



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTORTECHNICKÁ

Katedra měření

Návrh a kalibrace experimentálního senzoru osvitu

Design and calibration of experimental solar
irradiance sensor

Diplomová práce

Studijní program: Inteligentní budovy

Autor diplomové práce: Bc. Václav Zelenka

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Wolf Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelenka** Jméno: **Václav** Osobní číslo: **420049**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a kalibrace experimentálního senzoru osvitů

Název diplomové práce anglicky:

Design and calibration of experimental solar irradiance sensor

Pokyny pro vypracování:

V návaznosti na navržené řešení v projektu 1 a 2, realizujte experimentální senzor osvitů s využitím LED s různým emisním spektrem jako detektoru. Senzor bude schopen orientačně určit spektrum dopadajícího záření. Zkompletujte senzor sestávající se ze čtyř desek plošných spojů s diodou (LED), krycí kopule a základny s teplotní stabilizací (Peltierův článek s chladičem). Proveďte kalibraci senzoru v laboratorních podmínkách při využití světelných zdrojů s různým spektrem. Ověřte jeho funkčnost pro sluneční záření ve venkovních podmínkách.

Seznam doporučené literatury:

- [1] A Guide to Solar Radiation Measurement: From sensor to application [online]. Gengenbach Messtechnik: Reinhold Rösemann, 2017 [cit. 2018-08-08]. Dostupné z: https://info.kippzonen.com/hubfs/Downloads/e-Book_a_Guide_to_Solar_Radiation_Measurement.pdf
- [2] Forrest M. Mims, "Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors," Appl. Opt. 31, 6965-6967 (1992) [cit. 2019-01-01]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-31-33-6965>
- [3] WALTER, G. Jung. OP AMP APPLICATIONS. U.S.A.: Analog Devices, Inc. 2002. ISBN 0-916550-26-5

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Wolf, Ph.D., UCEEB Kladno

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

Datum zadání diplomové práce: **30.01.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **07.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2020/2021

Ing. Petr Wolf, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Rípků, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Návrh a kalibrace experimentálního senzoru osvitů“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 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.

V Praze 7.1.2020

.....

Bc. Václav Zelenka

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petrovi Wolfovi Ph.D. za cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Tato práce vznikla v rámci projektu Univerzitní centrum energeticky efektivních budov. Dále bych rád poděkoval mé rodině za podporu.

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá návrhem a kalibrací experimentálního senzoru osvitů, který využívá jako čidla ozáření LED s různým emisním spektrem. Tento experimentální senzor je schopný orientačně určit spektrum dopadajícího záření.

Teoretická část této práce se zabývá obecně slunečním zářením, senzory osvitů a jejich aplikacemi.

V rámci praktické části je v této práci popsán návrh a realizace experimentálního senzoru osvitů. Dále pak jeho kalibrace a ověření jeho funkčnosti.

KLÍČOVÁ SLOVA

Senzor osvitů, sluneční záření, sluneční spektrum, LED, teplotní stabilizace senzoru

ABSTRACT

This thesis deals with design and calibration of experimental solar irradiance sensor which use a LED with different emission spectrum. This experimental solar irradiance sensor is able to indicatively determined the spectre of radiation.

The theoretical part starts with a description of solar irradiation, solar irradiation sensors and their applications

The practical part of this thesis is focus on design, realization and calibration of solar irradiance sensor. There is verification of functionality.

KEY WORDS

irradiation sensor, solar irradiation, solar spectre, LED, tempering of sensor

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	1
1 Úvod	2
1.1 Sluneční záření	3
1.2 Způsoby využití senzorů osvitů	9
1.3 Druhy senzorů osvitů.....	10
1.3.1 Pyranometr	11
1.3.2 Fotodioda	13
1.3.3 Senzor na principu křemíkového fotovoltaického článku	14
2 Koncept experimentálního senzoru osvitů	15
2.1 Popis měřicího kanálu a modulu senzoru osvitů.....	18
2.2 Mechanické řešení senzoru osvitů	24
2.3 Ochranná kopule	27
2.4 Měřicí řetězec experimentálního senzoru osvitů.....	28
2.5 Teplotní stabilizace.....	29
3 Kalibrace experimentálního senzoru osvitů.....	30
3.1 Určení fotoproudu LED čidlem bez OZ.....	31
3.2 Dopočet zesílení	33
3.3 Kalibrace modulů experimentálního senzoru osvitů	34
3.1 Ověření na světelných zdrojích s různým spektrem	37
4 Závěr.....	40
Seznam použité literatury	42
Seznam obrázků	44
Seznam Tabulek	46

Seznam použitých zkratk a symbolů

G_{SC}	solární konstanta	($W \cdot m^{-2}$)
γ_s	azimut Slunce	($^{\circ}$)
h	výška Slunce nad obzorem	($^{\circ}$)
γ	azimut osluněné plochy	($^{\circ}$)
β	sklon osluněné plochy	($^{\circ}$)
θ	úhel dopadu	($^{\circ}$)
G	ozáření (osvit)	($W \cdot m^{-2}$)
AM	koeficient atmosférické masy	(-)
k^*	clearSky index	(-)
I_A	fotoproud	(A)
A	zesílení převodníku proud napětí	($V \cdot A^{-1}$)
U_d	vstupní napětí operačního zesilovače	(V)
λ	vlnová délka	(nm)
$\lambda_{Peakmax}$	maximum emisního spektra LED	(nm)
R_f	rezistor ve zpětné vazbě	(Ω)
C_f	kapacitor ve zpětné vazbě	(F)
U_2	výstupní napětí	(V)
GNDPWR	výkonová zem	
GND	zem	
VEE	záporné napájecí napětí	(V)
G_R	relativní ozáření	(-)
OZ	operační zesilovač	

1 Úvod

Záření ze Slunce patří mezi nejdostupnější zdroje energie na Zemi. Přímá přeměna této energie na elektrickou energii je známa již od 19. století. První aplikace fotovoltaických panelů jakožto zdroje energie byla využita v kosmonautice. Tento zdroj elektrické energie má významné uplatnění u budov s velmi nízkou energetickou náročností. U budov nulových a nule blízkých či energeticky nezávislých se bez aplikace fotovoltaických systémů nejspíše neobejdeme. V nedávném období došlo k rapidnímu nárůstu instalovaného výkonu tohoto zdroje v celosvětovém měřítku. Důvodem tohoto nárůstu byla cílená podpora dotačními programy a značný pokles ceny komponent v důsledku velkého objemu výroby, a dále rozvoj technologií potřebných k výrobě komponent fotovoltaických systémů.

Fotovoltaika je zdroj energie nestálý. Výkon fotovoltaických systémů závisí na aktuálních provozních podmínkách, a to zejména na intenzitě slunečního záření (osvitu) a teplotě. Tyto veličiny je potřeba pomocí senzoru sledovat. Z naměřených dat lze pak sledovat jednak výtěžnost fotovoltaického systému, ale lze i tato data využít v predikci výroby energie fotovoltaických systémů. Tato predikce je velice důležitá s ohledem na řízení energetiky a obchodování s elektrickou energií. Zároveň se i předpověď slunečního záření uplatní na lokální úrovni pro řízení a zefektivnění energetických systémů budov.

Cílem této diplomové práce je v návaznosti na Projekt 1 a 2 zrealizovat experimentální senzor osvitu pro venkovní měření, kde je více čidel záření s různou spektrální citlivostí a různou orientací. Jako čidla osvitu byla vybrána LED s různým emisním spektrem. Dále pak provést kalibraci tohoto experimentálního senzoru a ověřit jeho funkčnost.

Spektrálně citlivý senzor je vhodný pro získávání informací o konkrétních vlnových délkách, což je vhodné například pro krátkodobou predikci osvitu. Dalším jeho využitím může být určení vhodné fotovoltaické technologie pro dané lokální místo.

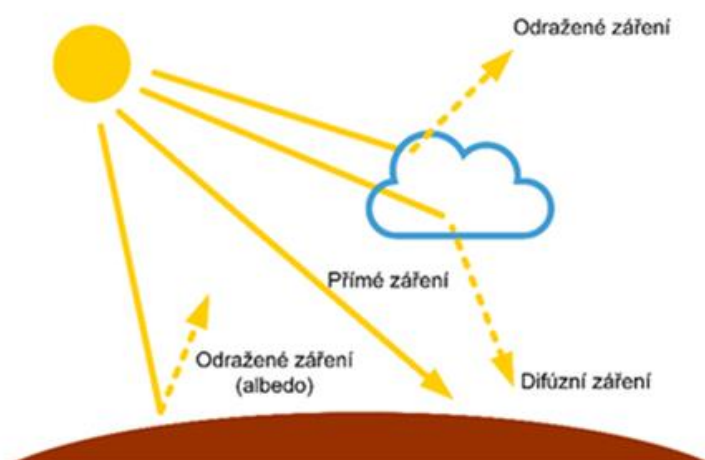
Tato diplomová práce má tři části. První část tvoří teoretický úvod do problematiky slunečního záření, měření slunečního osvitu a rozbor druhů senzorů osvitu. Druhá část se zabývá konceptem a realizací experimentálního senzoru osvitu. Ve třetí části této práce je popsána metodika kalibrace a měření, která ověřila funkčnost experimentálního senzoru osvitu.

1.1 Sluneční záření

Tato první část práce je teoretickým úvodem do slunečního záření a sensorů osvitů. Byla vypracována v rámci Projektu 1 [14].

Slunce je naší nejbližší hvězdou a je centrem našeho solárního systému, zásobuje naši planetu energií. Tato energie je klíčová pro existenci života na naší planetě. Slunce se skládá přibližně ze 71 % vodíku, 27 % helia a 2 % stopových prvků. Teplota povrchu Slunce má zhruba 5800 K. Sluneční energie je produktem termonukleární fúze probíhající v jeho jádru. Hmotnost Slunce je asi 332 000 krát vyšší než hmotnost naší planety. Intenzita vyzářené radiace na povrchu Slunce je asi $63 \text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}$. Cestou k Zemi není sluneční záření pohlcováno, ale jeho intenzita klesá s čtvercem vzdálenosti od Slunce. Střední vzdálenost mezi Sluncem a Zemí je přibližně 150 miliónů kilometrů, tato vzdálenost se také označuje jako 1 AU (Astronomical Unit). Hodnota ozáření dopadajícího na vnější hranici zemské atmosféry se nazývá solární konstanta G_{SC} a její průměrná hodnota je $1367 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Tato hodnota není konstantní, protože Země obíhá okolo Slunce po eliptické dráze a v určitých obdobích je Země blíže Slunci.

Zemská atmosféra má značný vliv na intenzitu slunečního záření dopadajícího na povrch naší planety. Její výška je přibližně 70 až 80 km a skládá se z 78 % dusíku, 21 % kyslíku a dalších plynů včetně 1 % vodních par. Když prochází sluneční záření atmosférou, je jeho intenzita snížena rozptylem a absorpcí od různých částic pevných nebo kapalných. Rozptylem se celková radiace rozděluje na část přímou, jež má směrový charakter, a část difúzní nebo také všesměrovou. Poměr těchto dvou složek závisí na zeměpisné poloze, nadmořské výšce, čistotě ovzduší a oblačnosti. Dále existuje i část slunečního záření odraženého od zemského povrchu, a to se nazývá albedo. Popsané složky jsou znázorněny na obrázku 1.



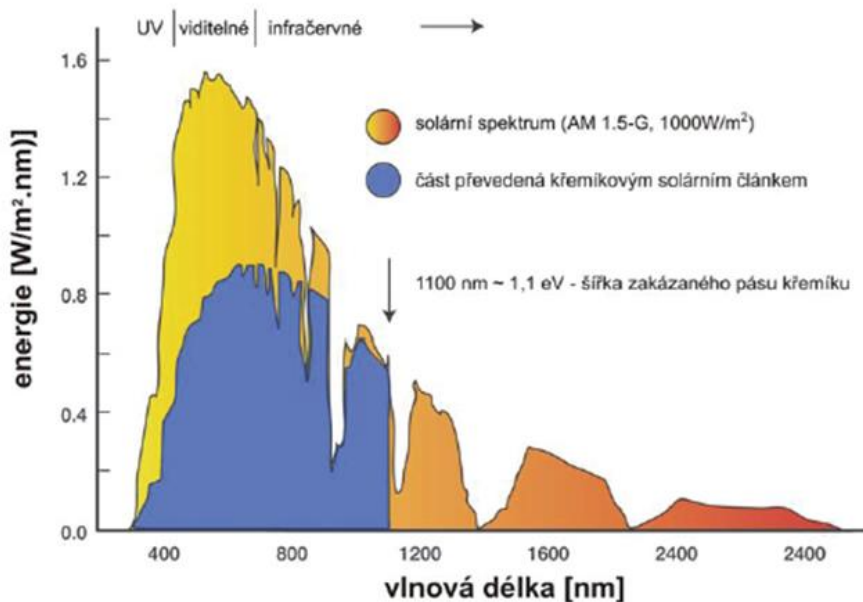
Obrázek 1: Schéma znázorňující průstup záření zemskou atmosférou [1]

Sluneční záření je obecně elektromagnetické záření a přenáší energii v širokém spektru vlnových délek. Toto elektromagnetické vlnění můžeme charakterizovat podle amplitudy, vlnové délky a frekvence. K popsání celého spektra slouží vlnová délka, což je vzdálenost dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění, které kmitají ve fázi, a rozděluje elektromagnetické vlnění do několika skupin, které jsou popsány v následující tabulce 1.

Typ	Název	Vlnová délka (nm)
krátké vlny	UV-C	200 - 280
	UV-B	280 - 315
	UV-A	315 - 400
	Viditelná část	400 - 700
	NIR	700 - 3000
dlouhé vlny	FIR	3000 - 5000

Tabulka 1. Rozdělení elektromagnetického spektra pomocí vlnových délek [3]

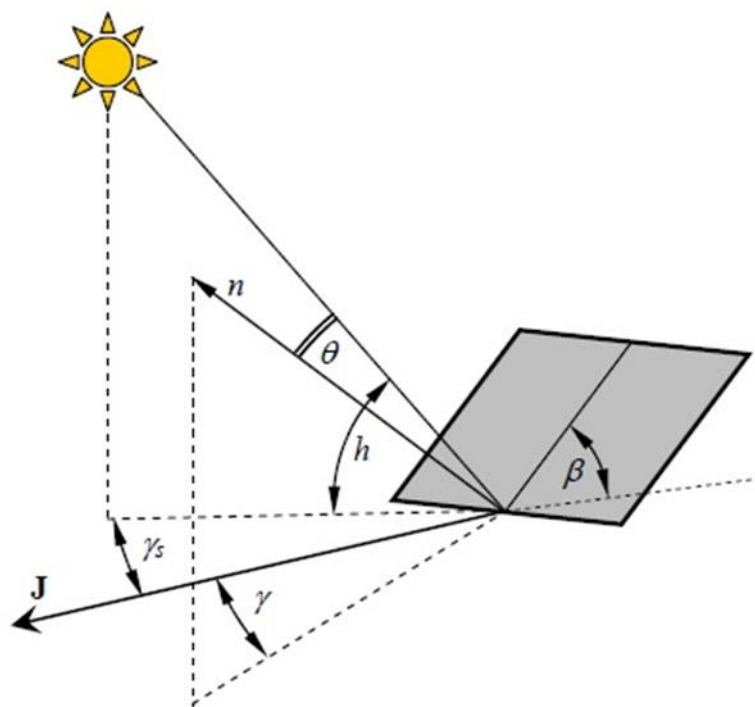
Typické spektrum slunečního záření je znázorněné na obrázku číslo 2. Maximum slunečního záření na povrchu Země nastává při vlnových délkách v rozmezí 400 až 500 nm. Na obrázku 2 je dále vyznačena část spektra, na které je citlivý křemíkový fotovoltaický článek. [2,3]



Obrázek 2: Využitelné spektrum záření pro články Si [2]

Solární geometrie slouží k popisu vzájemné polohy Slunce a osluněné (ozářené) plochy. V našem případě například fotovoltaického panelu. Tato vzájemná poloha je určena čtyřmi úhly.

