



# 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

SOLAR RADIATION MEASUREMENTS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Mazoch

### VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Jan Mazoch

**ID:** 173700

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Měření slunečního záření

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem bakalářské práce je návrh a ověření levné metody pro orientační měření přímého a difúzního slunečního ozáření pro odhad tepelného zisku budov. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Zpracujte literární průzkum, patentovou rešerši a průzkum trhu týkající se metod a přístrojů pro měření slunečního záření.
2. Na základě předchozího bodu definujte požadavky na parametry vhodného čidla snímače záření a diskutujte použitelné principy a konkrétní typy
3. Vybrané typy čidel prakticky ověřte porovnáním s referenčním snímačem.
4. Pro nejvhodnější čidlo nebo kombinaci čidel navrhnete koncepci snímače pro použití v provozních podmínkách, diskutujte volbu použitých součástek, obvodové a konstrukční řešení. Dle možností ověřte základní funkčnost navrženého snímače.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

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

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 29.5.2017

**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**

Bakalářská práce se zabývá návrhem a ověřením levné metody pro orientační měření přímého a difúzního slunečního záření pro odhad tepelného zisku budov. Teoretická část je zaměřena na rozbor sluneční energie a druhů měřicích zařízení. V praktické části jsou uvedeny výsledky patentové rešerše a průzkumu trhu. Dále je zde představen návrh ideálního provedení měřicího obvodu. Poslední kapitola se soustředí na praktické ověření vybraných levných čidel, zahrnující návrh vhodného dataloggeru a měřicího obvodu a také porovnání naměřených dat s referenčním senzorem. Závěr je věnován popisu možného řešení snímače pro použití v provozních podmínkách.

## **Klíčová slova**

Měření slunečního záření, pyranometr, termočlánek, fotodioda, datalogger.

## **Abstract**

This Bachelor's thesis discusses design and verification of an inexpensive method for indicative measurement of direct and diffused solar radiation, in order to estimate the heat gain of buildings. Theoretical part focuses on the analysis of solar energy and types of measuring devices. Practical part presents results of patent research and market research. The design of an ideal solution of a measurement circuit is also presented here. The last chapter concentrates on the practical verification of selected inexpensive sensors. It includes the design of a suitable datalogger and measurement circuit, plus the comparison of measured data with reference sensor. The conclusion is devoted to describing possible solution for the sensor which should be applicable in operating conditions.

## **Keywords**

Solar radiation measurement, pyranometer, thermocouple, photodiode, datalogger.

### **Bibliografická citace:**

MAZOCH, J. *Měření slunečního záření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 55s. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Měření slunečního záření jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou v práci citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 **29. května 2017**

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc a velmi cenné rady při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Petru Mastnému, Ph.D. a Ing. Janu Morávkovi z ústavu elektroenergetiky za poskytnutá referenční data. A rovněž bych rád poděkoval RNDr. Filipu Chuchmovi z ČHMÚ taktéž za poskytnutá meteorologická data.

V Brně dne **29. května 2017**

.....

podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Sluneční energie.....	2
2.1	Slunce.....	2
2.2	Sluneční záření.....	2
2.3	Přímé a difuzní záření.....	3
3	Druhy měřicích zařízení.....	5
3.1	Měření přímého slunečního záření.....	5
3.1.1	Angstromův elektricky kompenzační pyrhelio­metr.....	5
3.1.2	Pyrhelio­metr se stříbrným diskem.....	6
3.1.3	Termoelektrický pyrhelio­metr.....	7
3.2	Měření difuzního slunečního záření.....	8
3.3	Měření hemisférického slunečního záření.....	8
3.3.1	Bimetalový pyranograf.....	8
3.3.2	Pyranometr s fotodiodou.....	9
3.3.3	Pyranometr s termočlánkem.....	10
3.3.4	Fotovoltaický pyranometr.....	11
3.4	Měření hemisférického a odraženého slunečního záření.....	11
4	Norma ISO-9060 [20].....	12
5	Rešerše v patentové literatuře.....	13
5.1	Rešeršní strategie.....	13
5.2	Nalezené dokumenty.....	13
5.3	Závěr z rešerše v patentové literatuře.....	19
6	Současný trh.....	21
6.1	Nalezené přístroje.....	21
6.2	Závěr z průzkumu trhu.....	25
7	Návrh ideálního provedení měřicího obvodu.....	26
7.1	Výběr vhodného materiálu.....	26
7.1.1	Krycí filtr.....	26
7.1.2	Fotoelektrický materiál.....	26
7.1.3	Fotorezistivní materiál.....	27
7.2	Výběr vhodného snímače.....	28
7.2.1	Tepelné snímače.....	28
7.2.2	Kvantové snímače.....	29

7.3	Výběr vhodného zesilovače .....	29
8	Praktické měření vybraných čidel .....	31
8.1	Datalogger.....	31
8.1.1	Nastavení tasku .....	32
8.1.2	Zpracování dat .....	33
8.1.3	Ukončení tasku.....	37
8.2	Měřicí obvod.....	38
8.2.1	Použité snímače .....	38
8.2.2	Zapojení měřicího obvodu .....	39
8.3	Porovnání naměřených dat s referenčními .....	43
9	Závěr .....	46
10	Bibliografie .....	47
11	Přílohy.....	51

# 1 ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je návrh a ověření levné metody pro orientační měření přímého a difuzního slunečního záření pro odhad tepelného zisku budov.

V teoretické části práce je nejdříve charakterizováno sluneční záření včetně rozdělení jeho složek. Dále jsou zde představeny historické a moderní přístroje používané pro měření slunečního záření a následně je uvedena norma ISO-9060 zabývající se klasifikací a specifikací pyranometrů. V praktické části práce jsou uvedeny výsledky rešerše v patentové literatuře a výsledky průzkumu současného trhu. Následně je představen návrh ideálního provedení měřicího obvodu zahrnující výběr ideálních materiálů, dále výběr samotných snímačů a zesilovače výstupního signálu. Poslední kapitola této práce se týká samotného praktického ověření vybraných levných a snadno dostupných snímačů. Tato kapitola konkrétně pojednává o realizaci vhodného dataloggeru, návrhu měřicího obvodu a porovnání naměřených dat s referenčním senzorem. Závěr je pak věnován návrhu koncepce levného snímače použitelného při provozních podmínkách.



## 2 SLUNEČNÍ ENERGIE

### 2.1 Slunce

Slunce tvoří střed sluneční soustavy, v níž se nachází i planeta Země. Pro planetu Zemi je tedy Slunce nejbližší hvězdou a zároveň i hlavním zdrojem energie. Slunce je koule žhavého plazmatu s hmotností přibližně 330 000krát větší, než je hmotnost Země, tedy  $2 \times 10^{30}$  kg a tvoří asi 99.9 % hmotnosti sluneční soustavy. Dle prováděných měření se složení Slunce mění, a to v závislosti na hloubce, ale lze konstatovat, že hmotnost Slunce je tvořena ze 70 % vodíkem z 28 % heliem a zbylé 2 % tvoří ostatní prvky, přičemž alespoň ve stopovém množství se ve Slunci nachází většina prvků periodické tabulky [1].

Průměr Slunce je přibližně 1.392 milionů kilometrů [2]. Z hlediska struktury Slunce se do přibližně 138.4 tis. km od středu nachází jádro, do 513.4 tis. km radiační zóna, následovaná konvekční zónou (do 695.2 tis. km) a svrchními vrstvami - fotosférou, chromosférou a korunou [3].

Jádro Slunce má teplotu dosahující  $1.5 \times 10^7$  K a hustotu plazmatu  $130\,000 \text{ kg/m}^3$  [2]. Dle Matušky [1] v něm dochází k termojaderné fúzi, kdy protony vodíku a helia do sebe narážejí vysokou rychlostí, při které se překonává jejich elektrická odpudivost, a dostávají se k sobě natolik blízko, že jádra atomů splynou. „Každou sekundu se tak přemění 564 milionů tun vodíku na 560 milionů tun helia“. Rozdíl mezi hmotnostmi je způsoben nižší hmotností vzniklého jádra helia a čtyř protonů vodíku, jež vstupují do reakce. Tento rozdíl hmot se při reakci přemění na energii podle vztahu  $E=m \times c^2$ . Výkon uvolněný při této reakci je tedy  $3.6 \times 10^{26}$  W. Tato energie ve formě rentgenových fotonů postupně prochází přes radiační zónu a konvekční zónu, díky čemuž se z uvedených fotonů postupně stávají energeticky chudší fotony o delší vlnové délce. Fotosférou je energie o vlnových délkách 0.2 až 3  $\mu\text{m}$  vyzařována do kosmického prostoru. Povrch Slunce vyzařuje energii přibližně  $60 \text{ MW/m}^2$ , tedy asi  $3.6 \times 10^{26}$  W. Z celkového množství dané energie na Zemi dopadá pouze přibližně 174 tis. TW, což představuje asi jednu půl miliardtinu [4].

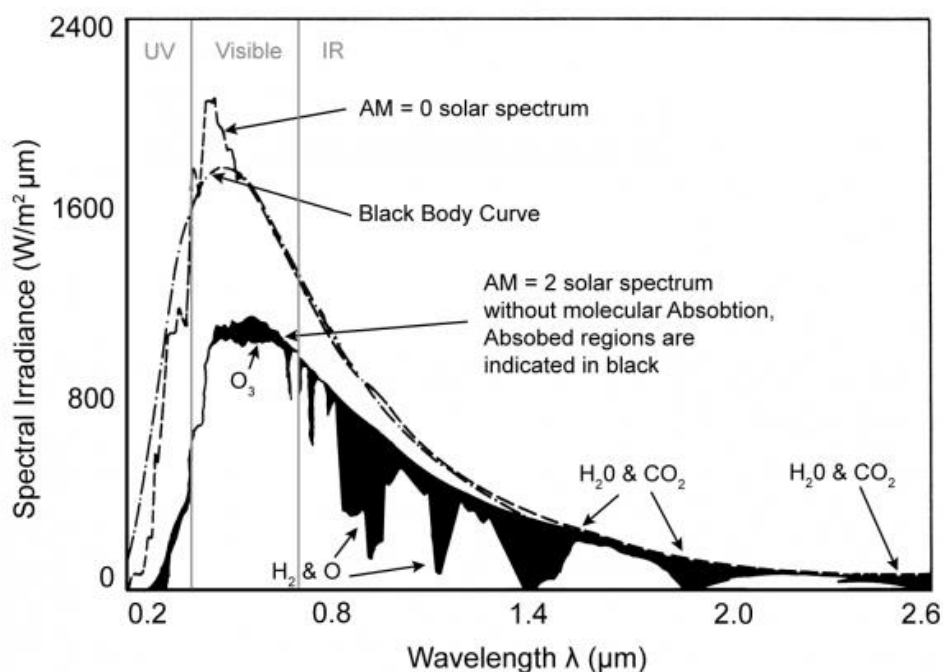
### 2.2 Sluneční záření

Slunce je téměř dokonalým příkladem černého tělesa s povrchovou teplotou 5 800 K. Černým tělesem je těleso, jež pohlcuje veškeré dopadající záření a spektrum, jež vyzařuje, závisí pouze na teplotě tohoto tělesa [5]. Slunce díky své povrchové teplotě 5 800 K nejvíce vyzařuje energii o vlnové délce 501 nm [2].

