje světelný senzor nastavením příslušného pinu do log. 0. Další kroky se opakují, dokud není zařízení odpojeno od napájecího zdroje.

K zjišťování vstupní frekvence, generované světelným senzorem slouží funkce `edge_detector()`, která je při změně logické hodnoty na výstupním pinu světelného senzoru rovna log. 1. Tato funkce je volána funkcemi `measR/G/B/C(kolikrat)`, které zjišťují intenzitu dopadajícího světla na jednotlivé barevné kanály. Parametr „kolikrat“ určuje kolik měření se sečte, a výsledná hodnota se tímto číslem vydělí, funkce `measR/G/B/C(kolikrat)` tedy vrací aritmetický průměr z tolika měření, kolik nastaví parametr. Tyto funkce jsou volány postupně funkcí `measCCT(kolikrat)`, která změří intenzity dopadajícího záření na jednotlivé kanály, a pokud není intenzita příliš nízká nebo teplota snímaná termistorem příliš vysoká provede přepoččet naměřených hodnot do prostoru CIE XYZ a najde barevnou teplotu. V posledním kroku je výsledek měření zobrazen na displeji a odeslán do Wi-Fi modulu.

## 7. Výstupy bakalářské práce

V této kapitole budou řešeny otázky oživení, tedy prvního spuštění zařízení. Také budou uvedeny případné problémy, které byly při procesu oživování odhaleny, a jejich řešení. Žádné problémy, které by znemožňovaly využití k primárnímu účelu, tedy měření CCT, nebyly odhaleny, což dokladuje vysokou kvalitu designu plošného spoje a dobrý výběr použitých součástek.

Na druhou stranu, při oživování, a hlavně při ladění firmware, byly odhaleny některé odchylky od původního záměru, tyto se podařilo vyřešit v rámci úpravy firmware. Nebylo tedy nutné nijak upravovat vodivé spoje na DPS. Těmto se bude věnovat další podkapitola.

V procesu oživení také došlo k několika měřením, které měly za cíl ověřit, pracují-li jednotlivé funkční celky podle záměru. Pořadí těchto zkoušek hrálo důležitou roli, neboť před testováním činnosti mikrokontroléru, bylo nutné mít jistotu, že napájecí zdroj pracuje správně. Poté proběhla první měření se světelným snímačem, zkoušky rozsahu napájecích napětí, kontroly napětí na výstupu spínaného a lineárního zdroje.

### 7.1 Kontrola napěťových měničů

V průběhu osazování desky plošného spoje součástkami bylo provedeno první měření, a to měření výstupních napětí z napájecích měničů. Jelikož byla naměřena správná napětí jak na výstupu 5 V tak na 3,3 V větvi, byla potvrzena správná činnost měničů a mohla být deska osazena dalšími součástkami, které by mohly být nesprávným napájením zničeny.

Později, měřením na již sestaveném zařízení, byly experimentálně ověřeny krajní hodnoty přípustného napájecího napětí přiváděného na napájecí konektor typu jack. Jelikož byl tento konektor zamýšlen jako primární napájecí vstup a aby bylo možné napájet zařízení různými zdroji napětí, bylo nutné změřit od jakého napětí bude spínaný zdroj dodávat napětí 5 V pro další obvody zapojené na jeho výstup.

Další část zkoušky mohla proběhnout až po odladění základních funkcí firmwaru, jelikož činnost mikrokontroléru ovlivňuje spotřebu zařízení. Dolní hranice vstupního napětí byla zjištěna 4,8 V a horní byla naměřena 15 V. Součástky využitě ve spínaném zdroji jsou dimenzovány až na vstupní napětí 24 V. Provoz zařízení s takto vysokým vstupním napětím není cílem návrhu, tedy ani této práce. Bezpečně je možné napájet

zařízení zdroji s výstupním napětím v rozsahu 5 V až 12 V. Příkon zařízení byl naměřen do 0,5 W a je mírně závislý na napájecím napětí.

Zařízení je dále možné napájet pomocí konektoru typu mini USB nebo hřebenových vývodů. Na tyto konektory je nutné připojovat zdroje s výstupním napětím 5V, jelikož nejsou nijak chráněny.

### 7.1.1 Výstup z měření napětí na výstupu měničů

Veličina	Hodnoty
Rozsah napájecích napětí	5 V – 12 V

## 7.2 Čidlo teploty

Pro určování teploty atmosféry, za které probíhá měření bylo navrženo čidlo s termistorem. Termistor je součástí rezistorového děliče napětí, a tedy výstupní napětí děliče se mění s teplotou. Toto napětí je přivedeno na integrovaný AD převodník v mikrokontroléru, výstupem je tedy 10bitové číslo. Toto číslo není nutné pro činnost zařízení převádět na stupně Celsia, postačí znát jeho hodnotu při měření kalibračních hodnot a proti ní porovnávat při každém dalším měření. Dělič byl navržen tak, aby při pokojové teplotě bylo na jeho výstupu polovina napájecího napětí a s rostoucí teplotou tato hodnota klesala. Při ověřování funkce této periferie bylo číslo na výstupu AD převodníku v rozmezí 540 až 560, což splňuje podmínku kladenou při návrhu.

Dále pro zjištění strmosti charakteristiky proběhla druhá zkouška. Pomocí regulovatelné horkovzdušné pájecí stanice, byl senzor zahříván na teplotu přibližně 160 °C. Při této zkoušce se na výstupu AD převodníku zobrazila dekadická hodnota 45. Tato zkouška měla za cíl ověřit, nedojde-li při běžné činnosti zařízení ke ztrátě důvěryhodného signálu z čidla. Tento stav by mohl nastat, pokud by odpor termistoru přestal od nějaké teploty klesat.

