



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## MĚŘENÍ SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ - MATICOVÝ SNÍMAČ S FOTODIODAMI

SOLAR RADIATION MEASUREMENTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Miroslav Kokeš

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Miroslav Kokeš

**ID:** 186113

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Měření slunečního záření - maticový snímač s fotodiodami

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a ověření metody pro měření přímého a difúzního slunečního záření. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Zpracujte rešerši týkající se měření slunečního ozáření.
2. Navrhněte a realizujte vhodně uspořádaný maticový snímač s fotodiodami, schopný použití v provozních podmínkách, diskutujte volbu použitých součástí a konstrukční řešení
3. Ověřte funkčnost realizovaného snímače porovnáním s referenčním snímačem, diskutujte dosažené parametry.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Matuška, T. Solární zařízení v příkladech. Grada 2013.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 20.5.2019

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
*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**

Obsahem bakalářské práce je návrh levného maticového snímače s fotodiodami BPW34 pro měření přímého a difúzního slunečního záření. V teoretické části je obsažen rozbor slunečního záření, jevy ovlivňující sluneční záření a rešerše přístrojů pro jeho měření. V praktické části je obsažen návrh a výběr vhodných součástek, následně jeho sestavení a ověření funkčnosti realizovaného snímače v provozních podmínkách. Výsledky měření byly z důvodu chyby v návrhu sestaveného snímače nevyhodnotitelné a bylo změřeno pouze celkové sluneční záření. Závěr je věnován shrnutí naměřených výsledků a dalšímu postupu úpravy snímače.

## **Klíčová slova**

Měření slunečního záření, fotodioda, pyranometr, maticový snímač

## **Abstract**

The aim of this thesis is to design a moderate matrix sensor equipped with photodiodes BPW34 which is used to measure direct and diffused solar radiation. The theoretical framework of the thesis is focused on the analysis of solar radiation, influencing phenomenon and devices used for measuring solar radiation. Practical part of the thesis includes design and selection of suitable parts followed by construction of the device and its testing in operating conditions. The irregularity in design of the sensor caused the error which led to the failure in evaluating of measurement. The overall solar radiation data was measured and evaluated. The conclusion is dedicated to the evaluation of results and possible future plans to redesign the device in order to correct the measurement of all required data.

## **Keywords**

Solar radiation measurement, photodiode, pyranometer, matrix sensor

## **Bibliografická citace:**

KOKEŠ, Miroslav. *Měření slunečního záření - maticový snímač s fotodiodami* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119267>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Beneš.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření slunečního záření - maticový snímač s fotodiodami jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho 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: **12. května 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Stanislavu Pikulovi za poskytnuté konzultace při práci s programem LabVIEW a Ing. Miroslavu Uhrovi za a vyhotovení desek plošných spojů pro sestavený snímač.

V Brně dne: **12. května 2019**

.....  
podpis autora

# Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Solární energie .....	2
2.1	Slunce.....	2
2.2	Přímé a difúzní sluneční záření .....	2
3.	Spektrum slunečního záření.....	3
3.1	Ultra fialové sluneční záření .....	3
3.1.1	Ultrafialové záření typu A .....	3
3.1.2	Ultrafialové záření typu B.....	3
3.1.3	Ultrafialové záření typu C.....	3
3.2	Viditelné světlo .....	4
3.3	Infračervené záření.....	4
4.	Měření solární energie .....	5
4.1	Měření celkového slunečního ozáření.....	5
4.1.1	Pyranometr s termočlánkem .....	5
4.1.3	Pyranometr s fotodiodou.....	6
4.1.4	Fotovoltaický pyranometr.....	6
4.2	Měření přímého slunečního ozáření.....	7
4.3	Měření difúzního slunečního ozáření.....	7
4.4	Měření odraženého slunečního záření.....	8
5.	Průchod slunečního záření atmosférou .....	9
5.1	Atmosféra .....	9
5.2	Útlum přímého slunečního záření .....	9
5.2.1	Rozptyl přímého slunečního záření .....	10
5.2.2	Absorpce přímého slunečního záření.....	10
5.2.3	Ozón.....	11
6.	Návrh snímače .....	12
6.1	Výběr součástek .....	12
6.1.1	Fotodiody .....	12
6.1.2	Zesilovač.....	12
6.1.3	Teplotní čidlo .....	13
6.2	Testovací zapojení.....	13
6.2.1	Schéma testovacího zapojení .....	14
6.2.2	Převodník proudu na napětí .....	14
6.2.3	Pouzdro testovacího snímače.....	15
6.2.4	Průběh testovacího měření.....	16
6.2.5	Závěr .....	17
6.3	Datalogger .....	18
6.3.1	Program:.....	18

7.	Maticový snímač.....	19
7.1	Návrh snímače.....	19
7.1.1	Počet a rozmístění diod:.....	19
7.1.2	Výška stínícího válce .....	20
7.2	Vlastní výroba snímače .....	21
8.	Výsledky měření maticového snímače .....	23
8.1	Testovací měření .....	25
8.1.1	Porovnání hodnot.....	26
9.	Závěr .....	28

# Seznam symbolů a zkratek

## Zkratky:

FEKT	...	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	...	Vysoké učení technické v Brně
TDMS	...	Technical Data Management Streaming
GBWP	...	Gain Bandwidth Product

## Symbols:

U	...	napětí	[Ω]
I	...	proud	[A]
C	...	kapacita	[F]
$I_e$	...	intenzita slunečního záření	[W/m <sup>2</sup> ]
S	...	plocha	[m <sup>2</sup> ]
d	...	délka	[m]
$\alpha, \beta$	...	úhel	[°]
$S_\lambda$	...	Spektrální citlivost	[-]
h	...	výška	[m]
r	...	poloměr	[m]



## Seznam obrázků

Obr. 2-1 - Průchod slunečního záření atmosférou [8] .....	2
Obr. 3-1 – Spektrum záření [9] .....	4
Obr. 4-1 - Pyranometr s termočlánkem [7] .....	5
Obr. 4-2 - Pyranometr s fotodiodou [7] .....	6
Obr. 4-3 - Fotovoltaický pyranometr, model ML1-C2 [7] .....	6
Obr. 4-4 - Spektrální odezva pyranometrů [7] .....	7
Obr. 4-5 - Pyrhelimetr s fotodiodou [10] .....	7
Obr. 4-6 - Pyranometr se stínícím prstencem [11] .....	8
Obr. 4-7 - Albedometr CMA 6 [12] .....	8
Obr. 5-1 - Distribuce slunečního záření [13] .....	9
Obr. 5-2 - Rozptyl přímého slunečního záření [14] .....	10
Obr. 5-3 - Spektrum slunečního záření [16] .....	11
Obr. 6-1 - Schéma zapojení fotovoltaického a fotovodivostního režimu [17] .....	13
Obr. 6-2 - Detail uchycení diod a peltierova článku testovacího zapojení .....	13
Obr. 6-3 - Schéma zapojení testovacího snímače .....	14
Obr. 6-4 - Pouzdro testovacího snímače .....	16
Obr. 6-5 - Graf intenzity slunečního záření testovacího zapojení .....	17
Obr. 6-6 - Graf Intenzit slunečního záření testovacího zapojení - 22.4.2019 .....	17
Obr. 6-7 - Řídící obrazovka LabVIEW .....	18
Obr. 7-1 - Schéma rozmístění diod maticového snímače .....	20
Obr. 7-2 - Schéma vzdálenosti diod .....	20
Obr. 7-3 - Minimální výška stínícího válce .....	21
Obr. 7-4 - Schéma zapojení maticového snímače .....	22
Obr. 8-1 - Graf intenzit slunečního záření maticového snímače - 26.4.2019 .....	23
Obr. 8-2 - Graf intenzity slunečního záření 28.4.2019, 12:00 .....	24
Obr. 8-3 - Graf intenzity slunečního záření maticového snímače - 28.4.2019 .....	24
Obr. 8-4 - Graf průběhu napětí na diodách - 26-29.4.2019 .....	25
Obr. 8-5 - Graf intenzit slunečního záření maticového snímače - 28.4.2019 .....	27
Obr. 8-6 - Normalizace maticového snímače .....	27
Obr. 10-1 - Testovací zapojení uvnitř .....	32
Obr. 10-2 - Testovací zapojení vně .....	32
Obr. 10-3 - LabVIEW - zobrazení průběhů diod .....	33
Obr. 10-4 - Polovina desky plošných spojů pro osazení diod .....	33
Obr. 10-5 - Deska plošných spojů s operačními zesilovači .....	34
Obr. 10-6 - Maticový snímač uvnitř .....	35
Obr. 10-7 - Maticový snímač vně .....	35
Obr. 10-8 - Graf intenzity slunečního záření .....	36
Obr. 10-9 - Graf intenzity slunečního záření - 26.4.2019 .....	36

Obr. 10-10 - Graf intenzity slunečního záření - 27.4.2019.....	37
Obr. 10-11 - Graf intenzity slunečního záření - 28.4.2019.....	37
Obr. 10-12 - Graf intenzity slunečního záření - 29.4.2019.....	38
Obr. 10-13 - Graf intenzity slunečního záření - 30.4.2019.....	38
Obr. 10-14 - Graf intenzity slunečního záření - D1 .....	39
Obr. 10-15 - Graf intenzity slunečního záření - D2.....	39
Obr. 10-16 - Graf intenzity slunečního záření - D3.....	40
Obr. 10-17 - Graf intenzity slunečního záření - D4.....	40
Obr. 10-18 - Graf intenzity slunečního záření - D5.....	41
Obr. 10-19 - Graf intenzity slunečního záření - D6.....	41
Obr. 10-20 - Graf intenzity slunečního záření - D8.....	42
Obr. 10-21 - Graf intenzity slunečního záření - D9.....	42
Obr. 10-22 - Graf intenzity slunečního záření - D10.....	43
Obr. 10-23 - Graf intenzity slunečního záření - D11.....	43
Obr. 10-24 - Graf intenzity slunečního záření - D12.....	44

## **Seznam tabulek**

Tabulka 3-1 - Rozdělení ultrafialového záření [3][5].....	3
Tabulka 8-1 - Vliv kupole na měřená data .....	25

# 1. ÚVOD

Cílem bakalářské práce je návrh a výroba cenově dostupného snímače a ověření přesnosti měření přímého a difúzního slunečního záření k hodnotám referenčního snímače.

Teoretická část shrnuje informace o solární energii, o slunečním záření, spektru slunečního záření, jevech vznikajících při průchodu slunečního záření atmosférou a způsobech měření solární energie, které byly použity při návrhu realizovaného snímače.

Na teoretickou část navazuje popis volby použitých součástí a konstrukční řešení realizovaného snímače, ověření jeho funkčnosti v provozních podmínkách, vyhodnocení dosažených parametrů snímače porovnáním s referenčním snímačem a závěrečné vyhodnocení realizovaného maticového snímače.

## 2. SOLÁRNÍ ENERGIE

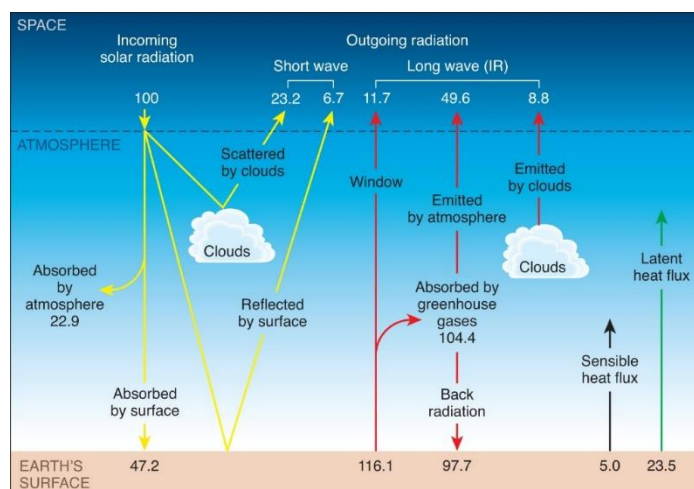
### 2.1 Slunce

Planeta Země je součástí sluneční soustavy jejíž středem je naše nejbližší hvězda Slunce, která je zdrojem veškeré energie pro naši planetu. Slunce má tvar koule o průměru 1,39 milionů kilometrů, tj. 109krát větší než Země. Zároveň jeho hmotnost je  $2 \times 10^{30}$  kg, je tak 330 000krát hmotnější než Země [1] a tvoří přibližně 99,86 % celkové hmotnosti sluneční soustavy [2]. Toto je příčinou, že objekty uvnitř sluneční soustavy jsou přitahovány právě Sluncem a obíhají okolo něj. Země obíhá okolo Slunce se vzdáleností v průměru 150 milionů kilometrů.

Slunce se dá rozdělit do tří vrstev: Jádra, radiační zóny a konvekční zóny. Sluneční jádro zasahuje do 20-25 % poloměru Slunce a má hustotu až  $150 \text{ g/cm}^3$  s teplotou blízkou se 25,7 milionů Kelvinů. Radiační zóna zasahuje přibližně do 70 % průměru Slunce. Uvnitř zóny dochází především k přenosu energie a teplota klesá ze sedmi ke dvěma milionům Kelvinů s rostoucí vzdáleností od jádra. Hustota hmoty klesá s teplotou od  $20 \text{ g/cm}^3$  k  $0.2 \text{ g/cm}^3$ .

### 2.2 Přímé a difúzní sluneční záření

Slunce vysílá ve všech směrech záření v nerozptýlené formě. Při průchodu atmosférou je část záření pohlcována, další část se rozkládá na částicích prachu, krystalcích ledu či kapkách vody. Důsledkem tohoto efektu část zářivého toku z oblohy přichází ve formě rozptýleného, tzv. difúzního slunečního záření, které nemá směrový charakter [1], tj. přichází ze všech směrů se stejnou intenzitou. Nerozptýlené sluneční záření, přímé sluneční záření, má výrazně směrový charakter. Zjednodušeně lze konstatovat, že přímé sluneční záření přichází tehdy, je-li viditelný sluneční kotouč [1].



Obr. 2-1 - Průchod slunečního záření atmosférou [8]

## 3. SPEKTRUM SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ

Slunce generuje většinu odchozí energie v rozsahu vlnových délek v rozsahu od 0,2 do 3,0  $\mu\text{m}$ . Toto záření vstupuje do atmosféry cca 60 km nad zemským povrchem. Zemská atmosféra se skládá převážně z dvouatomových plynů dusíku a kyslíku. Tyto dva plyny pohlcují ve vyšších vrstvách atmosféry, tzv. ionosféře, přicházející škodlivé ultrafialové a rentgenové záření. Nižší vrstva atmosféry, tzv. ozonoféra, s vysokým obsahem ozónu pohlcuje zbývající životu nebezpečnou část ultrafialového záření. V nejnižších vrstvách atmosféry jako je např. troposféra dochází k pohlcování různých vlnových délek spektra vodní parou, oxidem uhličitým prachem a aerosoly. Důsledkem tohoto filtrování, které nás chrání před nebezpečným kosmickým zářením na zemský povrch dopadá na zem záření v oblasti vlnových délek od 0,3 do 3,0  $\mu\text{m}$ .

### 3.1 Ultrafialové sluneční záření

Ultrafialové záření má vlnové délky kratší, než je viditelné spektrum světla, které se dále dělí do tří skupin podle rozsahů jeho vlnových délek dle tabulky 3-1

**Tabulka 3-1 - Rozdělení ultrafialového záření [3][5]**

Jméno	Zkratka	Vlnová délka [nm]
Ultrafialové záření typu A	UVA	315-400
Ultrafialové záření typu B	UVB	280-315
Ultrafialové záření typu C	UVC	100-280

#### 3.1.1 Ultrafialové záření typu A

Zdroje tohoto typu záření se také nazývají *černé světlo* (black light) a mohou způsobit tzv. fluorescenci, tedy že ozářené materiály začnou vyzařovat viditelné světlo. Záření proniká hlouběji do pokožky a způsobuje její ztmavení bez poškození tkání.

#### 3.1.2 Ultrafialové záření typu B

Záření způsobuje poškození živých tkání a také ostatním člověkem vytvořeným materiálům. Při průchodu atmosférou je toto záření částečně pohlceno ozónem ve stratosféře.

#### 3.1.3 Ultrafialové záření typu C

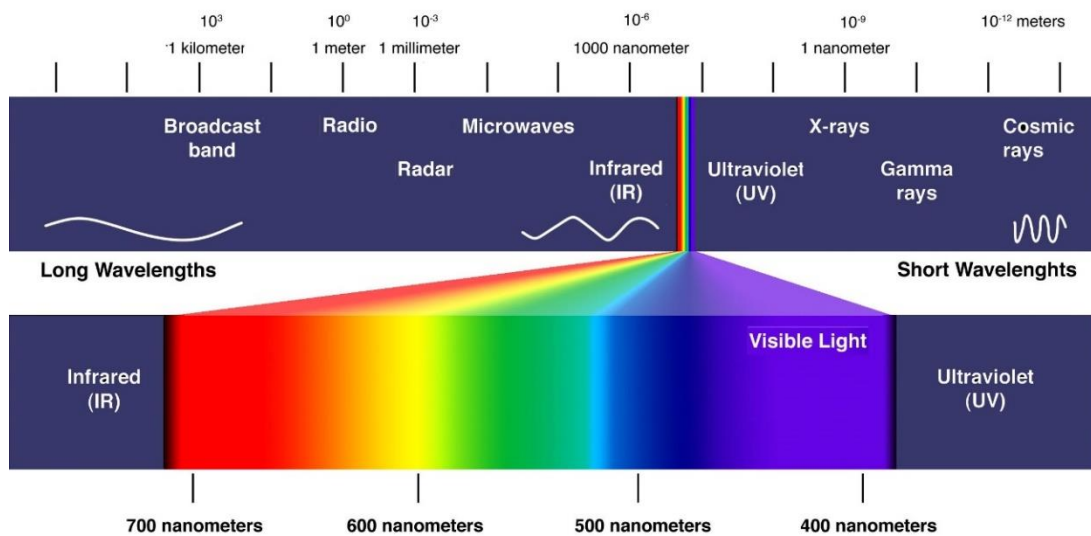
Záření typu C může způsobovat poškození DNA, také zabíjí bakterie a virusy. Umělé zdroje tohoto záření používají ve zdravotnictví. V přírodě se nevyskytuje, protože je pohlcováno kyslíkem v atmosféře.

## 3.2 Viditelné světlo

Jak již vyplývá z jeho názvu, jedná se o část spektra viditelnou lidským okem. Nachází se v rozmezí od 390 nm do 700 nm, přičemž mění svou barvu od fialové k červené (viz. Obr. 3-1)

## 3.3 Infračervené záření

Jedná se o záření s vyšší vlnovou délkou, než má viditelné světlo, tedy od 760 nm do 1 mm. Toto záření vyzařují všechna tělesa a má výrazné tepelné účinky. Našlo své uplatnění např. v elektronice a sdělovací technice.