- azimutem Slunce γ_S (°)
- výškou Slunce nad obzorem h (°)
- azimutem (orientací) osluněné plochy γ (°)
- sklonem osluněné plochy β (°)



Obrázek 3: Sluneční geometrie [3]

Azimut je obecně úhel, který stanovuje polohu vzhledem ke světovým stranám. V solární technice se obvykle měří od jihu. Azimut Slunce je úhel mezi polohou Slunce a jihem. Tento úhel se mění během dne a Slunce je přesně na jihu ve 12:00 slunečního času. Výška Slunce nad obzorem je úhel, který svírá polopřímka směřující od ozářené plochy ke Slunci s vodorovnou rovinou. Výška Slunce nad obzorem závisí na zeměpisné šířce, sluneční deklinaci a na slunečním čase. Pro jakýkoliv okamžik ji lze teoreticky vypočítat. Azimut stěny nebo také orientace osluněné plochy je úhel, který svírá normála stěny s jihem. Sklon osluněné plochy je úhel mezi osluněnou plochou a vodorovnou rovinou. Úhel dopadu θ je úhel, který svírá normála osluněné plochy se směrem polopřímky vedené od osluněné plochy ke Slunci.

Intenzita slunečního záření dopadající na obecnou rovinu se nazývá ozáření (osvit) G ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Má dvě složky, jak již bylo zmíněno, a to přímé ozáření G_b (beam) a difuzní ozáření G_d (diffuse).

$$G = G_b + G_d \quad (1)$$

Přímá složka ozáření se určí z přímé normálové ozářenosti G_{bn} a kosinu úhlu dopadu θ slunečních paprsků.

$$G_b = G_{bn} \cdot \cos \theta \quad (2)$$

Difuzní ozáření se skládá ze dvou složek. Z difuzního ozáření z nebe $G_{d\ sky}$ a difuzního ozáření odraženého od zemského povrchu $G_{d\ reflex}$.

$$G_d = G_{d\ sky} + G_{d\ reflex} \quad (3)$$

Tyto jednotlivé složky můžeme určit pomocí následujících vztahů:

$$G_{d\ sky} = G_{dh} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (4)$$

$$G_{d\ reflex} = \rho_g \cdot G_h \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

kde:

G_{dh} je difuzní ozáření dopadající na horizontální rovinu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

G_h je globální ozáření dopadající na horizontální rovinu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

ρ_g je (součinitel odrazivosti zemského povrchu) albedo (-), jehož průměrná hodnota je 0,2, ale například čerstvě napadlý sníh může dosahovat až hodnoty 0,87.

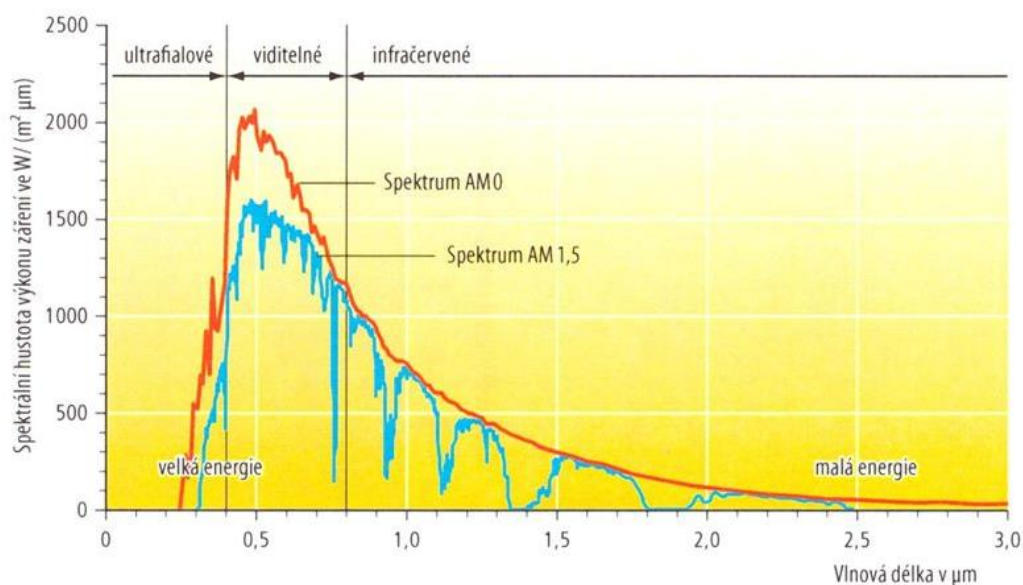
β je sklon ozářené plochy od horizontální roviny (°)

[3]

Intenzita slunečního záření závisí kromě jiného na úhlu výšky Slunce nad obzorem h ($^\circ$). Ten se během dne a roku mění. Při svislé poloze Slunce má sluneční záření nejkratší cestu skrz atmosféru. Je-li oproti tomu Slunce nízko, je cesta jeho záření atmosférou delší. Tím dochází k silnější absorpci a rozptylu slunečního záření. K popisu dráhy skrz zemskou atmosféru a také složení atmosféry se používá koeficient AM (Air Mass). Vztah mezi polohou Slunce a koeficientem AM je definován následovně.

$$AM = \frac{1}{\sin h} \quad (6)$$

Sluneční záření ve vesmíru bez vlivu zemské atmosféry je označováno jako AM 0. Spektrum slunečního záření ve vesmíru je znázorněno na následujícím obrázku 4. Na tomto obrázku je i znázorněno spektrum AM 1,5, což je spektrum slunečního záření, které se udává v standardních testovacích podmínkách. Pokud je Slunce v zenitu, tedy výška Slunce nad obzorem h je 90° , nastává AM 1.



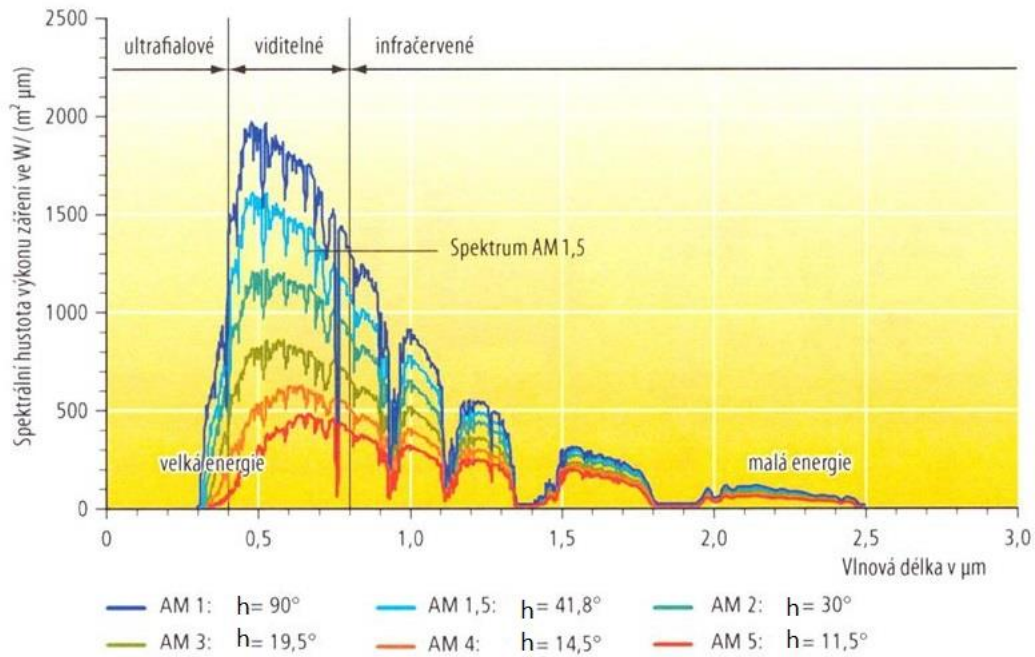
Obrázek 4: Spektrum slunečního záření AM0 a AM1,5 [13]

Při průchodu světla zemskou atmosférou dochází ke snížení slunečního záření kvůli:

- Odrazu od atmosféry
- Absorpci molekulami v atmosféře (O_3 , H_2O , O_2 , CO_2)
- Rayleighovému rozptylu (rozptylu molekul)
- Mieovému rozptylu (rozptylu částic prachu a nečistot ve vzduchu)

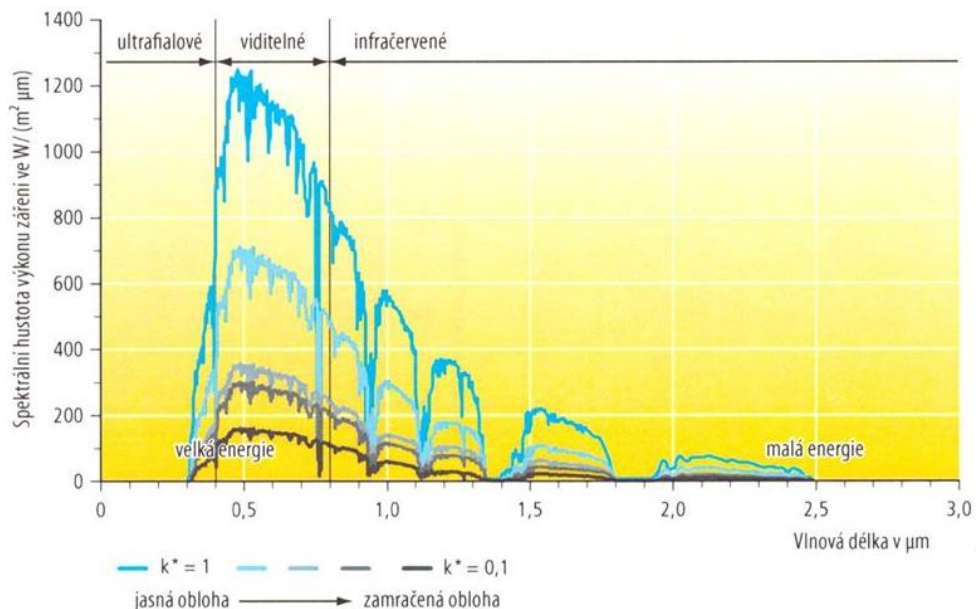
V případě, že se změní poloha Slunce, dochází také změně spektra slunečního záření. Čím blíže se k horizontu Slunce nachází, tím silněji dochází k posunu světla do červené oblasti spektra.

Z průběhu různých spekter v obrázku 5 je patrný silný pokles výkonu se snižující výškou Slunce h (°)



Obrázek 5: Spektrum slunečního záření při různých úhlech výšky Slunce [13]

Dále pak rovněž oblačnost způsobuje změnu spektra slunečního záření. Čím je obloha zamračenější, tím více dochází k posunu slunečního záření do modrého (šedého) spektra. Tato závislost je znázorněna na obrázku 6.



Obrázek 6: Spektrum slunečního záření při různých stupních oblačnosti. [13]

Zde se zavádí clearSky index k^* . Tento kvocient příslušného slunečního záření je definován následujícím vztahem.

$$k^* = \frac{G}{G_{ClearSky}} \quad (7)$$

kde:

G je příslušné ozáření při oblačnosti ($W \cdot m^{-2}$)

$G_{ClearSky}$ je ozáření bez oblačnosti ($W \cdot m^{-2}$)

[3,13]

1.2 Způsoby využití senzorů osvitů

Senzory osvitů se používají v řadě technických aplikací.

Naměřená data ze senzorů osvitů se využívají k vytváření meteorologických modelů, a to již od 20. století. Tyto modely umožňují predikci se střednědobým horizontem (hodiny až dny), a to se využívá pro plánování činností závislých na počasí.

Další možností využití senzorů osvitů je jejich aplikace v budovách, kde slouží například k určování pasivních solárních zisků, což je zásadní informace pro řízení otopných systémů budov. S větším počtem budov s velkou plochou prosklení jsou pasivní solární zisky stále více a více důležité pro řízení vnitřních podmínek v budovách. Vhodnou regulací a zohledněním predikce osvitů lze dosáhnout energetické úspory.

S globálním rozvojem obnovitelných zdrojů ve světě začínají být prediktivní služby nutností pro řízení energetických soustav. Mimo klasické predikce počasí se využívá i specializovaná predikce zaměřená na určení výroby fotovoltaických systémů. Fotovoltaika je obecně zdroj energie nestálý a je přímo závislý na meteorologických podmínkách. Vzhledem k narůstajícímu počtu obnovitelných zdrojů připojovaných do energetických sítí vzniká problém s energetickou bezpečností, provozní stabilitou sítí, kvalitou dodávané energie, což má značné ekonomické dopady. Snahy eliminovat tyto problémy vyžaduje co nejpřesnější predikci výroby obnovitelných zdrojů v kombinaci s řízenou akumulací elektrické energie a regulací vybraných spotřebičů v rámci tzv. chytrých sítí (smart grids).

Nové uplatnění predikce osvitů přichází se zvětšujícím se počtem tzv. hybridních fotovoltaických systémů s bateriovým uložištěm energie, které se v dnešní době stávají součástí i menších objektů pro rezidenční bydlení. Znalost predikce osvitů umožňuje řídicím systémům efektivně hospodařit s energií a tím maximalizovat lokální využití energie získané z fotovoltaického

systemu. Při znalosti informace o osvitu je lokální řídicí systém schopen odhadnout profil výroby fotovoltaického systému v čase.

Automatizované systémy pro řízení toků energií v budovách potom mohou určovat, v kterých okamžicích a jaké množství energie ukládat do baterií, nebo naopak kolik energie spotřebovat v regulovatelných zátěžích v budově. Díky predikci osvitu, která umožňuje predikovat vyrobenou energii fotovoltaického systému, je možné se vyvarovat stavům, kdy nelze vyrobenou energii uložit do baterií z důvodu jejich plného nabití. Vhodným řízením tak lze zefektivnit využití fotovoltaického systému a zajistit maximální využití energie.

Aktuální výkon fotovoltaických systémů závisí zejména na osvitu a dále pak na vlastní provozní teplotě fotovoltaických článků. S rostoucí teplotou dochází ke snižování účinnosti fotovoltaického článku.

[6]

1.3 Druhy senzorů osvitu

Pro měření slunečního záření se využívají přístroje používající různá umělá čidla záření. Jedná se o objektivní metodu měření.

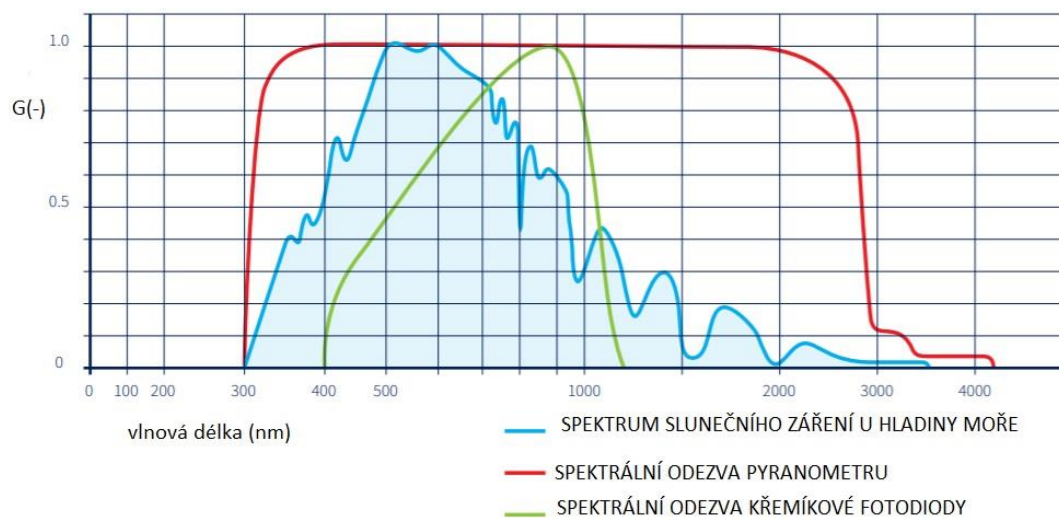
Při použití umělých čidel záření jsou účinky záření převedeny na elektrickou veličinu, která je následně zpracována. Pro tato měření se používají zejména fotočlánky nebo termočlánky.

Fotočlánek je zařízení, které je vybaveno čidlem citlivým na světlo. V případě měření slunečního záření jej nazýváme senzorem osvitu. Podle potřeby volíme čidla s různou spektrální citlivostí. Fotočlánek je osazen do fotometrické hlavičky v senzoru, která bývá také vybavena speciálním filtrem pro úpravu spektrální citlivosti čidla do požadovaného rozsahu. Fotočlánky mohou pracovat na principu změny fotovodivosti (fotorezistory) nebo na principu fotovoltaického jevu (fotovoltaický článek). Dále lze k měření osvitu použít princip termoelektrického jevu (pyranometr). Vyjmenované fotosenzory jsou uvedeny na obrázku 7.