## 7.2.1 Výstup z měření teplotním senzorem

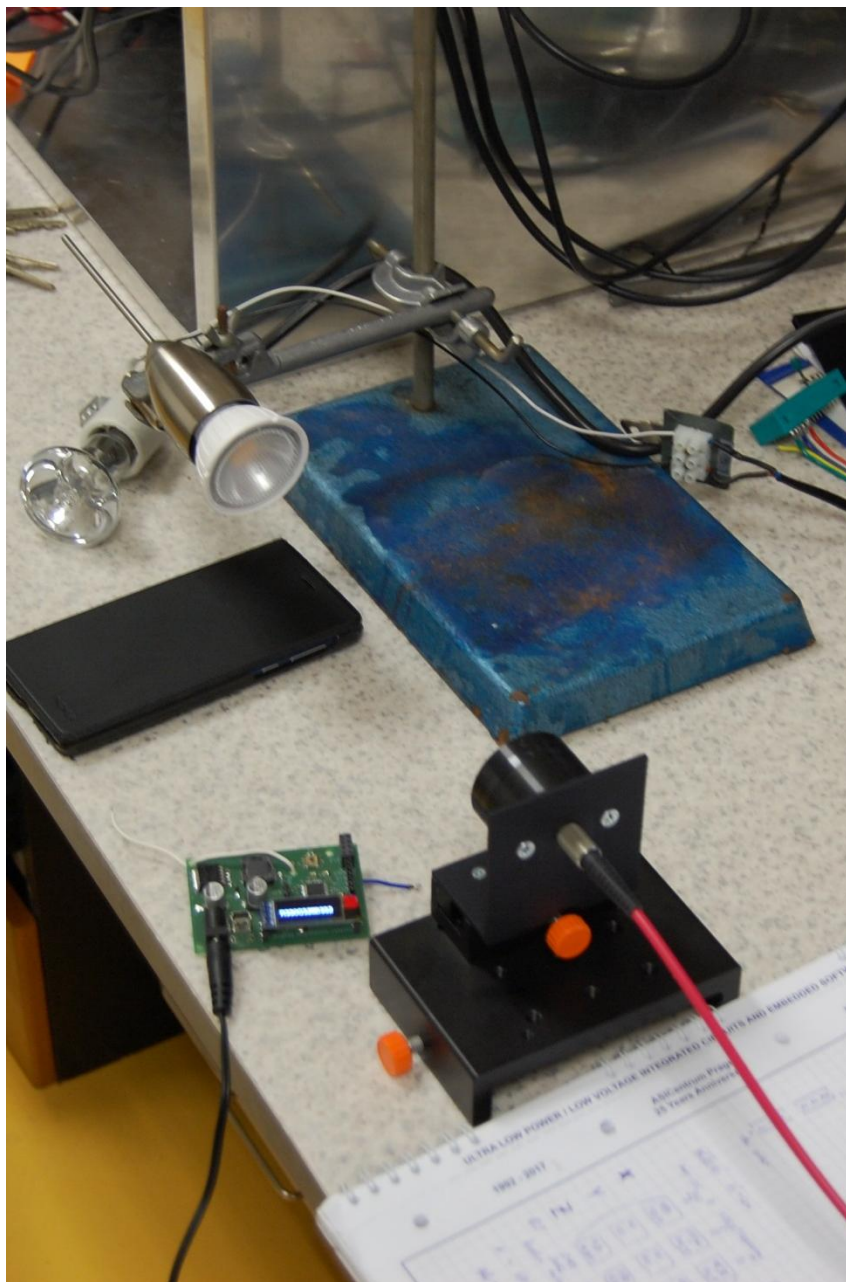
Situace	Výstup z AD převodníku
Měření za pokojové teploty	540
Ofukování horkým vzduchem	45

## 7.3 Světelný senzor

Právě při ověřování této části návrhu byla odhalena chyba. Jelikož při návrhu vodivých cest došlo k záměně pinů mikrokontroléru. Výstupní signál ze světelného snímače byl připojen na pin, který nepodporuje přerušení. Původní návrh firmwaru využíval přerušení pro inkrementaci čítače, ve kterém se uchovává informace o intenzitě dopadajícího záření.

Firmware navržený pro řešení této chyby snímá logickou hodnotu na pinu v hlavním běhu obslužného softwaru, a pro zvýšení přesnosti výsledků se celé měření tři krát opakuje a výstupy průměrují. S tímto opravným firmware byla zjištěna správná reakce snímače na dopadající světlo.

Jelikož měření s opraveným firmware napovídalo správné činnosti senzoru, bylo, pro určení barevné teploty, nutné nalézt korekční matice. S pomocí přesného měřidla byly zjištěny barevné teploty a souřadnice v prostoru CIE XYZ pro tři různé zdroje světla. Tato měření probíhala v laboratorních podmínkách na přístroji ILT 950 Spectroradiometer, jež byl výrobcem kalibrován podle normy ISO17025.[22] Stejně zdroje byly měřeny také zařízením konstruovaným v této práci. Jak měření se spektrometrem, tak se zařízením konstruovaným v této práci probíhala v zatemněné místnosti a při zachování stejné vzdálenosti zdroje od senzoru. Na obrázku 7 je zobrazena měřicí sestava. Světelné podmínky na fotografii neodpovídají osvětlení v místnosti při měření, jelikož fotografie vznikla až po naměření všech potřebných hodnot a místnost byla odtemněna. Měřicí sestava se skládala z objímky, pro jednoduchou výměnu zdrojů světla a ze senzoru měřidla ILT 950. Objímka byla upevněna ve stojanu, díky kterému bylo možné umístit zdroje světla i snímačů do horizontální roviny.



**Obr. 7:** Návrh plošného spoje

Na fotografii je zařízení zachyceno na stole a je důležité uvést, že při měření nebylo zařízení položeno volně na stole, nýbrž vloženo před snímač spektrometru, tak aby byla zachována horizontální rovina a záření ze zdrojů dopadalo kolmo na snímač TCS3200.

Výstupem z těchto měření jsou matice zobrazené dále. Výpočtem zmíněným v kapitole 4.3 byla získána kalibrační matice pro senzor TCS3200. Naměřené hodnoty senzorem TCS3200 jsou pomocí kalibrační matice přepočítány tak, aby odpovídaly barevnému prostoru CIE XYZ.