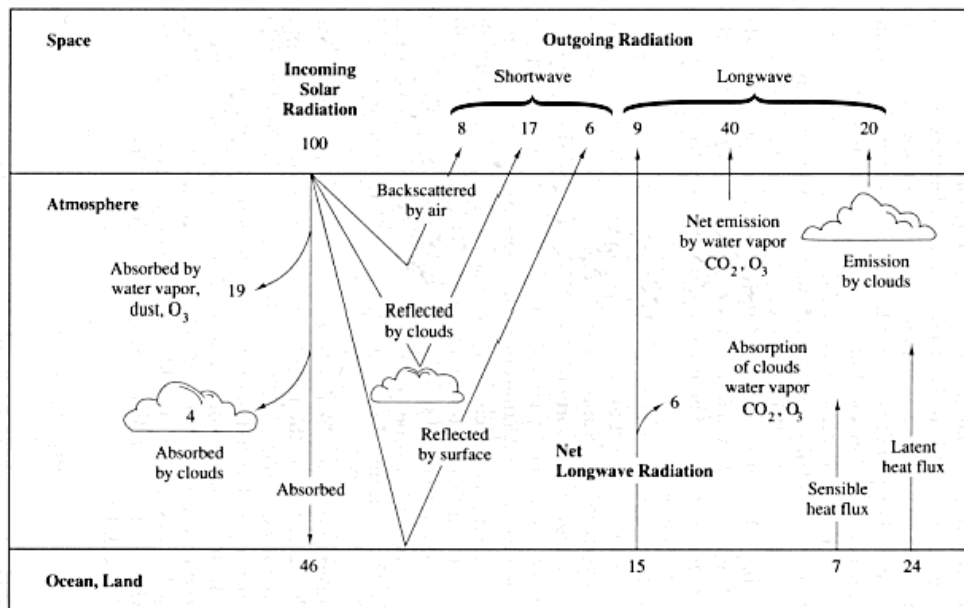
Infračervené záření představuje vlnové délky od 1 mm do přibližně 740 nm, přičemž od 1 mm do 3  $\mu\text{m}$  se jedná o IR-C neboli vzdálené IR, od 3  $\mu\text{m}$  do přibližně 1.4  $\mu\text{m}$  se jedná o IR-B neboli střední IR a od 1.4  $\mu\text{m}$  do 0.76  $\mu\text{m}$  se jedná o IR-A neboli blízké IR. Viditelné spektrum poté pokrývá vlnové délky od 740 nm do 380 nm, od červené barvy po fialovou. Ultrafialové záření nakonec pokrývá oblasti od 100 nm do 400 nm, přičemž se dále dělí na UVC (od 100 nm do 280 nm), UVB (od 280 nm do 315 nm) a UVA (od 315 nm do 400 nm).

## 2.3 Přímé a difuzní záření

Sluneční záření musí před dopadem na povrch Země projít skrz vrstvu atmosféry, jež začíná přibližně 60 km nad zemský povrch. Při tomto průchodu dochází k odrazení nebo pohlcení části záření. Na obr. 2.1 je vidět rozdíl mezi hustotou záření v závislosti na vlnové délce v kosmickém prostoru a hustotou záření v závislosti na vlnové délce na povrchu Země.



Obr. 2.1 Změna elektromagnetického spektra před ( $AM = 0$ ) průchodem atmosférou a po ( $AM = 2$ ) něm [6].



Obr. 2.2 Průchod slunečního záření atmosférou [7].

Z obr. 2.2 je patrné, že zpět do kosmického prostoru je odraženo:

- v průměru 17 % slunečního záření prostřednictvím mraků (v závislosti na oblačnosti),
- 8 % slunečního záření vlivem fyzikální reakce s molekulami vzduchu, kdy dojde k všesměrovému rozptylu záření,
- 6 % slunečního záření prostřednictvím zemského povrchu,

Z uvedeného vyplývá, že zpět do kosmického prostoru je tedy odraženo přibližně 31 % slunečního záření.

Ze zbylých 69 % slunečního záření, jež není odraženo zpět do kosmického prostoru:

- je 19 % absorbováno prachem, ozónem a vodní párou nacházejících se ve stratosféře (horní vrstva atmosféry, přibližně od 13 km do 45 km),
- jsou 4 % absorbována mraky nacházejícími se v troposféře (spodní vrstva atmosféry, přibližně do 8 až 17 km),
- a 46 % dopadá přímo na zemský povrch. [7]

Přímé sluneční záření dopadající na objekt je takové sluneční záření, jež dopadá na objekt přímo ze Slunce a malé části oblohy okolo něj a má tedy velmi výrazný směrový charakter. Difúzní sluneční záření je pak takové záření, jež je průchodem atmosférou rozptýleno, případně odraženo od povrchu, a má tedy všesměrový charakter. [1]

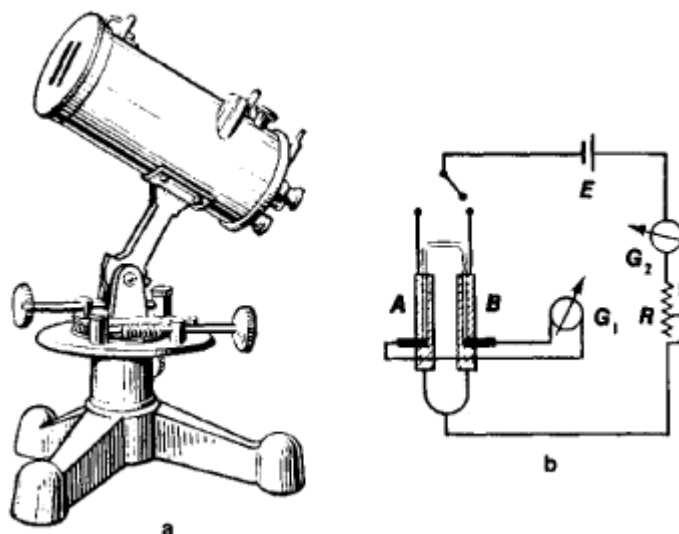
## 3 DRUHY MĚŘICÍCH ZAŘÍZENÍ

### 3.1 Měření přímého slunečního záření

Pro měření přímého slunečního záření, také DNI („Direct normal incidence“), slouží pyrliometry. Rozsah jejich zorného pole je typicky do 5°, proto musí být umístěny na zařízení sledujícím slunce, a to tak, aby mohlo docházet k jeho otáčení.

#### 3.1.1 Angstromův elektricky kompenzační pyrliometr

Angstromovým elektricky kompenzačním pyrliometrem je pyrliometr vyvinutý v roce 1893 švédským fyzikem Knut Johan Ångströmem. Tento pyrliometr obsahuje dva manganinové proužky sloužící jako senzory. Povrch těchto senzorů je natřen černou barvou absorbující krátkovlnné záření. K těmto senzorům je zezadu připojen měděno-konstantanový termočlánek, jenž je připojen na galvanometr. Při průtoku proudu senzorem se senzor zahřívá, jelikož se chová také jako rezistor. Sensory jsou umístěny v tubusu s otvorem, jímž může dovnitř procházet sluneční záření. Jeden ze senzorů je zastíněn, takže sluneční záření dopadá pouze na druhý senzor. Dopadající záření na povrch jednoho ze senzorů zvyšuje jeho teplotu a na termočlánek se úměrně tomu indukuje termoelektrické napětí působící galvanometr. Galvanometr značí výchylku, a proto je na druhý senzor přiveden proud, jehož velikost se zvyšuje, dokud se nedosáhne nulové výchylky na galvanometru a poté je velikost proudu úměrná velikosti proudu vznikající na termočlánek, a tedy zároveň přímo úměrná slunečnímu záření podle vzorce  $S = K \cdot i^2$ , kde K je vnitřní konstanta přístroje stanovená z velikosti senzoru, jeho odporu a absorpčního koeficientu jeho povrchu. [8]

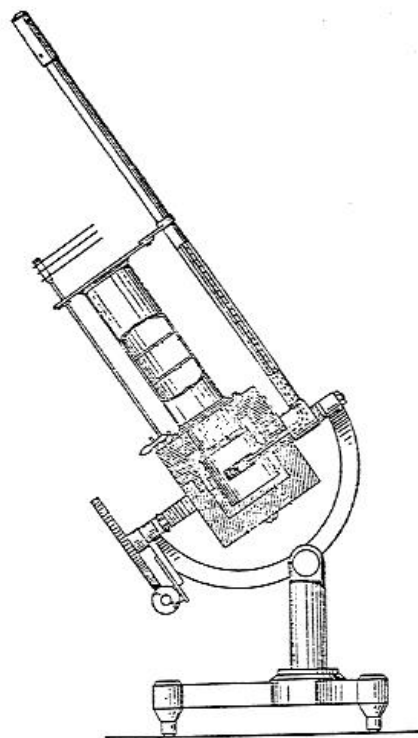


Obr. 3.1 Angstromův elektricky kompenzační pyrhelimetr [9]

Na obr. 3.1 jsou znázorněny senzory s termočlánky (A, B), externí napájecí zdroj (E), galvanometr (G1) a R reostat pro řízení velikosti proudu.

### 3.1.2 Pyrhelimetr se stříbrným diskem

Pyrhelimetrem se stříbrným diskem je pyrhelimetr vynalezený Charles Greeley Abbotem v roce 1902, který má jako senzor stříbrný disk s průměrem 38 mm a tloušťkou 7 mm. Disk je z jedné strany pokryt černou barvou pro absorpci záření. Disk má z boku vytvořený otvor, do něhož se vloží rtuťový teploměr, jenž je vyveden ven z dřevěného boxu, v němž je disk vložen, aby se zamezilo vnějším teplotním vlivům. Ve vnější části tohoto dřevěného boxu je teploměr ohnut do pravého úhlu, tak aby bylo měření snazší a aby byl přístroj kompaktnější. Úhel zorného pole je omezen tubusem, jímž záření musí projít na  $5.7^\circ$ . Měření tímto pyrhelimetrem se provádí zasouváním a vysouváním tří clonek do tubusu v přesných intervalech tak, aby došlo ke střídání fáze, kdy je disk osvětlován zářením a jeho teplota stoupá, což se projeví na teploměru, a fáze, kdy je záření zastíněno. Výsledná intenzita slunečního záření je poté rozdílem mezi teplotami ve fázi, kdy je disk osvětlován a kdy není. [10]



*Obr. 3.2 Pyrheliometr se stříbrným diskem. [8]*

### **3.1.3 Termoelektrický pyrheliometr**

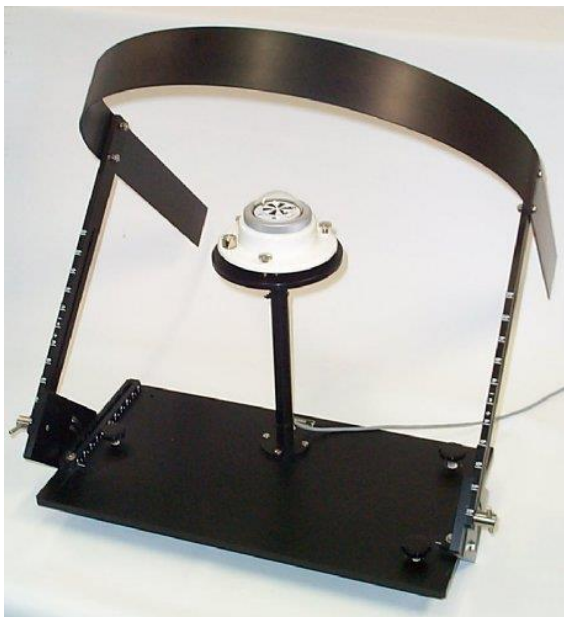
Termoelektrický pyrheliometr, v dnešní době nejpoužívanější, využívá jako senzor termočlánekovou baterii (např. měděno-konstantanový drát), který je umístěn v tubusu, tak aby se zamezilo vnějším vlivům a aby se zorné pole snížilo na hodnotu okolo  $5^\circ$ . Na vrchní straně tubusu je otvor s krystalovo-křemenovým okýnkem, jímž prochází sluneční záření na „teplé“ spoje násobného termočlánku. „Studené“ spoje termočlánku jsou spojeny s pouzdrem. Rozdíl teplot mezi „teplými“ a „studenými“ spoji je úměrný intenzitě záření dopadajícího na senzor.