Obrázek 7: Senzory osvitu 1) s křemíkovým fotovoltaickým článkem, 2) fotodiodou, 3) pyranometr [5]

Porovnání spektrální citlivosti různých čidel osvětlení je znázorněno na obrázku 8. [5]



Obrázek 8: Spektrální rozsah pyranometru a fotodiody v porovnání se spektrem záření dopadajícího na zemský povrch u hladiny moře [5]

1.3.1 Pyranometr

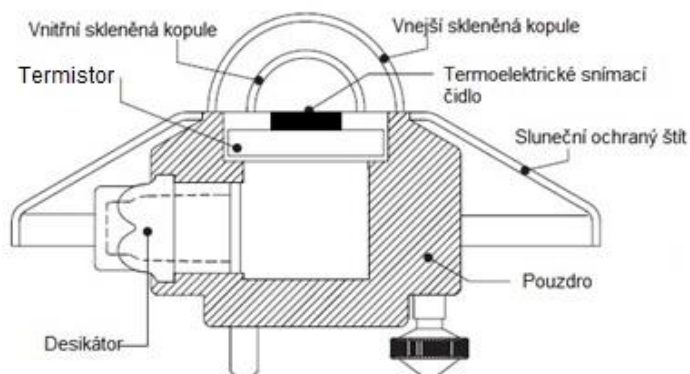
Pyranometr pracuje na principu termoelektrického jevu. Je definován mezinárodní normou ISO 9060 jako zařízení pro měření solární radiace v spektrálním rozsahu 300 až 3000 nm. Jedná se o aktivní senzor, což znamená, že se teoreticky vlivem snímané veličiny senzor chová jako zdroj energie. Pyranometry jsou velmi rozšířené v oblasti meteorologie a klimatologie a jsou součástí každé meteorologické stanice. Používají se i v dalších technických odvětvích. Nevýhodou pyranometrů je dlouhá doba odezvy, která se pohybuje v desítkách sekund.

Hlavní komponenty pyranometru jsou popsány na obrázku 9. Jsou to tyto komponenty:

Termoelektrické snímací čidlo, které je opatřeno černou nebo segmentově tvořenou černou a bílou absorpční plochou. Vnitřní a vnější skleněná kopule, která chrání čidlo pyranometru před působením vnějších vlivů. Pouzdro, ve kterém je čidlo uloženo. To slouží také jako teplotní reference čidla. Exsikátor, což je malá ampule s vysoušedlem, které zabraňuje vzniku vlhkosti uvnitř pyranometru. Stav tohoto vysoušedla je potřeba pravidelně kontrolovat.

Pod čidlem se nachází termistor, který je slouží k snímání teploty uvnitř pyranometru.

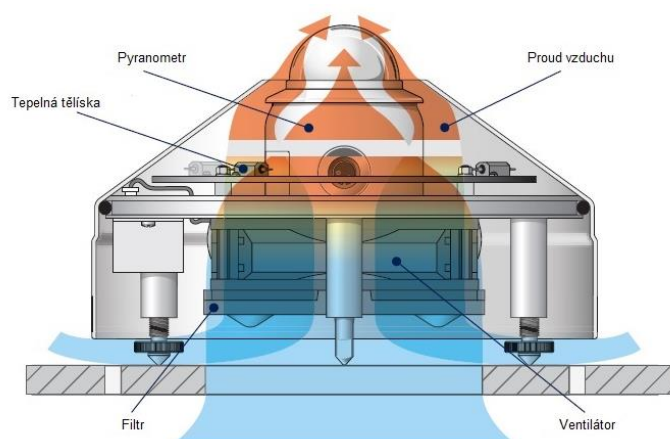
Dále je pyranometr opatřen ochranným slunečním štítem, který snižuje nežádoucí zahřívání dalších vnitřních částí měřicího řetězce uvnitř pyranometru. Pyranometry mohou být dále vybaveny externím čidlem teploty.



Obrázek 9: Konstrukce pyranometru [5]

Dražší pyranometry jsou dále vybaveny ventilační jednotkou s tepelnými tělísky, která zabraňuje ofukováním usazování nečistot na vnější straně ochranné kopule a v zimních měsících námraze a zachytávání sněhu na kopuli. Dále pak ventilátor slouží k stabilizaci teploty uvnitř kopule, čímž se snižuje offset pyranometru. Schéma ventilátoru je znázorněno na obrázku 10.

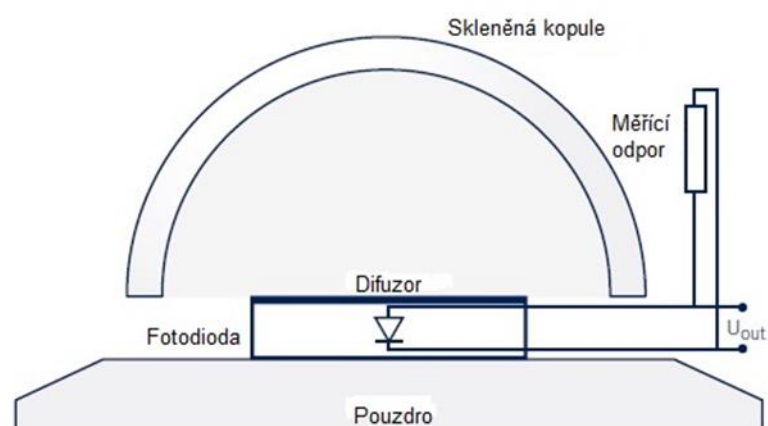
[3,4,5]



Obrázek 10: Schéma chlazení nebo ohřívání pyranometru pomocí ventilátoru a tepelných tělísek [5]

1.3.2 Fotodioda

Fotodiody jsou často používány jako čidla do fotočlánků. Pracují na principu fotovoltaického jevu, kdy dochází účinkem absorbování fotonů k excitaci nosičů náboje a vzniká elektrický proud, který je následně měřícím obvodem dále vyhodnocen. Podle požadovaných vlastností lze zvolit různé fotodiody, které se liší typem a materiálem použitého polovodiče. Využívají se v senzorech pro měření ozáření, kde není požadována konstantní spektrální citlivost senzoru přes celé vlnové spektrum. Typická spektrální citlivost fotodiody je znázorněna na obrázku číslo 8. Spektrální citlivost fotodiody lze ovlivnit použitým materiálem a případně optickým filtrem, který je na fotodiodu nainstalován. Jejich výhodou je jejich malá velikost, malá doba odezvy a vysoký výstupní signál. Jedná se o aktivní senzor, což znamená, že vlivem snímané veličiny se chová jako zdroj energie. Typické vnitřní uspořádání senzoru je znázorněno na obrázku 11. Senzor je složen z opticky kvalitní skleněné kopule, která chrání čidlo, v tomto případě fotodiodu, před vnějšími vlivy. Fotodioda se nachází pod difuzorem, který rozptyluje dopadající záření rovnoměrně na fotodiodu a tím snižuje směrovou odezvu na různé úhly dopadu sluneční radiace. Také slouží jako ochrana proti mechanickému poškození fotodiody. Příklad fotodiody určené pro venkovní měření ozáření je na obrázku 12. Tyto fotodiody se v anglické literatuře často označují jako silicon pyranometr.



Obrázek 11: Princip senzoru založeného na fotodiodě [5]



Obrázek 12: Příklad senzoru pracujícího na principu fotodiody [5]

Senzory na principu fotodiody jsou vhodné pro jednodušší a orientační měřicí úkoly a aplikace, kde se dbá na nižší náklady. Nesplňují ISO klasifikaci ani WBO (World Meteorological Organization) požadavky na spektrální rozsah a selektivitu pro měření slunečního záření.

[3,5]

1.3.3 Senzor na principu křemíkového fotovoltaického článku

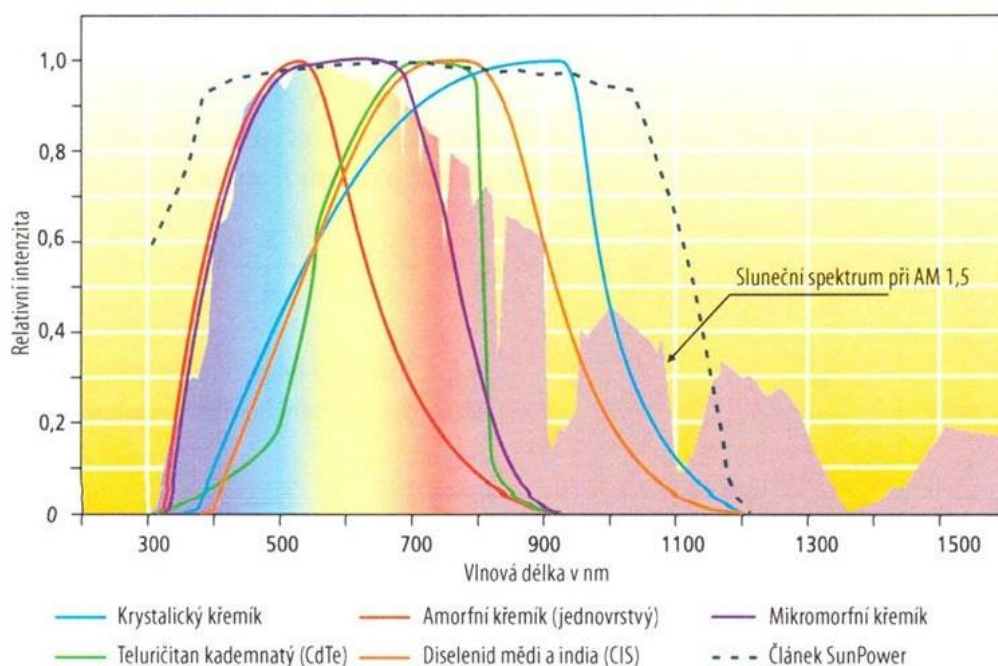
Mimo klasických fotodiód se také pro měření ozáření používají přímo fotovoltaické články. Výhodou těchto senzorů jsou stejné vlastnosti jako vlastnosti měřených objektů fotovoltaických modulů, pokud jsou tedy tyto technologie shodné. Z toho plyne i jejich hlavní využití pro měření osvitů ve fotovoltaických systémech. Tyto senzory mohou být dále vybaveny externím senzorem teploty, který snímá například teplotu fotovoltaického panelu. Příklad tohoto senzoru můžeme vidět na obrázku 7 viz kapitola 1.3.

2 Koncept experimentálního senzoru osvitů

Koncept experimentálního senzoru osvitů byl vypracován v rámci Projektu 2. [15]

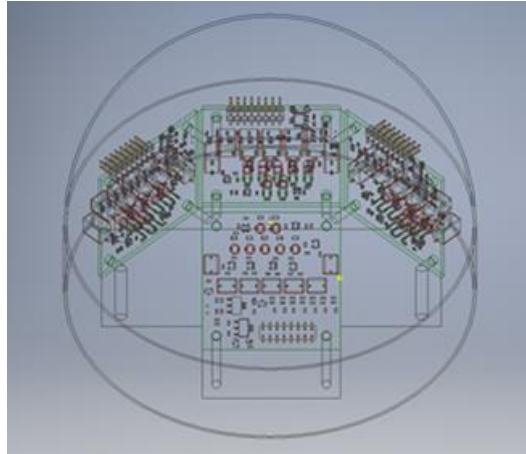
Samotná kompletní realizace experimentálního senzoru osvitů proběhla v rámci této diplomové práce.

Experimentální senzor osvitů pro venkovní měření je složen z více čidel záření s různou spektrální citlivostí. Spektrálně citlivý senzor může získávat informace o konkrétních vlnových délkách ve slunečním záření, což je vhodné například pro krátkodobou predikci osvitů, kdy bychom mohli detekovat červený a modrý posuv spektra slunečního záření. Dalším jeho využitím může být určení vhodné fotovoltaické technologie panelů pro dané lokální místo, neboť různé technologie fotovoltaických panelů mají odlišnou spektrální citlivost, což je zobrazeno na obrázku 13.



Obrázek 13: Spektrální citlivost různých druhů Fotovoltaických článků [13]

Experimentální senzor osvitů se skládá z ochranné kopule, ve které je držák jednotlivých čidel. Držák umožňuje celkově čtyři orientace jednotlivých čidel: jižní orientace pod úhlem 45°, západní orientace pod úhlem 45°, východní orientace pod úhlem 45° a horizontální orientace. Různou orientací čidel by se mělo zamezit nepřesnostem způsobeným kosinovým rozptylem od kopule a získávat rovnou informace o osvitů v různých orientacích bez nutnosti přepočtu. Tento experimentální senzor osvitů má i možnost teplotní stabilizace pomocí Peltiérových článků pro případ, že by docházelo k jeho přehřívání, což by mohlo negativně ovlivnit jeho funkčnost. Základní koncept zobrazen na obrázku 14.



Obrázek 14: Model základního konceptu experimentálního senzoru osvitu

Jako jednotlivá čidla osvitů jsem se rozhodl použít barevné LED, tedy světlo emitující diody, anglicky light-emitting diodes. Dále jen LED. LED, kromě jejich nejrozšířenější aplikace jako světelného zdroje, mohou sloužit i jako spektrálně selektivní detektor osvitů, jejichž odezva souvisí s jejich vyzařovacím spektrem. Výhodou senzoru osvitů založeného na LED je:

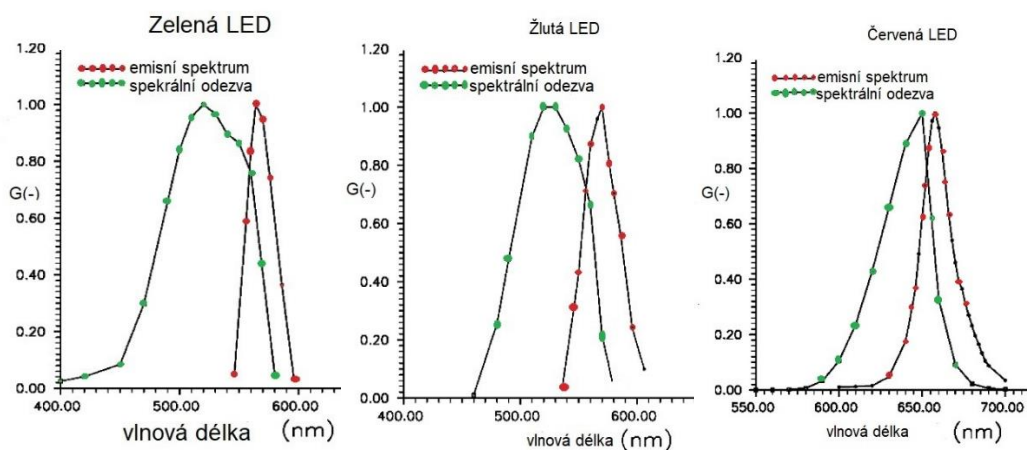
- nízká cena jednotlivých LED, což může být důležité při případné sériové výrobě či vytváření měřicí sítě složené z více senzorů
- LED jsou široce dostupné s různým vyzařovacím spektrem
- robustní provedení
- mají stabilní optické vlastnosti
- nevyžadují další přídavný optický filtr

LED se již v řadě aplikací jako fotodetektory pro optická měření používají, například jako jednoduché fotodetektory v chemii, jako radiometry v satelitních družicích, dále jako tzv. „Sun photometry“ pro určování různých látek v atmosféře apod. To jsou všechno aplikace, kde je vyžadován spektrálně selektivní senzor záření.

[7,8]

Jistou nevýhodou, kterou je nutné uvažovat, je skutečnost, že emisní spektrum neodpovídá zcela přesně spektrální odezvě stejné LED. Tato skutečnost byla stanovena experimentálně podle publikace [9], kdy byly vybrány tři komerčně dostupné LED (zelená, žlutá a červená). Ty byly umístěny do speciální měřicí aparatury. Emisní spektrum jednotlivých LED bylo měřeno pomocí spektrometru, konkrétně modelu IL1700/IL588 od firmy International Light. Spektrální odezva

jednotlivých LED byla změřena pomocí vlnového skenovacího monochromatoru, konkrétně Model PL746D od firmy Optronic Laboratory. Výsledky jsou znázorněny na obrázku 15.