Naměřeny byly tedy dvě sady výsledků, jež byly dosazeny do rovnice 5:

$$A = \begin{pmatrix} 121 & 111 & 105 \\ 100 & 100 & 100 \\ 17 & 33 & 67 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 270 & 2822 & 692 \\ 265 & 2877 & 701 \\ 271 & 2890 & 695 \end{pmatrix}^{-1}, \quad (6)$$

matice A je potom:

$$A = \begin{pmatrix} -186,355 & -13,394 & 199,211 \\ -160,295 & -10,579 & 170,417 \\ -52,548 & -0,163 & 52,576 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Podle této matice jsou určeny hodnoty XYZ kompatibilní s CIE XYZ podle rovnice 4:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = A \times \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix},$$

$$X = -186,355R - 13,394G + 199,211B$$

$$Y = -160,295R - 10,579G + 170,417B$$

$$Z = -52,548R - 0,163G + 52B$$

Kde R, G a B jsou hodnoty naměřené zařízením.

Tímto způsobem byly získány hodnoty, se kterými je možné hledat barevnou teplotu podle MacAdamova vzorce:

$$CCT = 449n^3 + 3525n^2 + 6823n + 5520,33, \quad (8)$$

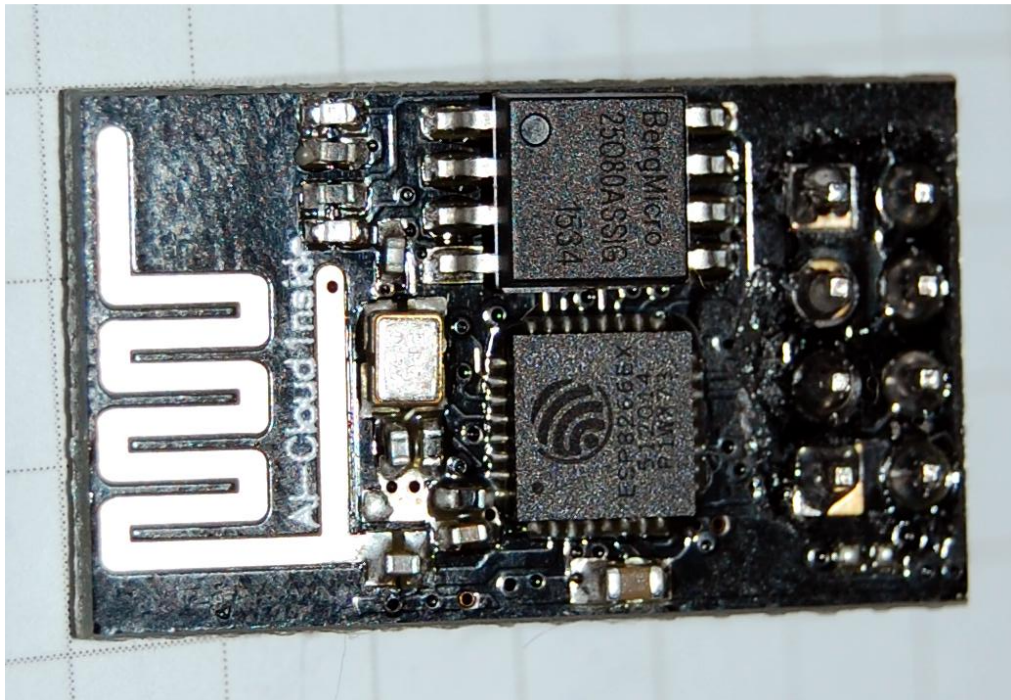
$$n = (x - 0.3320)/(0.1858 - y), \quad (9)$$

kde x a y jsou souřadnice barevného prostoru CIE xy, o kterých se zmiňovala kapitola 2.4. Důležité je zmínit, že hledat barevnou teplotu má smysl pouze pro zdroje bílého světla. Matematicky je možné pomocí MacAdamova vzorce určit barevnou teplotu monochromatické zelené LED diody, ale fyzikálně tato hodnota postrádá smysl. Ideální černý zářič totiž nebude za žádné teploty zářit zelenou barvou.

V odborných kruzích je k určení barevné teploty využívána jiná metoda. Barevná teplota je vyhledávána v tabulkách vydaných CIE. V těchto tabulkách jsou uvedeny barevné teploty pro všechny souřadnice barevného prostoru CIE xy. Oproti MacAdamově vzorci je touto metodou možné nalézt také údaj  $D_{uv}$ , který vyjadřuje vzdálenost bodu v barevném prostoru CIE xy od planckovy křivky.

## 7.4 Modul ESP8266 a ThingSpeak

ESP 8266 je rodina populárních modulů pro připojení různých jednoduchých zařízení k internetu. Existují v různých provedeních, která se liší hlavně počtem uživatelských vývodů – GPIO, které jsou k dispozici uživateli například pro ovládání relé. Jelikož bude v této práci modul využíván pouze k odesílání naměřené hodnoty barevné teploty, nebylo využito žádných uživatelských vývodů. Vhodným modulem je tedy verze 01, která je nejmenším modulem z rodiny ESP8266 a je zobrazena na obrázku 8.



**Obr. 8:** Modul ESP8266 verze 01

Modul ESP 8266 verze 01 byl fotografován na papíře s rastrovým rozměrem půl centimetru, pro ilustraci jeho miniaturních rozměrů 2,5 x 1,5 [cm]. Meandr v levé části obrázku tvoří Wi-Fi anténu, dále je vidět dvojice integrovaných obvodů. Horní obvod je paměť pro ukládání persistentních nastavení a čip níže je samotný mikrokontrolér ESP8266.

Veškeré obvody rodiny ESP8266 vyžadují napájení 3,3 V a komunikují s mikrokontrolérem pomocí AT příkazů a disponuje dvěma GPIO. Pomocí AT příkazů je možné nastavit do persistentní paměti modulu ESP8266 Wi-Fi síť, ke které se bude modul automaticky připojovat. Další příkazy jsou později využívány k navázání spojení se vzdáleným serverem a odeslání datového paketu.