*Obr. 3.3 Termoelektrický pyrheliometr Hukseflux DR01 [11]*

## 3.2 Měření difuzního slunečního záření

Pro měření difuzního záření se využívají standardní pyranometry vybavené stínícími prvky, jako například různými prstenci z černě eloxovaného hliníku. „Prstenec umožňuje kontinuální měření difuzní složky během dne bez nutnosti automatického přestavování polohy stínícího prstence. Sklon prstence se přestavuje jednou za několik dní podle období.“ [1] V kombinaci s nestíněným pyranometrem lze použít pro stanovení hodnoty přímého záření.



Obr. 3.4 Stínící prstenec NovaLynx [12]

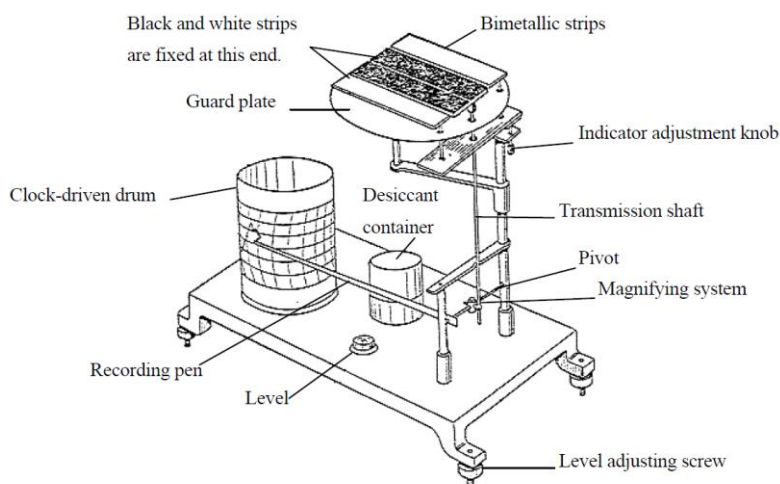
## 3.3 Měření hemisférického slunečního záření

Hemisférické záření se skládá z přímého a difuzního záření dopadajícího na horizontální rovinu z polokoule oblohy. Zařízeními sloužícími pro měření hemisférického slunečního záření jsou pyranometry. [1]. Pyranometry jsou obvykle vybaveny krycím sklem ve tvaru polokoule, která chrání senzor před nepříznivými vlivy okolí, zabráňuje ovlivňování senzoru dlouhovlnným zářením a zároveň díky svému tvaru usměrňuje záření tak, že i ve chvíli, kdy je slunce blízko horizontu, záření dopadá na senzor [10].

### 3.3.1 Bimetalový pyranograf

Bimetalový pyranograf je zařízení, jehož snímací část se skládá ze dvou párů bimetalových proužků. První pár proužků je natřen na bílo tak, aby pokud možno

neabsorboval žádné záření, a druhý pár je natřen na černo tak, aby měl co nejmenší reflexivitu. Oba páry jsou jedním koncem připojeny ke společné desce, jeden z vrchu a druhý zespodu. Společná deska zároveň zabraňuje přenosu tepla mezi jednotlivými páry. Černý pár je připojen přes kloubovou hřídel k záznamovému zařízení a bílý pár je připojen k rámu pyranografu. Změna teploty černého páru proužků se přenesse na záznamové zařízení, přičemž bílý pár proužků má kompenzační funkci, jelikož díky spojení na jedné straně vyrovnává posun černého páru proužků způsobený změnou teploty uvnitř pyranografu. Bimetalový pyranograf je schopen měřit přibližně v rozmezí vlnových délek od 300 nm do 3000 nm [8]. Časová konstanta bimetalového pyranografu je přibližně 10 až 15 minut [10].



Obr. 3.5 Bimetalový pyranograf [8].

### 3.3.2 Pyranometr s fotodiodou

U pyranometru s fotodiodou je senzorem fotodiody a obvyklý rozsah vlnových délek je u nejlepších přístrojů tohoto typu přibližně 350 nm až 1100 nm, v závislosti na použitém typu fotodiody. Fotodiody pracuje na principu přeměny dopadajícího záření na napětí. Je to levnější než varianta s termočlánkem, avšak nejistota měření je zde řádově větší než s termočlánkem [1]. Oproti variantě s termočlánkem má však o několik řádů nižší časovou konstantu.

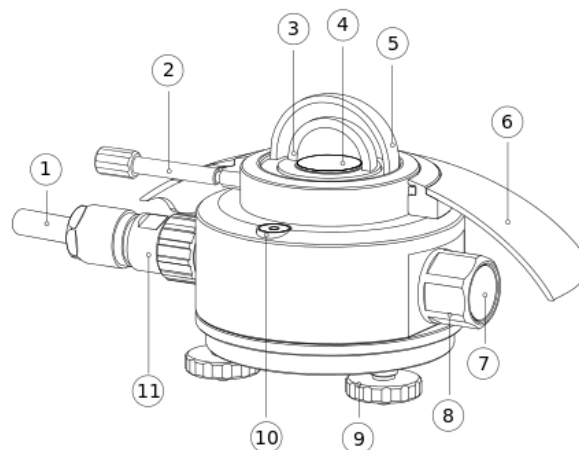




Obr. 3.6 Pyranometr s fotodiodou ML-01 EKO Instruments [13].

### 3.3.3 Pyranometr s termočlánkem

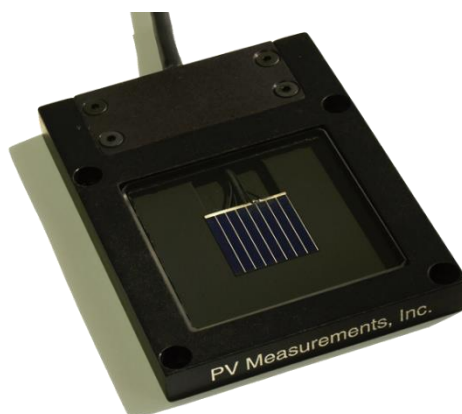
Pyranometry s termočlánkem představují, vzhledem ke své velké přesnosti a rozsahu vlnových délek, nejpoužívanější druh pyranometrů, zejména pro laboratorní účely. Dopadající záření je absorbováno povrchem natřeným černou barvou, čímž je tento povrch ohříván. V první variantě je nárůst teploty tohoto povrchu měřen pomocí několika sériově nebo sériovo-paralelně spojených termoelektrických článků tvořících termočlánek. Aktivní segmenty jsou umístěny pod černým povrchem, takže jsou ohřívány zářením absorbovaným černým povrchem. Pasivní segmenty jsou teplovodivě spojeny s pouzdem pyranometru, jež slouží jako chladič. Ve druhé variantě používané u novějších a výkonnějších pyranometrů je použit Peltierův článek využívající rozdílných polovodičů nahrazujících rozdílné kovy termočlánků. Rozsah vlnových délek pyranometrů je přibližně od 300 nm do 3000 nm [14]. Zároveň díky krytí kupolí je rozsah zorného pole až 180°



Obr. 3.7 Pyranometr s termočlánkem SR20 Hukseflux [15].

### 3.3.4 Fotovoltaický pyranometr

U fotovoltaických pyranometrů jsou dopadající fotony s energií nad zakázaným pásmem přeměňovány přímo na pozitivní a negativní náboj. Velikost proudu, jež je generován, je závislý na intenzitě a vlnových délkách záření. Velikost takto generovaného proudu je měřena jako napětí na malém rezistoru, jenž je součástí vnějšího obvodu umístěného ve fotovoltaickém pyranometru [16]. Fotovoltaické pyranometry mají typický rozsah vlnových délek 350 nm až 1150 nm [17]. Nejsou schopny pracovat se zářením dopadajícím pod úhlem větším než 80°. Vyžadují teplotní korekci. Výhodou je nízká časová konstanta pod několik milisekund [16].



*Obr. 3.8 Fotovoltaický pyranometr PV Measurements, Inc. [18]*

### 3.4 Měření hemisférického a odraženého slunečního záření

Pro měření hemisférického záření a odraženého záření slouží Albedometry. Albedometry se skládají ze dvou identických pyranometrů s termočlánky, přičemž jeden je natočen směrem vzhůru a měří hemisférické záření a druhý je natočen směrem dolů a měří odražené záření. Albedo je stanoveno jako poměr odraženého záření k hemisférickému záření. Velikost odraženého záření závisí na úhlu dopadu záření a na odrazivosti povrchu (např. asfalt 4%, 25% tráva, 90% čerstvý sníh) [19].

## 4 NORMA ISO-9060 [20]

Norma ISO-9060 „zavádí klasifikaci a specifikaci přístrojů pro měření hemisférického a přímého slunečního záření v celém rozsahu od 0.3  $\mu\text{m}$  do 3  $\mu\text{m}$ .“

Norma rozděluje pyranometry do třech skupin podle níže uvedených parametrů:

- Secondary standard – nejvyšší požadavky na pyranometry, tento typ pyranometrů se používá pro výzkumné měřicí účely
- First class – střední požadavky na pyranometry, tento typ pyranometrů se používá pro výzkumné a rutinní měřicí účely
- Second class – nejnižší požadavky na pyranometry, tento typ pyranometrů se používá pro rutinní měřicí účely

Tab. 4.1 Specifikace normy ISO-9060 [21]

Specifikace	Secondary Standard	First Class	Second Class
<b>Čas odezvy:</b> čas pro dosažení 95% odezvy	< 15 s	< 30 s	< 60 s
<b>Offset A:</b> odezva na 200 W/m <sup>2</sup> čistě tepelného záření, ventilované	7 W/m <sup>2</sup>	7 W/m <sup>2</sup>	7 W/m <sup>2</sup>
<b>Offset B:</b> odezva na změnu 5 K/h teploty okolí	$\pm 2$ W/m <sup>2</sup>	$\pm 2$ W/m <sup>2</sup>	$\pm 2$ W/m <sup>2</sup>
<b>Nestabilita:</b> změna odezvy za rok v %	$\pm 0.8$ %	$\pm 1.5$ %	$\pm 3$ %
<b>Nelinearita:</b> Odchylka v % od odezvy 500 W/m <sup>2</sup> v důsledku změny intenzity záření od 100 do 1000 W/m <sup>2</sup>	$\pm 0.5$ %	$\pm 1$ %	$\pm 3$ %
<b>Směrová odezva (pro paprskové ozáření):</b> rozsah chyb způsobených za předpokladu, že odezva je správná pro všechny směry při měření z jakéhokoliv směru paprsku záření, jehož normální intenzita je 1000 W/m <sup>2</sup>	$\pm 10$ W/m <sup>2</sup>	$\pm 20$ W/m <sup>2</sup>	$\pm 20$ W/m <sup>2</sup>
<b>Spektrální selektivita:</b> odchylka v % výsledku spektrální absorpance a propustnosti od odpovídající průměrné, od 0.35 do 1.5 $\mu\text{m}$	$\pm 3$ %	$\pm 5$ %	$\pm 10$ %
<b>Teplotní odezva:</b> odchylka v % způsobená změnou teploty okolí v rozsahu 50 K	2 %	4 %	8 %
<b>Náklonová odezva:</b> odchylka odezvy v % vztažená k 0°, v důsledku změny náklonu od 0° do 90°, při intenzitě 1000 W/m <sup>2</sup>	$\pm 0.5$ %	$\pm 2$ %	$\pm 5$ %