Obr. 3-1 – Spektrum záření [9]

## 4. MĚŘENÍ SOLÁRNÍ ENERGIE

### 4.1 Měření celkového slunečního ozáření

Pro měření celkového slunečního ozáření se používají přístroje zvané pyranometry. Tyto přístroje měří tzv. hemisférické sluneční ozáření, tj. výkonovou hustotu přímého a difúzního záření přicházejícího z polokoule oblohy na vodorovnou rovinu. Senzor pyranometru je uzavřen uvnitř ochranného obalu, který zajišťuje izolaci vůči vnějším vlivům, které by mohly mít negativní vliv na průběh měření. Samotné čidlo je umístěno pod jedním nebo dvěma polokulovými kryty, které jsou speciálně navrženy tak, aby jimi procházelo maximum slunečního záření. [1][3]

#### 4.1.1 Pyranometr s termočlánkem

Tento typ pyranometru má jako senzor slunečního záření termočlánek navržený pro měření slunečního záření v celém jeho spektru. Černý termočlánekový senzor absorbující veškeré spektrum záření, má spektrální rozsah od 300 nm do přibližně 50 000 nm, tato hodnota je však u pyranometru omezena skleněnou kopulí se zorným polem až 180°, která filtruje záření s vlnovou délkou nad 2800 nm. Takto modifikované záření dopadá na zmíněný termočlánek, kde je absorbováno a mění se na teplo. Spodní strana termočlánu je spojena s pouzdrem, který slouží zároveň jako chladič. Nárůst tepla může být měřen buď pomocí několika sériově popř. sériovo-paralelně spojených termoelektrických článků tvořící jeden termočlánek, nebo pomocí Peltierova článku využívající rozdílných polovodičů namísto kovů. Peltierův článek se využívá u novějších, výkonnějších pyranometrů. [7]



Obr. 4-1 - Pyranometr s termočlánkem [7]

### 4.1.3 Pyranometr s fotodiodou

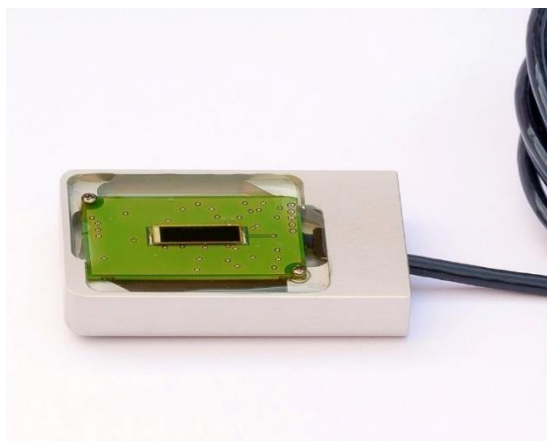
Pyranometr s fotodiodou má jako senzor záření fotodiodu se spektrálním rozsahem mezi 350 nm a 1100 nm podle typu použité fotodiody. Pro určení celkového slunečního záření tedy využívá jen část spektra. To je příčinou vzniku nejistoty měření, která je řádově větší než při měření s termočláňkovým pyranometrem. Vlivem fotoelektrického jevu dochází na fotodiodě k velmi rychlé přeměně záření na napětí.



Obr. 4-2 - Pyranometr s fotodiodou [7]

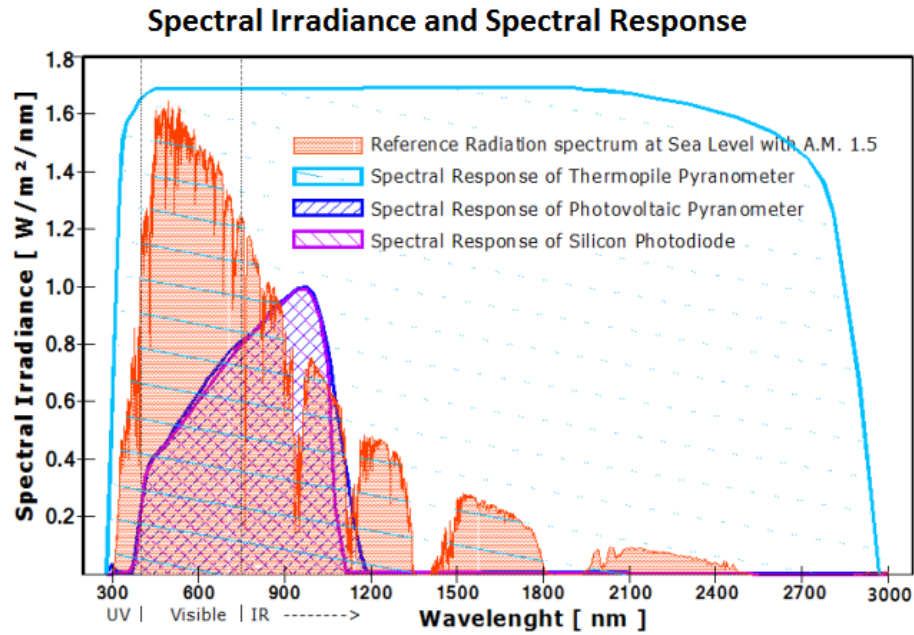
### 4.1.4 Fotovoltaický pyranometr

Fotovoltaický pyranometr je odvozen od pyranometru s fotodiodou, jeho senzor je pole fotovoltaických buněk. Při dopadu slunečního záření v rozmezí vlnových délek od 350 nm do 1150 nm, je na těchto buňkách generován proud přímo úměrný energii dopadeného záření. Senzor je stejně jako u pyranometru s fotodiodou velmi rychlý. Jeho nevýhodou je nutnost provedení teplotní korekce z důvodu jeho teplotní závislosti. [7]



Obr. 4-3 - Fotovoltaický pyranometr, model ML1-C2 [7]





Obr. 4-4 - Spektrální odezva pyranometrů [7]

## 4.2 Měření přímého slunečního ozáření

Při měření přímého slunečního záření, měříme pouze záření přicházejícího přímo ze Slunce. Zároveň se snažíme minimalizovat přítomnost odraženého světla. Zařízení pro tato měření se nazývají pyrheliometry, ve kterých je senzor umístěn na patě dostatečně dlouhé trubice s malým zorným úhlem  $5,7^\circ$ . Celé zařízení musí být vybaveno automatickým polohovacím zařízením, které sleduje pohyb Slunce po obloze. [1] [3]



Obr. 4-5 - Pyrhelioometr s fotodiódou [10]

## 4.3 Měření difúzního slunečního ozáření

Pro měření difúzního ozáření se používají pyranometry se stíněním čidla před přímou složkou slunečního záření. Nejčastěji se používá stínící prstenec o průměru cca 60 cm a šíři 7,5 cm. Tento prstenec umožňuje souvislé měření po dobu několika dnů bez nutnosti přestavování úhlu natočení disku. [1]



**Obr. 4-6 - Pyranometr se stínícím prstencem [11]**

#### **4.4 Měření odraženého slunečního záření**

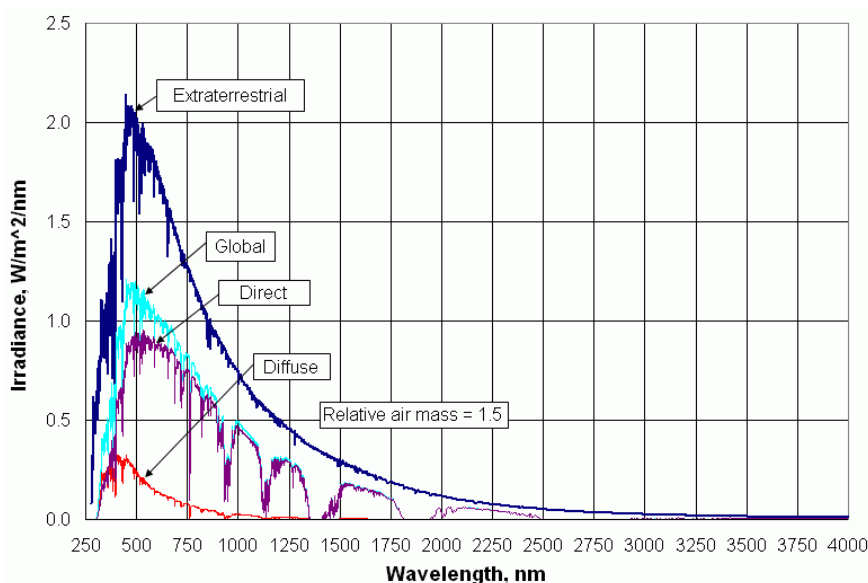
Pro měření odrazivosti obecného povrchu se používá tzv. albedometr, který se skládá ze dvou pyranometrů. První pyranometr měří sluneční záření dopadající na námi měřený povrch a druhý je natočen čelem k tomuto povrchu a měří pouze z něj odražené záření. Ze zaznamenaných hodnot se vypočte tzv. albedo, tj. poměr odraženého k dopadajícímu slunečnímu záření. [1]



**Obr. 4-7 - Albedometr CMA 6 [12]**

## 5. PRŮCHOD SLUNEČNÍHO ZÁŘENÍ ATMOSFÉROU

Jak můžeme vidět na obrázku 5-1, sluneční záření dopadající na zemskou atmosféru je značně větší než záření dopadající na zem. Při průchodu slunečního záření atmosférou dochází k řadě jevů. Tyto jevy mají značný vliv na výsledné záření dopadající následně na zemský povrch.



Obr. 5-1 - Distribuce slunečního záření [13]

### 5.1 Atmosféra

Atmosféra je vrstva plynů obklopující planetu Zemi a je udržována na místě zemskou gravitací. Skládá se přibližně z 78 % dusíku, 21 % kyslíku a mnoha dalších tzv. stopových plynů jako je například argon, neon nebo vodní páry. Mimo samotné plynné složení atmosféry se v ní nachází různé aerosoly, které mají buď suchozemský původ např. kouř z továren, erupce sopky, nebo přímořský původ kterými jsou např. krystalky soli.

Všechny výše zmíněné složky a mnoho dalších mají značný vliv na průchod slunečního záření atmosférou. Můžeme tedy říci, že čím lépe budeme znát aktuální složení atmosféry, tím přesněji můžeme určit intenzitu slunečního záření. [15]

### 5.2 Útlum přímého slunečního záření

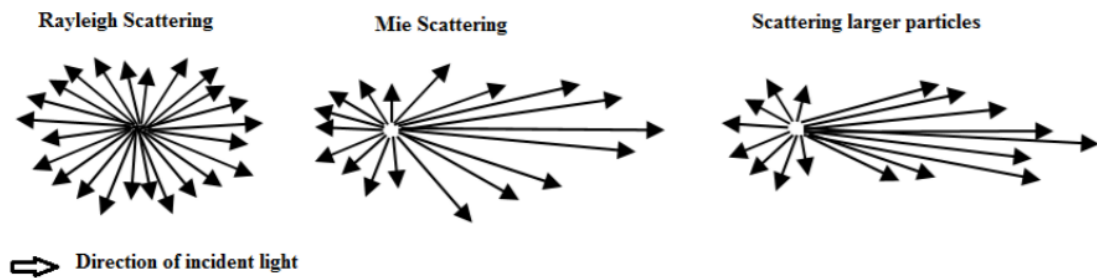
Při průchodu slunečního záření atmosférou je část jeho energie odebrána rozptylem a část se absorbuje. Oba tyto vlivy značně modifikují spektrum. Zbylá část energie dopadající na zemský povrch přímo ze Slunce se nazývá přímé záření.

### 5.2.1 Rozptyl přímého slunečního záření

K rozptylu slunečního záření dochází při nárazu elektromagnetické vlny na částici. Při nárazu je část její energie rozptýlena do všech směrů. Tato rozptýlená energie se nazývá difúzní záření.

Rozptylem slunečního záření se zabývají Rayleighova a Mieho teorie, které nám podle velikosti částice a vlnové délky záření určují směr rozptylu záření. Z teorií vyplývá, pokud je velikost částice menší, než jedna desetina vlnové délky dochází k Rayleighovu rozptylu, pokud je přibližně velikostně jedné čtvrtiny, dochází k Mieho rozptylu a pokud je částice větší, než je vlnová délka dochází k rozptylu větších částic.

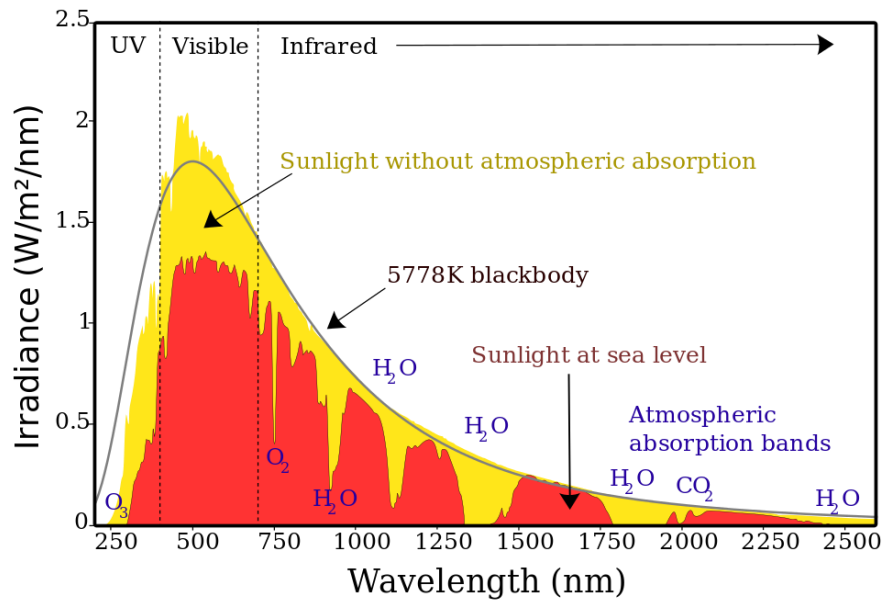
V čisté a suché atmosféře je přibližně polovina přicházející energie rozptýlená zpět do vesmíru a ta druhá dopadá na Zem jako rozptýlené sluneční záření. V atmosféře obsahující nečistoty dopadá na zem více rozptýlené sluneční energie z důvodu většího přímého rozptýlení. [4]



Obr. 5-2 - Rozptyl přímého slunečního záření [14]

### 5.2.2 Absorpce přímého slunečního záření

Na rozdíl od rozptylu slunečního záření, které se děje v celém spektru, absorpce slunečního záření se děje pouze v určitých vlnových délkách. Absorpce je způsobena plyny v atmosféře. Na obrázku 5-3 můžeme vidět „díry“ ve spektru slunečního záření a plyny, kterými byly tyto „díry“ způsobeny. Veškerá absorbovaná energie je nakonec opět vyzářena, však s mnohem vyšší vlnovou délkou.



Obr. 5-3 - Spektrum slunečního záření [16]

### 5.2.3 Ozón

Ozón pohlcuje prakticky veškerou přichozí radiaci ve vlnových délkách kratších než 0,29  $\mu\text{m}$ . Se vzrůstající vlnovou délkou se jeho vliv prudce snižuje až dosáhne přibližně 0,35  $\mu\text{m}$ , kdy už pro radiaci prakticky neexistuje.

## 6. NÁVRH SNÍMAČE

### 6.1 Výběr součástek

Na základě provedeného průzkumu trhu jsem došel k závěru, že nejvýhodnější součástíou pro sestavení snímače pro měření sluneční záření budou fotodiody. Použití fotorezistorů jsem vyloučil z důvodu malého spektrálního rozsahu. U fotorezistorů je spektrální rozsah většinou limitován pouze na viditelnou část spektra. Pro fototranzistory nabízené na českém trhu je spektrální rozsah znatelně širší než pro fotorezistory, však nepřesahují svými spektrálními vlastnostmi fotodiody.

#### 6.1.1 Fotodiody

Pro možné zhotovení maticového snímače jsem našel dvě velkoplošné křemíkové fotodiody. Při jejichž výběru jsem se zaměřil na to, aby měly co největší spektrální rozsah, velikost snímače a zorný úhel diody:

Vybrané diody:

- fotodioda BPX61 od společnosti Osram, která má spektrální rozsah od 400 do 1100 nm a snímaný úhel  $\pm 55^\circ$ ,
- fotodioda BPW34 od společnosti Vishay s rozsahem od 600 do 1050 nm a zorným úhlem  $\pm 65^\circ$ .

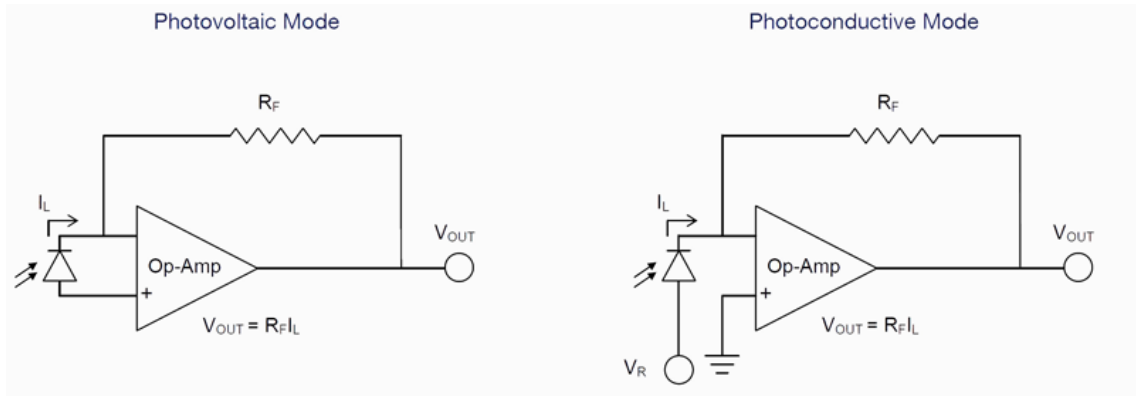
Z výše uvedených fotodiód jsem na základně níže popsaného testovacího měření vybral pro maticový snímač fotodiodu BPW34 od společnosti Vishay.

#### 6.1.2 Zesilovač

Při práci s fotodiodami mohou pracovat se zapojením jednak do fotovoltického nebo do fotovodivostního režimu. Fotovodivostní režim se používá pro měření, kde je rychlost důležitější než přesnost. Vstupní veličinou je v tomto případě proud. Oproti tomu u fotovoltického režimu je vstupní veličinou napětí a používá se pro přesná měření, rychlost je druhořadý parametr.

Pro naše měření s fotodiodami je důležitější přesnost, oproti rychlosti. Z tohoto důvodu jsem zvolil zapojení operačního zesilovače ve fotovoltickém režimu. Operační zesilovače mají několik důležitých parametrů, které bylo potřeba při jeho výběru zvážit. Jedním z nich je offset, který způsobuje chybu měření a z tohoto důvodu by měl být co nejmenší. Dalším důležitým parametrem je s ohledem na funkčnost zapojení klidový proud („bias current“). Při zapojení diody ve fotovoltickém režimu operační zesilovač funguje jako převodník proudu na napětí, který je podrobněji popsán níže. Tyto diody mají spektrální citlivost dle jejich datasheetů 70 nA/lx. Aby bylo dosaženo nejlepších výsledků měření musí být klidový proud operačního zesilovače co nejmenší, z tohoto důvodu by měl být maximálně v desítkách nA. Pro návrh snímače jsem vybral operační

zesilovač LM324 od firmy Texas Instruments, který má vstupní klidový proud 20 nA. [6][17]



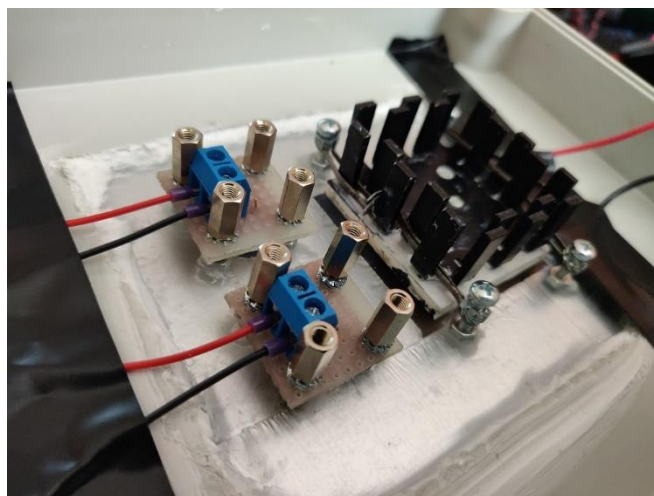
Obr. 6-1 - Schéma zapojení fotovoltaiického a fotovodivostního režimu [17]

### 6.1.3 Teplotní čidlo

Pro snímání teploty jsem se rozhodl použít senzor LM335, který má definovanou závislost 10 mV/K. Vzhledem k tomu, že snímač bude pracovat v rozmezí teplot přibližně od 0 °C do 50 °C, čemuž odpovídají hodnoty napětí od 2,73 V do 3,23 V, výstupní hodnoty nebude potřeba zesilovat.