Obrázek 15: Porovnání emisního spektra a spektrální odezvy stejné LED [9]

Z obrázků je patrné, že maximum křivky emisního spektra je na vyšší vlnové délce než maximum spektrální odezvy. Dále je patrné, že šířka pásma spektrální odezvy je větší než šířka pásma emisního spektra. Tuto skutečnost je třeba při návrhu respektovat. [9]

Fotoproud I_A , který LED prochází při jejím osvětlení na denním slunci, odpovídá zhruba velikosti μA . [7]

Tuto skutečnost jsem experimentálně ověřil, kdy jsem na univerzální plošný spoj napájel červenou a zelenou LED v SMD pouzdru. Tento přípravek jsem umístil na osluněnou plochu a pomocí multimetru změřil, jaký proud protéká LED. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 2.

	I_A (μA)
zelená	0,53
červená	0,55

Tabulka 2: Naměřený proud osluněnou LED bez OZ

Dále jsem provedl experiment, kdy jsem na přípravku univerzálního plošného spoje umístil operační zesilovač OZ MCP 6071 a červenou LED zapojil do fotovoltaického zapojení, které bude popsáno v následující kapitole. Zesílení jsem nastavil pomocí rezistoru ve zpětné vazbě operačního zesilovače na hodnotu zesílení $A = 10^6 \text{ V}\cdot\text{A}^{-1}$. Tento přípravek s operačním zesilovačem a bez operačního zesilovače jsem odzkoušel pod žárovkovým svítidlem v laboratoři. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

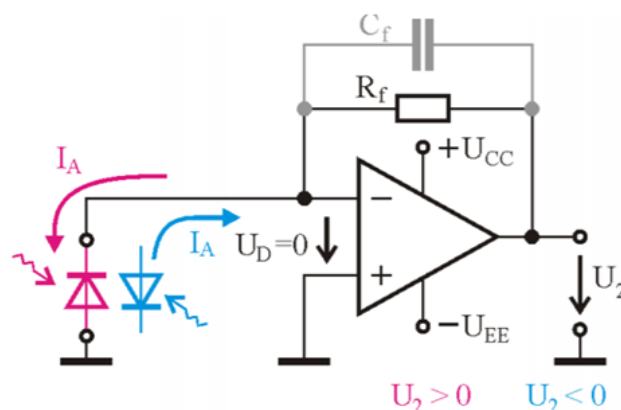
Bez OZ	0,07 μA	-
S OZ	$U_2 = 70 \text{ mV}$	Zesílení $A = 10^6 \text{ V}\cdot\text{A}^{-1}$

Tabulka 3: LED s operačním zesilovačem a bez

Z tohoto experimentu jsem ověřil, že proud protékající LED je měřitelný a závisí na osvětlení dané LED.

2.1 Popis měřicího kanálu a modulu senzoru osvětlení

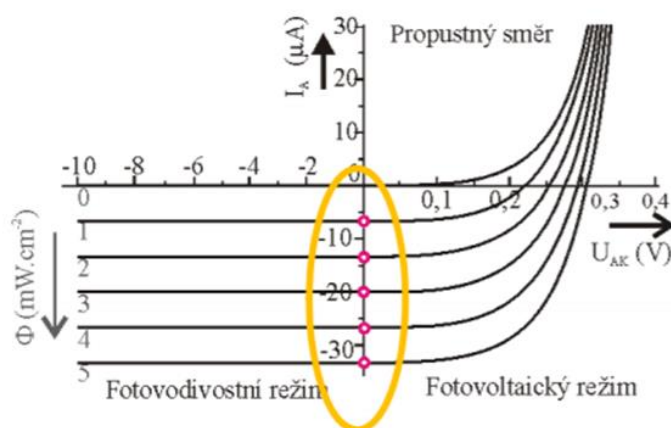
Pro měření proudu procházejícího fotodiodou se používá převodník proud napětí. Jedná se o takzvané zapojení diody ve fotovoltaickém režimu. Toto zapojení je znázorněno na obrázku 16 a bude dále popisováno.



Obrázek 16: Transimpedanční zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu [10]

V tomto zapojení je fotodioda přímo připojena na vstup invertujícího operačního zesilovače a chová se jako zdroj proudu, což je tzv. fotovoltaický režim. Fotodioda je zapojena jako zdroj proudu nakrátko, což je způsobené díky virtuální nule na invertujícím vstupu operačního

zesilovače ($U_d = 0$ V). Dostáváme tak lineární závislost fotoproudu I_A na ozáření, jak je zřejmé z V-A charakteristiky fotodiody, která je znázorněna na obrázku 17.



Obrázek 17: V-A charakteristika Transimpedačního zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu [10]

Napětí na výstupu operačního zesilovače je pak přímo úměrné ozáření, protože platí

$$U_2 = R_f \cdot I_A \quad (7)$$

Fotoproud I_A teče celý do rezistoru ve zpětné vazbě R_f a $U_d = 0$ V.

Polaritu výstupního napětí můžeme volit uzemněním anody (kladná) nebo katody (záporná). Hodnota rezistoru ve zpětné vazbě udává převodní konstantu proud napětí.

Například při $R_f = 1\text{M}\Omega$ bude výstupní napětí $U_2 = 1$ V při fotoproudu $I_A = 1 \mu\text{A}$. Vzhledem k tomu, že poměr napětí na výstupu ku proudu na vstupu je roven rezistoru R_f , což znamená, že vstupní proud se konvertuje na výstupní napětí, je toto zapojení též nazýváno jako transimpedanční, někdy též transresistance. Dále je v obvodu zapojen kapacitor C_f , který je paralelně připojen k rezistoru R_f a funguje jako kmitočtová kompenzace pro zajištění stability zesilovače. Doporučuje se zvolit kapacitor s malým ztrátovým činitelem, například teflonové, polypropylenové nebo polyesterové kapacitory. V této realizaci jsem zvolil polypropylenový kapacitor o velikosti $1\mu\text{F}$.

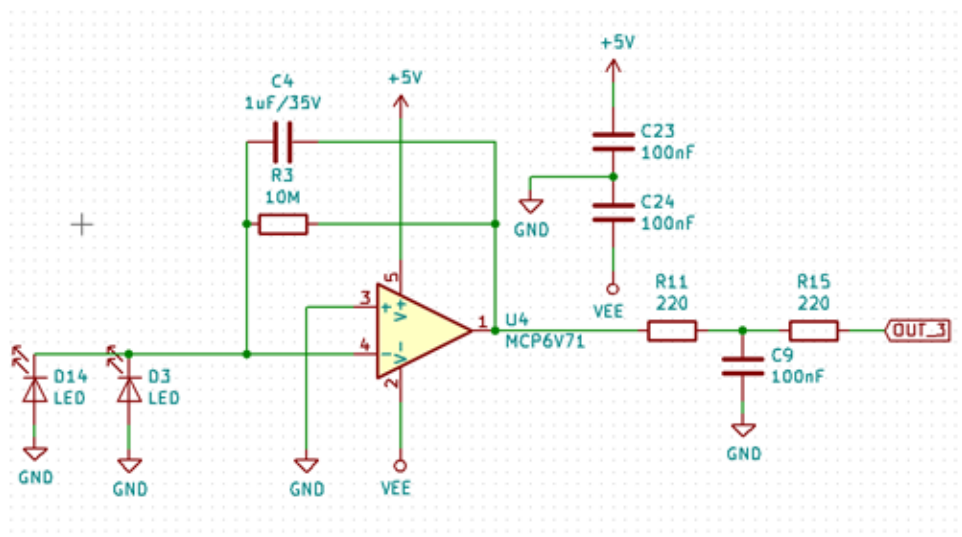
Výhody tohoto zapojení jsou:

- lineární závislost
- nízký šum
- vhodný pro přesná měření

[10,11]

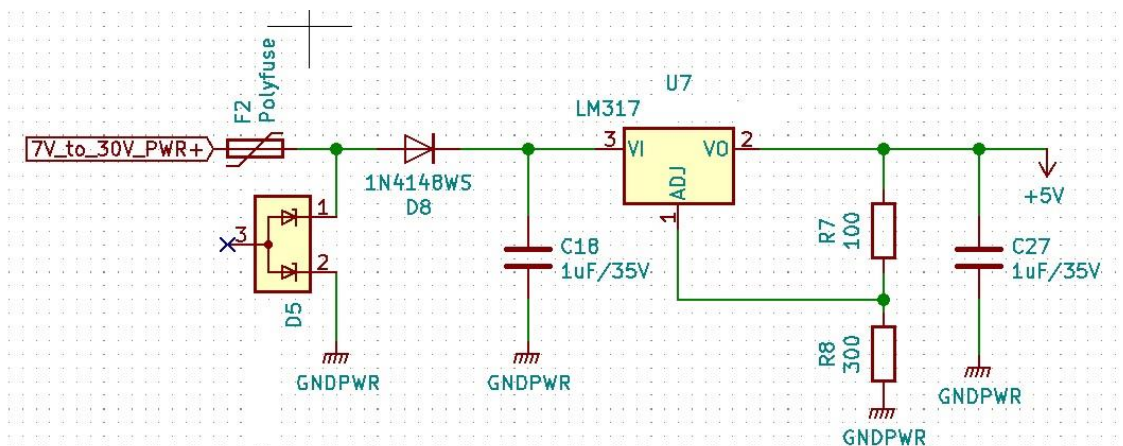
Realizace modulu experimentálního senzoru osvit

Modul (deska plošného spoje) byl navržen a realizován pomocí programu KICad 5. Plošný spoj je realizován na dvouvrstvé desce o rozměrech 5 cm x 5 cm. Tato deska tvoří měřicí modul experimentálního senzoru osvit. Na každé desce plošného spoje (modulu) je realizováno sedm měřicích kanálů pro fotodiody či LED a osmý kanál je vyhrazen pro senzor teploty. Příklad konkrétního zapojení čidla (kanálu) je znázorněn na obrázku 18. Jedná se o již zmiňované Transimpedanční zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu. Na vstupu jsou zapojeny dvě značky fotodiody, a to z toho důvodu, že první je určena pro footprint THT součástky a druhá pro footprint SMD součástky, čímž je zajištěna univerzálnost pro osazování buď THT součástkou nebo pro SMD součástkou. Jako operační zesilovač jsem zvolil MCP6V71. Tento operační zesilovač jsem vybral, protože se jedná o vysoce precizní operační zesilovač pro senzory a má navíc nízký teplotní drift V_{os} Drift ± 15 nV/°C. Velikostí odporu ve zpětné vazbě se nastavuje velikost zesílení. Na výstupu je umístěn RC filtr, který zde slouží jako ochrana před šumem a jako antialiasingová ochrana. Rezistor R15 na výstupu definuje výstupní impedanci a slouží i jako ochrana před zkratem na výstupu měřicího kanálu. Kapacitory C23 a C24 mají blokovací funkci a vykrývají případné špičky. Umísťují se vždy co nejbližše operačnímu zesilovači.



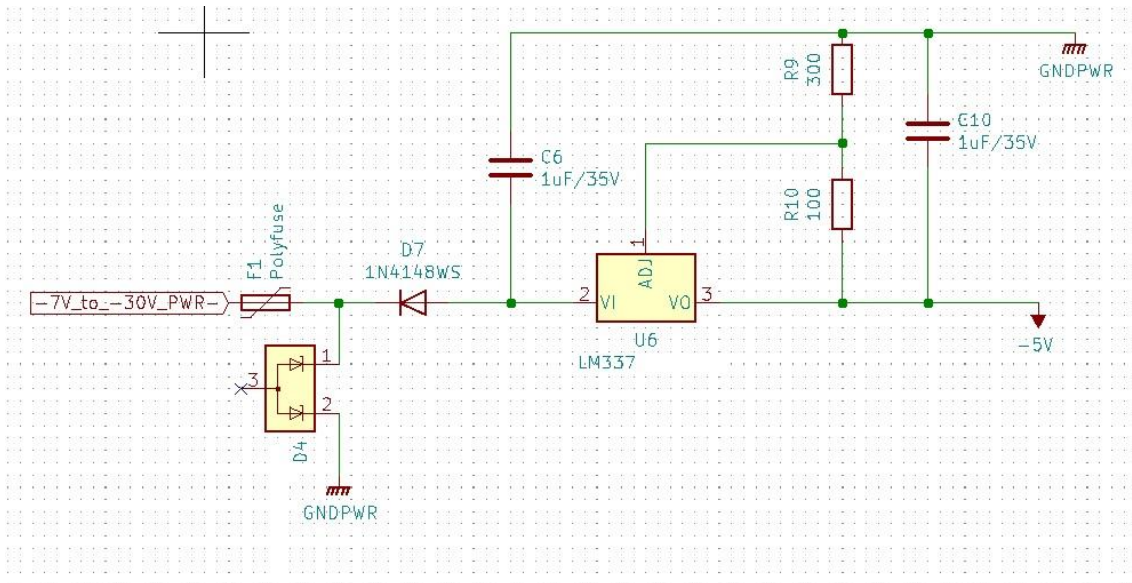
Obrázek 18: Zapojení jednoho čidla (kanálu)

K zajištění stabilního napájení + 5 V slouží součástka LM317, která je zapojena dle následujícího schématu na obrázku 19. Toto schéma je realizováno podle doporučeného schématu z dokumentace výrobce dané součástky. Navíc před touto součástkou se nachází bezpečnostní prvky obvodu na vstupu napájení, a to resetovatelná pojistka, která chrání obvod před nadměrným proudem a dále ESD ochranné zařízení (transil), které chrání obvod před napěťovými špičkami. Dioda v obvodu slouží jako ochrana před přepólováním. Pomocí rezistorů $R7 = 100 \Omega$ a $R8 = 300 \Omega$ je nastaveno výstupní napětí 5 V.



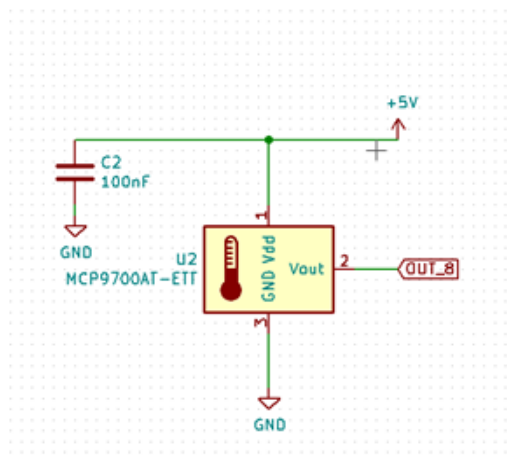
Obrázek č. 19: Napájení + 5 V

K zajištění stabilního napájení - 5 V slouží součástka LM337, která je zapojena dle následujícího schématu viz obrázek 20. Toto schéma je realizováno podle doporučeného schématu z dokumentace výrobce dané součástky. Navíc před touto součástkou se nachází bezpečnostní prvky obvodu na vstupu napájení, a to resetovatelná pojistka, která chrání obvod před nadměrným proudem a dále ESD ochranné zařízení (transil), které chrání obvod před napěťovými špičkami. Dioda v obvodu slouží jako ochrana před přepólováním. Pomocí rezistorů $R10 = 100 \Omega$ a $R9 = 300 \Omega$ je nastaveno výstupní napětí - 5 V.



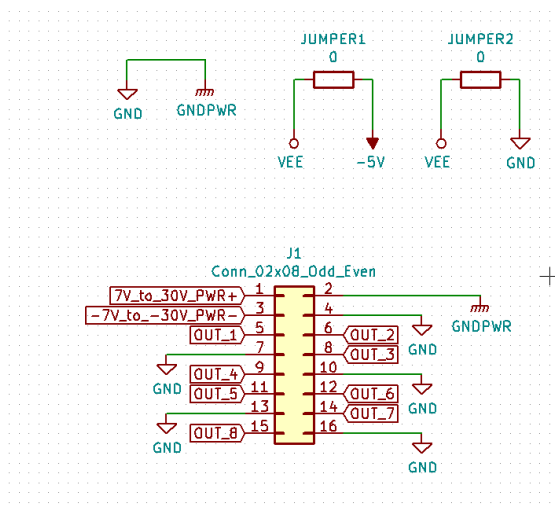
Obrázek 20: Napájení - 5 V

Teplotní senzor je realizován pomocí součástky MCP9700AT-E, což je nízkopříkonový lineární aktivní termistor. Obsahuje analogový snímač teploty, který převádí teplotu na analogové napětí. Schéma zapojení teplotního senzoru je na obrázku 21.