# 5 REŠERŠE V PATENTOVÉ LITERATUŘE

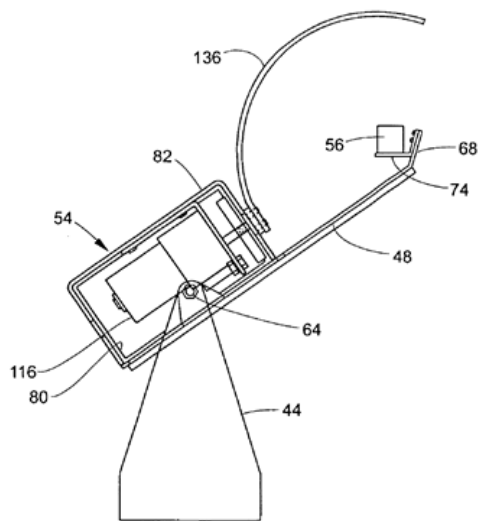
## 5.1 Rešeršní strategie

Rešerše byla prováděna v placené databázi Orbit omezující se pouze na patentovou literaturu. První rešeršní dotaz se zaměřoval pouze na výskyt slova „pyranometer“ v jakékoliv části patentového dokumentu – názvu, abstraktu, stavu techniky, podstatě vynálezu nebo příkladu provedení. Tímto dotazem byly nalezeny první relevantní dokumenty. Na základě těchto dokumentů byla poté zjištěna nejpoužívanější třída – G01J, dle třídění CPC („Cooperative Patent Classification“). Druhý vyhledávací dotaz byl rozšířen na použití spojení, jako je například „measur+ and radiation“ (znak „+“ značí rozšíření o libovolný počet písmen), v kombinaci s třídou G01J. Nakonec byla na relevantní dokumenty, nalezené pomocí prvního a druhého dotazu, použita vyšší funkce databáze Orbit „Search similar patents“, která dle podobných rysů vybraných dokumentů vyhledá jim podobné, díky čemuž jsou s velkou pravděpodobností nalezeny i dokumenty, které nebyly nalezeny pomocí druhého dotazu.

## 5.2 Nalezené dokumenty

### **Rotating shadowband pyranometer – US6849842 [22]**

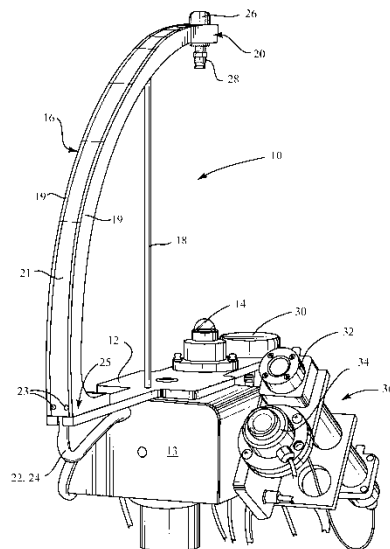
Patentové nároky popisují zakřivený plochý pás, který je na jedné straně připojen k motoru. Toto spojení tvoří první stupeň volnosti. Motor je dále otočně připojen k podstavci, což tvoří druhý stupeň volnosti. Třetí stupeň volnosti je tvořen podpěrou světelného senzoru umístěného v ose rotace zmíněného pásu. Motor slouží k rotaci pásu z jedné krajní pozice do druhé, přičemž během této rotace zastihuje světelný senzor, díky čemuž je možné měřit difuzní záření.



*Obr. 5.1 Rotating shadowband pyranometer*

**Shadow band assembly for use with a pyranometer and a shadow band pyranometer incorporating same – US8481905 [23]**

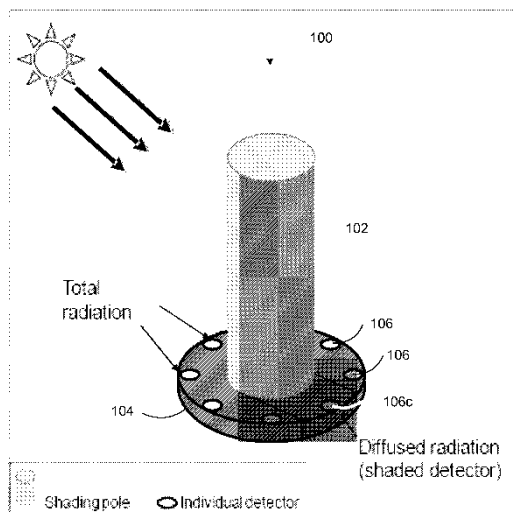
Patentové nároky popisují řešení, kdy je na platformě umístěn světelný senzor a vzdáleně od místa umístění světelného senzoru je na platformě připevněn obloukovitý stínící pás, přičemž druhý konec tohoto pásu se nachází přímo nad zmíněným světelným senzorem. Stínící pás tak vrhá stín na světelný senzor.



*Obr. 5.2 Shadow band assembly for use with a pyranometer and a shadow band pyranometer incorporating same*

### Direct, Diffuse, and Total Radiation Sensor – US2011273704 [24]

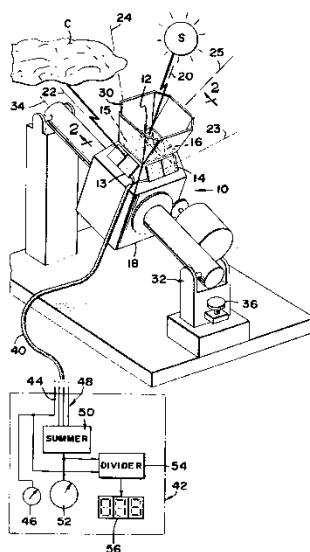
Patentové nároky popisují zařízení obsahující základnu a stínicí člen. Na základnu je dále připevněno množství detektorů umístěných okolo zmíněného stínicího členu. Během pohybu slunce po obloze je tak vždy jeden ze senzorů kompletně zakryt stínem, jenž vrhá stínicí člen, a zároveň je jeden ze senzorů kompletně vystaven slunečnímu záření, takže je možné v jeden okamžik měřit jak difuzní, tak i přímé záření.



Obr. 5.3 Direct, Diffuse, and Total Radiation Sensor

### Cloud cover sensor – US4355896 [25]

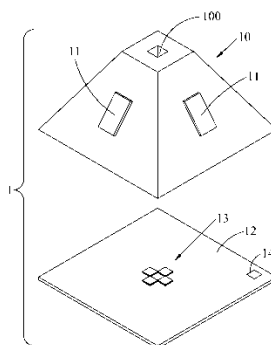
Patentové nároky popisují zařízení obsahující rám, na kterém je připevněno množství senzorů pro snímání difuzního slunečního záření. Sensory jsou na rámu umístěny tak, že svírají s osou rámu úhel menší než  $90^\circ$ , a na rámu je dále umístěn štít směřující přibližně ke slunci, takže brání dopadu přímého slunečního záření na senzory pro snímání difuzního slunečního záření. Zařízení dále obsahuje prostředky pro určení, zda je zataženo, a to na základě výstupu ze zmíněných senzorů. Zařízení obsahuje také senzory svírající s osou rámu úhel  $90^\circ$  pro snímání přímého slunečního záření.



Obr. 5.4 Cloud cover sensor

### Light sensing system and method of driving the same – US8581164 [26]

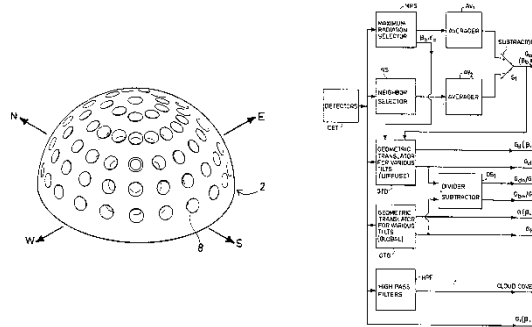
Patentové nároky popisují zařízení s množstvím prvních senzorů umístěných po bocích zařízení tak, že každý z nich snímá záření z určitého směru daného tvarem zařízení. Zařízení dále obsahuje otvor procházející středem celého zařízení až po podstavec, na spodu celého zařízení. Na podstavci jsou symetricky umístěny druhé senzory snímající záření procházející skrz zmíněný otvor. Signály z prvních a druhých senzorů jsou po té zpracovávány ve vyhodnocovací jednotce v závislosti na rozsahu a směru snímání.



Obr. 5.5 Light sensing system and method of driving the same

**Solar radiation sensor and system including same for measuring solar radiation distribution – US4491727 [27]**

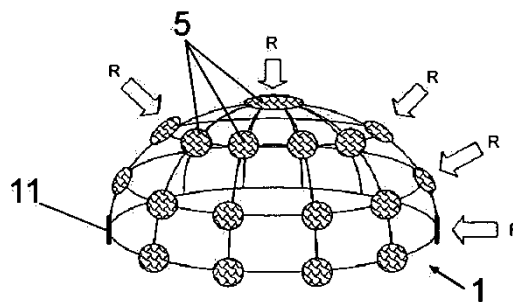
Patentové nároky popisují zařízení mající množství senzorů snímajících určitý směr, umístěných radiálně okolo polokoule. Zařízení dále obsahuje obvod pro určení, na který senzor dopadá nejvíce přímého záření. Dále také obsahuje obvod pro určení senzorů nejbližších senzoru, na který dopadá nejvíce přímého záření, a také obvod pro zprůměrování výstupů ze zmíněných nejbližších senzorů.



*Obr. 5.6 Solar radiation sensor and system including same for measuring solar radiation distribution*

**Solar radiation sensor – WO2008145796 [28]**

Patentové nároky popisují zařízení hemisférického tvaru, na němž jsou umístěny senzory pro měření slunečního záření tak, že každý má jiný sklon a azimut. Vedle každého ze senzorů slunečního záření je umístěn teplotní senzor. Oba senzory jsou z důvodu připojení k vyhodnocovacímu systému připojeny k zesilovači.



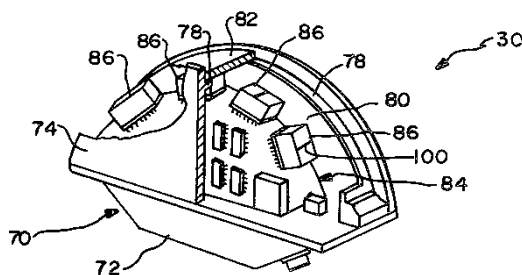
*Obr. 5.7 Solar radiation sensor*

**Tracking solar energy collector assembly – US4297572 [29]**

Patentové nároky popisují zařízení obsahující solární panel pohyblivě umístěný tak, že je pohyblivý po dráze tak, aby udržel přednastavenou pozici vůči slunci během celého dne. Zařízení dále obsahuje prostředky pro sledování pozice



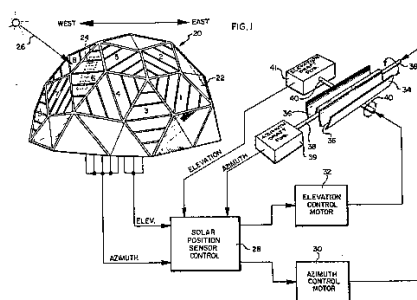
slunce a nastavování solárního panelu. Toto zařízení obsahuje množství snímačů přímého solárního záření.