Vzdálený server v tomto případě bude internetová služba ThingSpeak, která umožňuje připojení několika takovýchto zařízení. Uživatel této služby tím získá přístup k výsledkům jeho měření odkudkoliv. Z odeslaných dat je možné vykreslovat grafy, zpracovávat je pomocí nástrojů MATLAB. Na základě zpracování dat z jednoho snímače je možné spínat činnost jiného zařízení připojeného k ThingSpeak.

Odesílání dat probíhá do kanálů, a každému kanálu je možné přidružit až osm polí. Každý senzor tudíž může zapisovat do zvláštního pole v rámci jednoho kanálu. Odeslaná data nelze smazat. Službu je možné využívat buďto bezplatně nebo s ročními poplatky. V neplacené verzi dochází k určitým omezením v porovnání s verzí placenou. Konkrétně je omezen roční počet zápisů do služby, rychlost zápisů, počet kanálů a sdílení kanálů pro zápis jinými uživateli. Pro potřeby této práce plně dostačuje bezplatná verze, kde je počet zápisů omezen na 8200 denně a s minimálním intervalem mezi zápisem dat 15 sekund.

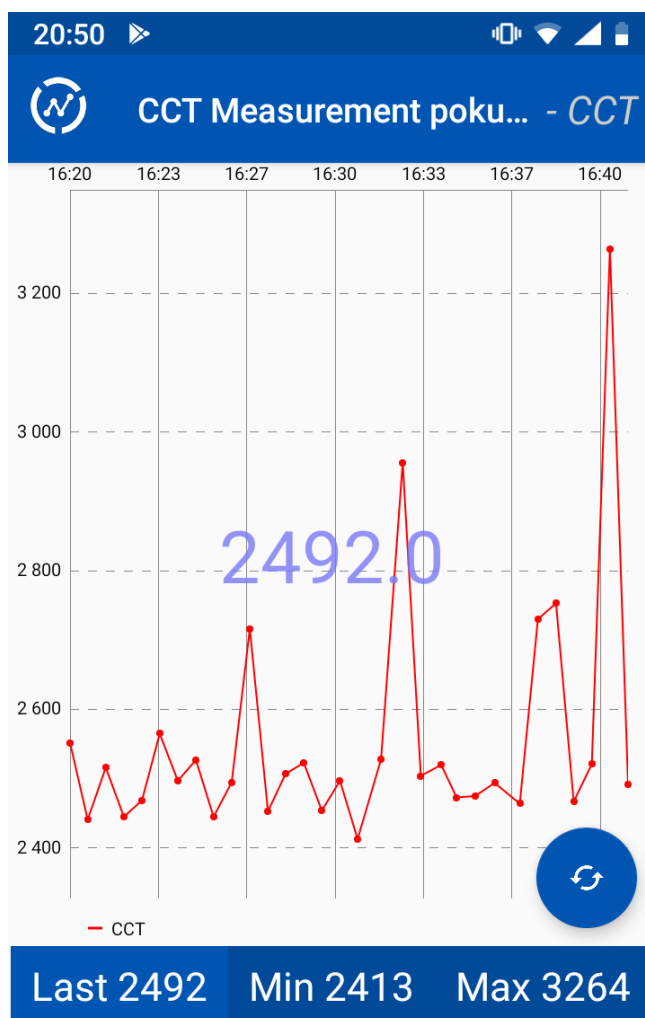
K odeslání dat musí mikrokontrolér poslat po sériové lince pouhé 4 krátké AT příkazy. Prvním z nich je vytvořeno spojení se vzdáleným serverem, druhým se odešle na server informace o délce odesílané informace. Ve třetím příkazu je na server odeslána samotná hodnota ze senzoru a označení do kterého kanálu a pole v něm hodnota patří. Poslední příkaz ukončuje komunikaci se serverem. Pro prezentaci jednoduchosti systému byly příkazy uvedeny v jejich originální podobě. Unikátní klíč nebyl uveden, jelikož jeho sdílení představuje bezpečnostní riziko.

```
AT+CIPSTART="TCP","api.thingspeak.com",80
AT+CIPSEND=51
GET /update?key=xxxxxxxxxxxxxxxx&field1=10 \r\n
AT+CIPCLOSE
```

Zavedení kompatibility zařízení s modulem ESP8266 a úprava firmwaru pro odesílání dat na ThingSpeak, tak umožní připojení zařízení do internetu věcí (IoT). Internetem věcí se dnes označuje síť pro propojení různých senzorů pro zlepšení jejich efektivity. Díky internetu věcí je možné zpracovávat několik měření na různých místech současně a na jejich základě ovládat jiná zařízení. Propojení mezi těmito senzory a akčními členy zajišťuje dnes všudypřítomné připojení k internetu. Připojení kolorimetru do domácího

internetu věcí by umožnilo řízení barevné teploty a intenzity osvětlení v průběhu dne, bez vlivu okolních světelných podmínek, plně automaticky a s minimální finanční náročností.