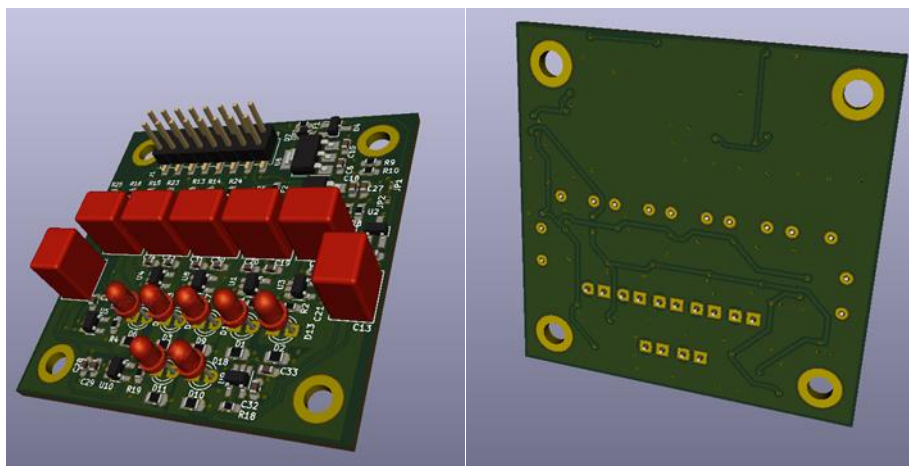
Obrázek 21: Teplotní senzor

Na desce plošného spoje se nachází dvě země, které jsou navzájem propojeny. Je to výkonová zem GNDPWR a zem GND. Operační zesilovače lze na dané desce zapojit buď se symetrickým napájením $\pm 5V$ nebo tzv. rail to rail zapojení, a to pomocí drátových propojek (jumper). Konektor na každé desce je realizován podle obrázku 22. Jednotlivé dvojice signálu jsou proloženy zeměmi, aby byl minimalizován vliv vzájemného rušení.



Obrázek 22: Konektor a drátové propojky (jumper)

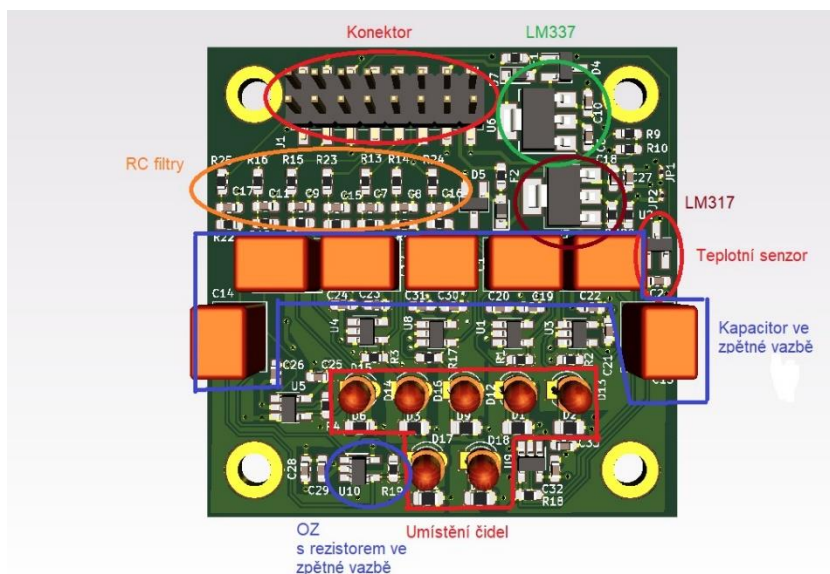
Na obrázku 23 je vygenerovaný 3D model osezeného měřicího modulu experimentálního senzoru osvitů.



Obrázek 23: 3D náhled modulu experimentálního senzoru osvitů

Rozvržení jednotlivých prvků na modulu je znázorněno na obrázku 24. Rozvržení je koncipováno tak, aby sloty pro jednotlivá čidla byla na spodní straně desky a žádná z vyšších součástek jim nestínila. Nezesílený signál je veden nejkratší cestou do operačního zesilovače. Tento signál je také obklopen ochranným paralelním spojením tzv. guard ring, který je realizován vrstvou rozlité mědi okolo těchto signálových spojů. Tato vrstva je připojena pomocí prokůvů do vrstvy GND.

[12]



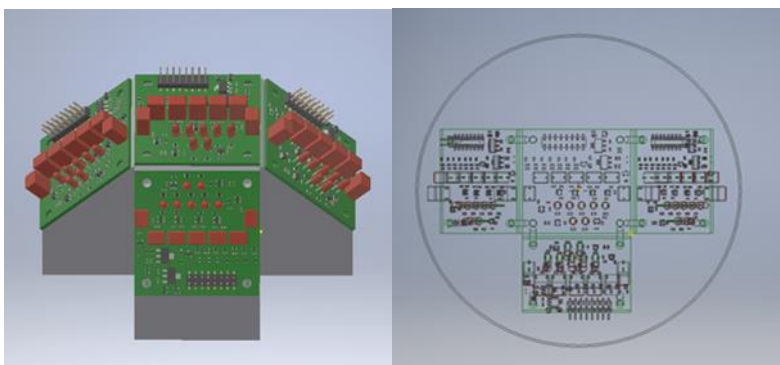
Obrázek č. 24: Rozvržení jednotlivých prvků na modulu

Takto navržené desky plošných spojů jsem nechal externí firmou vyrobit a následně jsem je osadil zmíněnými součástkami a provedl jejich oživení.

2.2 Mechanické řešení senzoru osvitů

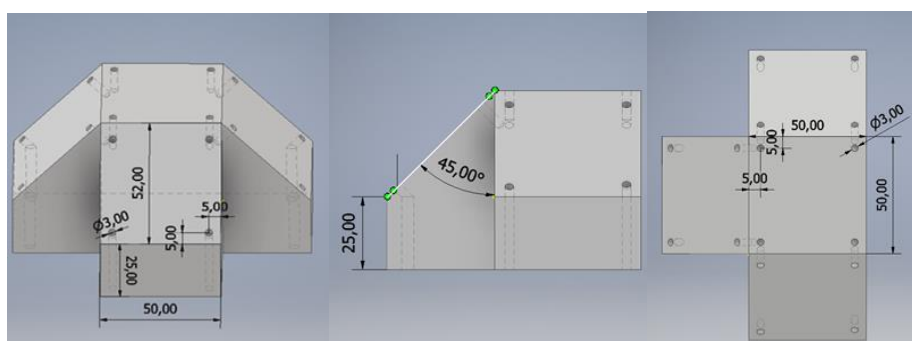
Mechanická konstrukce experimentálního senzoru se skládá z držáku jednotlivých modulů, které mají různou orientaci, jak již bylo zmíněno. Dále se mechanická konstrukce experimentálního senzoru skládá ze základny tvořené hliníkovou deskou o rozměrech 20 cm x 20 cm, na kterou je přišroubován držák modulů a ochranná kopule. Z druhé strany základny je přišroubován chladič. Veškeré tyto části mimo ochranné kopule jsou z hliníku, a to kvůli tomu, aby zajišťovaly dobré vedení tepla, neboť experimentální senzor osvitů je vybaven teplotní stabilizací, kterou zajišťují dva Peltiérové články. Tyto články se nachází mezi držákem a základnou.

Pro návrh a vymodelování držáku senzoru jsem použil program AutoCAD Inventor, kam jsem naimportoval i 3D model navrženého modulu. Dále jsem vymodeloval kopuli, do které bude senzor uzavřen, a tím jsem ověřil, zdali se osazený držák vejde do kopule. To je znázorněno na obrázku 25.



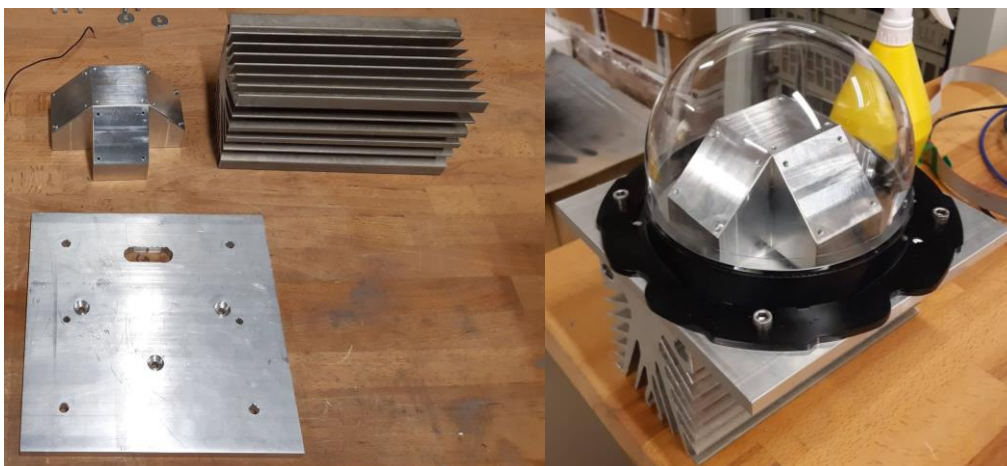
Obrázek 25: Držák senzoru osazený DPS a vložený do kopule

Přesné rozměry držáku jsou vykótovány v obrázku 26. Výška plošky je u nakloněných ploch o 2 mm delší kvůli teplotní roztažnosti, a to z toho důvodu, aby moduly neseděly takzvaně hrana na hranu. Jednotlivé díry jsem opatřil závitem na šroub M3 s hloubkou závitů 10 mm. Takto vymodelovaný držák jsem následně nechal externí firmou vysoustružit z hliníkového profilu na CNC soustruhu.



Obrázek 26: Držák senzoru - rozměry

Držák modulů experimentálního senzoru osvitů je přišroubován k základně z hliníkové desky, která je zobrazena na obrázku 27 vlevo. Na tomto obrázku je dále vidět samotný držák a i chladič. Tato základna má do sebe vyvrtané díry pro přišroubování jednak chladiče, držáku, tak i krycí kopule. Dále je v této základně vyfrézovaná oválný otvor pro protažení kabelů od jednotlivých modulů senzoru osvitů. Držák modulů je k základně přišroubován plastovými šrouby M4, a to z důvodu, aby přenos tepla mezi držákem a základnou s chladičem byl veden zejména přes Peltiéroví články. Na veškeré teplosměnné plochy jednotlivých částí mechanického řešení senzoru a Peltiérových článků je nanášena tenká vrstva uhlíkové teplovodivé pasty. Zkompletované mechanické řešení je zobrazeno na obrázku 27 vpravo včetně krycí kopule.



Obrázek 27: Jednotlivé části mechanického řešení experimentálního senzoru osvitů

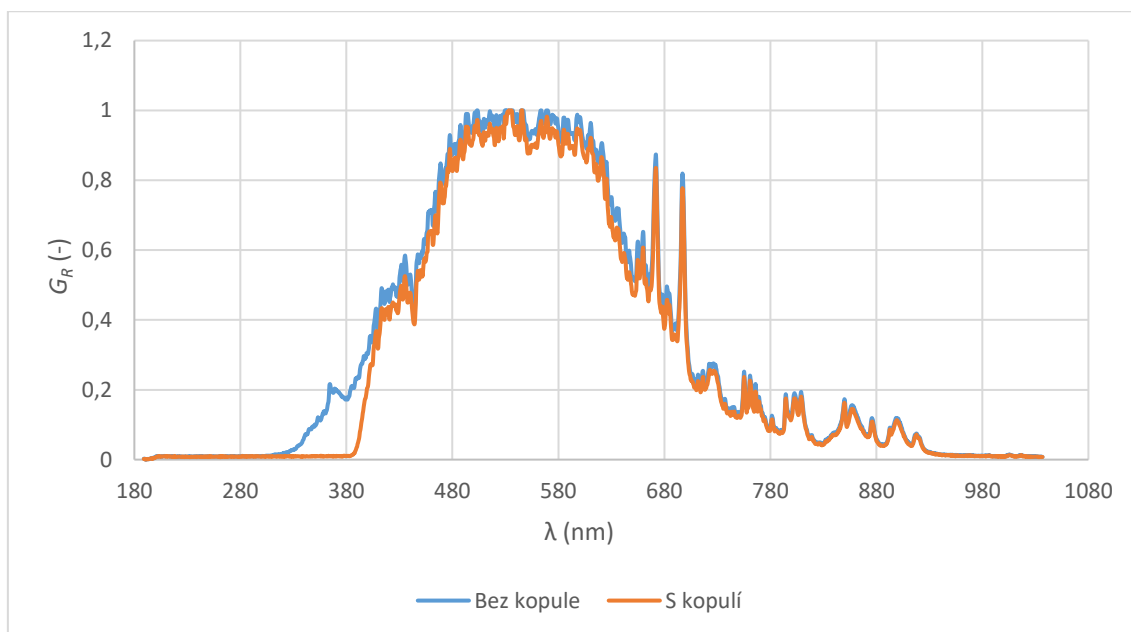
Zkompletovaná mechanická konstrukce experimentálního senzoru je přes čtyři závitové tyče M6 přišroubována k betonové dlaždici, která zajišťuje celkovou stabilitu senzoru a navyšuje jeho hmotnost, aby mohl experimentální senzor stabilně odolávat povětrnostním vlivům. Zavěšení na závitové tyče je také zvoleno kvůli možnosti vyrovnání základny senzoru do roviny přes dvě matice, kdy jedna se nachází zespodu základny a druhá seshora. Druhá matice zároveň upevňuje kopuli k desce chladiče. Takto seskládaný experimentální senzor osvitů je znázorněn na obrázku 28.



Obrázek 28: Kompletní experimentální senzor osvitů

2.3 Ochranná kopule

Ochranná kopule má chránit jednotlivé moduly před vnějšími vlivy. Zvolená kopule se používá pro ochranu bezpečnostních kamer. Tato kopule je znázorněna na obrázku 28. O vlastnostech kopule jsem bohužel nedohledal žádné relevantní informace. Pouze podle dostupných informací by měla být kopule z transparentního akryl-polykarbonátu. Celá kopule se skládá z transparentní části a gumové příruby, která má v sobě čtyři díry, pomocí kterých je přišroubována k základně experimentálního senzoru. Abych o vlastnostech kopule získal alespoň nějaké informace, podrobil jsem ji experimentálnímu měření, kdy jsem si pomocí spektrometru změřil spektrum solárního simulátoru SOLAB² na UCEEB ČVUT a následně změřil stejné spektrum přes tuto kopuli. K tomuto měření jsem použil spektrometr Flame od firmy Ocean Optics. Výsledek tohoto měření je znázorněn na obrázku číslo 29.



Obrázek 29: Spektrum solárního simulátoru SOLAB² s a bez kopule

Dále jsem změřil různá ozáření bez a s kopulí pomocí pyranometru CMP6 od firmy Kipp & Zonen. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 4. Dále je v tabulce vypočten útlum ozáření v procentech podle následujícího vzorce.

$$G_{\text{útlum}} = \frac{G_{\text{bez kopule}} - G_{\text{kopule}}}{G_{\text{bez kopule}}} \cdot 100\% \quad (8)$$

$G_{\text{bez kopule}} (\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$G_{\text{kopule}} (\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	$G_{\text{útlum}} (\%)$
388	321	17
507	421	17
1168	971	17

Tabulka 4: Naměřené ozáření pyranometrem s kopulí a bez kopule

Z naměřených průběhů spekter je patrné, že kopule nepropouští krátké vlnové délky. Zhruba až od 410 nm se chová transparentně. Tato její vlastnost může způsobovat chybu měření u modrých LED. Procentuální útlum je 17 %.

2.4 Měřicí řetězec experimentálního senzoru osvitu

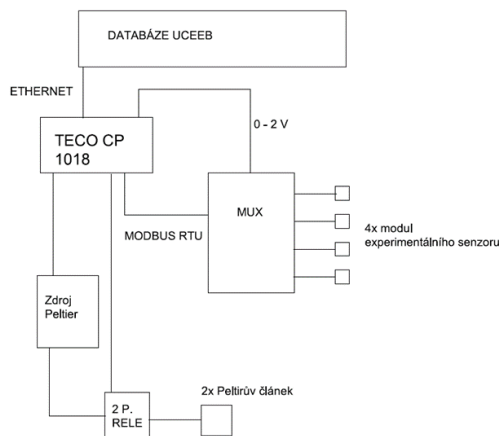
Signály z jednotlivých modulů jsou odváděny z kopule pomocí vodičů, které vedou do dalších prvků měřicího řetězce. Celkově se jedná o 8 signálů z každého modulu, kdy se v experimentálním senzoru osvitu nachází 4 moduly. Je tedy potřeba zpracovávat celkem až 32 analogových napěťových signálů. Tyto signály jsou dále zpracovávány pomocí programovatelného automatu PLC TECO CP 1018. Tento typ PLC automatu jsem zvolil vzhledem k tomu, že má dva napěťové analogové vstupy s vysokou vstupní impedancí. Rozsah tohoto vstupu je 0 až 2 V.