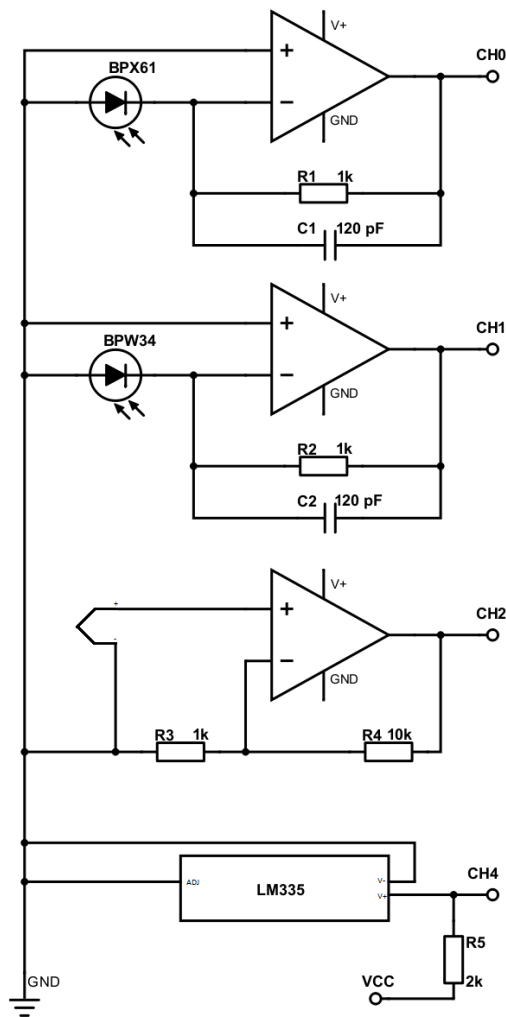
## 6.2 Testovací zapojení

Před sestavením maticového snímače jsem zhotovil testovací zapojení pro ověření funkčnosti součástek a jejich zapojení v provozních podmínkách. Zapojení obsahovalo dvě výše zmíněné velkoplošné fotodiody BPX61 a BPW34, peltierův článek a teplotní čidlo.



Obr. 6-2 - Detail uchycení diod a peltierova článku testovacího zapojení

## 6.2.1 Schéma testovacího zapojení



Obr. 6-3 - Schéma zapojení testovacího snímače

## 6.2.2 Převodník proudu na napětí

Senzory slunečního záření, jak již bylo zmíněno výše, jsou zapojeny ve fotovoltaickém režimu s převodníkem proudu na napětí. Pro zamezení nepříznivých oscilací způsobenou nestabilitou zapojení operačního zesilovače byl do obvodu přidán kompenzační kondenzátor  $C_c$ .

Při výpočtu hodnot jednotlivých součástí jsem počítal s maximální hodnotou intenzity slunečního záření  $I_e = 1000 \text{ W/m}^2$ . Ze známé velikosti plochy snímače ( $S$ ) a spektrální citlivosti čipu senzoru ( $S_{\lambda \text{ typ}}$ ) podle vzorce 6.1 jsem vypočítal hodnotu výstupního proudu při maximální intenzitě slunečního záření.

$$I_p = I_e \cdot S \cdot S_{\lambda \text{ typ}} \quad (6.1)$$



Tedy konkrétně pro zvolené fotodiody BPX61 a BPW34, které mají plochu čipu 7,02 mm<sup>2</sup> respektive 7,5 mm<sup>2</sup> a spektrální citlivost 0,62 A/W ( $\lambda = 850$  nm) respektive 0,54 A/W ( $\lambda = 900$  nm) byly vypočteny hodnoty:

$$I_{p,BPX61} = I_e \cdot S \cdot S_{\lambda typ} = 1000 \cdot 7,02 \cdot 0,62 = 4,3524 \text{ mA} \quad (6.2)$$

$$I_{p,BPW34} = I_e \cdot S \cdot S_{\lambda typ} = 1000 \cdot 7,5 \cdot 0,54 = 4,05 \text{ mA} \quad (6.3)$$

Maximální výstupní napětí zesilovače je dle datasheetu  $V_{cc} - 1,5$  V, tedy při napájení 5 V naměřím napětí 3,5 V. Následně hodnoty zpětnovazebních rezistorů  $R_f$  vychází dle Ohmova zákona 804,15  $\Omega$  pro BPX61 a 864,19  $\Omega$  pro BPW34.

Ze zjištěné hodnoty zpětnovazebního rezistoru byla stanovena hodnota kompenzačního kondenzátoru podle vzorců 6.4 a 6.5. Hodnoty kapacit operačního zesilovače nejsou v datasheetu uvedeny, rozhodl jsem se je tedy zanedbat a pro konečný kompenzační kondenzátor byl použit kondenzátor s vyšší než vypočtenou hodnotou.

$$C_{IN} = C_D + C_{CM} + C_{DIFF} \quad (6.4)$$

$$C_F = \sqrt{\frac{C_{IN}}{2\pi(GBWP)R_f}} \quad (6.5)$$

$C_D$	... Kapacita fotodiody
$C_{CM}$	... Kapacita vstupů zesilovače vůči zemi
$C_{DIFF}$	... Kapacita mezi jednotlivými vstupy zesilovače
GBWP	... Gain Bandwidth Product operačního zesilovače

Hodnota kapacity fotodiody je pro BPX61 72 pF, pro BPW34 70 pF.

Z hodnoty operačního zesilovače GBWP 1,2 MHz bylo vypočteno:

$$C_{F,BPX61} = \sqrt{\frac{C_{IN}}{2\pi(GBWP)R_f}} = \sqrt{\frac{72 \cdot 10^{-12}}{2\pi \cdot 1,2 \cdot 10^6 \cdot 845}} = 106,31 \text{ pF} \quad (6.6)$$

$$\doteq 120 \text{ pF}$$

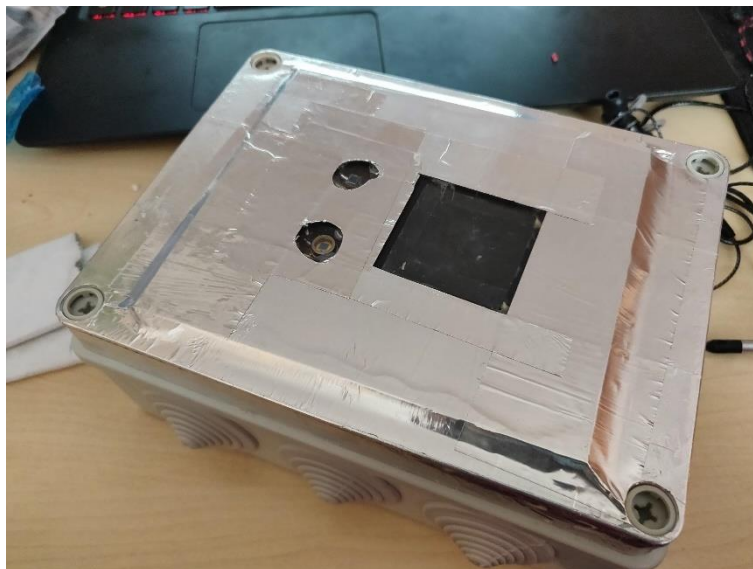
$$C_{F,BPW34} = \sqrt{\frac{C_{IN}}{2\pi(GBWP)R_f}} = \sqrt{\frac{70 \cdot 10^{-12}}{2\pi \cdot 1,2 \cdot 10^6 \cdot 864}} = 103,66 \text{ pF} \quad (6.7)$$

$$\doteq 120 \text{ pF}$$

### 6.2.3 Pouzdro testovacího snímače

Vzhledem k požadavku, že pouzdro snímače musí za všech povětrnostních podmínek ochránit elektroniku umístěnou uvnitř před vnějšími povětrnostními podmínkami jako je např. vlhkost, prach a rozdíly teplot, byla pro sestavení snímače použita krabice s průchodkami s krytím IP65. Do víka byl vyřezán otvor, který byl následně překryt skleněnou tabulkou o tloušťce 3 mm, která byla přilepena a utěsněna silikonem,

z důvodu maximálního zachování původního krytí krabice před povětrnostními vlivy. Světlo citlivé prvky byly připevněny k víku, aby co nejtěsněji přiléhaly ke skleněné tabulce. Tím bylo zajištěno maximální pokrytí vnější plochy pouzdra hliníkovou páskou, která zajišťuje odraz dopadajícího světla mimo senzory a částečně zabraňuje nežádoucí akumulaci tepla uvnitř krabice.

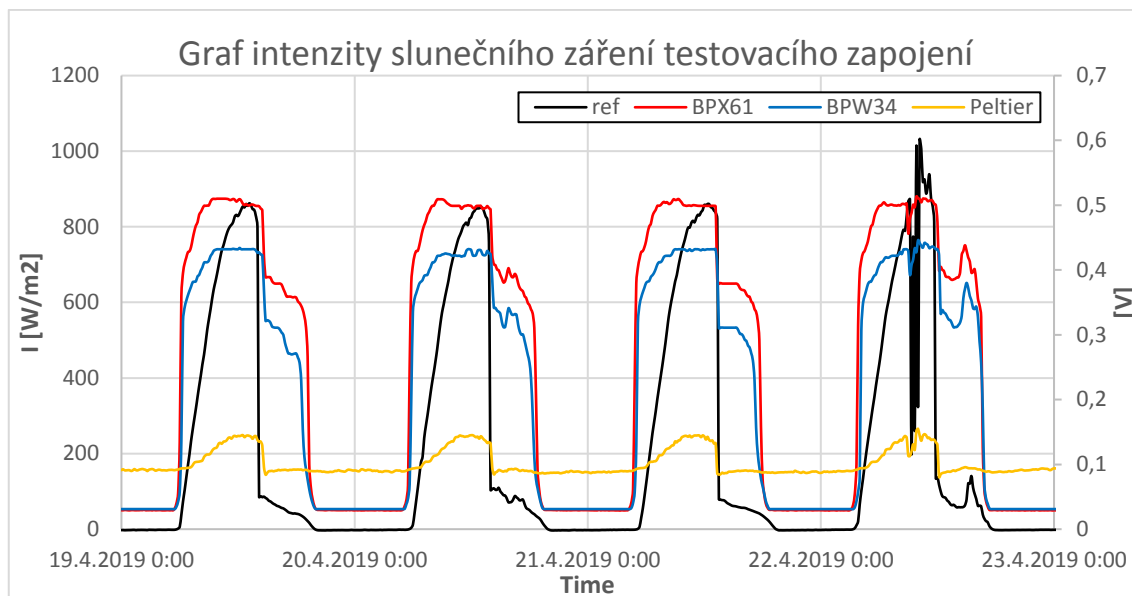


**Obr. 6-4 - Pouzdro testovacího snímače**

## 6.2.4 Průběh testovacího měření

Testovací měření proběhlo od 18.4 do 24.4. 2019 na střeše školní budovy Technická 10 v Brně. Data z posledního dne testovacího měření byla neprůkazná z důvodu silného větru, který převrhl testovací snímač a z tohoto důvodu nejsou obsažena v grafu 6-5.

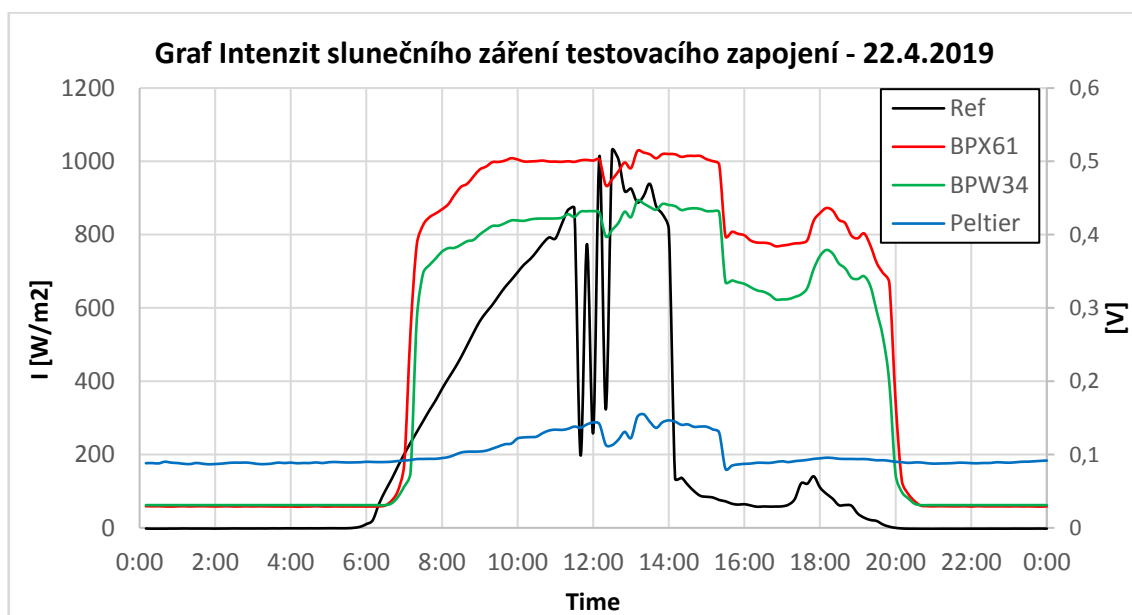
Po dobu testovacího měření, jak je vidět z naměřených průběhů v grafu 6-5 bylo slunečné počasí. Obě fotodiody mají velice podobný průběh napětí s rozdílem amplitudy měřeného napětí. Dioda BPX61 má větší výstup, což znamená že širší spektrální rozsah diody je mnohem důležitější než úhel snímání fotodiody nebo velikost snímače, v těchto parametrech má fotodioda BPW34 lepší vlastnosti. Z grafu 6-6 na kterém je detailní průběh naměřených hodnot ze dne 22.4.2019 však můžeme vidět, že obě fotodiody špatně reagují na velké změny intenzity osvětlení, zaznamenané referenčním snímačem, rovněž jako skoková změna napětí na začátku a konci slunečního cyklu. Peltierův článek na rozdíl od měřenému napětí na diodách zaznamenává malou změnu napětí při dopadu slunečního záření v průběhu celého dne.



**Obr. 6-5 - Graf intenzity slunečního záření testovacího zapojení**

## 6.2.5 Závěr

Výsledky měření provedené testovacím zapojením byly podkladem pro výběr fotodiody k sestavení maticového snímače. Peltierův článek nebyl k vytvoření maticového snímače využit z důvodu velikosti snímače a výše pořizovací ceny. Protože obě použité diody měly velice podobný průběh generovaného napětí, k výrobě maticového snímače jsem se rozhodl použít fotodiodu BPW34, která je cenově dostupnější než fotodioda BPX61.



**Obr. 6-6 - Graf Intenzit slunečního záření testovacího zapojení - 22.4.2019**

## 6.3 Datalogger

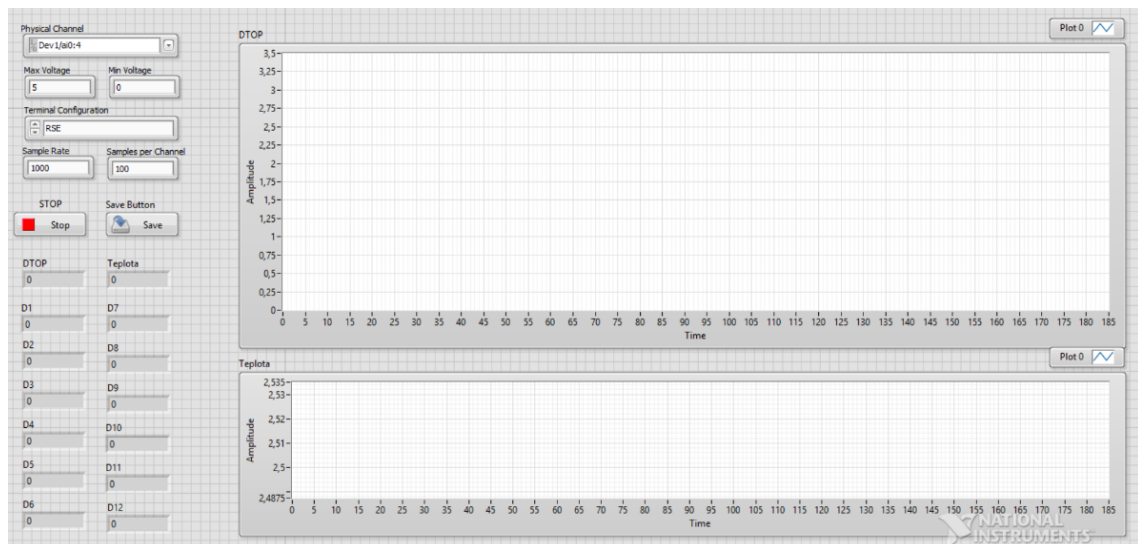
Pro získávání dat ze snímačů jsem zvolil měřicí karty od firmy National Instruments. Specificky to je karta USB-6008, poskytující osm analogových vstupů, každý s 11 bitovým rozlišením v single-ended režimu. Karta poskytuje 5 V zdroj napětí při maximálním odběru 200 mA. Tuto kartu jsem použil pro testovací zapojení.

Pro zaznamenávání dat ze samotného maticového snímače byla z důvodu vyššího počtu analogových vstupů použita karta USB-6215, poskytující šestnáct analogových vstupů v single-ended režimu s rozlišením 16 bitů.

### 6.3.1 Program

Měřicí karty byly naprogramovány v programu LabVIEW. Pro docílení maximální přesnosti měření s nezahlcením výstupními daty jsem program k zaznamenání dat navrhl následovně

Data ze snímačů získávána z jednotlivých kanálů karty v sekundových intervalech jsou udržována v paměti pomocí shift registrů do naplnění pole šedesáti hodnotami, tedy za předchozí minutu. Program z těchto dat vypočte průměr, který zaznamená do pole výstupů, které je rovněž uchováváno v shift registrech. Původní data použita k zaznamenanému výpočtu se vymažou. Zprůměrované minutové hodnoty se současně s časovou značkou automaticky zapisují do TDMS souborů v hodinových intervalech. Tento záznam rovněž slouží jako ochrana proti ztrátě dat.



Obr. 6-7 - Řídící obrazovka LabVIEW

# 7. MATICOVÝ SNÍMAČ

## 7.1 Návrh snímače

Maticový snímač byl navržen tak, aby bylo možné měřit celkové, přímé i difúzní sluneční záření a bylo možné sledovat polohu slunce během dne. Proto, aby snímač byl schopen měřit přímé i difúzní sluneční záření je potřeba použít nejméně dvou snímačů, kdy jeden je vystaven slunečnímu záření, tedy měří celkové záření, druhý je zastíněný a měří difúzní sluneční záření. Rozdílem naměřených hodnot získáme přímé sluneční záření.

### 7.1.1 Počet a rozmístění diod

Pro získání hodnot měření slunečního záření včetně polohy slunce jsem diody snímače umístil na kružnici s konstantními rozestupy a stínící prvek umístil uprostřed mezi nimi. Pro zajištění difúzního záření, které vyžaduje mít alespoň jeden senzor neustále zastíněný jsem se z důvodu zabezpečení větší přesnosti rozhodl mít vždy dva senzory zastíněny.