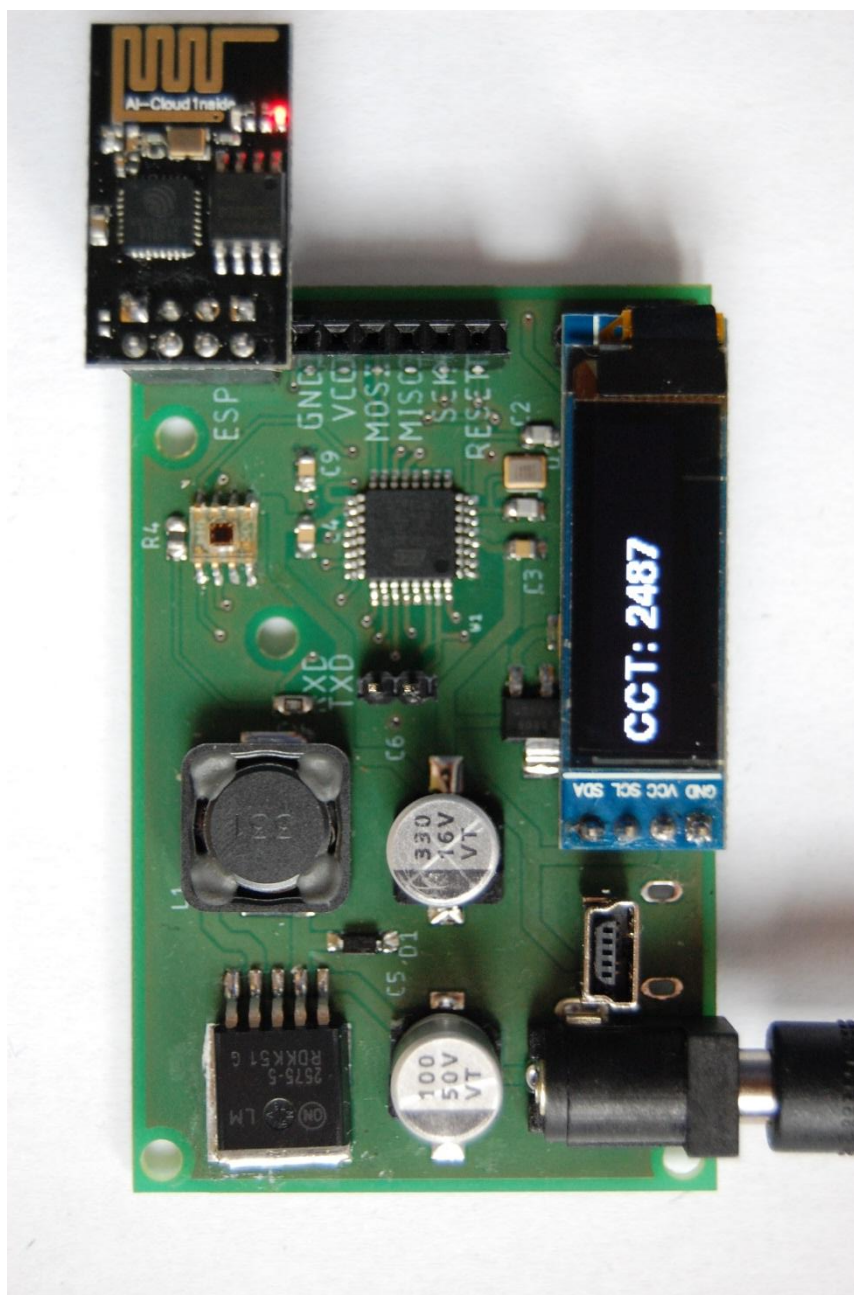
ThingSpeak umožňuje data zobrazovat nejen v internetovém prohlížeči, ale také v aplikaci pro operační systém Android. Aplikace se připojuje k jednotlivým kanálům pomocí jejich unikátního identifikátoru. Je tak možné sledovat více měření zároveň. V aplikaci je možné zobrazovat jak grafy, tak různá virtuální ručková měřidla. Výchylka virtuálních ukazatelů je řízena stejnými daty, jako jsou zobrazovány v grafech. Na obrázku 9 je zobrazen výstup jednoho kanálu s měřením do jediného pole v aplikaci pro mobilní telefon s operačním systémem Android.



**Obr. 9:** Ukázka mobilní aplikace ThingSpeak

Integrace matematického nástroje MATLAB do prostředí ThingSpeak umožňuje data zpracovávat různými způsoby, například s nimi vykonávat různé výpočty a jejich výsledky zobrazovat. Tato vypočtená data mohou být ze serveru vyčítána a na jejich základě mohou být řízeny další procesy. [23]

Cílem této práce je vyvinout zařízení, jež bude měřit barevnou teplotu. Celé finální zařízení je na obrázku 10. V dolní části je osazen spínaný zdroj a v horní části potom mikrokontrolér a světelný senzor. Napájecí stejnosměrné napětí je možné přivádět buďto konektorem jack nebo USB mini. USB konektor je vyveden kolmo, jelikož je tak lépe přístupný.

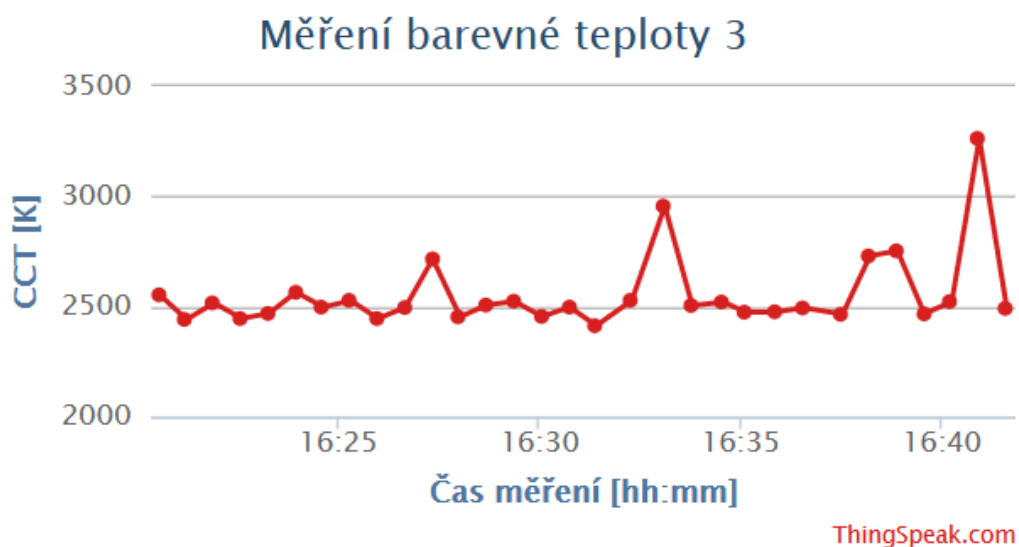


**Obr. 10:** Fotografie výsledného zařízení

Na obrázku jsou k zařízení připojeny oba možné výstupy. Výstupy pracují současně a vzájemně nezávisle. Výstupní zařízení se připojují pomocí hřebenových vývodů. Display je možno připojit ve dvou orientacích, čímž dojde k obrácení orientace textu.