Obr. 5.8 Tracking solar energy collector assembly

### Solar collection system – EP0047084 [30]

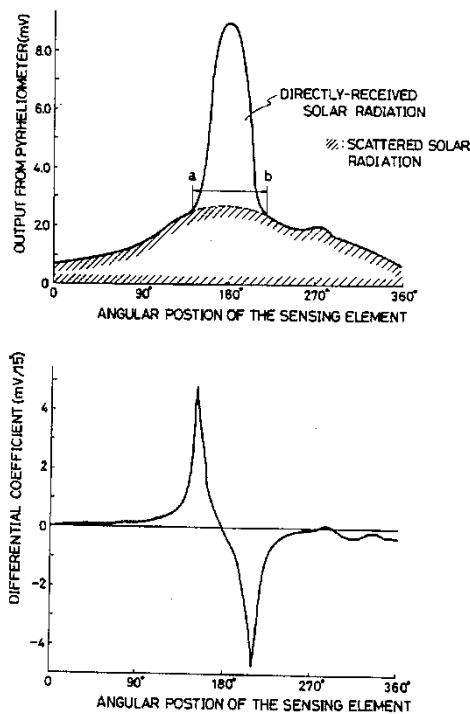
Patent popisuje zařízení obsahující množství solárních senzorů snímajících solární energii dopadající pod určitým azimutem a výškou, přičemž je pomocí těchto solárních senzorů vyhodnocována pozice slunce a podle toho je ve dvou osách natáčen solární kolektor.



Obr. 5.9 Solar collection system

### Method of and apparatus for measuring amount of solar radiation received directly – US4719344 [31]

Patentové nároky popisují způsob měření slunečního záření, kdy je konstantní rychlostí otáčeno se senzorem slunečního záření. Během tohoto otáčení senzor snímá oblohu včetně slunce, takže je získáno jak přímé, tak i difuzní záření. Dále se získává diferenciální koeficient elektrických výstupů ze senzorů s ohledem na čas, čímž se z velké části eliminuje difuzní složka přijatého záření.



Obr. 5.10 Method of and apparatus for measuring amount of solar radiation received directly

### 5.3 Závěr z rešerše v patentové literatuře

Rešerše v patentové literatuře se zaměřovala především na patentové dokumenty týkající se konstrukce zařízení pro měření přímého a difuzního slunečního záření, jelikož při přidání zaměření na konstrukci konkrétních snímačů byly nalezeny dokumenty nerelevantní vůči zadání. V závislosti na zaměření rešerše se tedy patentové nároky nalezených dokumentů týkali především konstrukce, přičemž konkrétní druhy použitých snímačů byly v těchto dokumentech zmiňovány sekundárně.

Jedna část nalezených dokumentů se zabývá stínícími prvky pro měření difuzního záření, a to jak pohyblivými (US6849842), kdy je automatické otáčení zajišťováno motorem, tak i nepohyblivými (US8481905, US2011273704 a US4355896), kdy je stínění přímého slunečního záření zajišťováno specifickým tvarem stínícího prvku.

Další část nalezených dokumentů popisuje několik způsobů sledování polohy slunce a zjišťování intenzity slunečního záření, přičemž základem zařízení pro tyto účely bývá hemisférický prvek, na který se následně připojují senzory. Senzory jsou buď umístěny na povrchu tohoto hemisférického prvku (EP0047084, WO2008145796), nebo jsou umísťovány do otvorů vytvořených v hemisférickém prvku (US4297572, US4491727, US8581164). Pozice slunce je s drobnými

změnami vyhodnocována vyhodnocením senzoru s nejvyšší hodnotou intenzity dopadajícího záření a spojením této informace se známým azimutem a sklonem konkrétního prvku s největší hodnotou intenzity dopadajícího záření.

## 6 SOUČASNÝ TRH

### 6.1 Nalezené přístroje

Jednou z možností jak měřit sluneční záření je pomocí pyranometrů s termočlánkem. Tyto pyranometry mají obvykle krycí sklo, jež chrání termočlánek před nepříznivými vlivy okolí. Toto krycí sklo zároveň ve většině případů svými vlastnostmi umožňuje úpravu dráhy dopadajícího záření tak, že takovýto pyranometr má pak úhel snímání 180°. Typickým představitelem je například pyranometr Hukseflux SR25, jehož krycí sklo je vyrobeno ze safíru [32] nebo Hukseflux SR22, jehož krycí sklo je vyrobeno z křemene, díky čemuž má oproti pyranometru Hukseflux SR25 rozšířený spektrální rozsah.



Obr. 6.1 Hukseflux SR25 [32]

Dalším důležitým parametrem je třída dle normy ISO-9060. Nejlepší přístroje pro vědecké měřicí účely splňují Secondary Standard, avšak zřejmou nevýhodou těchto přístrojů je vysoká cena (nezřídka přesahuje 60 000 Kč a více).

Použití pyranometrů s termočlánkem je výhodné zejména z důvodu pokrytí celého spektrálního rozsahu slunečního záření, tedy přibližně od 200 do 2 600 nm.

Jednou ze zajímavých variant může být pyranometr s termočlánkem, jenž obsahuje stínící prvek integrovaný přímo do těla pyranometru. Takovým pyranometrem je například SPN1 od Delta-T Devices. Uvedené uspořádání je výhodné zejména z důvodu možnosti současného měření jak celkového slunečního záření, tak i difuzního slunečního záření.



Obr. 6.2 Delta-T Devices SPN1 [41]

Další variantou je využití samostatného termočlánekového senzoru umístěného ve vhodném pouzdře s krycím sklem například z křemene nebo safíru. Takovým termočlánekovým senzorem může být například DX-0165 od Dexter Research. DX-0165 je uzavřen v pouzdře se safírovým sklem, takže jeho spektrální rozsah je potom od 100 nm do 7 000 nm, což znamená, že dojde k pokrytí celého spektrálního rozsahu slunečního záření, přičemž pořizovací cena tohoto senzoru je nižší



Obr. 6.3 Dexter Research DX-0165 [42]

než desetina ceny nejlevnějších pyranometrů s termočlánkem. Tento senzor zároveň pouzdru DX-0165 umožňuje úhel snímání 95°, díky čemuž lze teoreticky použitím čtyř senzorů pokrýt celou potřebnou oblast.

Náhradou pyranometrů s termočlánkem by mohly být pyranometry s fotodiodou, jejichž ceny se pohybují většinou kolem 20 000 Kč. Velkou výhodou oproti pyranometrům s termočlánkem je jejich časová odezva, která je o několik řádů nižší, což vyplývá z principu jejich technologie. Omezením je však v současnosti úzký spektrální rozsah, jež zpravidla bývá od 400 do 1 100 nm. Tento spektrální rozsah odpovídá přibližně viditelnému záření a částečně blízkému infračervenému, z čehož vyplývá, že nejsou schopny snímat část ultrafialového záření a infračervené záření krátkých vlnových délek. Pyranometry s fotodiodou se proto používají ve většině případů pouze pro monitoring výkonu PV (fotovoltaických) systémů nebo v zemědělství, kde není vyžadováno snímání dopadajícího záření v celém spektru. Typickým představitelem může být například SP Lite od společnosti Thies Clima.



Obr. 6.4 Thies Clima SP Lite [43]

Alespoň částečným řešením problému úzkého spektrálního rozsahu u pyranometrů s fotodiodou by mohlo být použití například dvoupásmových fotodiód, které jsou v podstatě tvořeny dvěma diodami a to křemíkovou a indium-galium-arsenidovou, případně jinými vhodnými, jejichž spektrální rozsahy se překrývají. Takovou fotodiodou je například fotodióda DSD2 od společnosti Thorlabs, Inc.



Obr. 6.5 Thorlabs, Inc. DSD2 [44]

Tab. 6.1a Nalezené přístroje

Výrobce	Model	Typ snímače	Spektrální rozsah [nm]	Úhel snímání [°]	Směrová odezva [W/m <sup>2</sup> ]	Citlivost [μV/W/m <sup>2</sup> ]	Citlivost [mA/W/m <sup>2</sup> ]	Čas odezvy [s]	Cena [Kč]
Kipp & Zonen	SP Lite2	fotodioda	400 ÷ 1 100	180	10	60 ÷ 100		0.5 * 10 <sup>-6</sup>	
Kipp & Zonen	CM4	termočlánek	300 ÷ 2 800	180	20	4 ÷ 10		8	
Kipp & Zonen	CMP3	termočlánek	300 ÷ 2 800	180	20	5 ÷ 20		18	
Kipp & Zonen	CMP6	termočlánek	285 ÷ 2 800	180	20	5 ÷ 20		18	
Kipp & Zonen	CMP10	termočlánek	285 ÷ 2 800	180	10	7 ÷ 14		5	
Kipp & Zonen	CMP11	termočlánek	285 ÷ 2 800	180	10	7 ÷ 14		5	
Kipp & Zonen	CMP21	termočlánek	285 ÷ 2 800	180	10	7 ÷ 14		5	
Kipp & Zonen	CMP22	termočlánek	200 ÷ 3 600	180	5	7 ÷ 14		5	
Hukseflux	SR05	termočlánek	285 ÷ 3 000	180	25			18	
Hukseflux	SR25	termočlánek	285 ÷ 3 000	180	10	7 ÷ 25		3	115 000
Hukseflux	SR22	termočlánek	190 ÷ 4 000	180	10	7 ÷ 25		3	
Hukseflux	SR20	termočlánek	285 ÷ 3 000	180	10	7 ÷ 25		3	51 800
Hukseflux	SR12	termočlánek	285 ÷ 3 000	180	20	7 ÷ 25		18	40 180
Hukseflux	SR11	termočlánek	285 ÷ 3 000	180	20	7 ÷ 25		18	
Hukseflux	SR03	termočlánek	285 ÷ 3 000	180	25	7 ÷ 25		1	
Hukseflux	LP02	termočlánek	285 ÷ 3 000	180	25	7 ÷ 25		18	18 760
Thies Clima	SP Lite	fotodioda	400 ÷ 1 100	180		100		1	13 000
Delta-T Devices	SPN1	termočlánek	400 ÷ 2 700	180	10	1 000		0.2	119 582

Tab. 6.1b Nalezené přístroje

Výrobce	Model	Typ snímače	Spektrální rozsah [nm]	Úhel snímání [°]	Směrová odezva [W/m <sup>2</sup> ]	Citlivost [μV/W/m <sup>2</sup> ]	Citlivost [mA/W/m <sup>2</sup> ]	Čas odezvy [s]	Cena [Kč]
Thies Clima	GSM 3.3	fotodioda	400 ÷ 1 100	/	/	/	/	/	18 000
Envitech	RS 81 - I	termočlánek	300 ÷ 3 000	/	/	/	0.01	50	13 000
EMS Brno	EMS 11	fotodioda	/	170	/	20	/	/	7200

Tab. 6.2 Nalezené senzory

Výrobce	Model	Typ snímače	Spektrální rozsah [nm]	Úhel snímání [°]	Směrová odezva [W/m <sup>2</sup> ]	Citlivost [μV/W/m <sup>2</sup> ]	Citlivost [mA/W/m <sup>2</sup> ]	Čas odezvy [s]	Cena [Kč]
Thorlabs, Inc.	DSD2	fotodioda InGaAs a Si	Si 400 ÷ 1 100, InGaAs 1 000 ÷ 1 800	/	/	/	Si 550, InGaAs 600	4 * 10 <sup>-6</sup>	16 120
Thorlabs, Inc.	FD05D	fotodioda	800 ÷ 2 600	/	/	/	1 300	17 * 10 <sup>-9</sup>	3 380
Dexter Research	DX-0165	termočlánek	0.1 ÷ 7	95	/	182	/	0.204	1 682
Thorlabs, Inc.	FGA01	fotodioda InGaAs	800 ÷ 1 700	/	/	/	1 003	0.3 * 10 <sup>-9</sup>	1 670

## **6.2 Závěr z průzkumu trhu**

Během rešerše současného trhu byly nalezeny různé přístroje, které by mohli plnit žádanou funkci, avšak kvůli vysoké ceně je většina z nich pro účely této práce nevhodná. Jako nejvhodnější se jeví použití vícera termočlánekových senzorů osazených do vhodné matice, jelikož toto řešení poskytuje dostatečný spektrální rozsah. Tímto termočlánekovým senzorem by mohl být výše uvedený senzor DX-0165 od americké společnosti Dexter Research. Senzor DX-0165 zároveň poskytuje i velký úhel snímání, díky čemuž není nutné použít velké množství těchto senzorů, což má zároveň příznivý vliv na výslednou cenu takového přístroje.