Dva analogové napěťové vstupy jsou potřeba, neboť mimo zadání této diplomové práce je v plánu realizovat dva experimentální senzory osvitu v rámci jedné instalace. Pro zadání této diplomové práce by stačil PLC automat pouze s jedním analogovým napěťovým vstupem.

Vzhledem k tomu, že tento typ PLC automatu má jen dva analogové napěťové vstupy, je využito ke zpracování všech až 32 signálů analogového multiplexoru AnalogMUX od firmy Papouch s.r.o. PLC automat komunikuje pomocí protokolu ModBus RTU s multiplexorem a postupně vyčítá jednotlivé signály. Dále je PLC automat připojen přes ethernetový kabel k internetu a odesílá naměřená data do databáze UCEEB. Řešení komunikace s databází UCEEB a vyčítání signálů jsem převzal z jiného projektu realizovaného na Univerzitním centru energeticky efektivních budov a není výsledkem ani předmětem mé diplomové práce.

PLC automat dále ovládá teplotní stabilizaci experimentálního senzoru osvitu. Tato záležitost je popsána v následující kapitole.

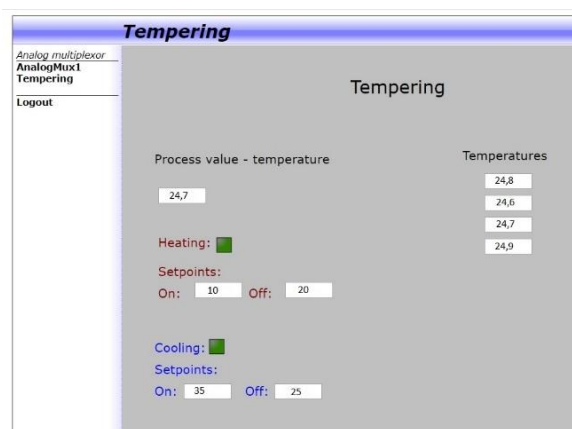
Blokové schéma celého měřicího řetězce je znázorněno na obrázku 30.



Obrázek 30: Blokové schéma měřicího řetězce.

2.5 Teplotní stabilizace

Teplotní stabilizace senzoru osvitu je realizována kvůli udržení stabilní teploty uvnitř kopule experimentálního senzoru osvitu a omezení teplotního driftu elektronických součástek. Je zajištěna pomocí dvou v sérii zapojených Peltiérových článků, které se nachází uvnitř kopule pod držákem modulů experimentálního senzoru. Chlazení nebo vytápění kopule je řízeno pomocí PLC automatu, kdy na základě naměřené hodnoty z teplotního čidla dochází k spínání zdroje pro Peltiérové články. Dále pak PLC může pomocí spínání dvoupólového stejnosměrného relé komutovat + a – na přívodních kabelech Peltiérových článků, čímž dochází k chlazení nebo vytápění kopule. V PLC automatu je vytvořen program, kde se dá nastavit takzvaný setpoint pro chlazení či vytápění kopule. K tomuto programu se dá přes webové rozhraní připojit a tento setpoint nastavit. Setpoint pro chlazení či vytápění má vždy dvě hodnoty, a to hodnotu pro začátek chlazení či vytápění a hodnotu, na které se daný děj zastaví. Ukázka tohoto rozhraní je na obrázku číslo 31.



Obrázek 31: Webové rozhraní pro teplotní stabilizaci.

3 Kalibrace experimentálního senzoru osvit

Základní měření pro kalibraci jednotlivých modulů experimentálního senzoru probíhala v laboratoři SOLAB² na UCEEB ČVUT. Tato laboratoř má k dispozici simulátor slunečního záření od firmy PSE AG. Tento simulátor je vybaven lampovým polem s ustáleným ozářením a umělou oblohou. Umělá obloha slouží k odstranění emise dlouhovlnného záření z horkých lamp, kdy se jedná o dutinu, která je složena ze čtyř skleněných modulů a je profukovaná vzduchem. Simulátor má osm Metal-halogenidových (MHG) lamp o výkonu 4000 W, konkrétně ATLAS MTT GmbH “Solar Constant 4000”. MHG žárovky obsahují malé množství kovů vzácných zemin a vytvářejí husté multičárové spektrum, které se velmi podobá spektru AM 1,5. Simulátor slunečního záření je možné pomocí pojezdového systému nastavovat do různé výšky. Solární simulátor je na obrázku číslo 32. Jelikož experimentální senzor osvit má především určovat osvit během dne, byl jako referenční zdroj užit tento solární simulátor se spektrem, které se podobá AM 1,5.



Obrázek 32: Solární simulátor

Kalibrace experimentálního senzoru byla provedena následovně.

Nejprve jsem pro vzorek dvaceti různých LED v pouzdře SMD 0805 změřil fotoproud, který generují, a to pro několik různých ozáření bez zesilovacího obvodu. Hodnoty různé ozáření jsem nastavoval pomocí vzdálenosti solárního simulátoru od desky univerzálního plošného spoje, na který jsem vzorek měřených LED napájel. Naměřené hodnoty dané LED jsem proložil polynomem prvního stupně. Tím jsem získal závislost fotoproudu na ozáření. Na základě této závislosti jsem vybral konkrétní LED, které jsem následně osadil na jednotlivé moduly experimentálního senzoru osvitů a dopočítal velikost zesilovacího rezistoru R_f . Kritériem pro výběr použitých LED byla jejich barva tak, abych mohl pokrýt co největší rozsah slunečního spektra a velikost generovaného fotoproudu, kdy jsem vybíral LED s co nejvyšším fotoproudem.

Následně jsem provedl obdobné měření, kdy jsem opět pro různé hodnoty ozáření změřil výstupní napětí všech kanálů osazených LED na modulu experimentálního senzoru osvitů.

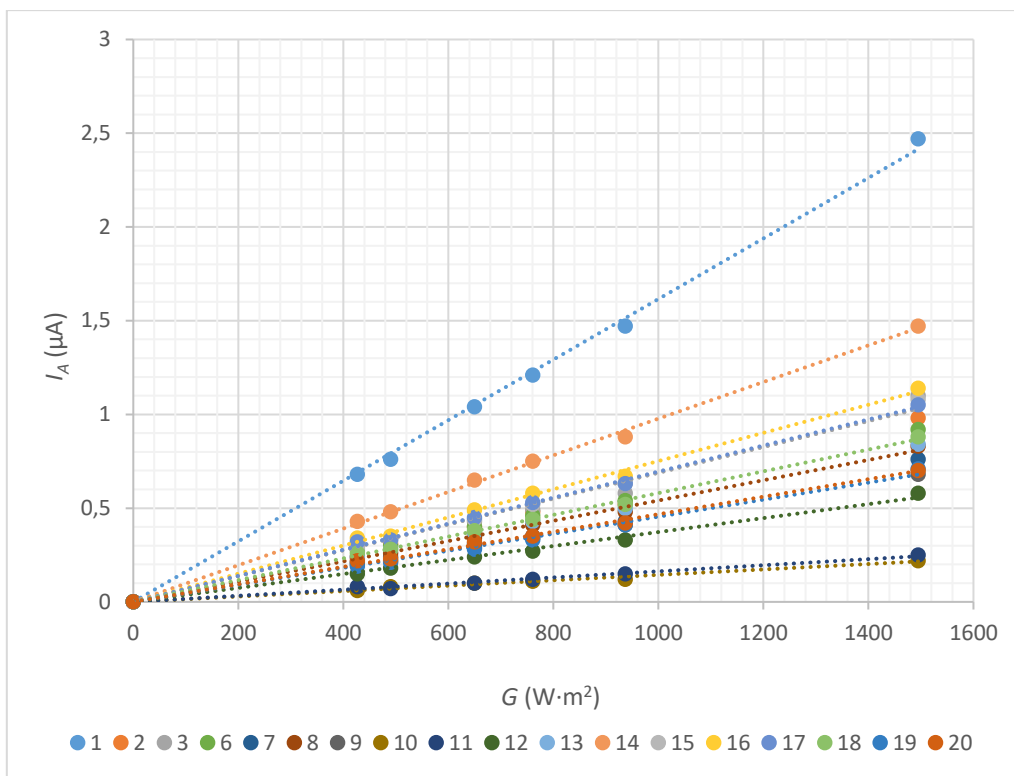
Toto měření jsem provedl na všech čtyřech modulech. Získal jsem tak závislost výstupního napětí z osazeného kanálu experimentálního senzoru na ozáření. Tuto závislost jsem proložil polynomem prvního stupně a určil parametry tohoto prokladu. Tím jsem získal rovnici, na základě které jsem schopen z výstupního napětí dopočítat orientačně ozáření, která dopadá na danou LED, pro spektrum blízké AM 1,5. Intenzita ozáření byla po celou dobu experimentů měřena pomocí pyranometru CMP6 od firmy Kipp & Zonen.

3.1 Určení fotoproudu LED čidlem bez OZ

V následující tabulce 5 je uveden příklad naměřených hodnot deseti LED v pouzdře SMD 0805.

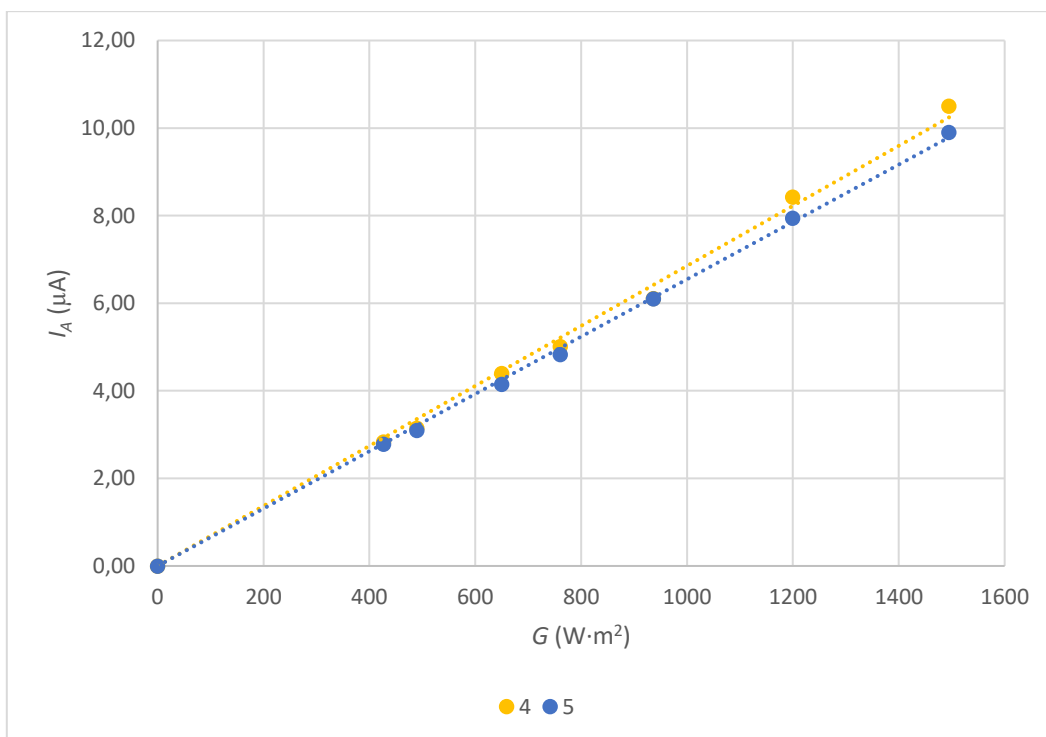
Barva	M	Z	Č	IR 880	IR 940	Ž	Z	M	Č	M
číslo vzorku	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G ($W \cdot m^{-2}$)	I_A (μA)									
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
427	0,68	0,29	0,28	2,83	2,78	0,15	0,21	0,08	0,20	0,06
490	0,76	0,31	0,34	3,15	3,10	0,18	0,24	0,07	0,22	0,08
650	1,04	0,40	0,43	4,40	4,15	0,24	0,31	0,10	0,29	0,10
761	1,21	0,48	0,49	5,01	4,83	0,27	0,35	0,12	0,34	0,11
937	1,47	0,52	0,58	6,11	6,10	0,33	0,43	0,15	0,41	0,12
1200	1,98	0,79	0,88	8,43	7,95	0,47	0,61	0,20	0,55	0,18
1495	2,47	0,98	1,10	10,50	9,90	0,58	0,76	0,25	0,68	0,22

Tabulka 5: Závislost fotoproudu I_A na ozáření.



Obrázek 33: Graf závislosti fotoproudu I_A na ozáření

Na obrázku 33 je závislost fotoproudu na ozáření pro osmnáct vzorků, které jsem proložil přímkou prvního stupně. Zbylé dva vzorky jsou uvedeny ve vlastním grafu na obrázku 34, protože generovaly vyšší fotoproud než ostatní LED a zakreslovaly by výsledky ostatních LED.



Obrázek 34: Graf závislosti fotoproudu I_A na ozáření G

Na základě velikosti generovaného fotoproudu I_A jsem se rozhodl, že na realizaci experimentálního senzoru osvitů použiju LED číslo 1, 2, 3, 4, a 5. Detailní vlastnosti vybraného vzorku LED je uveden v tabulce 6.

Barva	Modrá	Zelená	Červená	IR 880	IR 940
číslo vzorku	1	2	3	4	5
λ_{Peakmax} (nm)	465	568	643	860	940
technologie	InGaN	GaP	GaAlAs	GaAs	GaAs

Tabulka 6: Informace o vzorku vybraných LED

3.2 Důpočet zesílení

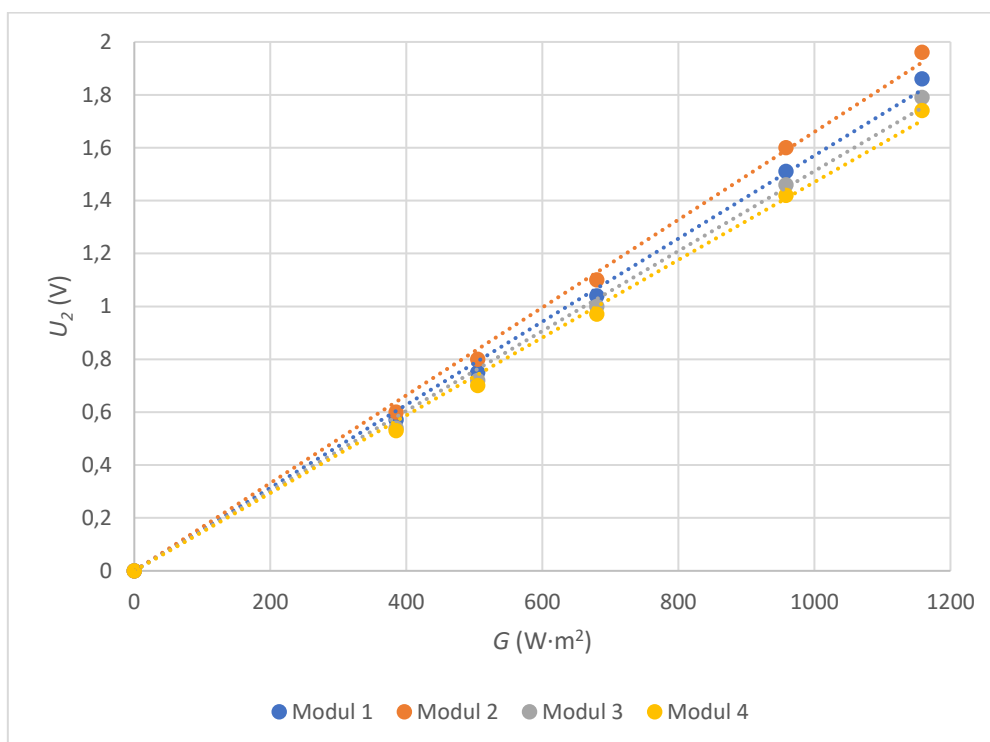
Důpočet zesílení pro převodník proud napětí jsem provedl následovně. Jako maximální hodnotu, kterou bude experimentální senzor osvitů schopen měřit, jsem vybral ozáření $G_{\text{max}} = 1200 \text{ W}\cdot\text{m}^2$. Tuto hodnotu jsem si vybral z toho důvodu, že by měla postačovat jako maximální hodnota ozáření, která se běžně v podmínkách ČR vyskytuje. Následně jsem si ze vzorce pro výstupní napětí převodníku proud napětí vyjádřil hodnotu zesilovacího odporu. Jako hodnotu maximálního napětí jsem dosadil maximální horní mez analogového napěťového vstupu PLC automatu, která je 2 V. Důpočtené hodnoty zesilovacího rezistoru R_f jsou v následující tabulce 7. Dále jsem z řady SMD rezistorů vybral nejnižší podobnou hodnotu, kterou jsem použil nakonec jako zesilovací rezistor R_f pro danou LED. Nejnižší možnou hodnotu jsem vybíral kvůli tomu, abych měl vždy výstupní napětí U_2 pro maximální ozáření $G_{\text{max}} 1200 \text{ W}\cdot\text{m}^2$ pod 2 V a nedostával se tak do saturace.