Wi-Fi modul ESP8266, se připojuje také pomocí hřebenového vývodu. Špatnému připojení Wi-Fi modulu zabraňuje skutečnost, že by v takovém případě stínil světelnému senzoru.

S takto připraveným zařízením bylo uskutečněno pokusné měření barevné teploty v místnosti. Pro zlepšení měření byly žaluzie v oknech zataženy. Výrobce udával barevnou teplotu světelného zdroje 2500 K. Měření bylo zaznamenáváno do internetové služby ThingSpeak. Právě pro možnost vytváření takovýchto záznamů bylo zařízení navrženo pro kompatibilitu s modulem ESP8266.



**Obr. 11:** Graf zobrazený službou ThingSpeak, verze pro internetový prohlížeč

Do Obrázku 11 byly zanášeny výsledky měření v půl minutových intervalech. Zaznamenané odchylky od hodnoty 2500 K byly způsobeny tím, že do laboratoře, ve které měření probíhalo někdo vkročil. Změnily se tak světelné podmínky, například proniknutím jiného světla do místnosti. Výpočet barevné teploty vychází z průměru sta měření a tak tyto rychlé změny způsobily odchylky od hodnoty 2500 K v grafu výše.

## 8. Závěr

Práce se v první části zaměřuje na studium fyzikálního pozadí problematiky měření barvy. Rozebírá podstatu světla a jeho vlastnosti, základy vnímání světla okem člověka a popisuje kolorimetrické modely užívané v odborné praxi. Důležitými barevnými prostory jsou model XYZ a 1960 UCS, jeden z důvodů zajištění kompatibility výsledků s jinými měřidly a druhý pro zjištění barevné teploty.

Dále je důkladně rozebrána jedna aplikace teoretických znalostí z kapitoly, kolorimetrie. Kolorimetry jsou zařízení pro kvalitativní porovnání barev. Protože se tato zařízení dosud využívala hlavně ve výrobním procesu, byly konstruovány tak, aby podávaly velice přesné výsledky. Pořízení těchto zařízení je finančně náročné.

V práci je proto rozveden záměr vytvořit méně komplexní a méně přesnou podobu kolorimetru, která nalezne využití v méně náročných aplikacích. Rozebrány jsou komponenty pro výrobu takového zařízení a jednotlivé součástky byly vybrány tak, aby nejlépe splňovaly stanovené požadavky. Podle vybraných komponent byl sestaven návrh softwaru pro mikrokontrolér, který bude řídit celý proces měření.

Podářilo se také vyvinout prototyp ověřující funkčnost jednotlivých komponent dosud vybraných pro konstrukci finálního zařízení. Stavba prototypu potvrdila správnost koncepce a bylo tedy možné pokračovat v designu samostatně fungujícího zařízení.

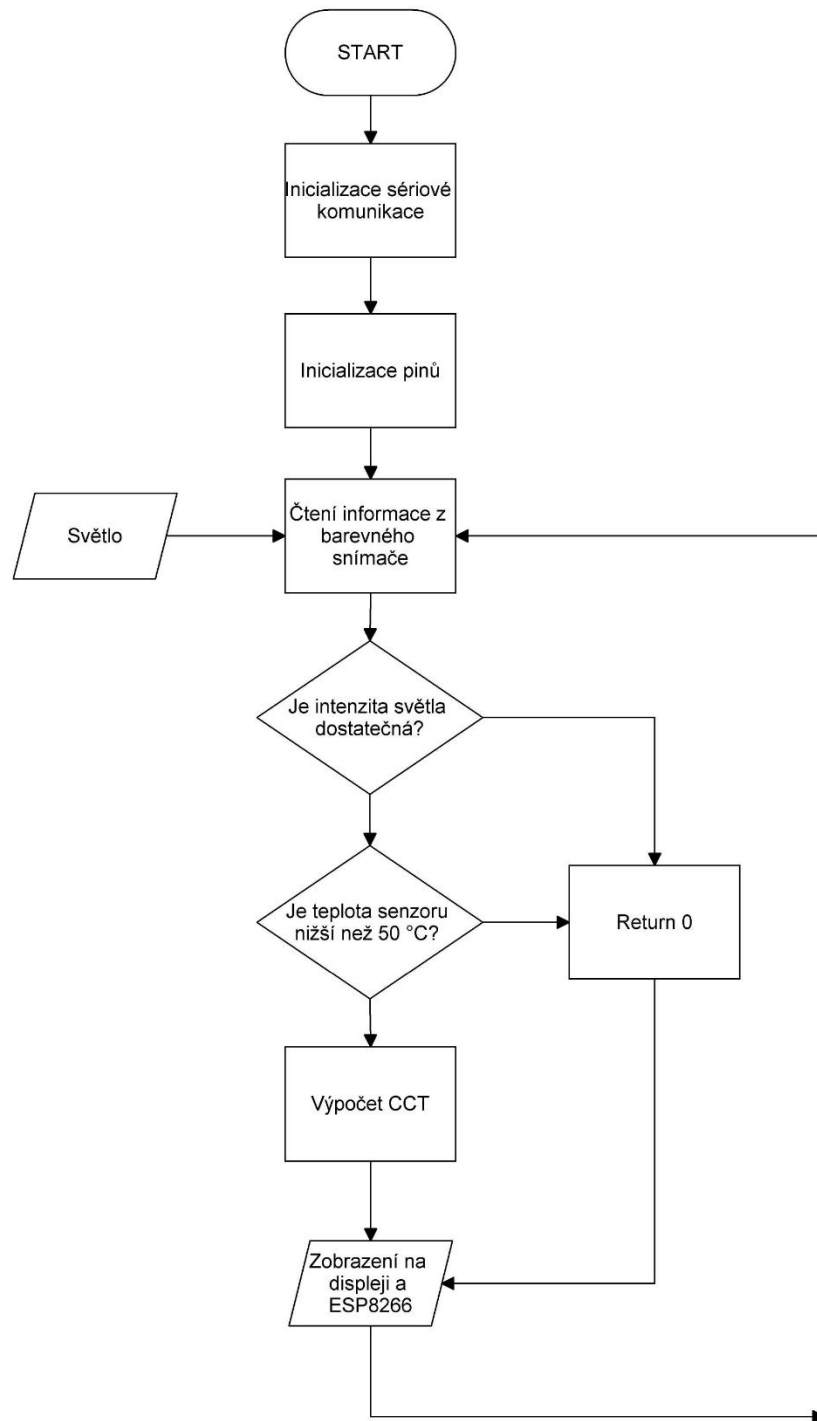
Při návrhu byl kladen důraz na nízkou cenu a snadné ladění firmwaru. Po sestavení zařízení proběhla základní měření jednotlivých funkčních celků na desce plošného spoje a měření se světelným snímačem. Tato měření potvrdila správnou činnost zařízení, z provedených měření ale vyplývá, že použitá metoda slouží pouze k orientačnímu určení barevné teploty. Dobré výsledky je možné dosáhnout pouze provedením přesné kalibrace celého zařízení. Dosažené výsledky jsou v práci prezentovány. Změřená data se zobrazují na OLED displeji, ale také je automaticky prováděn záznam na datové uložení. Pro demonstraci byl vybrán server ThingSpeak. Měření se zdrojem o barevné teplotě 2500K, přineslo dobré výsledky.