Při návrhu snímače jsem vycházel z předpokladu, že vyrobený maticový snímač bude umístěn do skleněné kupule, sloužící pro ochranu před vnějšími povětrnostními podmínkami, o vnitřním průměru 95 mm. Rozhodl jsem se tedy diody umístit na kružnici o poloměru  $r = 40$  mm.

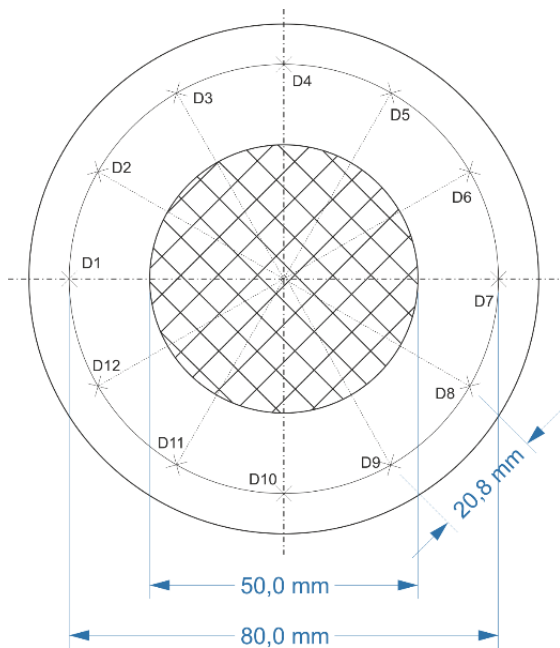
Výběr počtu diod ovlivňuje stanovení průměru stínícího prvku ( $d_{sp}$ ), respektive stínícího válce. Průměr stínícího válce při splnění stanoveného požadavku na současně zastínění alespoň dvou diod byl určen dle vzorce 7.1, který představuje minimálně dvojnásobek vzdálenosti dvou diod včetně součtu délky strany snímače diody

$$d_{sp} \approx 2 \cdot d_d + d_{sa} \quad (7.1)$$

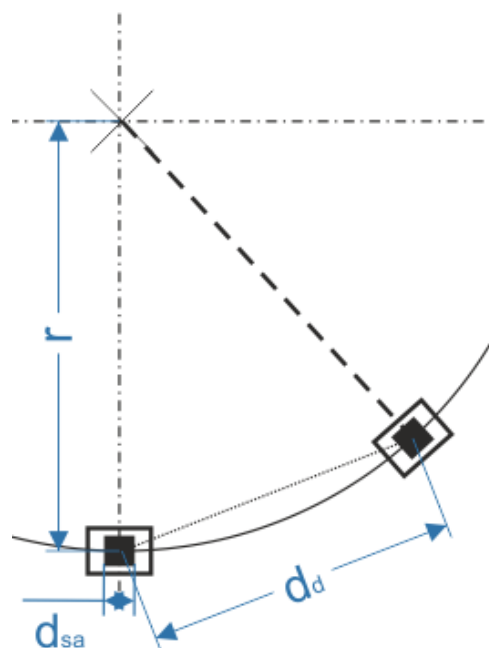
Při stanovení počtu diod jsem zvolil symetrii při jejich rozmístění, pro možnost využití při určení polohy slunce. Pro řešení jsem upřednostnil maticovým snímač s dvanácti diodami před snímačem s osmi diodami. Vyšel jsem z předpokladu, že větší množství diod by mělo umožnit přesnější určení polohy slunce. Schéma rozmístění, viz. Obr. 7-1.

.

.



Obr. 7-1 - Schéma rozmístění diod maticového snímače



Obr. 7-2 - Schéma vzdálenosti diod

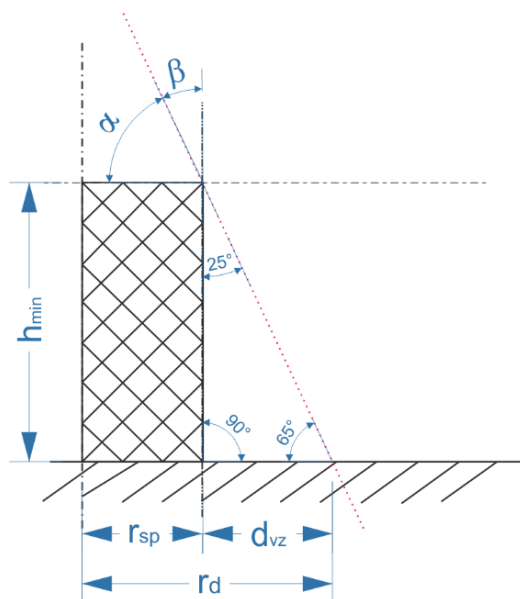
## 7.1.2 Výška stínícího válce

Minimální výška stínícího válce ( $h_{min}$ ) závisí na úhlu pod kterým dopadají sluneční paprsky a potřebnou délkou vrhaného stínu. Úhel dopadu slunečních paprsků závisí na zeměpisné šířce, natočení zemské osy a čase. V našich zeměpisných šířkách sluneční paprsky dopadají pod největším úhlem  $\beta \doteq 65^\circ$  během slunovratu. Výšku stínícího válce získáme dále uvedeným výpočtem 7.4 za předpokladu, že poloměr stínícího prvku  $r_{sp} = 25$  mm, diody jsou ve vzdálenosti od středu  $r_d = 40$  mm a s průměrem senzoru diody  $d_{sa} = 3$  mm je počítáno jako s rezervou.

$$d_{vz} = r_d - r_{sp} + d_{sa} = 40 - 25 + 3 = 18,0 \text{ mm} \quad (7.2)$$

$$\alpha = \beta - 90^\circ = 25^\circ \quad (7.3)$$

$$h_{min} = \frac{d_{vz}}{\tan(\alpha)} = \frac{18}{\tan(25^\circ)} = 38,6 \text{ mm} \quad (7.4)$$



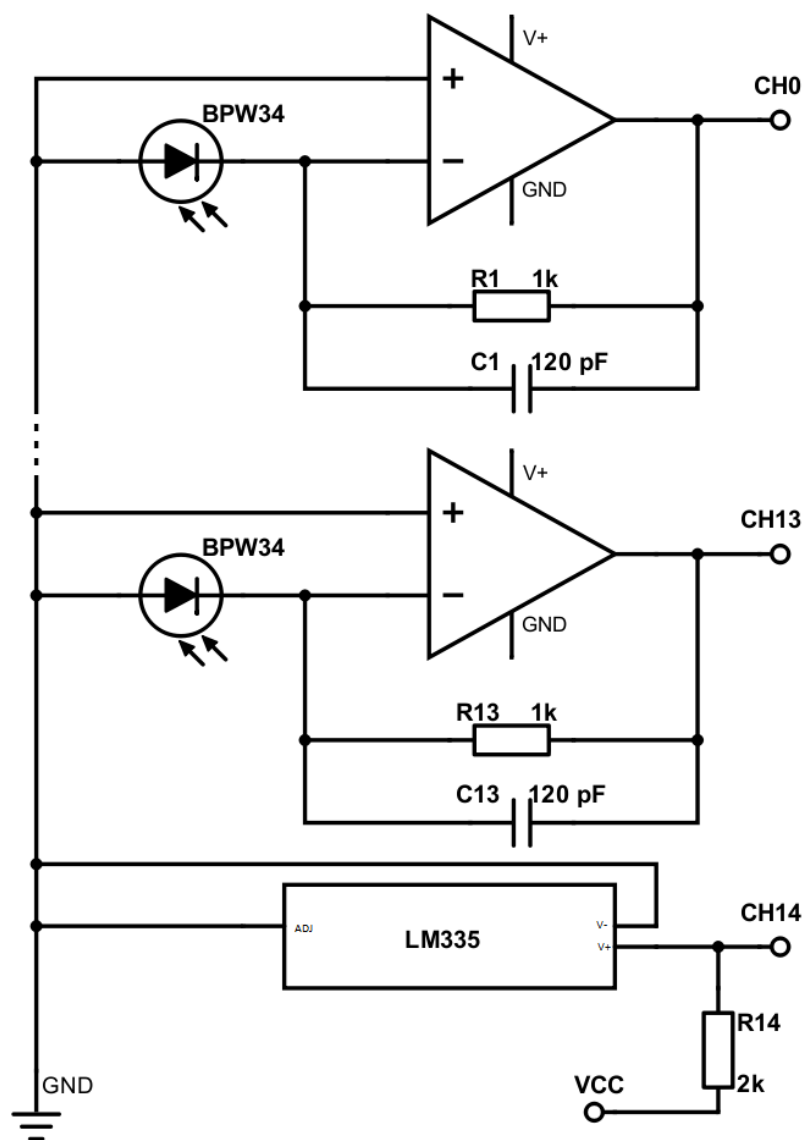
**Obr. 7-3 - Minimální výška stínícího válce**

## 7.2 Vlastní výroba snímače

Pro maticový snímač jsem vyrobil desky plošných spojů dle schématu zapojení viz. Obr. 7-4. Tyto desky jsem nejprve navrhl v programu Eagle. Návrh se skládal ze dvou desek, jedna deska pro matici diod a druhá pro operační zesilovače. Desku pro fotodiody jsem musel rozdělit na dvě části z důvodu limitace licence programu Eagle, představující maximální rozměr 80x100 mm. Dle těchto návrhů byly vyrobeny desky v dílně ústavu automatizace a měřicí techniky VUT v Brně na CNC fríze.

Snímač jsem rozdělil do dvou částí, měřicí část tvoří třináct diod BPW34. Mimo dvanáct diod, které jsou umístěny v kruhu okolo stínícího válce byla do maticového snímače přidána ještě jedna dioda umístěna právě na tento válec, která zajišťuje referenční hodnotu pro ostatní diody maticového snímače. Měřicí část byla umístěna pod skleněnou kupolí, která byla přilepena na víčko krabice s průchodkami s krytím IP65 a utěsněna silikonem. Druhá, řídicí část obsahující desku plošných spojů s operačními zesilovači LM324 a teplotním čidlem LM335 byla umístěna uvnitř krabice. Všechny vertikální části krabice jsou mimo samotné diody polepeny hliníkovou páskou, pro zajištění odrazu slunečních paprsků a zabránění nežádoucí akumulace tepla uvnitř krabice a kupole. Obvod stínícího válce byl proveden černý, aby co nejvíce pohlcoval světlo a nevytvářel chyby měření na diodách.

Maticový snímač byl po vyhotovení umístěn na střechu školní budovy Technická 10 nedaleko referenčního snímače pro ověření jeho funkčnosti a zaznamenání dat pro následné vyhodnocení. Dioda s označením „D7“ byla za pomoci kompasu nasměrována na sever, pro potřeby zpracování dat při určování polohy slunce.



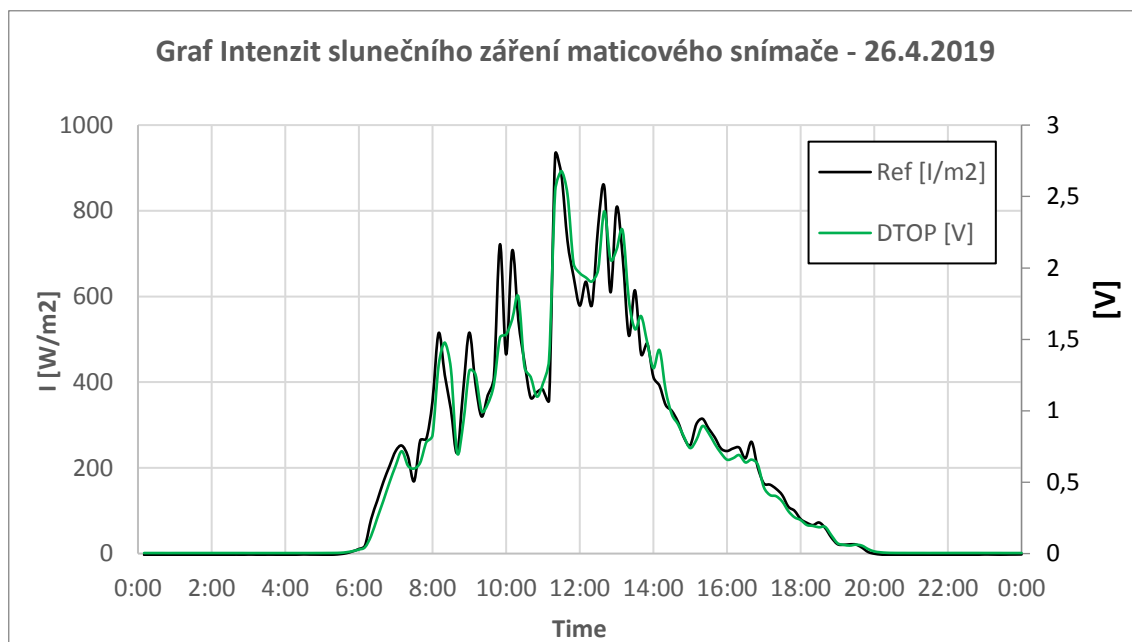
Obr. 7-4 - Schéma zapojení maticového snímače



## 8. VÝSLEDKY MĚŘENÍ MATICOVÉHO SNÍMAČE

Měření sestaveným maticovým snímačem proběhlo od 25.4.2019 do 30.4.2019. Zaznamenaná data provedeného měření ukázala, že jedna z diod maticového snímače, dioda s označením D7, byla pravděpodobně poškozena a zaznamenávala nespolehlivá data.

Dle grafu 8-1, který zobrazuje průběh napětí získaný referenční diodou DTOP a průběh intenzity záření referenčního snímače je patrné, že oba průběhy jsou velice podobné. U maticového snímače dochází k vyfiltrování některých maximálních hodnot, které může být způsobeno nižší citlivostí diod než u referenčního snímače.

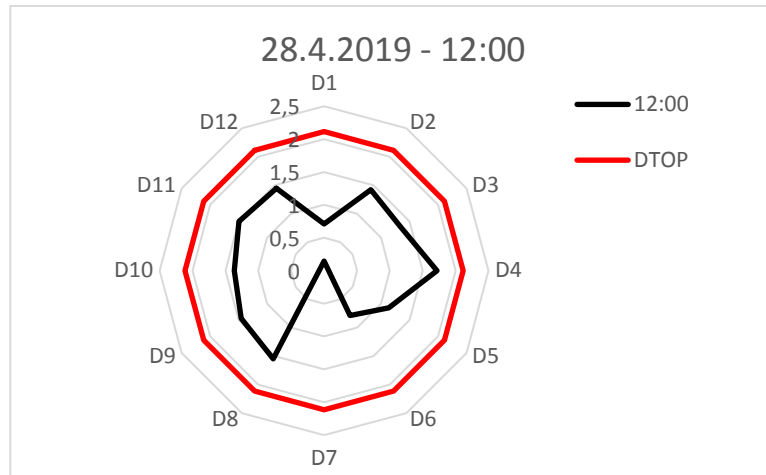


**Obr. 8-1 - Graf intenzit slunečního záření maticového snímače - 26.4.2019**

Mimo dobré výsledky referenční diody DTOP nedosahovaly naměřené hodnoty napětí ostatních diod maticového snímače očekávaných parametrů.

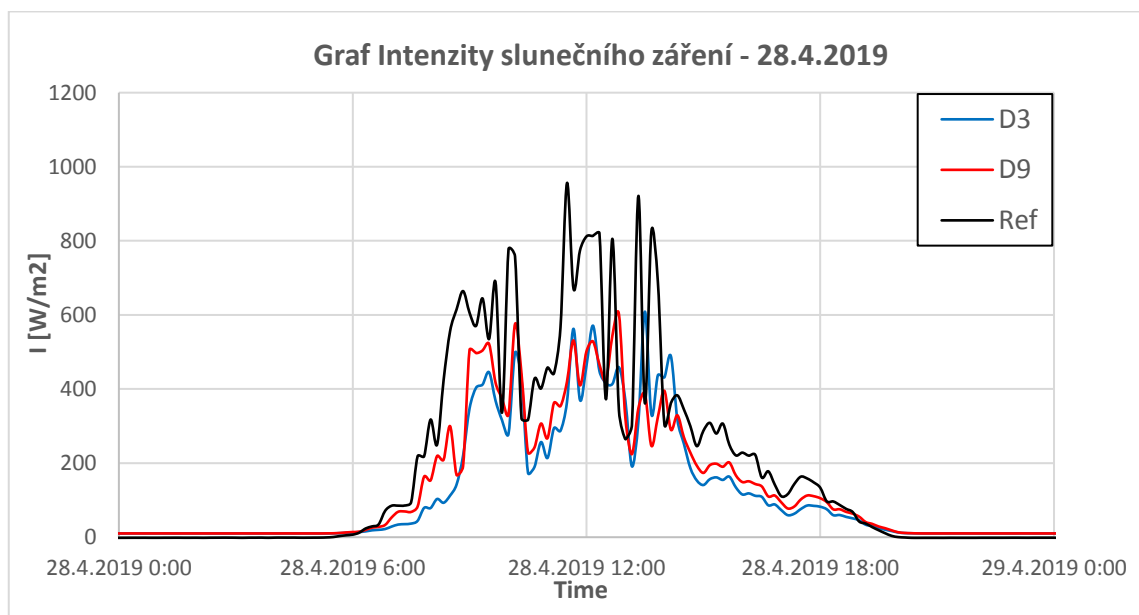
Maticový snímač byl sestaven tak, aby z naměřených hodnot napětí jednotlivých diod bylo možno určit alespoň přibližnou polohu slunce. Naměřené výsledky toto určení neumožňují, neboť poměr napětí mezi diodou vystavenou slunečnímu záření a diodou zastíněnou středovým válcem je minimální, nezatelný.

V grafu 8-2 jsou vyneseny hodnoty z poledne 28.4.2019. Z hodnoty napětí na referenční diodě DTOP lze usuzovat, že svítilo slunce. Dioda D1 byla nasměrována na jih a měla by mít hodnotu podobnou, ne-li větší než dioda D2, respektive D12.

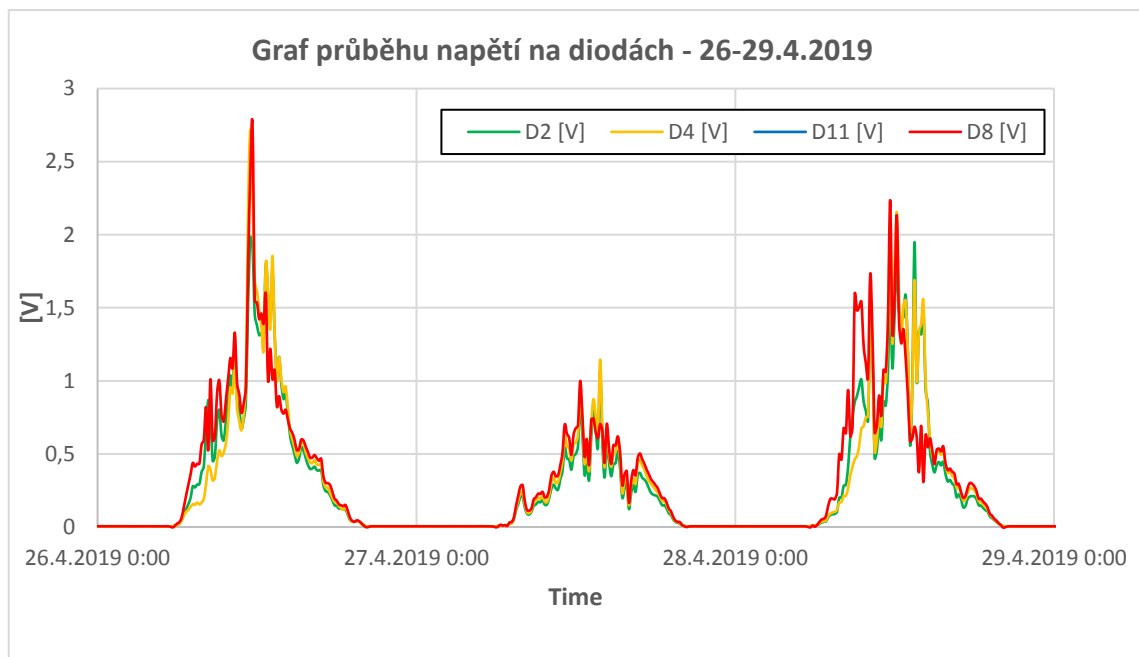


**Obr. 8-2 - Graf intenzity slunečního záření 28.4.2019, 12:00**

V grafu 8-3 vidíme průběhy referenčního snímače a diod D3 a D9 umístěných na opačných stranách maticového snímače. Oba měřené průběhy kopírují průběh referenčního snímače, a to s minimální vzájemnou odchylkou. V grafu 8-4 jsou zobrazeny průběhy čtyř diod v rovnoměrných rozestupech na maticovém snímači ze tří dnů měření a jak je vidět, odchylky jednotlivých průběhů jsou minimální.