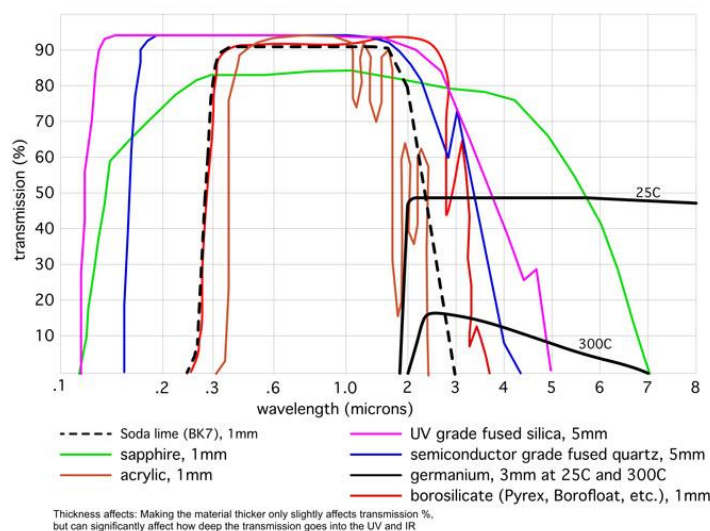


# 7 NÁVRH IDEÁLNÍHO PROVEDENÍ MĚŘICÍHO OBVODU

## 7.1 Výběr vhodného materiálu

### 7.1.1 Krycí filtr

Většina snímačů je umístěna do obalů, které omezují působící okolní vlivy. Tyto obaly jsou vybaveny krycím filtrem, jenž umožňuje průchod slunečního záření a jeho dopad na samotný snímač. V závislosti na použitém materiálu dochází zároveň k omezení průchozího spektra.

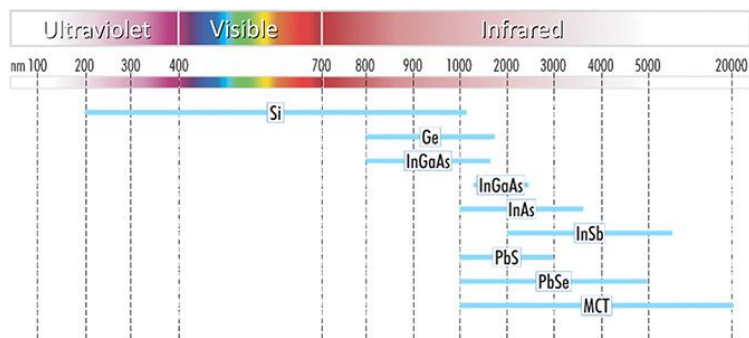


Obr. 7.1 Spektrální charakteristiky různých materiálů filtrů [45]

Jak je vidět z obr. 7.1, nejlepším materiálem pro krycí filtr by mělo být křemenné sklo z křemene nebo oxidu křemičitého, případně také safírové sklo, jelikož tyto materiály pokrývají vhodně požadované spektrum. Vyhovujícím materiálem by mohlo být však ještě také sodnovápenaté, borosilikátové sklo. Plexisklo má také ještě vyhovující rozsah spektra, avšak díky velkým výkyvům v přenosu je nevhodné. Absolutně nevhodným materiálem je germaniové sklo, jelikož jeho spektrální rozsah začíná až přibližně na 2  $\mu\text{m}$ .

### 7.1.2 Fotoelektrický materiál

U snímačů pracujících na fotoelektrickém principu je volba materiálu kritická.

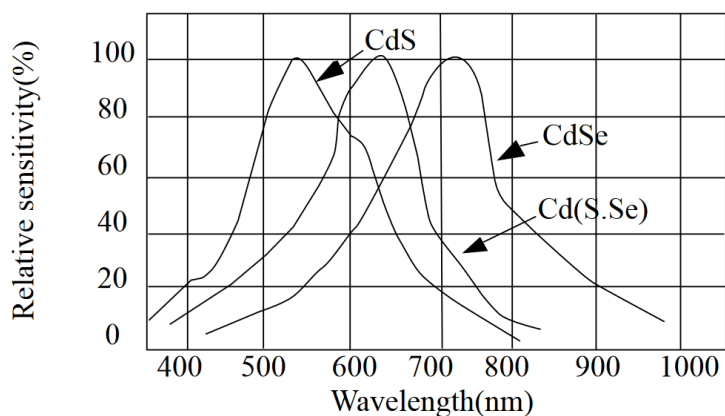


Obr. 7.2 Spektrální rozsah různých materiálů [46]

Jak je vidět z obr. 7.2, v současnosti neexistuje fotoelektrický materiál, který by dokázal pojmout celý spektrální rozsah dopadajícího záření. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit kombinaci dvou materiálů s částečně se překrývajícím spektrem. Prvním materiálem může být křemíková fotodioda se spektrem od 0.2 do 1.1  $\mu\text{m}$ . Jako druhý materiál pro použití se nejlépe jeví InAs fotodioda, jelikož její spektrum začíná na 1  $\mu\text{m}$  a má vhodný spektrální rozsah.

### 7.1.3 Fotorezistivní materiál

Fotocitlivé snímače měnící v závislosti na dopadajícím záření svůj odpor se nazývají fotorezistory. Fotorezistory mají inverzní závislost odporu na dopadajícím záření. V závislosti na použitém materiálu se nejvyšší citlivost pohybuje v rozmezí přibližně od 550 nm do 720 nm, avšak šířka použitelného spektra je mnohem užší než u fotodiody či termočlánků.



Obr. 7.3 Spektrální rozsah různých materiálů [33]

Jak je vidět z obr. 7.3, žádný z běžně používaných materiálů pro fotorezistory není vhodný pro širokopásmové účely, tudíž není vhodný pro mé použití.

Jediným řešením, jak je vidět na obr. 7.2, by bylo použití fotorezistoru například PbS, či PbSe v kombinaci s vhodnou fotodiódou doplňující snímané spektrum, například tedy křemíkovou fotodiódou.

## 7.2 Výběr vhodného snímače

### 7.2.1 Tepelné snímače

Před výběrem vhodného termočlásku je nutné znát některé důležité parametry, dle kterých lze zvolit nejvhodnější variantu. Těmito parametry jsou [34]:

- „bias“ napětí (tento parametr nemá obecně užívaný překlad) – zajišťuje správné chování, přičemž tímto chováním může být:
  - „maximum bias“ – „bias“ napětí, při kterém je zajištěna největší výstupní hodnota, nebo
  - „optimum bias“ – „bias“ napětí, při kterém je maximální poměr výstupní hodnoty k šumu;
- specifická detektivita  $D^*$  – definována jako  $D^* = (\text{Citlivost} * \sqrt{\text{Plocha}}) / (\text{Šum} * \sqrt{\Delta f})$  [ $\text{cm} * \sqrt{\text{Hz}} / \text{W}$ ] a vyjadřuje současně citlivost a šum zařízení, přičemž specifická detektivita by měla být co největší;
- mezní vlnová délka – vlnová délka, při které dojde k poklesu specifické detektivity  $D^*$  na polovinu maximální hodnoty;
- úhel snímání („FOV“) – vyjadřuje maximální úhel, ze kterého může dopadat záření na snímač;
- linearita – linearita výstupního signálu;
- rozlišitelnost („NEP“) – minimální detekovatelná hodnota;
- citlivost – poměr změny výstupní veličiny k jednotkové změně vstupní veličiny;
- spektrální odezva – citlivost snímače na různé vlnové délky;
- časová odezva – čas potřebný ke změně výstupní veličiny v závislosti na změně vstupní veličiny;
- krycí filtr pouzdra termočlásku;
- plnicí plyn pouzdra termočlásku.

Při výběru vhodného termočlásku by jednou z variant možného řešení mohlo být použití termočláskové baterie společnosti Dexter Research DX-0169, s cenou 73 USD/ks. Termočlásková baterie DX-0169 je umístěna v pouzdře opatřeném křemenným (quartz) filtrem, díky čemuž je omezena šířka pásma na 0.15 až 2.7  $\mu\text{m}$ , což perfektně odpovídá požadovaným parametrům. Pouzdro tohoto senzoru je vyplněno argonem, avšak vhodnější by bylo vyplnění xenonem za cenu 2.4 násobného zvýšení časové konstanty, ale také 2.4 násobného zvýšení citlivosti, což je pro lepší měření velice žádoucí.

Druhou variantou je možné použití termočlánekové baterie společnosti Dexter Research DX-0165 s cenou 65 USD/ks. Rozdílem senzoru DX-0165 oproti senzoru DX-0169 je využití safírového filtru, což rozšiřuje spektrum dopadající na termočlánek na 0.1 až 7  $\mu\text{m}$ . Pouzdro tohoto senzoru je vyplněno xenonem.

## 7.2.2 Kvantové snímače

Dalším možným řešením by bylo použití dvojice snímačů založených na fotoelektrickém jevu. Parametry, dle kterých dochází k výběru tohoto typu snímače, jsou téměř totožné s parametry zohledňovanými při výběru vhodného termočláneku.

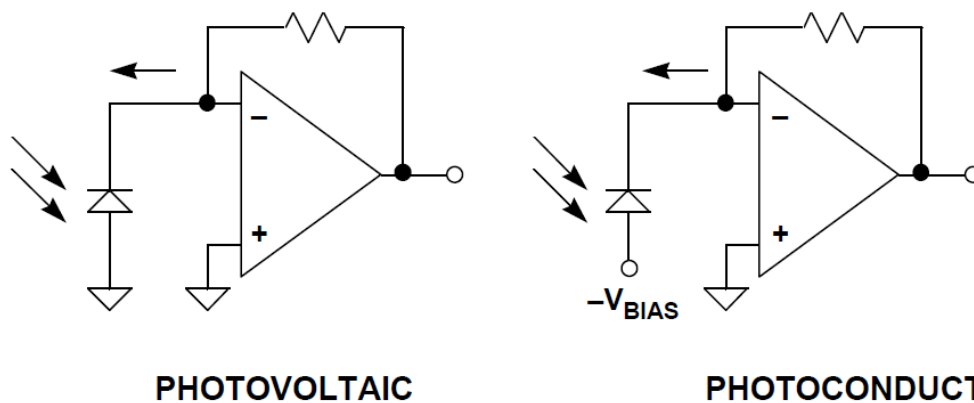
Prvním senzorem může být levná fotodioda, kterou najdeme v nabídce většiny prodejců elektrických součástek. Takovou fotodiodou může být například SMD fotodioda od společnosti VISHAYTEMD5080X01 s rozsahem od 0.35 do 1.1  $\mu\text{m}$  a úhlem snímání 130°. Tuto fotodiodu nalezneme v nabídce společnosti TME.