# Literatura

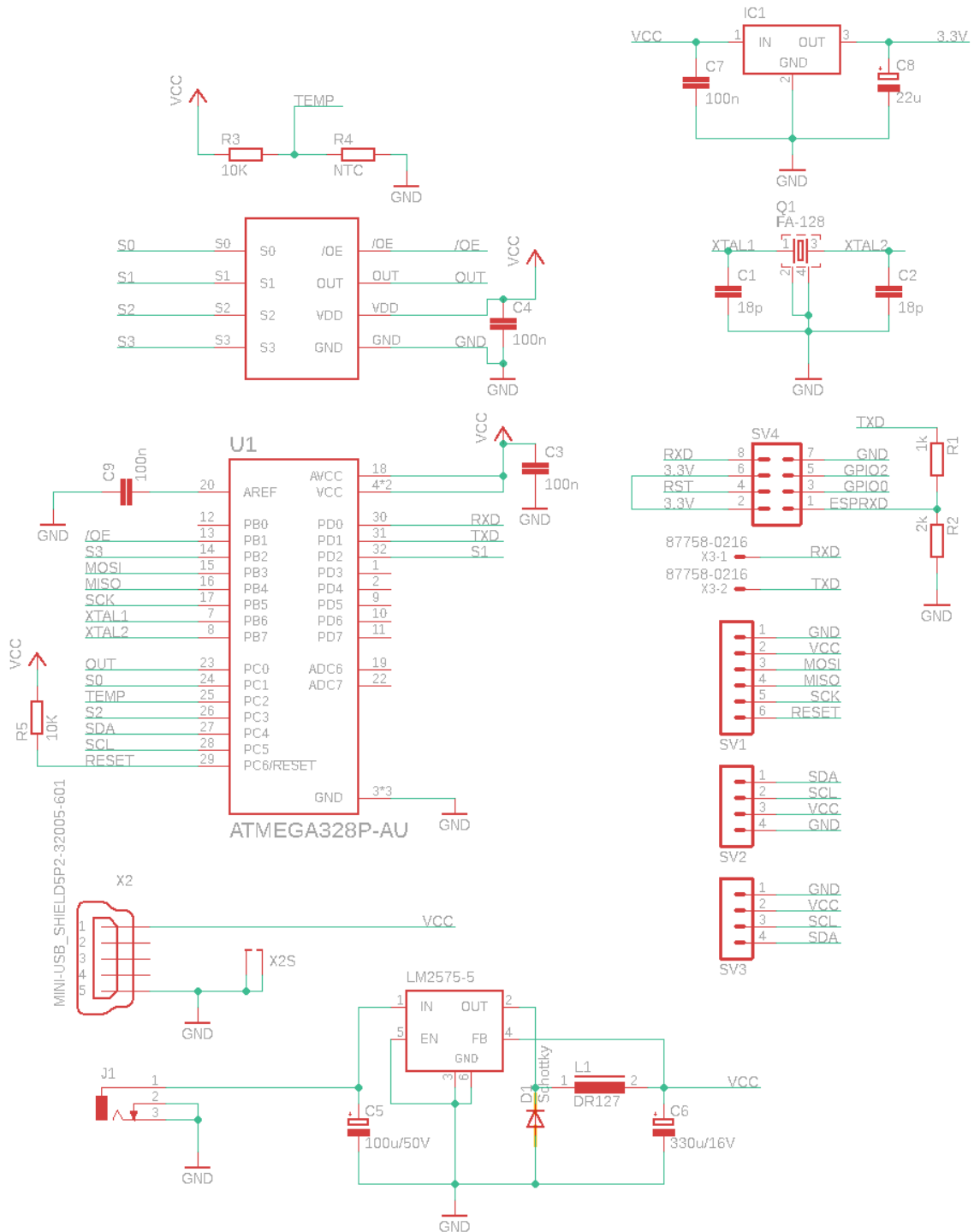
- [1] Elektromagnetické spektrum [online]. In: . [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/yd6yxeqv>
- [2] A Beginner's Guide to (CIE) Colorimetry. *Medium* [online]. 2016 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/yahamh96>
- [3] CIE 1931 color space. In: *CIE 1931 color space* [online]. Wikipedia, 2018 [cit. 2018-11-30]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y848tan9>
- [4] ČSN EN 12464-1 (360450): Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory. Praha: UNMZ, 2012.
- [5] Umělé osvětlení z pohledu projektanta. In: *Atelier-DEK* [online]. Praha: DEKPROJEKT, 2011 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y9djtrl5>
- [6] Color temeperature. *Wikipedia, free encyklopedia* [online]. San Francisco: Wikipedia, 2018 [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/pt4qdx>
- [7] Světelné znečištění a vliv na lidské zdraví. *Světelné znečištění* [online]. Ondřejov: Česká astronomická společnost [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y73e59lx>
- [8] *TCS3200 datasheet* [online]. TAOS, 2009 [cit. 2018-11-25]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y7z3munk>
- [9] Barevné spektrum. In: *Color in Gems* [online]. Davidson, Severní Karolína: Davidson, 2014 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y7tkthwl>
- [10] Spektrální citlivost čípků. In: *Wikimedia.org* [online]. San Francisco: Wikimedia, 2008 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/ycqpwrwy>
- [11] Datsheet OPT3006. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas: Texas Instruments, 2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y6ughkgz>
- [12] Datsheet TCS3200. In: *Mouser* [online]. TAOS, 2009 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y98xpfv3>
- [13] Datasheet TCS3430. In: *AMS* [online]. Premstaetten: AMS, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y96yb9rs>
- [14] Datasheet MKE02Z32VQH2. In: *NXP* [online]. Eindhoven: NXP, 2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/ycx5pkn6>
- [15] Datasheet MSP430FR4133 [online]. In: . Dallas: Texas Instruments, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/ya6c8v6z>
- [16] Datasheet ATmega328p. In: *Microchip* [online]. Chandler (Arizona): Microchip, 2018 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y9e589dy>
- [17] Map Colors of a CIE Plot and Color Temperature Using an RGB Color Sensor. *Maxim Integrated* [online]. San Jose: Maxim Integrated, 2016 [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/ya4kqcxj>
- [18] MIC5239-3.3YS datasheet. In: *MIC5239-3.3YS datasheet* [online]. San Jose: MICREL, 2007 [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y2w8yakx>