**Obr. 8-3 - Graf intenzity slunečního záření maticového snímače - 28.4.2019**



**Obr. 8-4 - Graf průběhu napětí na diodách - 26-29.4.2019**

## 8.1 Testovací měření

Z důvodu neprůkazných dat z měření bylo provedeno testovací měření pro ověření vlivu skleněné kupole zakrývající senzor na výsledky měření. Snímač byl ponechán na slunci a bylo provedeno měření napětí na jednotlivých diodách za slunečního svitu, vlivem mechanického otáčení maticového snímače. Výsledky měření jsou zaznamenány do tabulky 8-1.

**Tabulka 8-1 - Vliv kupole na měřená data**

Označení	S kupolí		Bez Kupole	
	Slunce [V]	Stín [V]	Slunce [V]	Stín [V]
D1	1,00	0,40	1,84	0,26
D2	1,24	0,56	1,94	0,29
D3	1,12	0,75	1,69	0,27
D4	1,18	0,44	1,74	0,23
D5	1,76	0,43	2,11	0,10
D6	1,68	0,43	2,04	0,12
D7	1,26	0,78	1,84	0,17
D8	1,64	0,46	2,03	0,13
D9	1,57	0,48	1,95	0,19
D10	1,62	0,52	1,97	0,20
D11	1,46	0,47	2,14	0,16
D12	1,51	0,45	2,08	0,19
DTOP	1,70		1,84	

Z naměřených dat a pozorování chování snímače při měření jsem došel k závěru, že použití hliníkové fólie uvnitř kupole nebylo vhodné. Odražené světlo od zmíněné fólie se znovu odráží a láme od skleněné kupole a nejuje stín vytvořený středovým válcem. Z tohoto důvodu se hodnoty napětí na diodách nemění pouze v závislosti na světle dopadajícím přímo na snímač, ale jsou ovlivněny zářením, které se odráží uvnitř kupole. Naměřené hodnoty tabulky 8-1 nemohou být bohužel použity pro vytvoření korekce, která by odstranila chybu měření. Odraz světla uvnitř kupole je tak značný, že hodnoty napětí zastíněných diod dosahují téměř hodnot diod osvětlených. Dioda DTOP umístěna na vrcholu středového válce vykazuje nejmenší odchylku chyby z důvodu umístění v blízkosti povrchu kupole, vzhledem k menší ploše k odrazu slunečního záření.

Pro ověření funkčnosti navrženého maticového snímače před provedením nového měření se snímačem bude zapotřebí odstranit hliníkovou folii ze všech ploch snímače a nahradit ji nereflexivními prvky, aby nedocházelo k nežádoucímu odrazu a lomu světla a tím zkreslování výsledků měření. Po provedení těchto úprav bude možné měřením ověřit, zda skleněná kupole neovlivní měření natolik, že by muselo dojít k jejímu úplnému odstranění, a tedy kompletní změně návrhu snímače.

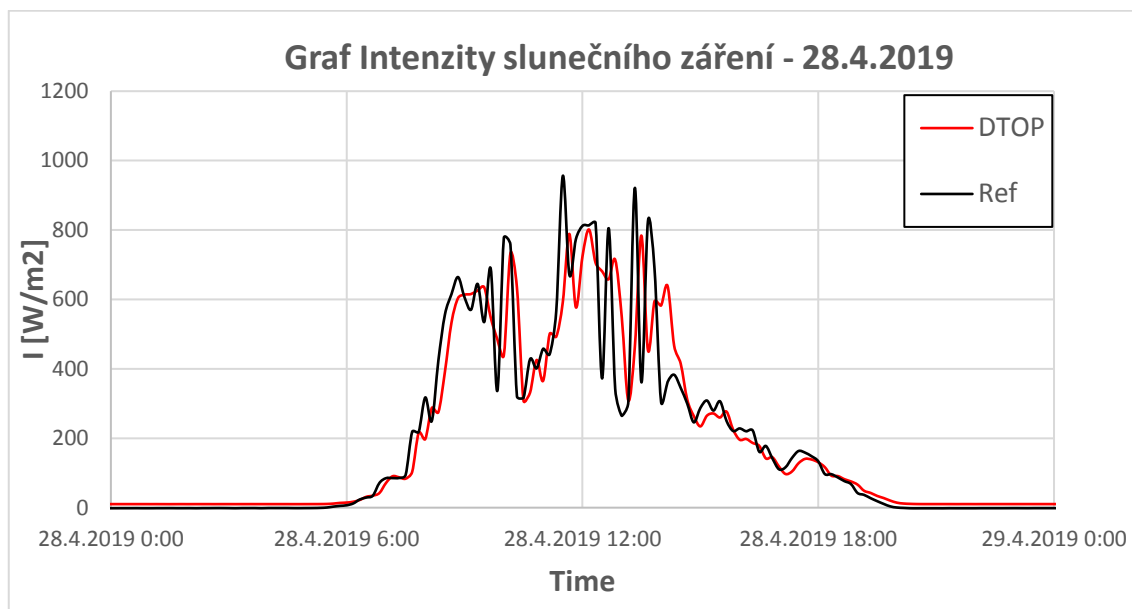
### **8.1.1 Porovnání hodnot**

Z provedeného testovacího měření a z naměřených hodnot vyplývá, že jediná data o slunečním záření byla naměřena referenční diodou DTOP, která měří celkové sluneční záření.

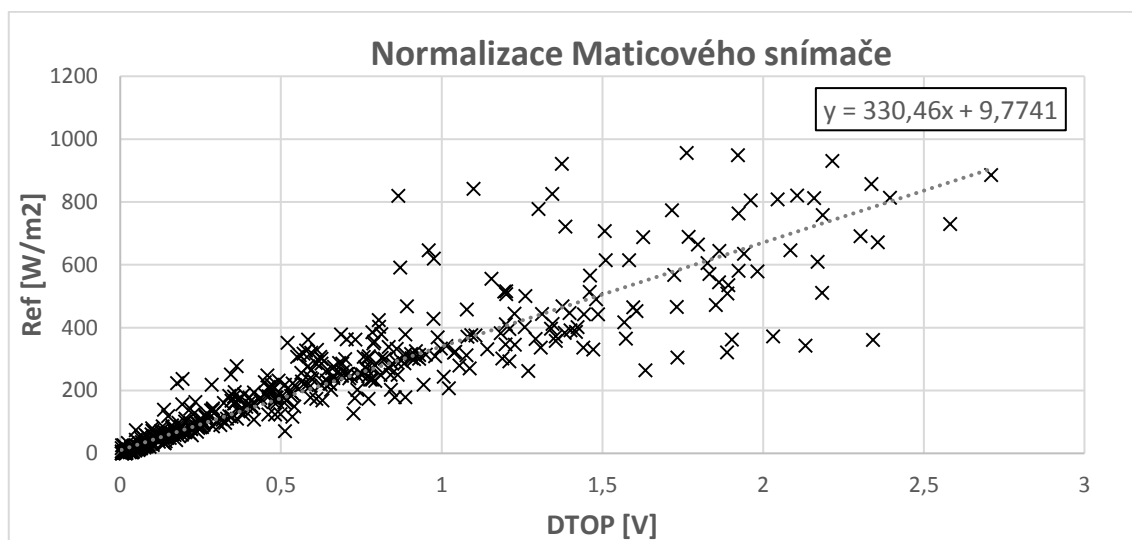
Hodnoty intenzity slunečního záření z referenčního snímače mají periodu deseti minut. U maticového snímače jsou data zapisována každou minutu. Z tohoto důvodu jsem naměřená data zprůměroval, aby bylo možné snáze porovnat jejich průběhy v čase. Pro veškeré hodnoty napětí je nezbytné provedení normalizace tak, aby se výsledek napětí maximálně přiblížil hodnotám průběhu referenčního snímače. Normalizace všech fotodiód maticového snímače byla provedena na základě dat z referenční diody DTOP viz. Obr. 8-5. Z grafu je patrné, že při vyšším osvětlení se hodnoty referenčního snímače a fotodiody DTOP více rozcházejí.

Průběh hodnoty intenzity slunečního záření odpovídá hodnotám napětí naměřenými maticovým snímačem s drobnými odchylkami. Maticový snímač filtruje některé lokální extrémní naměřené průběhy intenzity slunečního záření. Tato chyba měření je pravděpodobně způsobena průměrováním hodnot nebo malou citlivostí snímače. Z grafu 8-5 vidíme, že maticový snímač je schopen reagovat na změny intenzity slunečního záření. Naměřené hodnoty diody DTOP se vůči referenčnímu snímači pohybují většinou s maximální odchylkou 10 %. Během intenzivního slunečního svitu dioda ojedinele vykazuje větší chyby a to až 30 %. Takto velké chyby měření jsou zaznamenány při velkých, rychlých změnách osvětlení. Předpokládám tedy,

že jsou částečně způsobeny zprůměrováním minutových hodnot na desetiminutové a zároveň mohou být způsobeny i odrazem od krycí kupole. K přesnému určení zdroje chyb bude nutné další měření s upraveným snímačem. Při absenci přímého slunečního svitu výstupní průběh maticového snímače přesněji kopíruje průběh referenční, což je způsobeno absencí rychlých a velkých změn intenzity slunečního záření.



**Obr. 8-5 - Graf intenzit slunečního záření maticového snímače - 28.4.2019**



**Obr. 8-6 - Normalizace maticového snímače**

## 9. ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o sestavení levného maticového snímače a ověření jeho využití v provozu. V rámci zadání byla provedena rešerše zařízení pro měření slunečního záření, průzkum trhu a jevy ovlivňující sluneční záření. Z průzkumu trhu byly vybrány senzory pro měření slunečního záření. Pro tyto senzory bylo navrženo schéma zapojení a použití ostatních součástí s nimiž bylo provedeno testovacího měření. Pro maticový snímač byla následně jako vhodný senzor zvolena dioda BPW34.

Na základě poznatků a zkušeností získaných z testovacího měření byl sestaven maticový snímač obsahující třináct diod BPW34 umístěných pod skleněnou kupoli. Na základě výsledků měření popsanych v 8. kapitole se bohužel ukázalo, že použití reflexní hliníkové folie, která byla použita pro částečné zabránění akumulace tepla uvnitř snímače způsobil odraz světla dopadající na plochu senzoru, a to zapříčinilo nežádoucí a nepředvídatelné změny na dvanácti diodách určených pro měření difúzního slunečního záření a sledování pohybu slunce. Jediná dioda, která nebyla ovlivněna chybou měření způsobenou odrazem světla, protože byla umístěna bezprostředně pod vrcholem kupole, byla schopna měřit pouze celkové sluneční záření.

Na základě dat získaných z dat měření jedné fotodiody maticového snímače mohu říci, že dioda BPW34 je schopna měřit sluneční záření s relativně velkou přesností bez přímého slunečního svitu do 10 %. Při slunečním svitu naměřené údaje dosahují chyby až 30 %.

Na základě provedených měření a dosažených výsledků jsem vyhodnotil, že chyby měření byly způsobeny realizovaným návrhem maticového snímače a které nebylo možné z časových důvodů odstranit a ověřit.

Pro následující měření bude nutné zjistit příčinu chyby, která se vyskytla na diodě D7, dále ze současného návrhu maticového snímače odstranit reflexní prvky a určit, zda vliv samotné kupole nezpůsobuje chybu měření. V případě tohoto zjištění by muselo dojít ke kompletní změně krytí snímače před povětrnostními podmínkami nebo kompletní změně designu.

# Literatura

- [1] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. Stavitel. ISBN 978-80-247-3525-2
- [2] Slunce. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-11-20]. Dostupné na URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Sun>>
- [3] BROOKS, David R. *Bringing the Sun Down to Earth: Designing Inexpensive Instruments for Monitoring the Atmosphere*. 1. Institute for Earth Science Research and Education PA, USA: Springer Netherlands, 2008. ISBN 978-1-4020-8693-9.
- [4] IQBAL, Muhammad. *An introduction to solar radiation*. 1. New York: Academic Press, 1983. ISBN 0-12-373752-4.
- [5] Ultrafialové záření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-12]. Dostupné na URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet>>
- [6] Transimpedance Amplifiers (TIA): Choosing the Best Amplifier for the Job. In: *Texas Instruments* [online]. 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.tij.co.jp/jp/lit/an/snoa942a/snoa942a.pdf>
- [7] Pyranometr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-12]. Dostupné na URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Pyranometer>>
- [8] EarthLabs. *EarthLabs* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné z: [https://serc.carleton.edu/earthlabs/weather\\_climate/lab\\_2.html](https://serc.carleton.edu/earthlabs/weather_climate/lab_2.html)
- [9] *Amateur Astronomers Group* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné na URL: <<http://www.astronomersgroup.org/EMSpectrum.html>>
- [10] Pyrheliometr. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-13]. Dostupné na URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Pyrheliometer>>
- [11] *Měřicí stanice* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné na URL: <[http://www.meteo.noa.gr/ENG/iersd\\_station-images.htm](http://www.meteo.noa.gr/ENG/iersd_station-images.htm)>
- [12] *Albedometr CMA 6* [online]. [cit. 2017-12-13]. Dostupné na URL: <<http://www.envitech-bohemia.cz/p/497/albedometr-cma-6>>
- [13] *Protokol měření levným pyranometrem* [online]. 2008 [cit. 2017-12-13]. Dostupné na URL: <<http://www.instesre.org/Solar/PyranometerProtocol/PyranometerProtocol.htm>>
- [14] ALKHOLIDI, Abdulsalam Ghalib a Khaleel Saeed ALTOWIJ. Free Space Optical Communications — Theory and Practices. *Contemporary Issues in Wireless Communications*. InTech, 2014, 2014-11-26. DOI: 10.5772/58884. ISBN 978-953-51-1732-2. Dostupné také na URL: <<http://www.intechopen.com/books/contemporary-issues-in-wireless-communications/free-space-optical-communications-theory-and-practices>>

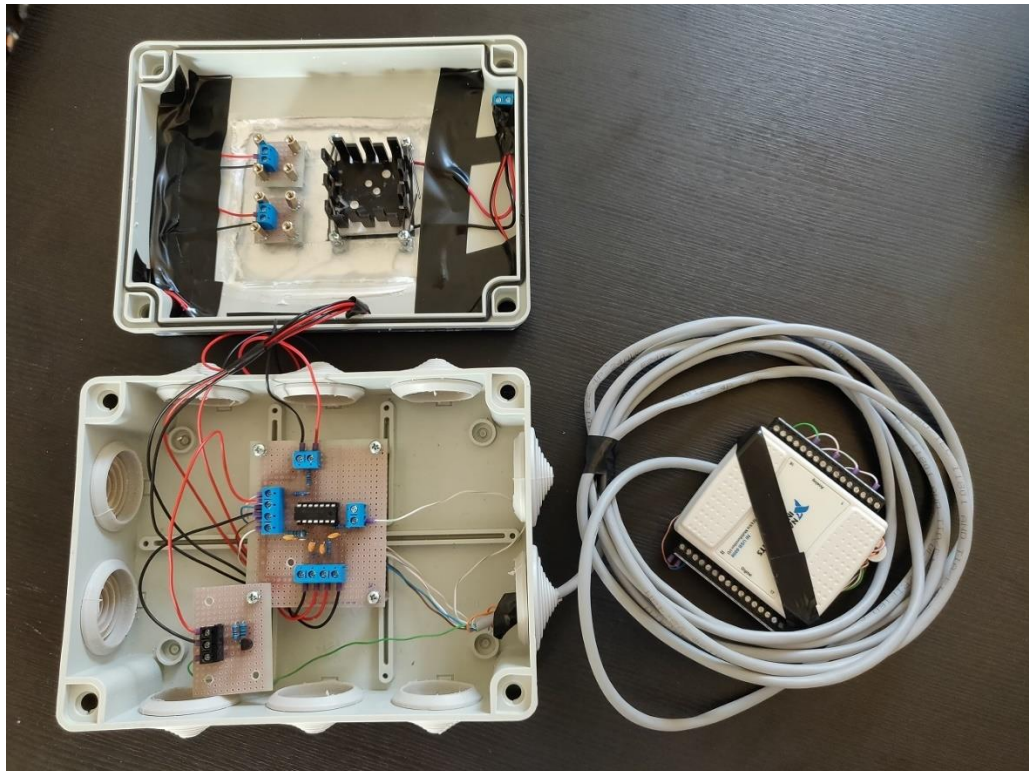
- [15] Zemská atmosféra. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-13]. Dostupné na URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere>>
- [16] Sluneční záření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-12-19]. Dostupné na URL: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>>
- [17] *Photodiode Theory of Operation* [online]. [cit. 2019-05-12]. Dostupné na URL: <<https://www.aptechnologies.co.uk/support/SiPDs/operation>>



## Seznam příloh

Příloha 1 - Testovací zapojení .....	32
Příloha 2 - Program LabVIEW .....	33
Příloha 3 - Desky plošných spojů .....	33
Příloha 4 - CD/DVD .....	34
Příloha 5 - Maticový snímač .....	35
Příloha 6 - Grafy .....	36