Pro nalezení vhodného druhého senzoru byla provedena rešerše nabídek několika prodejců a výrobců. U prodejců Farnell, Conrad a Digikey nebyly nalezeny žádné vhodné fotorezistory ani fotodiody, jelikož i fotorezistory a fotodiody s nejvyšší hranicí spektrálního rozsahu v jejich nabídce končily přibližně na 1.75  $\mu\text{m}$ , což je pro ideální řešení nedostačující. Dále byla prověřena nabídka společnosti Amphenol sensors, ovšem všechny její výrobky měly spektrální rozsah posunutý příliš nahoru, přibližně od 5  $\mu\text{m}$ , což je opět nepoužitelné. Fotodiody a fotorezistory nabízené prodejcem GME měly nejvyšší hranici spektrálního rozsahu přibližně 1.1  $\mu\text{m}$ , tudíž pro ideální řešení nedostačující. V nabídce prodejce Mouser byly nalezeny výrobky společnosti Lumex, jejichž spektrum by díky použitému materiálu PbSe odpovídalo rozsahem 1 až 5  $\mu\text{m}$  potřebám ideálního řešení. Těmito výrobky byly fotorezistory SNR-40633, SNR-40147 a SNR-40013, avšak první dva ze jmenovaných vyžadují připojení napájení chladiče, proto se jako ideální varianta jeví fotorezistor SNR-40013, který takové připojení napájení chladiče nevyžaduje. Dalším výrobcem, jenž vyrábí fotorezistory a fotodiody je společnost Laser Components. Tato společnost nabízí různé druhy fotorezistorů a fotodiod, z nichž se jako nejvhodnější jeví fotorezistory PbS série PB25, které nevyžadují připojení napájení chlazení a mají rozsah spektra od 1 do 3  $\mu\text{m}$ .

## 7.3 Výběr vhodného zesilovače

V případě použití fotodiod existují dva hlavní způsoby jejich práce a to jsou fotovoltaický režim a fotovodivostní režim. Tyto režimy se od sebe odlišují v několika parametrech. Prvním a zároveň nejdůležitějším parametrem je výstupní

veličina. Tou je v případě práce ve fotovoltaickém režimu napětí a ve fotovodivostním proud. Další důležitou vlastností je použití fotodiody, fotodiody ve fotovoltaickém režimu se kvůli své lineární charakteristice používají pro přesná měření a fotodiody ve fotovodivostním režimu se zase používají pro vysokorychlostní měření.



Obr. 7.4 Druhy pracovních režimů fotodiod [35]

Pro účely této práce je tedy vhodné využití fotodiody ve fotovoltaickém režimu, jelikož je potřeba získat co nejpřesnější výsledky, při nichž je rychlost druhořadým požadavkem. S tím se pojí i výběr vhodného operačního zesilovače, jelikož aby bylo dosaženo lépe zpracovatelnou hodnotu – napětí, je nutné využít převodníku proudu na napětí s dostatečným zesílením. Běžnou hodnotou spektrální citlivosti fotodiody je přibližně 70 nA/lx, přičemž přímý sluneční svit se rovná hodnotě cca 10 000 lx, avšak pro zataženo je to již jen 1 000 lx a pro soumrak již jen 10 lx, z čehož vyplývá, že klidový proud („bias current“) operačního zesilovače by neměl být větší než pouze několik desítek nA. Další důležitým parametrem operačního zesilovače, který způsobuje vznik chyb je offset, proto je offset požadován co nejmenší. Vhodným zesilovačem by tedy mohl být například Texas Instruments LM324 případně LM224.

## 8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VYBRANÝCH ČIDEL

Podstatou praktického měření je porovnání vybraných levných a snadno dostupných fotodiód a Peltierova článku s profesionálními pyranometry. Na základě výsledků tohoto experimentu by mělo být možné rozhodnout, zda je nutné použít komerční pyranometry s termočládky, případně jiné řešení popsané v kapitole č. 7 – Návrhu ideálního provedení měřicího obvodu, či lze využít levné fotodiody nebo jednoduchý Peltierův článek.

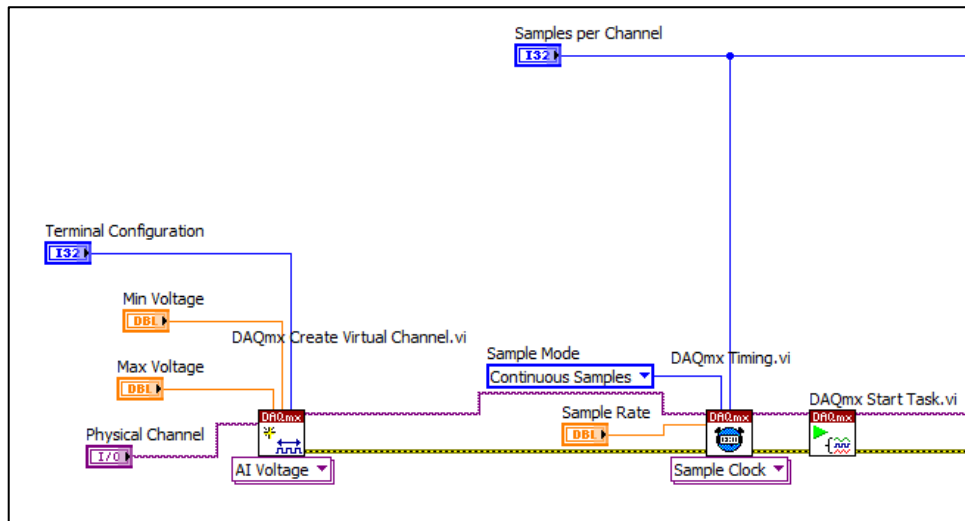
Tento experiment se skládá ze tří částí. První částí je naprogramování dataloggeru, který bude schopen vyčítat data z pěti kanálů a tato data následně ukládat. Druhou částí je návrh vhodného měřicího obvodu. Poslední částí je zpracování naměřených dat a jejich srovnání s daty naměřenými na stejném místě a ve stejnou dobu komerčním pyranometrem s termočládkem.

### 8.1 Datalogger

Jako datalogger jsem zvolil USB měřicí karta od National Instruments NI USB-6008. Karta NI USB-6008 s osmi single-ended analogovými vstupy s 11 bitovým rozlišením. Tato karta zároveň poskytuje 5V zdroj s maximálním proudovým odběrem 200mA, což je pro naše účely dostačující. Kartu jsem použil ve spojení s LabVIEW v. 2015 s instalovaným ovladačem NI-DAQmx.

Základem programu v LabVIEW je example „Voltage – Continuous Input“, který slouží v základu pro kontinuální vyčítání napětí z karty. Pro účely této práce jsem tento example upravil pro vyčítání dat z pěti kanálů pro senzory – BPW34, BPX61, EMS11, TEC1-12705S a LM335 a jejich zpracování a následné uložení.

## 8.1.1 Nastavení tasku

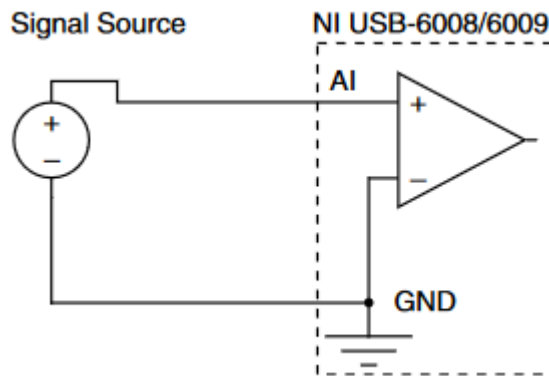


Obr. 8.1 Nastavení tasku

Task je kolekce jednoho nebo více virtuálních kanálů s různými parametry měření.

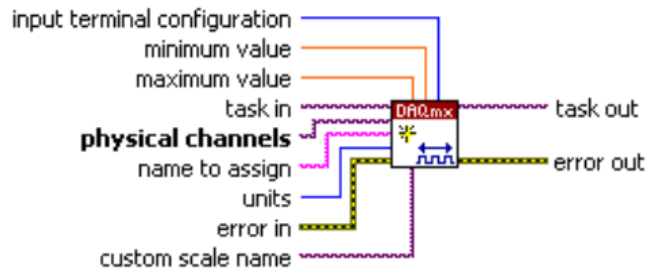
Nejprve musí dojít k vytvoření kanálu, ze kterého budou vyčítána data. To je realizováno pomocí bloku „DAQmx Create Virtual Channel.vi“, přičemž parametry tohoto bloku jsou:

- Input terminal configuration – zde bylo zvoleno měření RSE (Reference Single-Ended), jež měří napětí na vstupní svorce AI<sub>x</sub> proti zemi.



Obr. 8.2 Zapojení RSE [36]

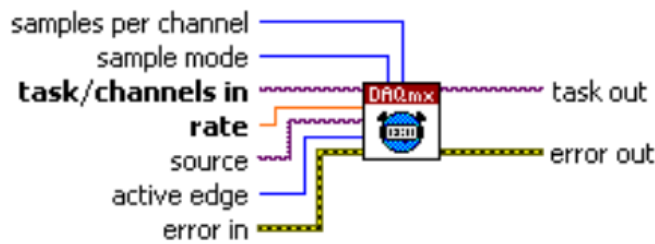
- Minimum/maximum value – slouží k nastavení možného rozsahu napětí, jelikož je použitý zesilovač napájen zdrojem 5V, tak bylo zvoleno 0 až 5 V.
- Physical channels – zde se zvolí, na kterých vstupech jsou připojeny zdroje signálu, v případě více zdrojů se kanály oddělují „:“, v tomto případě jsem tedy zvolil kanály 0 až 4.



Obr. 8.3 DAQmx Create Virtual Channel (VI) [37]

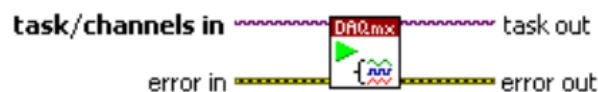
Dalším krokem je nastavení časování, které se nastavuje pomocí bloku „DAQmx Timing.vi“. V tomto bloku se nastavuje, kolik vzorků se má naměřit a případně zde dochází k vytvoření bufferu. Parametry tohoto bloku jsou:

- Sample mode – zde dochází k výběru, zda půjde o konečné nebo v tomto případě kontinuální měření.
- Samples per channel – v závislosti na hodnotě tohoto parametru dojde k vytvoření bufferu naměřených hodnot příslušné velikosti.
- Rate – zde se nastavuje vzorkovací frekvence ve tvaru „počet vzorků za sekundu“.



Obr. 8.4 DAQmx Timing (VI) [37]

Posledním krokem je spuštění samotného měření, které probíhá pomocí bloku „DAQmx Start Task (VI)“.



Obr. 8.5 DAQmx Start Task (VI) [37]

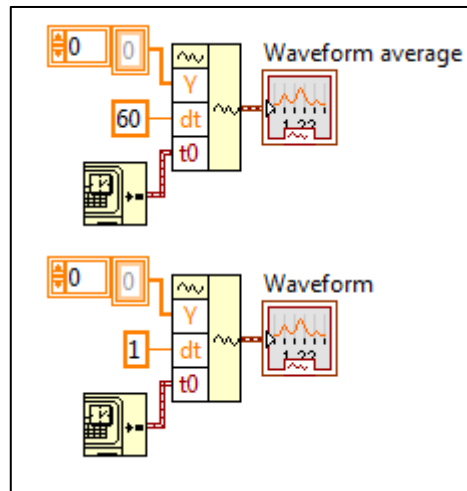
## 8.1.2 Zpracování dat

Jelikož jde o kontinuální měření, tak zpracování dat probíhá ve while smyčce. Vstupem této smyčky je počet vzorků „Samples per channel“, task a výstup z pěti SubVI „CREATE WAVE AVG“. Výstupem této smyčky je pouze task.