- [19] MIC5209 Datasheet. In: *MIC5209 500mA Low -Noise LDO Regulator* [online]. San Jose: MICREL, 2015 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/yytdasl3>
- [20] MCP1825. In: *MCP1825 500 mA, Low Voltage, Low Quiescent Current LDO Regulator* [online]. Chandler (Arizona): Microchip, 2008 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/yxnzn3gm>
- [21] ESP-01 Datasheet. In: *ESP-01 WiFi Module* [online]. Shenzhen: AI - Thinker team, 2015 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/yxbfsuj2>
- [22] Katalogový list ILT950. In: *Katalogový list ILT950* [online]. Peabody, MA: International Light Technologies, [2015] [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://tinyurl.com/y2dh88oy>
- [23] *Webové stránky ThingSpeak* [online]. Natick, MA: MathWorks, c2019 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <https://thingspeak.com/>

# Příloha 1 - Vývojový diagram



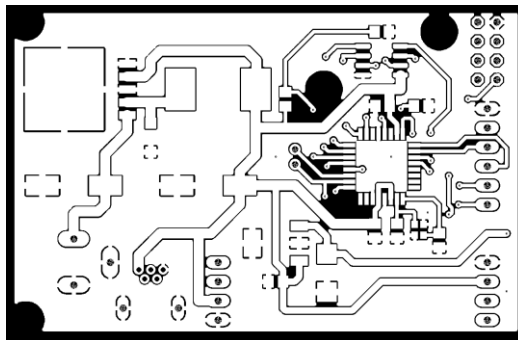
## Příloha 2 - Elektrické schéma zařízení



## Příloha 3 - Seznam součástek

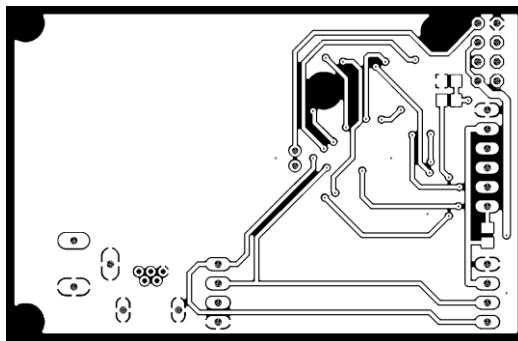
Součástka	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	18p	C0805	Keramický kondenzátor
C2	18p	C0805	Keramický kondenzátor
C3	100n	C0805	Keramický kondenzátor
C4	100n	C0805	Keramický kondenzátor
C5	100u/50V	140CLH-1010	Elektrolytický kondenzátor
C6	330u/16V	140CLH-1010	Elektrolytický kondenzátor
C7	100n	C0805	Keramický kondenzátor
C8	22u	C/6032-28R	Tantalový kondenzátor
C9	100n	C0805	Keramický kondenzátor
D1	Schottky	SOD123	Schottkyho dioda
IC1		SOT223	LDO
J1		DCJ0303	
L1	DR127	DR127	Cívka
LM2575-5		TO263-5	Buck convertor
Q1	FA-128	FA-128	Krystal 16 MHz
R1	1k	R0805	Rezistor
R2	2k	R0805	Rezistor
R3	10K	R0805	Rezistor
R4	NTC	R0805	Termistor
R5	10K	R0805	Rezistor
SV1		MA06-1	Hřebenový vývod
SV2		MA04-1	Hřebenový vývod
SV3		MA04-1	Hřebenový vývod
SV4		MA04-2	Hřebenový vývod
U\$1	TCS3210	SOIC127P600X172-8N	Světelný senzor
U1	ATMEGA328P-AU	QFP80P900X900X120-32N	Mikrokontrolér
X2	MINI-USB_SHIELD5P2-32005-601	32005-601	mini USB konektor
X3	87758-0216	87758-0216	Konektor jack

## Příloha 4 - DPS zařízení, horní strana



Rozměr desky 4,5 x 7 [cm], měřítko 1:1

## Příloha 5 - DPS zařízení, spodní strana



Rozměr desky 4,5 x 7 [cm], měřítko 1:1