## Příloha 1 - Testovací zapojení

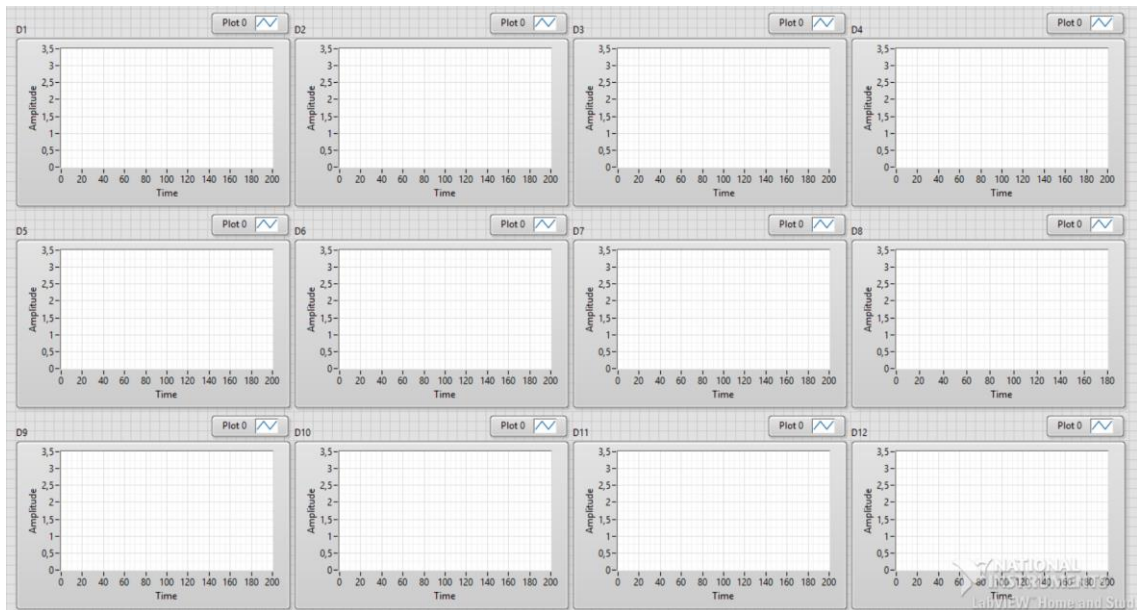


Obr. 10-1 - Testovací zapojení uvnitř



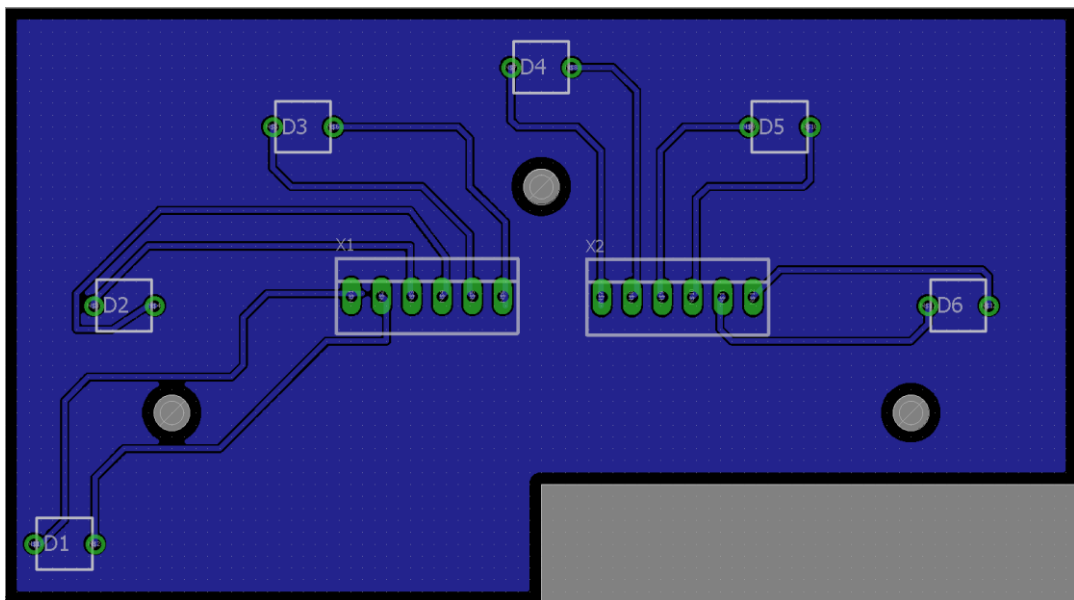
Obr. 10-2 - Testovací zapojení vně

## Příloha 2 - Program LabVIEW

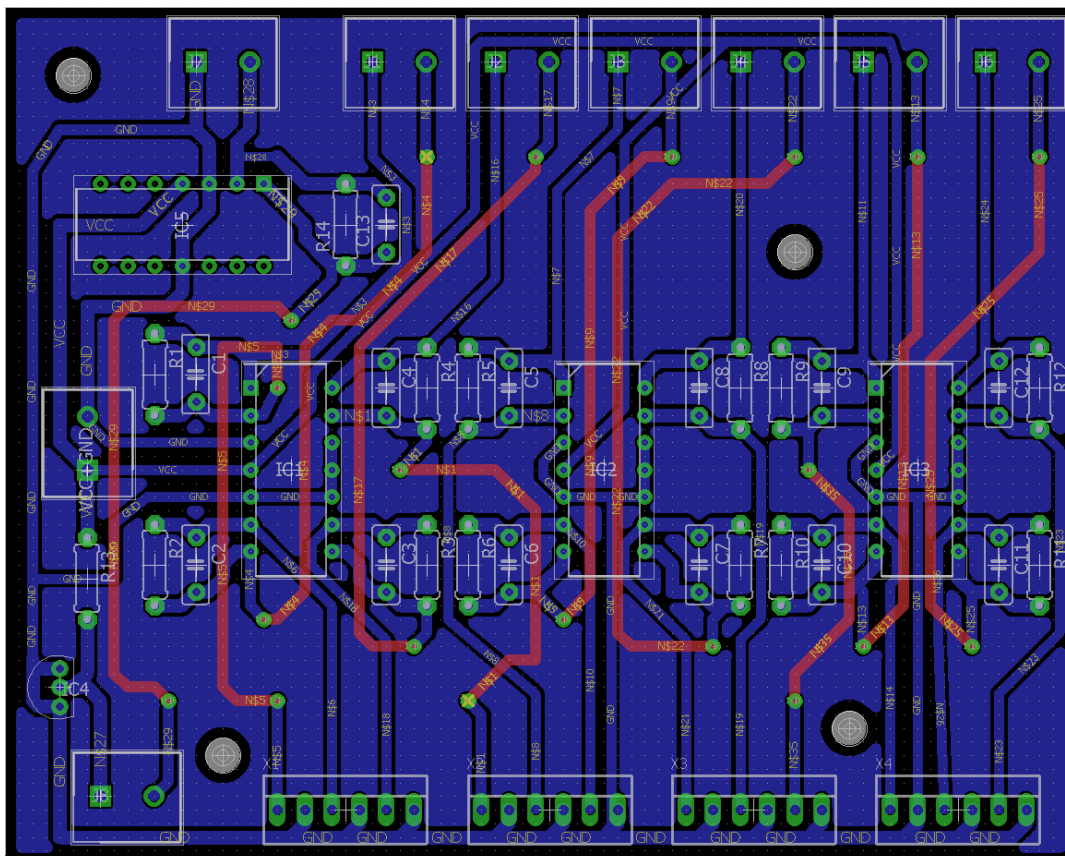


Obr. 10-3 - LabVIEW - zobrazení průběhů diod

## Příloha 3 - Desky plošných spojů



Obr. 10-4 - Polovina desky plošných spojů pro osazení diod



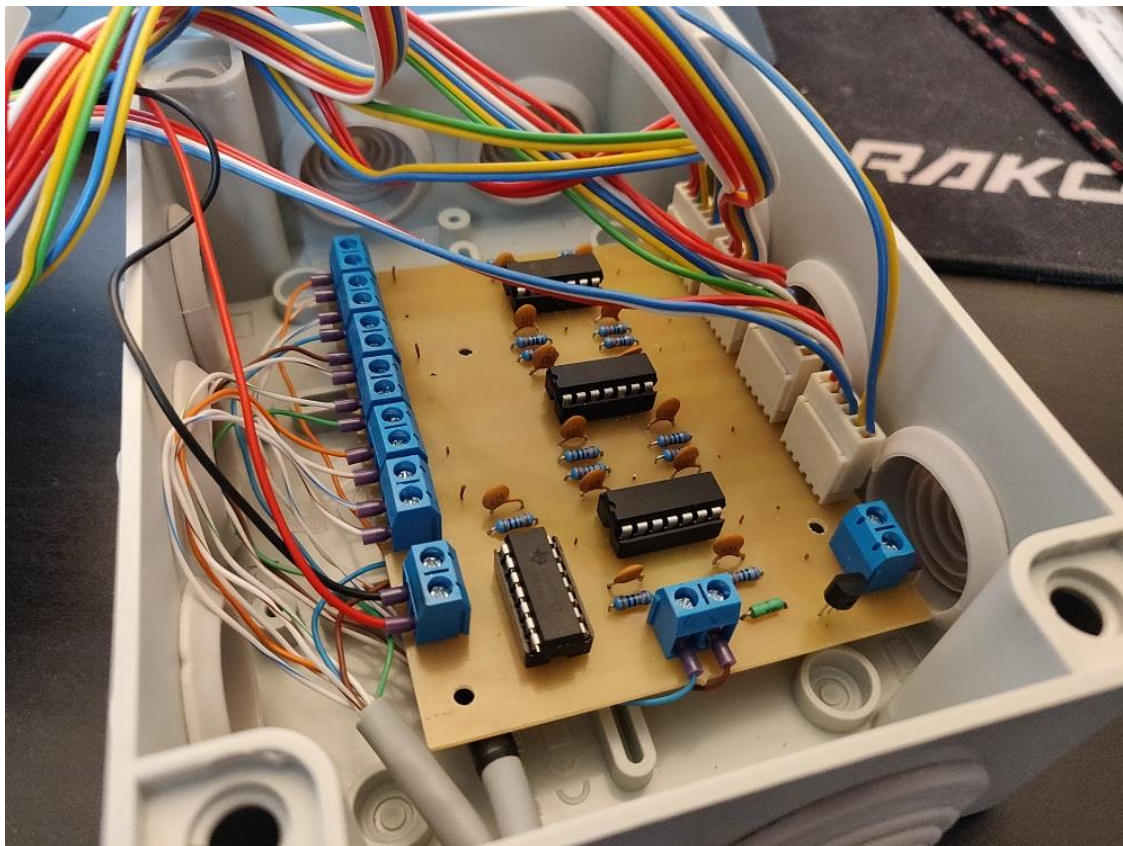
Obr. 10-5 - Deska plošných spojů s operačními zesilovači

## Příloha 4 - CD/DVD

Na přiloženém CD/DVD se nacházejí následující data:

- Elektronická verze bakalářské práce ve formátu PDF
- Naprogramovaný datalogger v programu LabVIEW
- Naměřená data ve formátu tdms
- Zpracovaná data ve formátu xlsx

## Příloha 5 - Maticový snímač

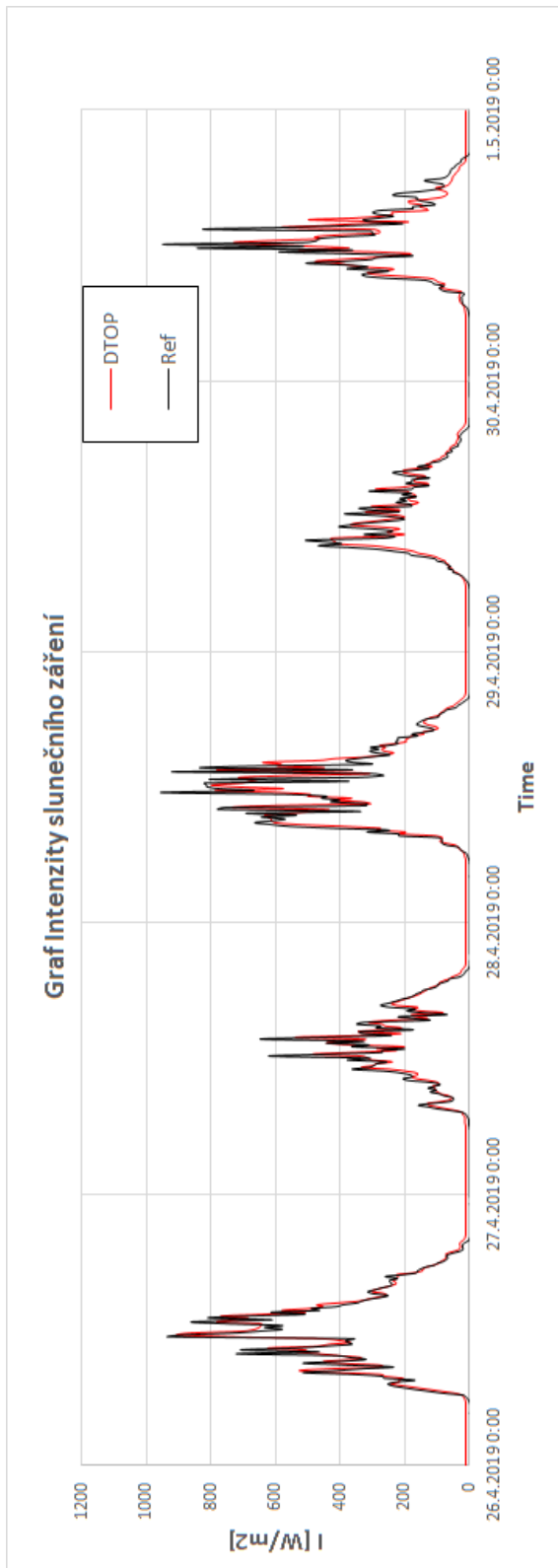


Obr. 10-6 - Maticový snímač uvnitř

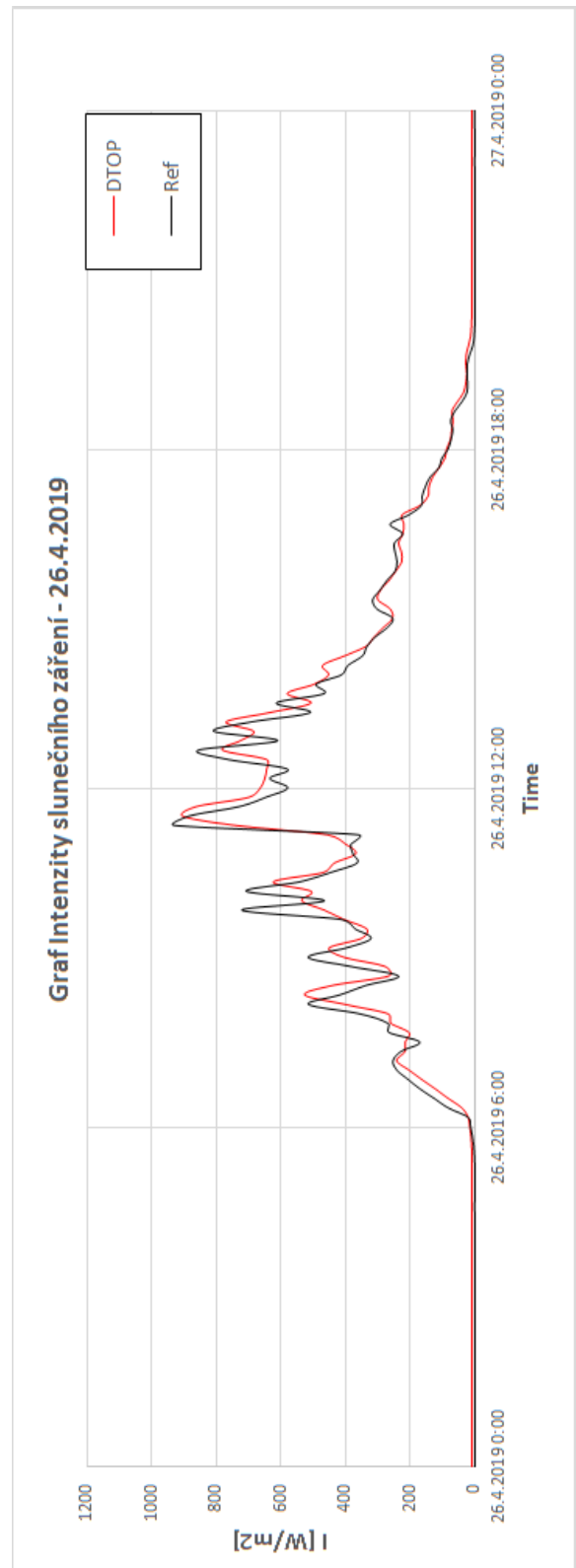


Obr. 10-7 - Maticový snímač vně

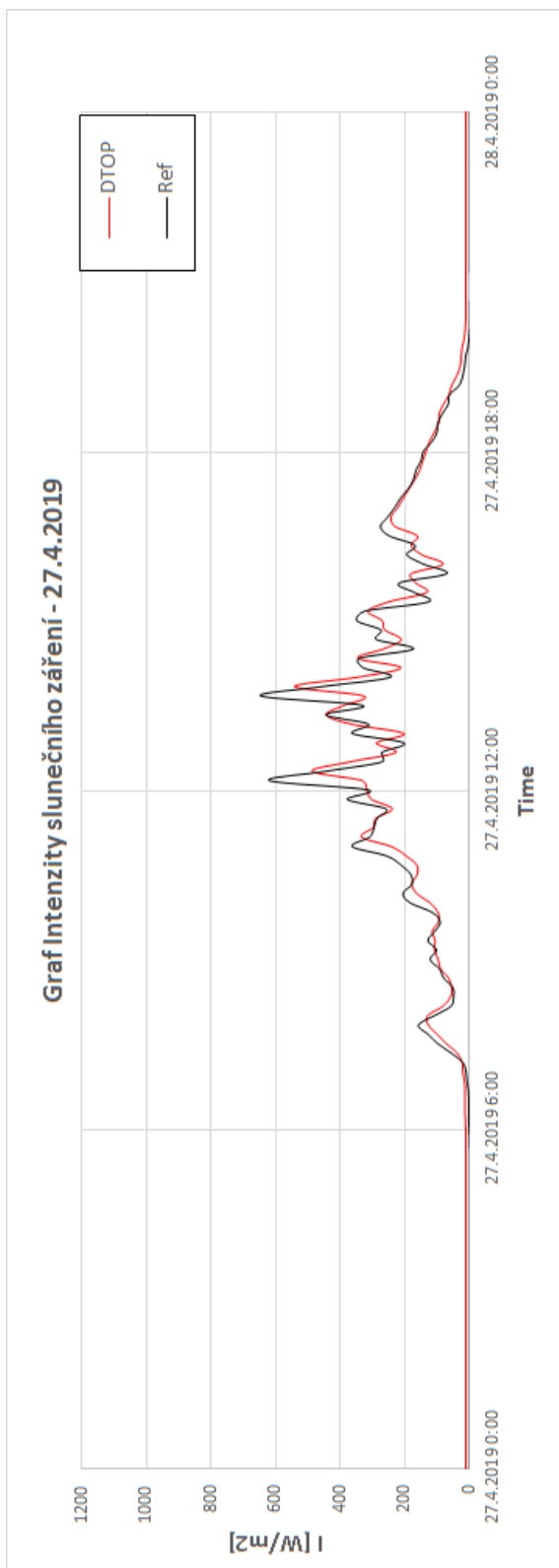
## Příloha 6 - Grafy



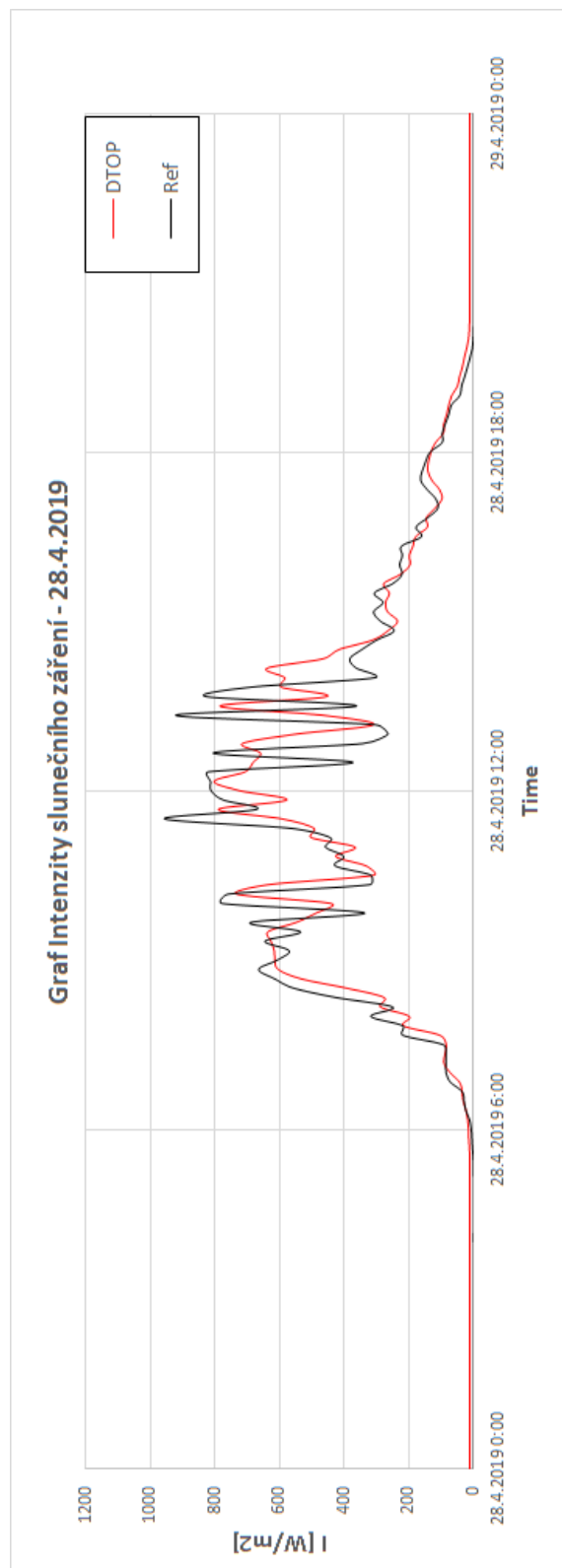
Obr. 10-8 - Graf intenzity slunečního záření