Barva	Modrá	Zelená	Červená	IR 880	IR 940
číslo vzorku	1	2	3	4	5
Důpočet zesílení R_f pro $1200 \text{ W}\cdot\text{m}^2$	1,01E+06	2,54E+06	2,27E+06	2,37E+05	2,52E+05
Možný R z příslušné řady	1,00E+06	2,20E+06	2,20E+06	2,20E+05	2,40E+05

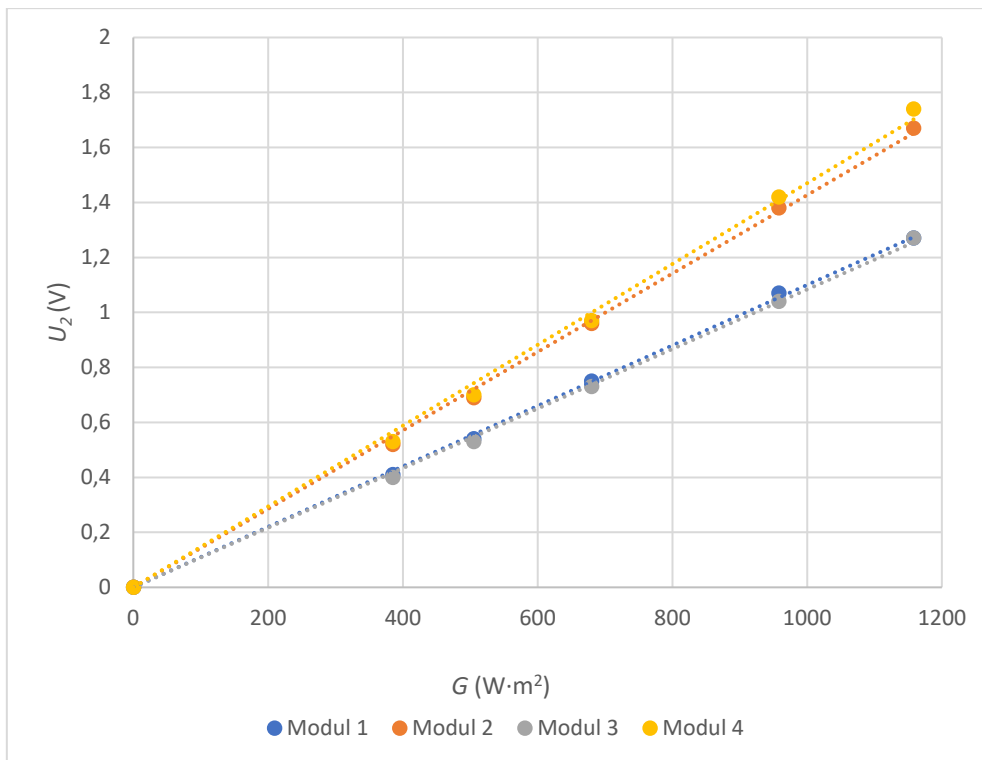
Tabulka 7: Důpočet zesilovacího rezistoru

3.3 Kalibrace modulů experimentálního senzoru osvitu

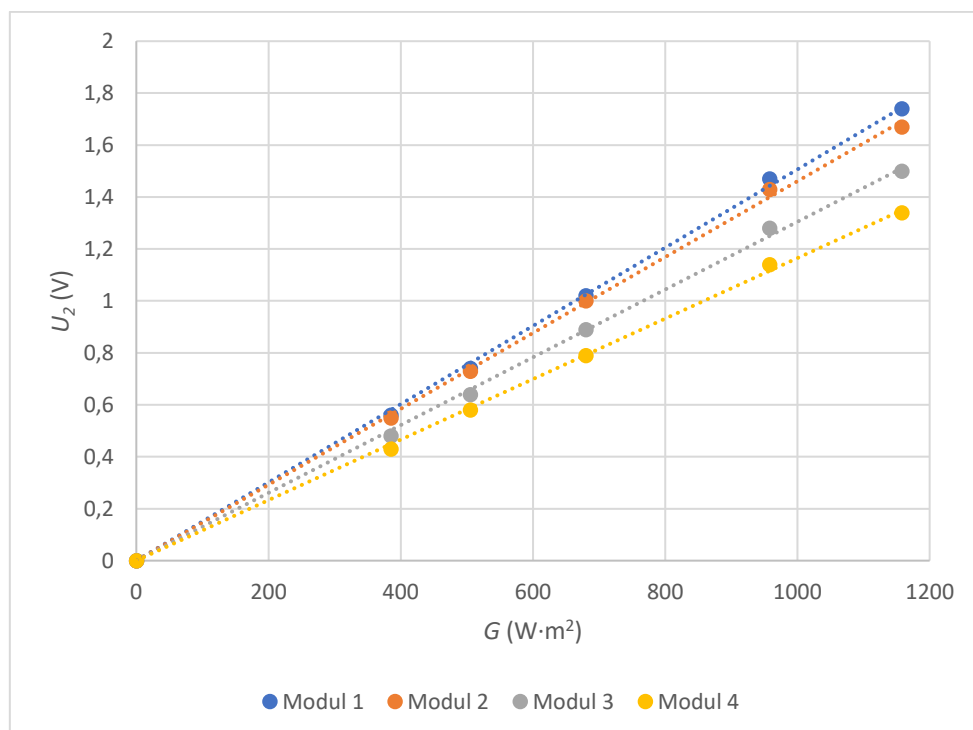
Po osazení modulů experimentálního senzoru osvitu jsem opět provedl kalibrační měření závislosti výstupního napětí na ozáření. Tímto měřením jsem chtěl ověřit, jestli je závislost výstupního napětí dle teoretického předpokladu lineární a platí vzorec $U_2 = R_f \cdot I_A$. Dále jsem pro každou LED určil rovnici jejího proložení polynomem prvního stupně. Na základě koeficientů, které jsem z tohoto proložení získal, mohu orientačně určovat z výstupního napětí U_2 ozáření G , které daná LED detekuje pro spektrum AM 1,5.



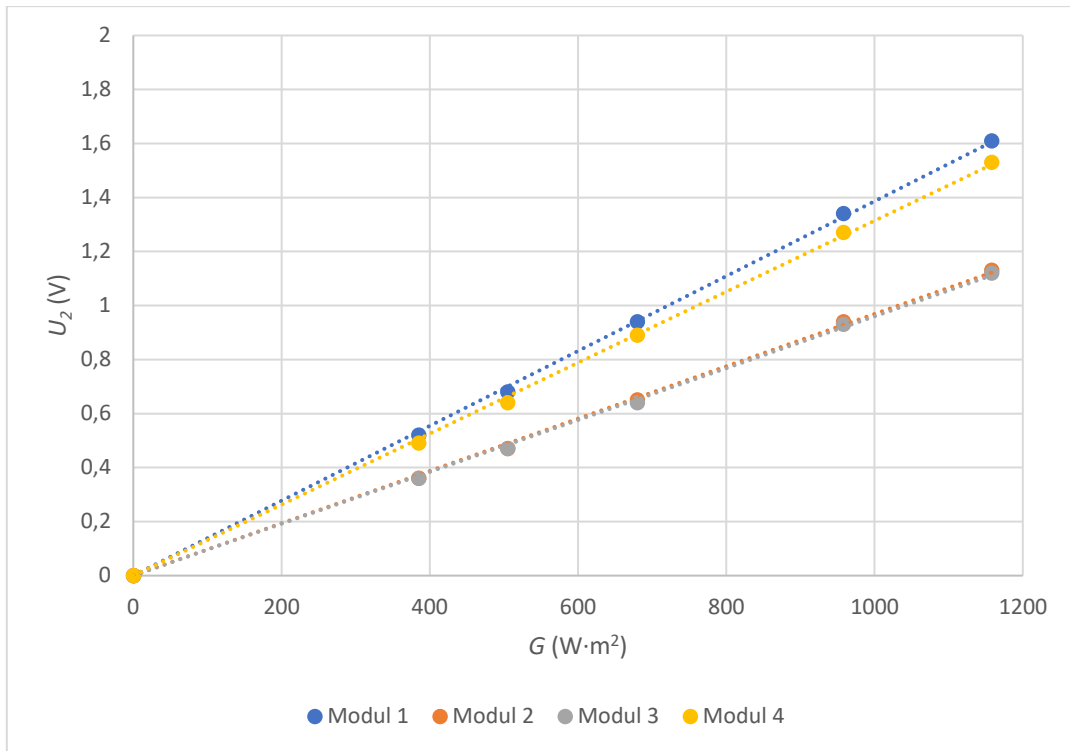
Obrázek 35: Závislost výstupního napětí U_2 modré LED osazených modulů na ozáření G



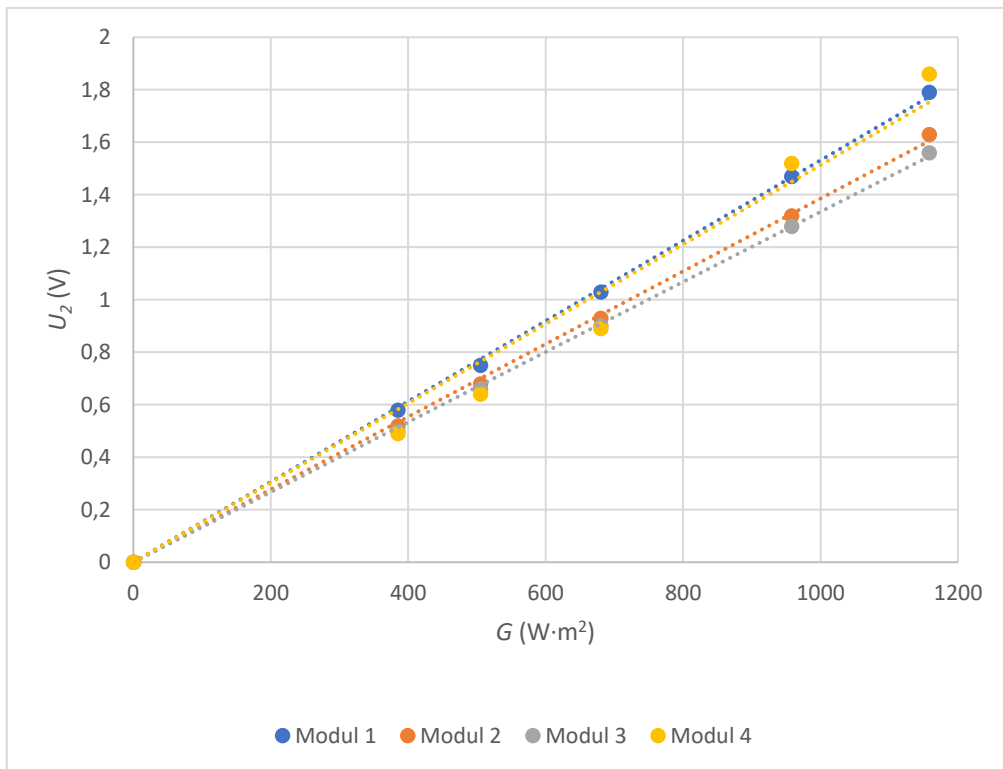
Obrázek 36: Závislost výstupního napětí U_2 zelené LED osazených modulů na ozáření G



Obrázek 37: Závislost výstupního napětí U_2 červená LED osazených modulů na ozáření G



Obrázek 38: Závislost výstupního napětí U_2 860 IR LED osazených modulů na ozáření G



Obrázek 39: Závislost výstupního napětí U_2 IR 940 LED osazených modulů na ozáření G

Z naměřených charakteristik je patrné, že se hodnoty některých LED stejné barvy značně liší, proto je nutné jednotlivé měřicí kanály kalibrovat individuálně. Tato rozdílnost může být způsobena různými technologickými odlišnostmi jednotlivých LED stejné barvy, které mohou být způsobeny například variabilitou technologického procesu výroby či odlišnými vlastnostmi zesilovacího obvodu.

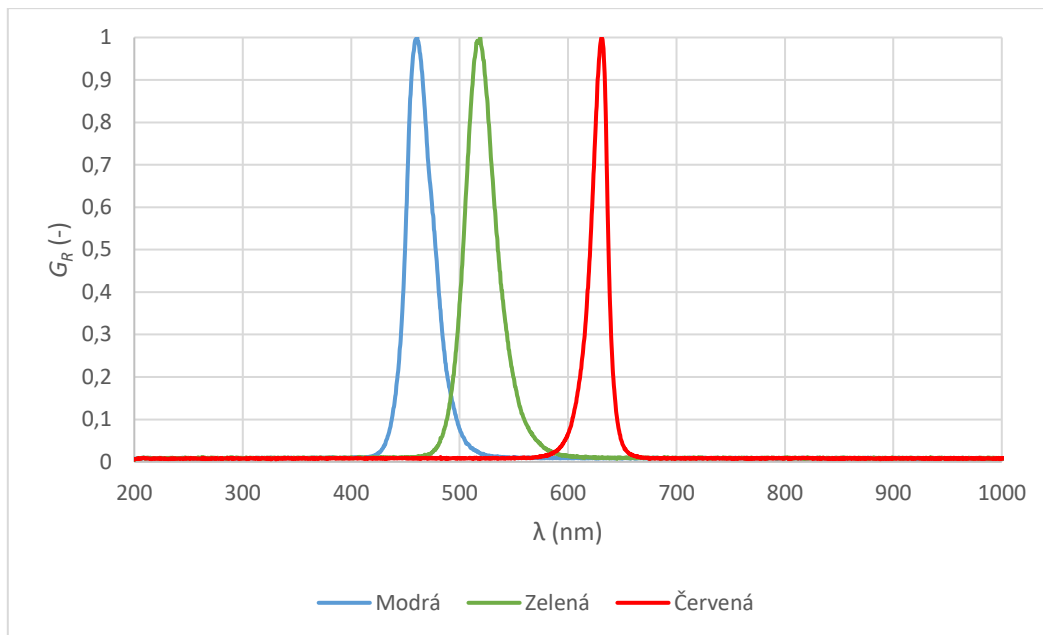
Dopočet vztahu pro proložení závislostí polynomem prvního stupně ve tvaru $y = a \cdot x$, což se dá na naměřené charakteristiky interpretovat jako $U_2 = a \cdot G$. Dopočet koeficientu a jsem provedl v softwaru Matlab pomocí Curve Fitting Toolboxu. V následující tabulce uveden příklad tohoto parametru pro modul 1, který jsem použil jako referenční modul pro ověření spektrální selektivity jednotlivých LED.