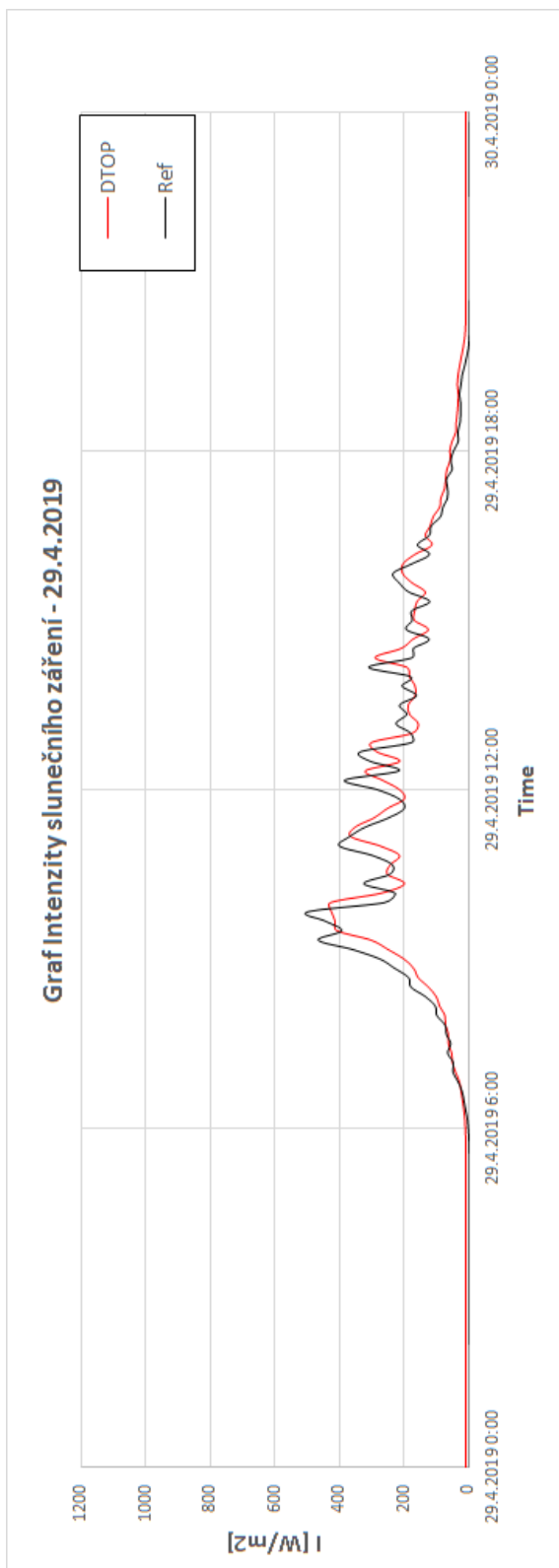
Obr. 10-9 - Graf intenzity slunečního záření - 26.4.2019



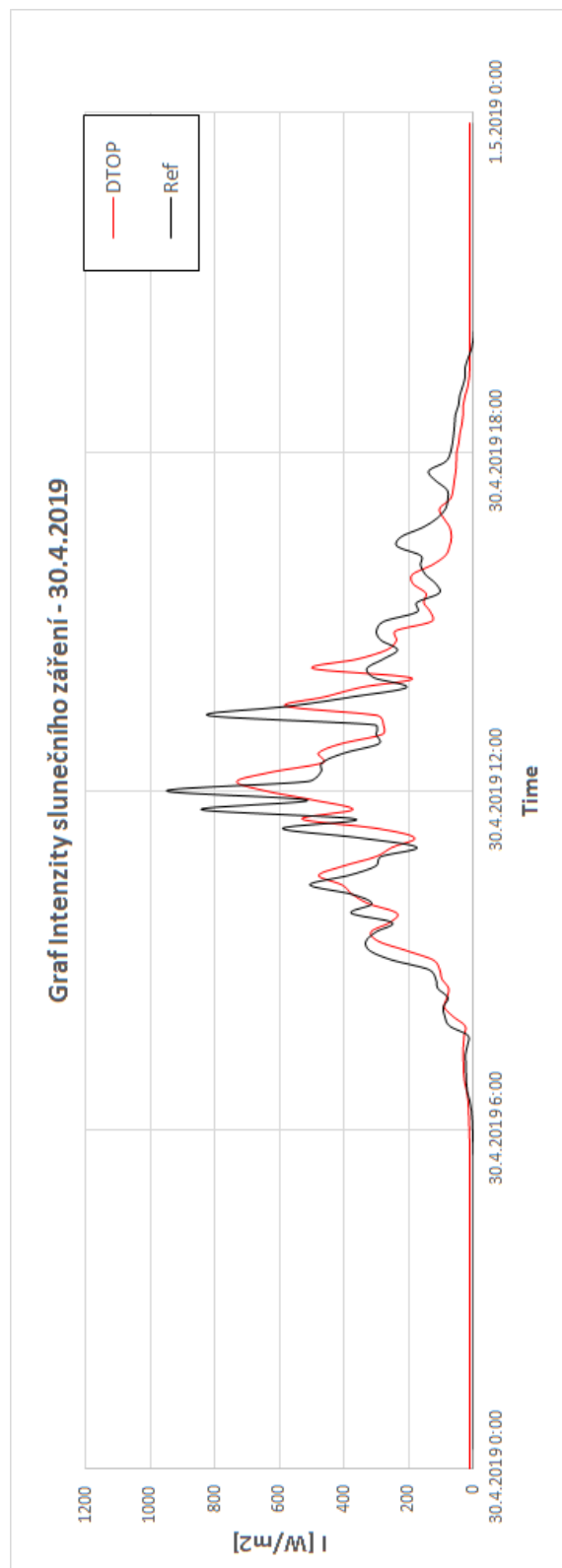
**Obr. 10-10 - Graf intenzity slunečního záření - 27.4.2019**



**Obr. 10-11 - Graf intenzity slunečního záření - 28.4.2019**

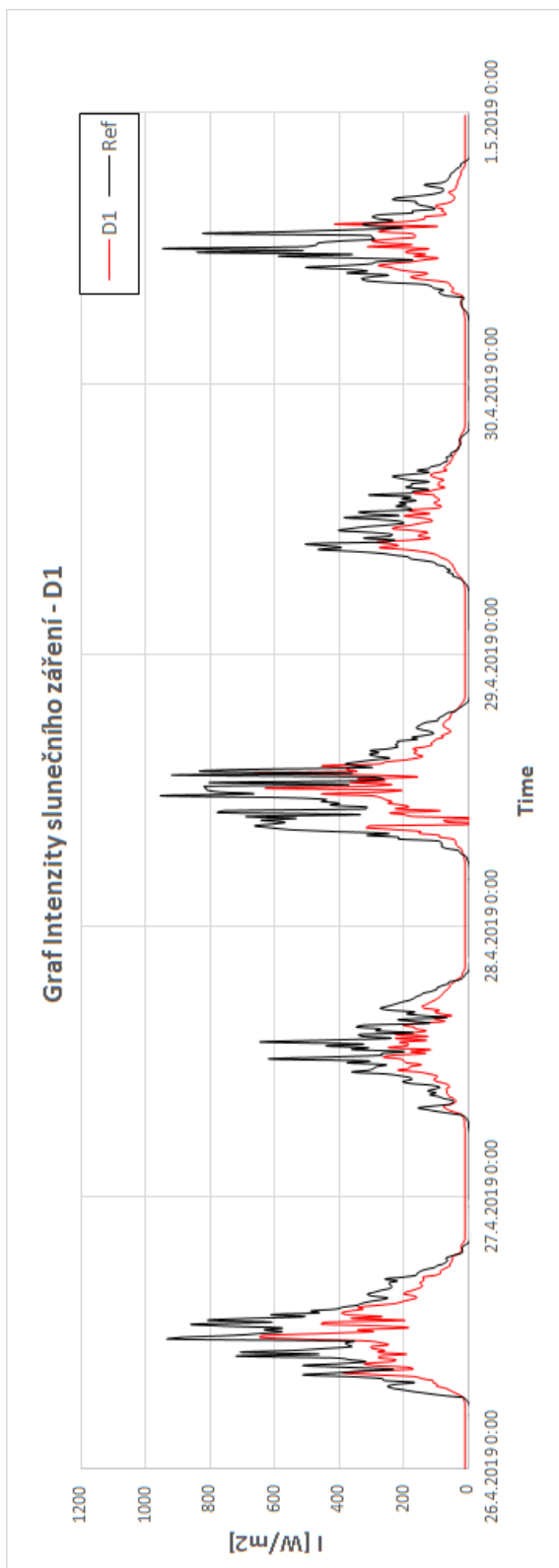


**Obr. 10-12 - Graf intenzity slunečního záření - 29.4.2019**

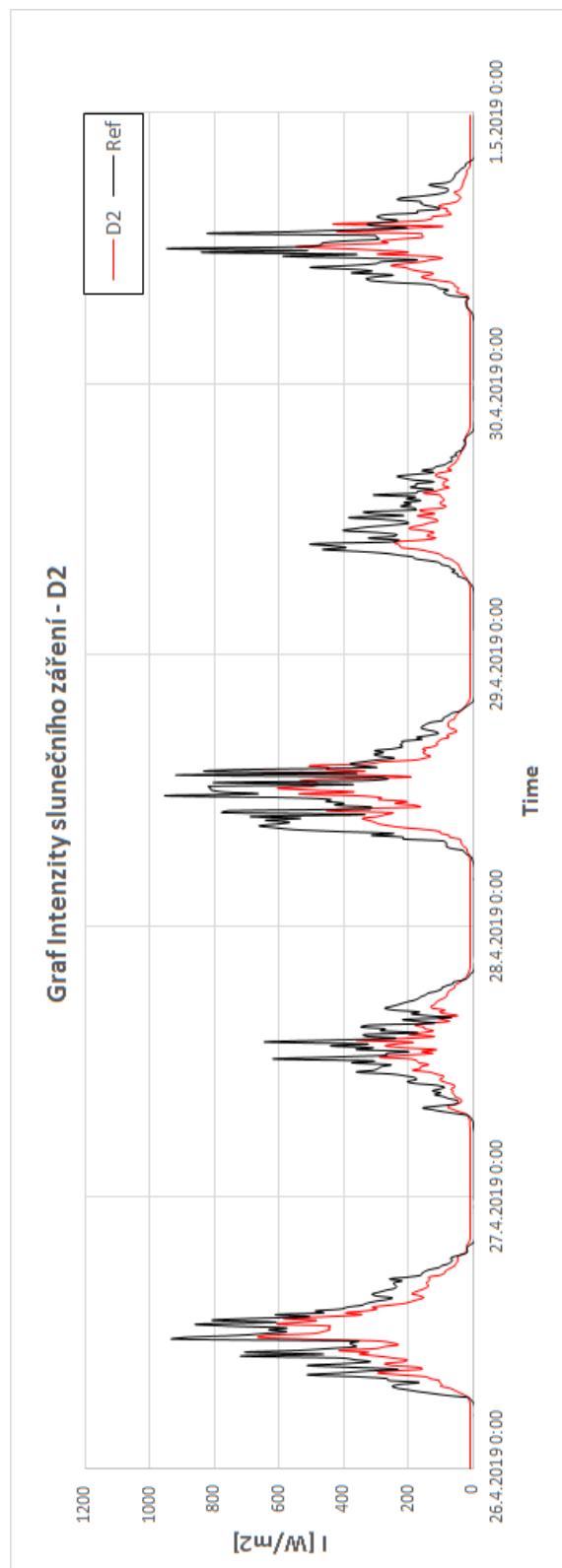


**Obr. 10-13 - Graf intenzity slunečního záření - 30.4.2019**

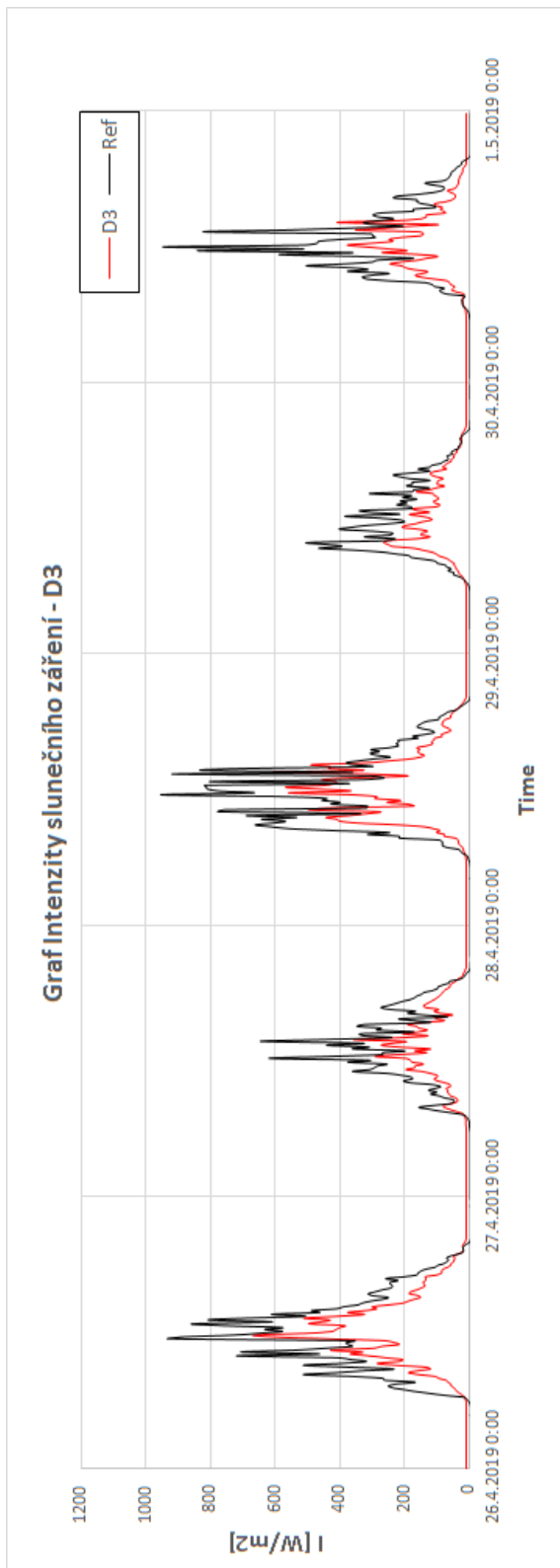




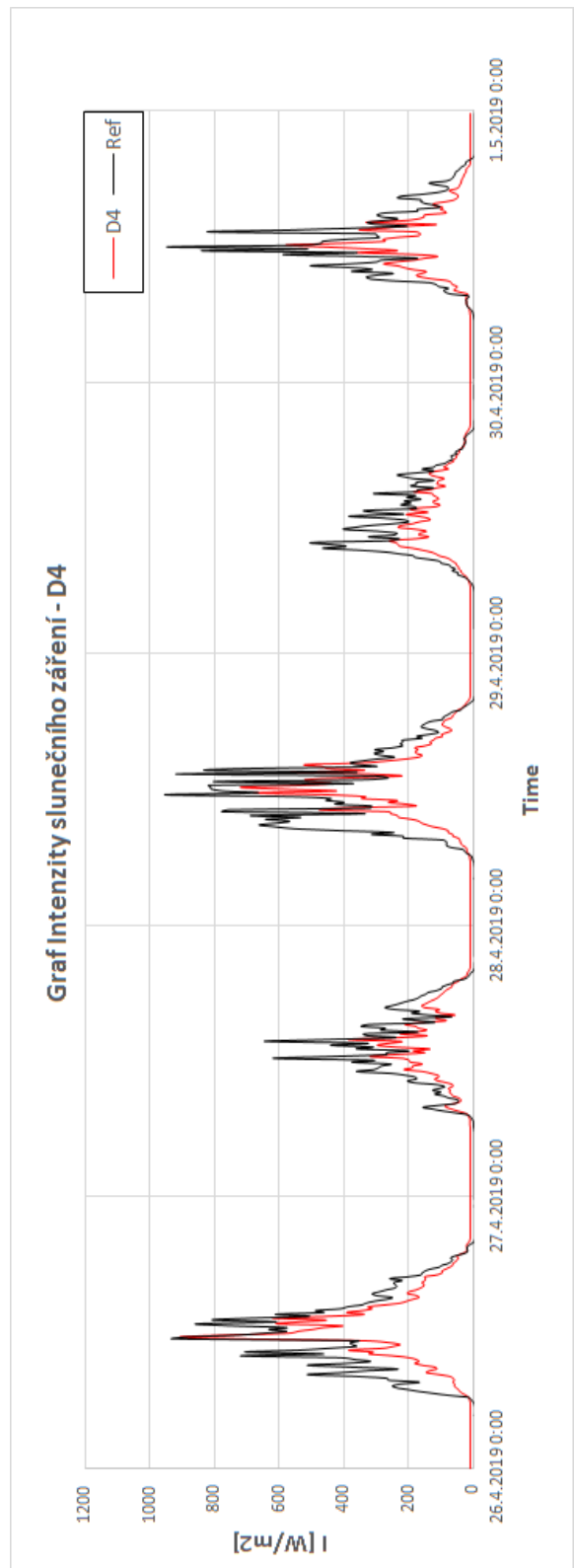
**Obr. 10-14 - Graf intenzity slunečního záření - D1**