	Modrá modul 1	Zelená modul 1	Červená modul 1	840 modul 1	960 modul 1
a	0,00157	0,0011	0,0015	0,00139	0,0015

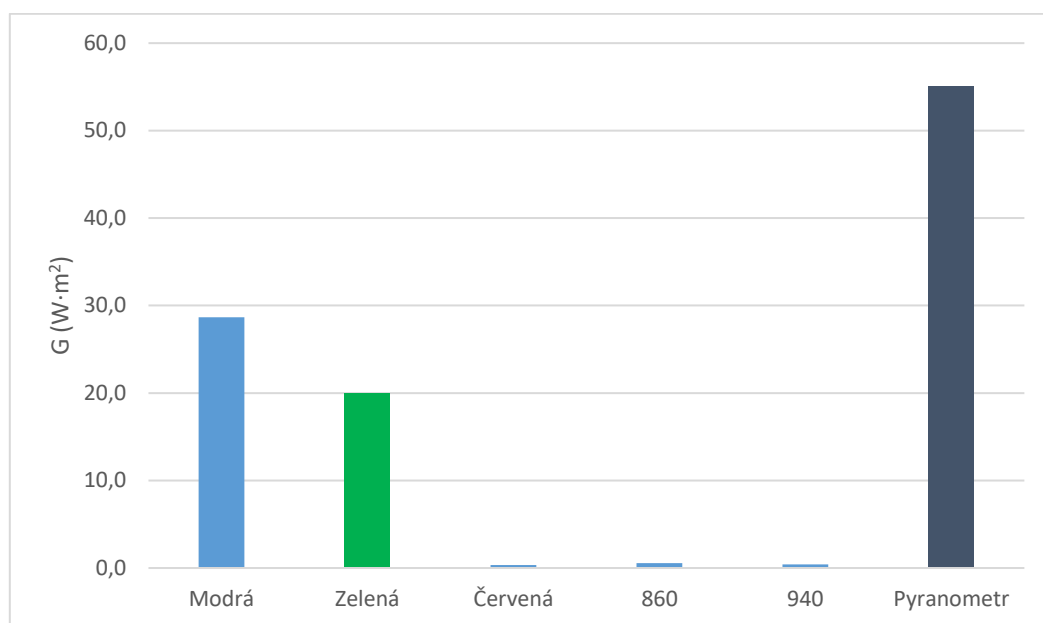
Tabulka 8: Koeficienty prokladu polynomem prvního stupně pro modul 1

3.1 Ověření na světelných zdrojích s různým spektrem

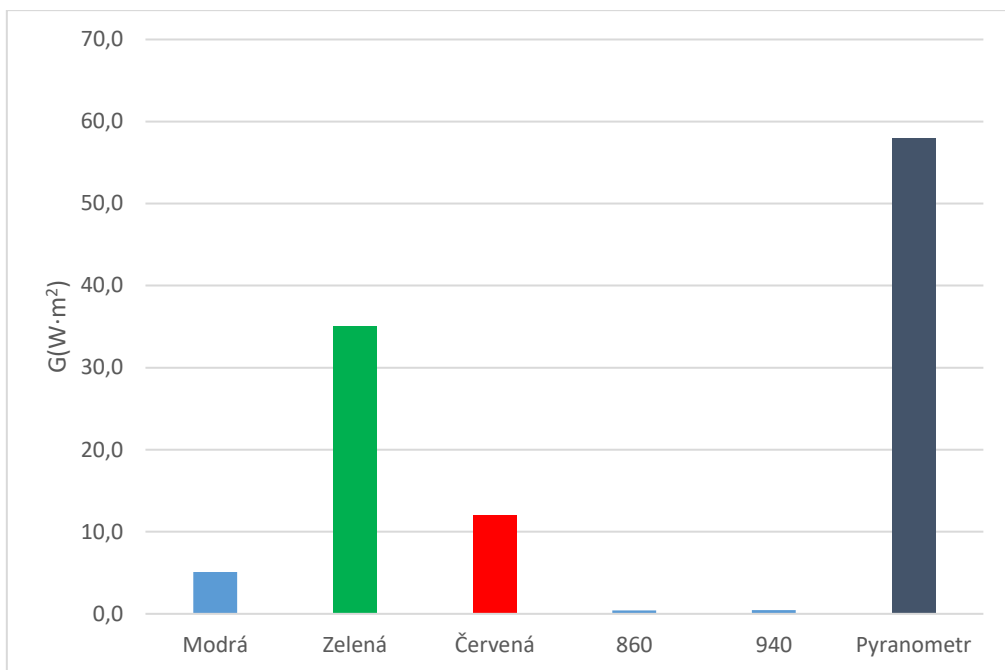
Spektrální selektivitu jednotlivých LED jsem ověřil následujícím experimentem, kdy jsem použil světelný zdroj s různým spektrem. Konkrétně jsem použil žárovku s RGB LED, která umožňuje nastavit různé barvy. Postupně jsem vybraný modul číslo 1 ozářil červenou, zelenou a modrou barvou a odečetl výstupy ze všech jeho kanálů. RGB žárovku jsem nastavil vždy do takové výšky, aby byla ozářenost stále stejná. Ozářenost jsem kontroloval pomocí stejného pyranometru jako během kalibrace. Spektra použitých barev jsou uvedena na obrázku 40. Tato spektra jsem změřil stejným spektrometrem jako v kapitole 2.3.



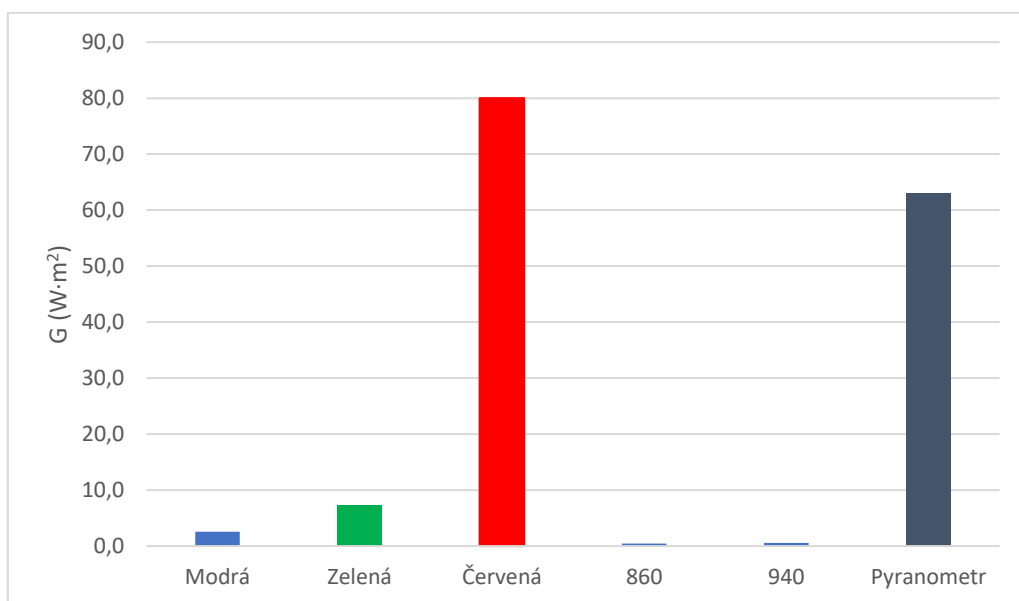
Obrázek 40: Různá světelná spektra LED žárovky pro určení spektrální selektivity



Obrázek41: Ověření spektrální selektivity pro modré světlo



Obrázek 42: Ověření spektrální selektivity pro zelené světlo



Obrázek 43: Ověření spektrální selektivity pro červené světlo

Naměřená data jsem pomocí výše uvedeného vztahu přepočítal na ozáření a zde znázornil na obrázku 39 až 41 ve formě sloupcových grafů. Z grafů je patrná spektrální selektivita jednotlivých LED. Z obrázku 39 je patrné, že i zelená LED má značnou odezvu na modré světlo, což je patrně způsobené posunem spektrální odezvy oproti emisnímu spektru, což jsem popsals v kapitole 2.

4 Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem, realizací a kalibrací experimentálního senzoru osvitů, který využívá spektrálně selektivní čidla ozáření. V tomto případě byly využity jako detektory LED s různým emisním spektrem.

V teoretické části jsou nejprve shrnuty základní informace o slunečním záření. Dále jsou popsány jednotlivé druhy komerčně prodávaných senzorů osvitů a způsoby jejich využití, kdy se naměřená data z těchto senzorů používají například pro určování meteorologických modelů, dále pak k určování pasivních solárních zisků v budovách a k přesné predikci výroby fotovoltaických systémů.

V praktické části je popsán návrh a realizace experimentálního senzoru osvitů. Nejprve se tato práce zabývá samotným konceptem tohoto senzoru. Dále je popsána problematika využití LED jako detektorů záření v obecné praxi. Důvodem, proč byly vybrány barevné LED, je jejich rozšířenost a cenová dostupnost. Následně je popsán měřicí obvod, který experimentální senzor osvitů využívá na svých modulech. Pro to byl zvolen převodník proud napětí. V mechanické části je rozebrána celková konstrukce experimentálního senzoru. Tento senzor se skládá z držáku na čtyři moduly, kopule a základny s chladičem. Všechny tyto části mimo kopule jsou vyrobeny z hliníku, který byl použit kvůli dobré tepelné vodivosti, neboť experimentální senzor osvitů je vybaven dvěma Peltiérovými články pro zabezpečení teplotní stabilizace senzoru. Tato stabilizace je zde zrealizována za účelem omezení teplotního driftu LED a elektronických součástek. K tomu byl do PLC automatu naprogramován řídicí algoritmus. Světelná transparentnost zvolené kopule byla experimentálně ověřena a bylo zjištěno, že nepropouští krátkovlnné světelné záření do hodnoty zhruba 410 nm. Navržený experimentální senzor osvitů byl následně prakticky zrealizován.

Třetí část této práce je věnována samotné kalibraci experimentálního senzoru osvitů. Kalibrace byla provedena na solárním simulátoru v laboratoři SOLAB² na UCEEB ČVUT. Kalibrace byla provedena na spektrum podobné AM 1,5 pro všechny čtyři moduly tím, že byla proměřena charakteristika výstupního napětí měřicího kanálu všech osazených LED. Tato charakteristika byla proložena polynomem prvního stupně a byly určeny jeho parametry, které slouží k přepočtu výstupního napětí na osvit. Dále byla ověřena spektrální odezva různě barevných LED. Tato měření prokázala schopnost realizovaného experimentálního senzoru měřit pomocí libovolné zvolené LED ozáření se spektrem AM 1,5. Při ozáření tímto spektrem ukazují výstupy experimentálního senzoru s různými čidly LED obdobnou hodnotu ozáření. Při ozáření experimentálního senzoru zdrojem světla s jiným spektrem než AM 1,5 například červeného

světla, je odezva čidla LED, který je pro dané světelné spektrum citlivý, výrazně vyšší než ostatních čidel LED. Porovnáním výstupního signálu senzoru s různými LED lze určit odchýlení od spektra AM 1,5.

Vzhledem k tomu, že jsem tuto diplomovou práci vypracovával v zimním semestru, nebylo možno naměřit dostatečně reprezentativní vzorek dat ve venkovních podmínkách, který by ověřil praktickou funkčnost experimentálního senzoru osvitů na slunečním záření.

Seznam použité literatury

- [1] Předpověď výroby fotovoltaických systémů [online]. ČVUT UCEEB: tzbinfo, 2017 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z:
<https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/15928-predpoved-vyroby-fotovoltaickych-systemu>
- [2] MASTNÝ, Petr. Obnovitelné zdroje elektrické energie. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [3] LUQUE, A. a Steven HEGEDUS. Handbook of photovoltaic science and engineering. Hoboken, NJ: Wiley, c2003. ISBN isbn0-471-49196-9.
- [4] RIPKA, Pavel. Senzory a převodníky. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 9788001046968.
- [5] A Guide to Solar Radiation Measurement: From sensor to application [online]. Gengenbach Messtechnik: Reinhold Rösemann, 2017 [cit. 2018-06-06]. Dostupné z:
https://info.kippzonen.com/hubfs/Downloads/ebook_a_Guide_to_Solar_Radiation_Measurement.pdf
- [6] Přesnost zdrojů předpovědi osvitů pro fotovoltaické systémy [online]. ČVUT UCEEB: tzbinfo, 2017 [cit. 2019-01-01]. Dostupné z:
https://www.tzb-nfo.cz/docu/casopisy/0008/000892_vytapeni-vevtrani-instalace-cislo-3-2017.pdf
- [7] Forrest M. Mims, "Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors," Appl. Opt. 31, 6965-6967 (1992) [cit. 2019-01-01]. Dostupné z:
<https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-31-33-6965>
- [8] Jeffrey S. Czupla-Myers, Kurtis J. Thome, and Stuart F. Biggar, "Design, calibration, and characterization of a field radiometer using light-emitting diodes as detectors," Appl. Opt. 47, 6753-6762 (2008) [cit. 2019-01-01]. Dostupné z:
<https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-47-36-6753>
- [9] Acharya Y.B., "Spectral and emission characteristics of LED and its application to LED-based sun-photometry," 2005OptLT..37..547A(2004) [cit. 2019-01-01]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399204001677>
- [10] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1241-5.
- [11] WALTER, G. Jung. *OP AMP APPLICATIONS*. U.S.A.: Analog Devices, Inc. 2002. ISBN 0-916550-26-5
- [12] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 3., rozš. vyd. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-1241-5.
- [13] HERAUSGEBER. *Leitfaden Photovoltaische Anlagen.*: Berlin 978-3-9805738-6-3 (ISBN)Seznam obrázků
- [14] ZELENKA, Václav. *Projekt 1*. Praha, 2018.

[15] ZELENKA, Václav. *Projekt 2*. Praha, 2019.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma znázorňující prostup záření zemskou atmosférou

Obrázek 2: Využitelné spektrum záření pro články Si

Obrázek 3: Sluneční geometrie

Obrázek 4: Spektrum slunečního záření AM0 a AM1,5

Obrázek 5: Spektrum slunečního záření při různých úhlech výšky Slunce

Obrázek 6: Spektrum slunečního záření při různých stupních oblačnosti.

Obrázek 7: Senzory osvitů 1) s křemíkovým fotovoltaickým článkem, 2) fotodiodou, 3) pyranometr

Obrázek 8: Spektrální rozsah pyranometru a fotodiody v porovnání se spektrem záření dopadajícího na zemský povrch u hladiny moře

Obrázek 9: Konstrukce pyranometru

Obrázek 10: Schéma chlazení nebo ohřívání pyranometru pomocí ventilátoru a tepelných tělísek

Obrázek 11: Princip senzoru založeného na fotodiodě

Obrázek 12: Příklad senzoru pracujícího na principu fotodiody

Obrázek 13: Spektrální citlivost různých druhů Fotovoltaických článků

Obrázek 14: Model základního konceptu experimentálního senzoru osvitů

Obrázek 15: Porovnání emisního spektra a spektrální odezvy stejné LED

Obrázek 16: Transimpedanční zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu

Obrázek 17: V-A charakteristika Transimpedančního zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu

Obrázek 18: Zapojení jednoho čidla (kanálu)

Obrázek č. 19: Napájení + 5 V

Obrázek 20: Napájení - 5 V

Obrázek 21: Teplotní senzor

Obrázek 22: Konektor a drátové propojky (jumper)

Obrázek 23: 3D náhled modulu experimentálního senzoru osvitů

Obrázek č. 24: Rozvržení jednotlivých prvků na modulu

Obrázek 25: Držák senzoru osazený DPS a vložený do kopule

Obrázek 26: Držák senzoru - rozměry

Obrázek 27: Jednotlivé části mechanického řešení experimentálního senzoru osvitů

Obrázek 28: Kompletní experimentální senzor osvitu

Obrázek 29: Spektrum solárního simulátoru SOLAB² s a bez kopule

Blokové schéma celého měřicího řetězce je znázorněno na obrázku 30.

Obrázek 31: Webové rozhraní pro teplotní stabilizaci.

Obrázek 32: Solární simulátor

Obrázek 33: Graf závislosti fotoproudu I_A na ozáření

Obrázek 34: Graf závislosti fotoproudu I_A na ozáření

Obrázek 35: Závislost výstupního napětí U_2 modré LED osazených modulů na ozáření G

Obrázek 36: Závislost výstupního napětí U_2 zelené LED osazených modulů na ozáření G

Obrázek 37: Závislost výstupního napětí U_2 zelené LED osazených modulů na ozáření G

Obrázek 38: Závislost výstupního napětí U_2 860 IR LED osazených modulů na ozáření G

Obrázek 39: Závislost výstupního napětí U_2 IR 940 LED osazených modulů na ozáření G

Obrázek 40: Různá světelná spektra LED žárovky pro určení spektrální selektivity

Obrázek 41: Ověření spektrální selektivity pro modré světlo

Obrázek 42: Ověření spektrální selektivity pro zelené světlo

Obrázek 43: Ověření spektrální selektivity pro červené světlo

Seznam Tabulek

Tabulka 1. Rozdělení elektromagnetického spektra pomocí vlnových délek

Tabulka 2: Naměřený proud osluněnou LED bez OZ

Tabulka 3: LED s operačním zesilovačem a bez

Tabulka 4: Naměřené ozáření pyranometrem s kopulí a bez kopule

Tabulka 5: Závislost fotoproudu I_A na ozáření.

Tabulka 6: Informace o vzorku vybraných LED

Tabulka 7: Dopočet zesilovacího rezistoru

Tabulka 8: Koeficienty prokladu polynomem prvního stupně pro modul 1.