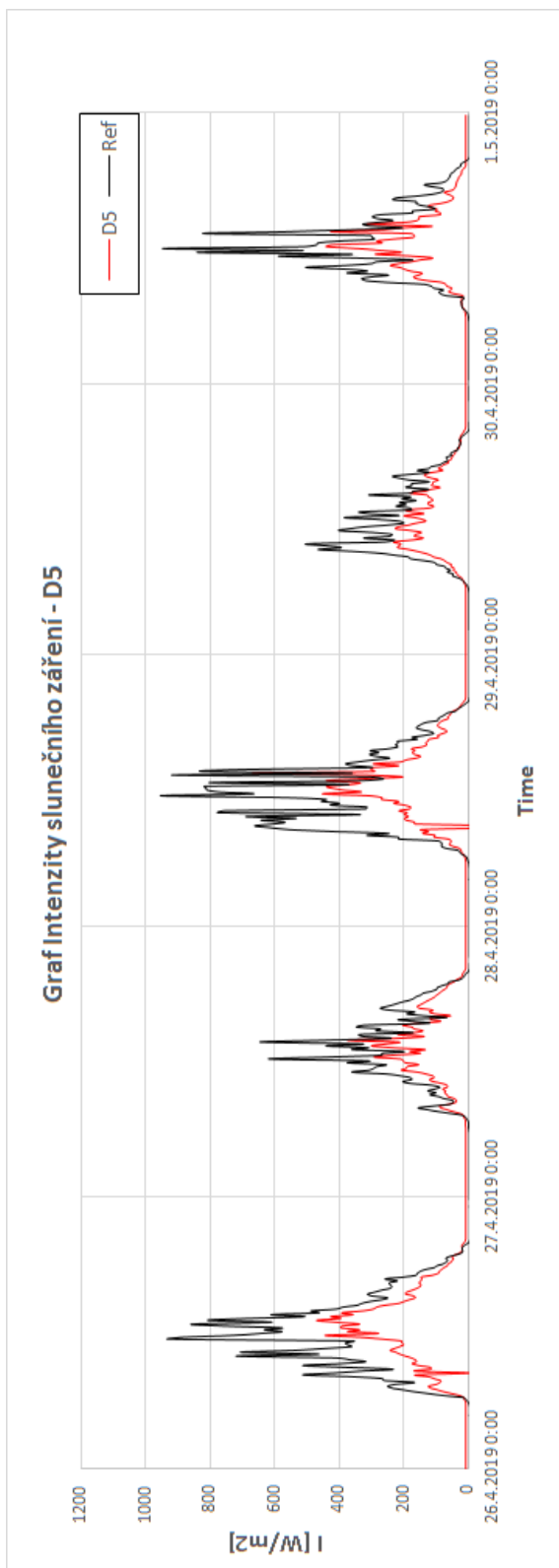
**Obr. 10-15 - Graf intenzity slunečního záření - D2**



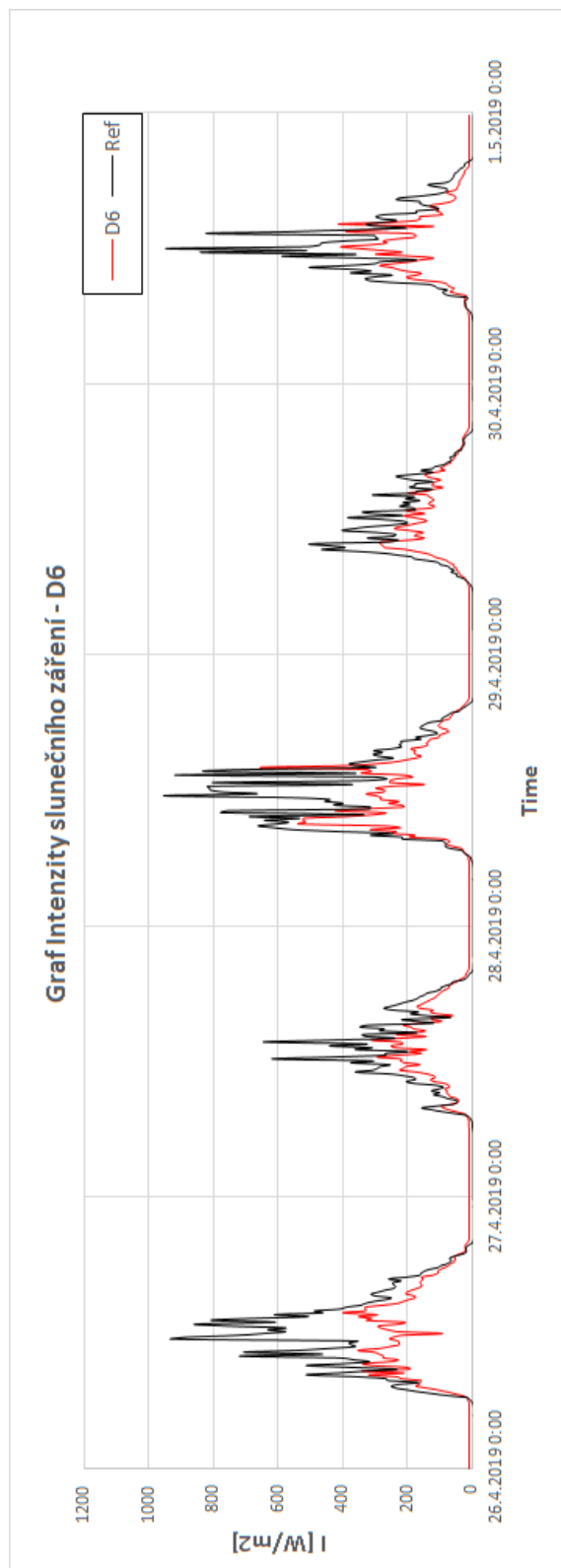
Obr. 10-16 - Graf intenzity slunečního záření - D3



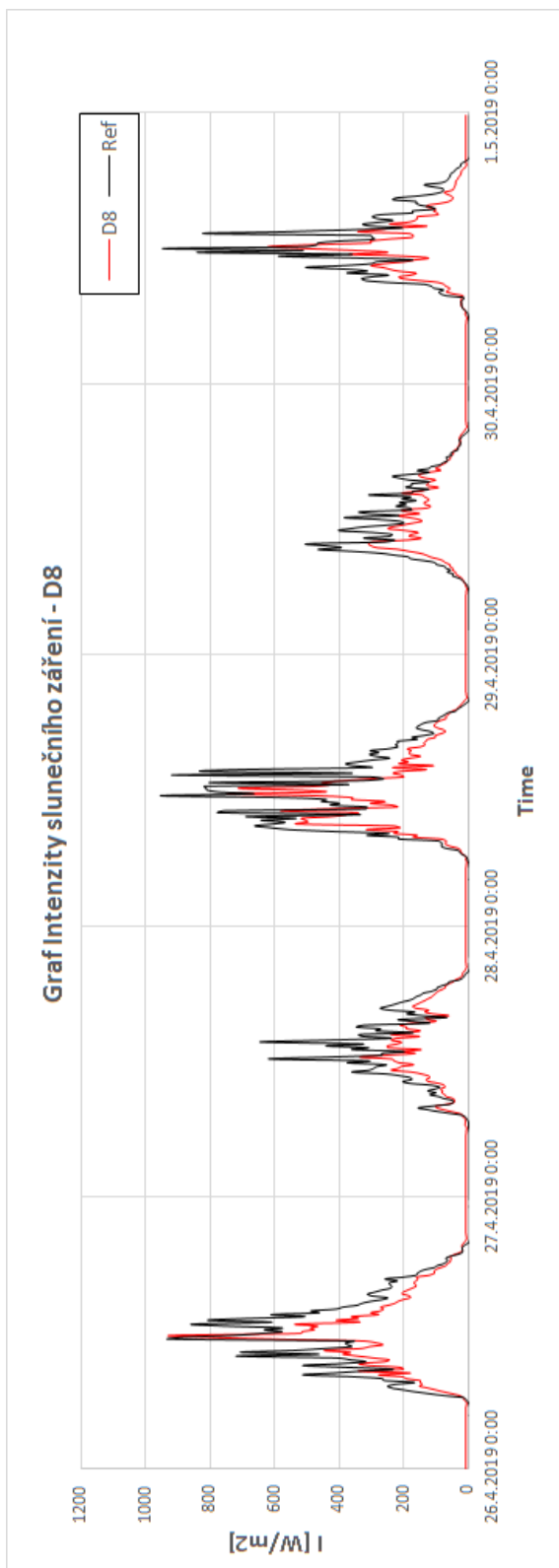
Obr. 10-17 - Graf intenzity slunečního záření - D4



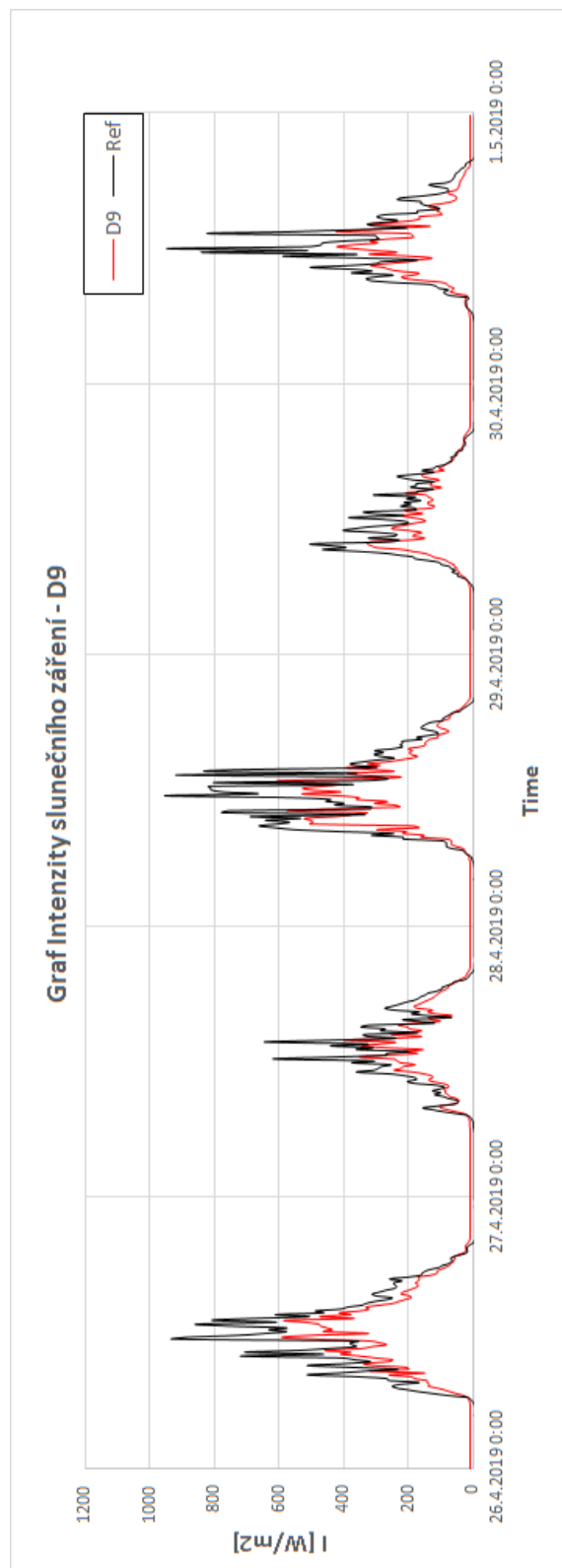
**Obr. 10-18 - Graf intenzity slunečního záření - D5**



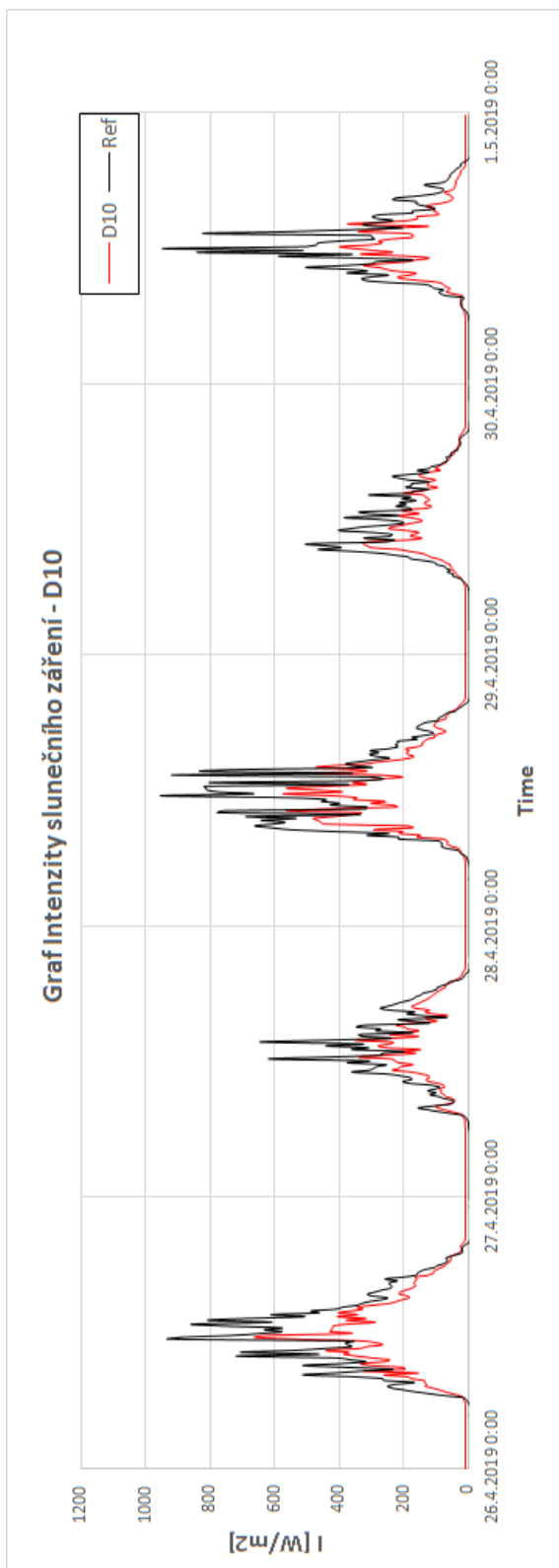
**Obr. 10-19 - Graf intenzity slunečního záření - D6**



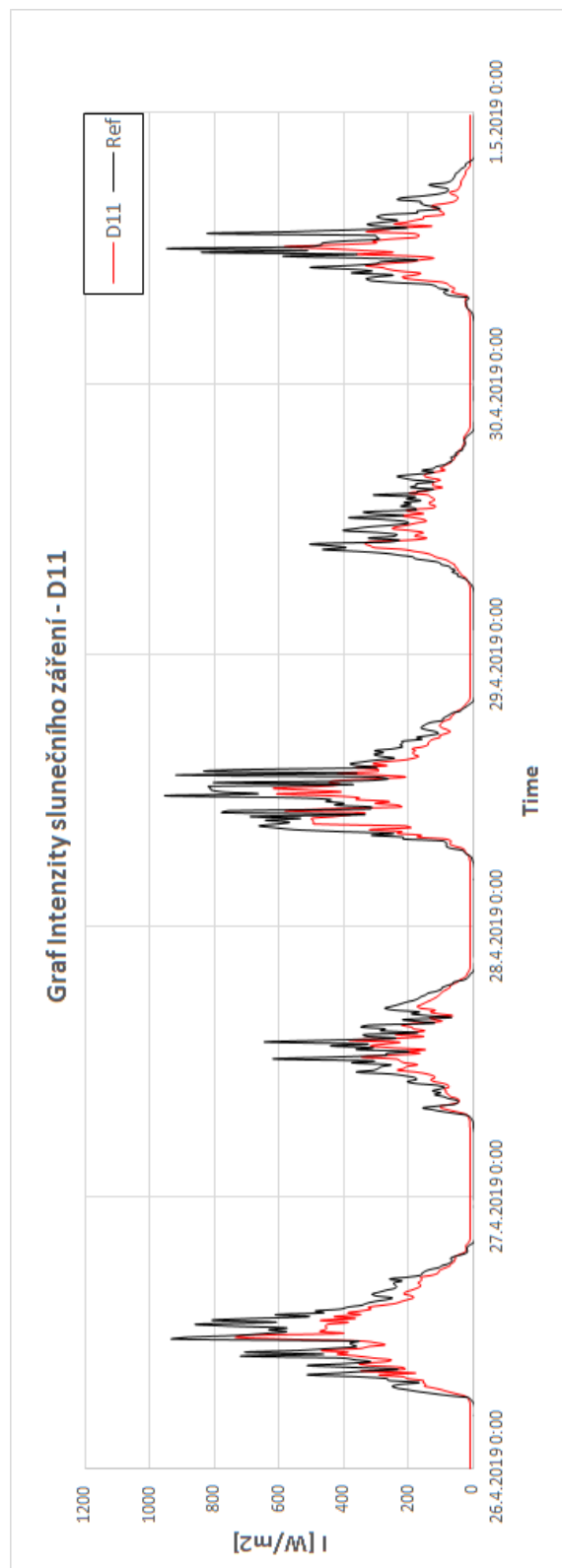
**Obr. 10-20 - Graf intenzity slunečního záření - D8**



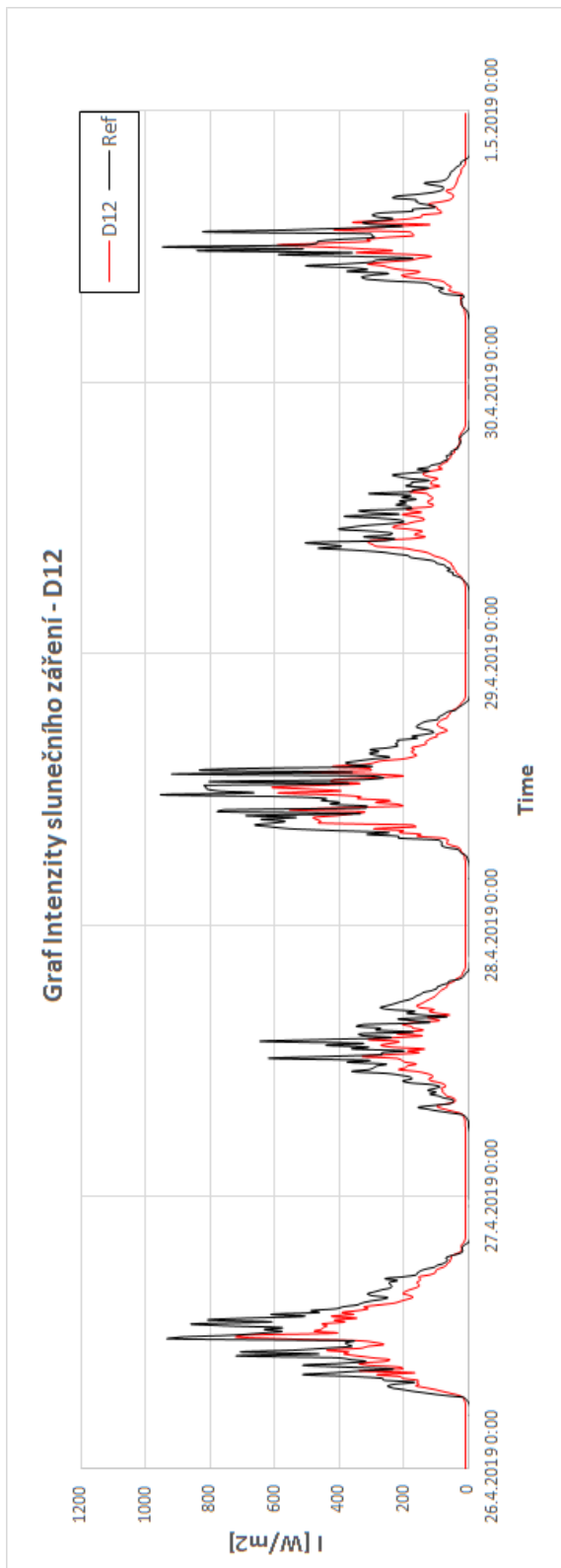
**Obr. 10-21 - Graf intenzity slunečního záření - D9**



**Obr. 10-22 - Graf intenzity slunečního záření - D10**



**Obr. 10-23 - Graf intenzity slunečního záření - D11**



**Obr. 10-24 - Graf intenzity slunečního záření - D12**