„CREATE WAVE AVG“ slouží pro vytvoření dvou waveformů, kdy jeden waveform slouží pro sekundová měření a druhý slouží pro průměr sekundových měření za minutu. Dle tohoto použití je také nastaven rozestup mezi jednotlivými

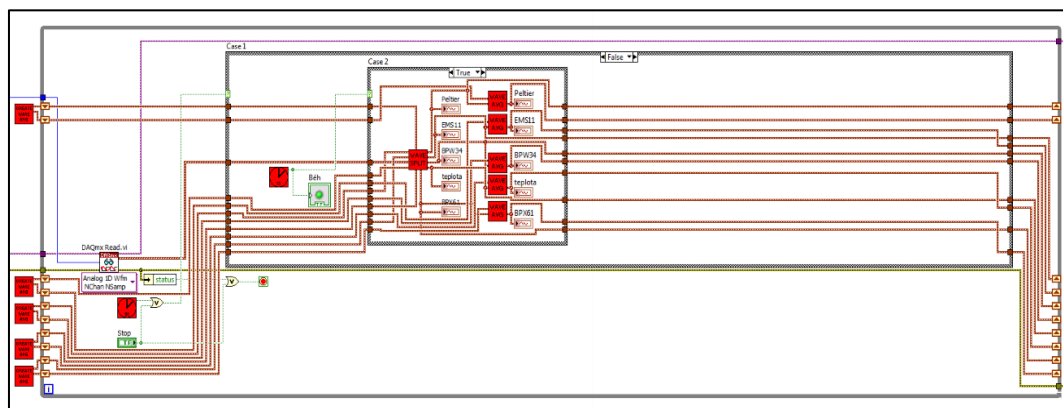


vzorky na sekundu resp. šedesát sekund. Součástí každého waveformu je také časová značka, aby bylo možné data následně zpracovat.



Obr. 8.6 CREATE WAVE AVG

Ve while smyčce pak dochází ke čtení naměřených dat, případnému ukončení měření a ke zpracovávání naměřených dat uvnitř case struktur.



Obr. 8.7 While smyčka

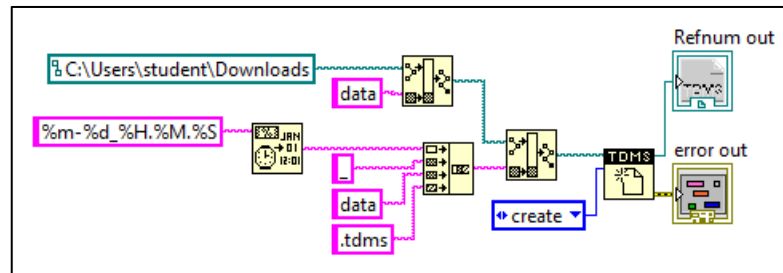
Ke čtení naměřených dat dochází v bloku „DAQmx Read (VI)“, konkrétně pak v jeho instanci „Analog 1D Wfm Nchan NSamp“. Vstupem této instance je počet vzorků, který specifikuje kolik vzorků má z bufferu přečíst. Výstupem této instance je 1D pole waveformů.



Obr. 8.8 DAQmx Read (VI) [37]

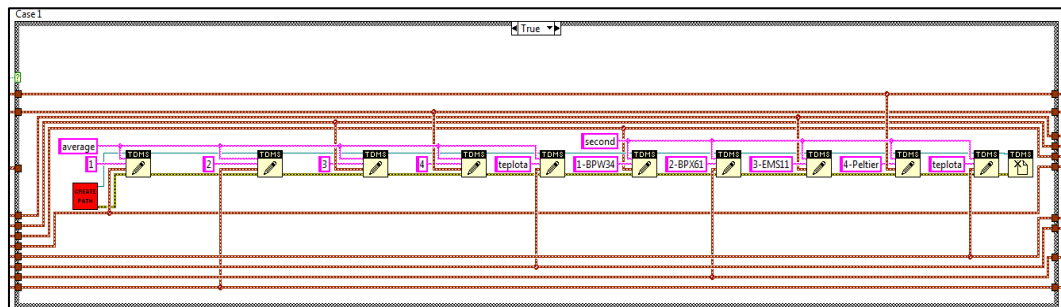
Case struktura „Case 1“ je řízena pulzním signálem s hodinovou periodou, který je realizován v SubVI „1H“ nebo tlačítkem „Stop“. Stav case struktury:

- Řídicí signál true – dojde k uložení všech dat, kdy v SubVI „CREATE PATH“ dojde k vytvoření TDMS souboru.



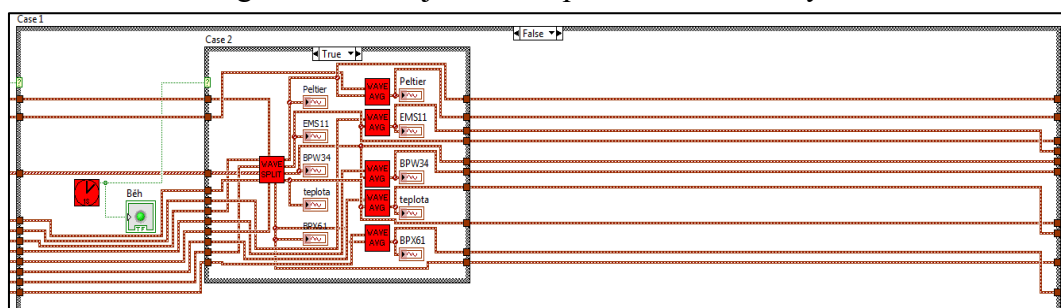
Obr. 8.9 CREATE PATH

Název TDMS souboru je opatřen časovou značkou, takže nemůže dojít k nechtěnému přepsání. Dále je v tomto stavu realizováno samotné ukládání do dvou skupin „average“ a „second“, obsahující průměrná a sekundová data, a do pěti kanálů. Na konec je soubor TDMS uzavřen. Data jsou i po uložení stále držena v programu, takže poslední uložený soubor při vypnutí pomocí „Stop“ tlačítka obsahuje všechna naměřená data. Tento způsob ukládání je výhodný z důvodu snazšího následného zpracování, přičemž je stále zachována bezpečnost programu, kdy při pádu nedojde ke ztrátě všech dat.



Obr. 8.9 Case 1 – true

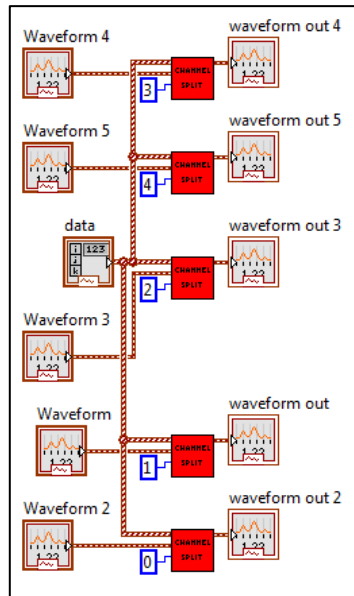
- Řídicí signál false – dojde ke vstupu do case struktury „Case 2“.



Obr. 8.10 Case 1 – false

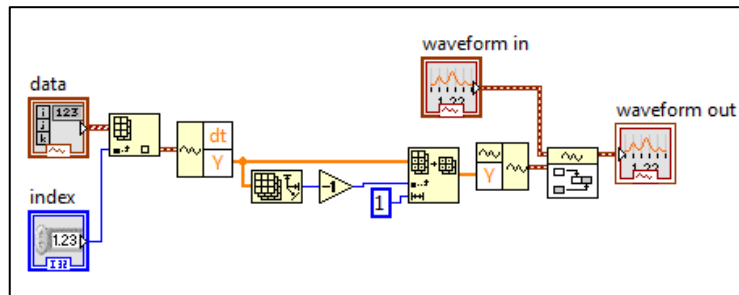
Case struktura „Case 2“ je řízena pulzním signálem se sekundovou periodou, který je realizován v SubVI „1S“. Stav case struktury:

- Řídicí signál true – v tomto stavu této case struktury dochází ke zpracování dat získaných z bloku čtení, a to konkrétně v SubVI „WAVE SPLIT“,



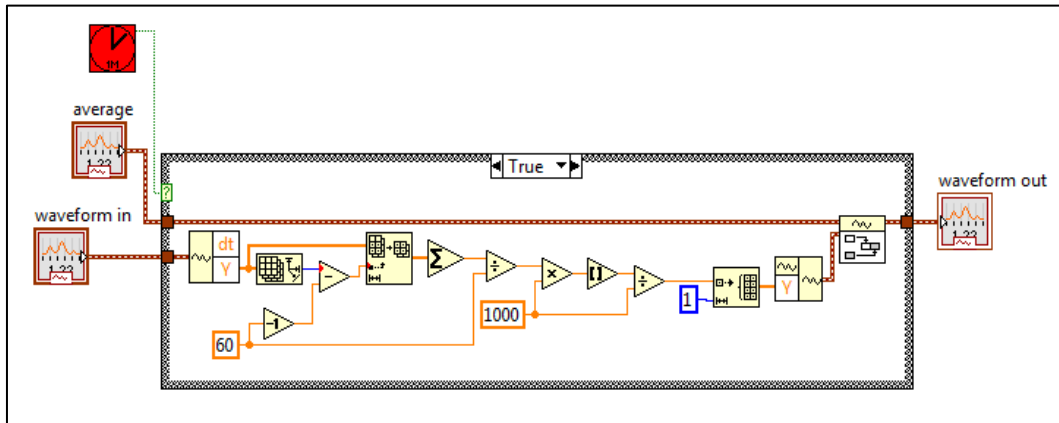
Obr. 8.11 WAVE SPLIT

jenž obsahuje další SubVI „CHANNEL SPLIT“.



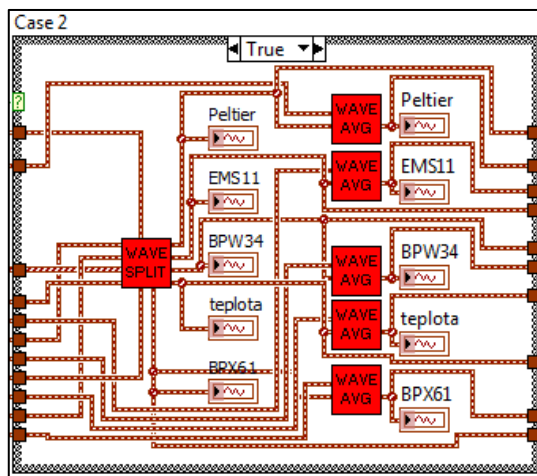
Obr. 8.12 CHANNEL SPLIT

V SubVI „CHANNEL SPLIT“ dojde k oddělení dat určitého kanálu a přečtení pouze poslední hodnoty, jelikož vzorkovací frekvence je mnohem vyšší. Dále je v tomto SubVI tato hodnota přidána do waveformu sekundových měření. SubVI „WAVE SPLIT“ slouží tedy pouze ke zpřehlednění hlavního kódu. Sekundová měření jsou následně přivedena do SubVI „WAVE AVG“.



Obr. 8.13 WAVE AVG

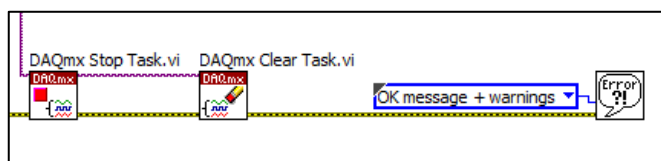
SubVI „WAVE AVG“ pomocí case struktury řízené pulzním signálem s minutovou periodou provede zprůměrování posledních šedesáti hodnot sekundového měření.



Obr. 8.14 Case 2 – true

- Řídící signál false – v tomto stavu nedochází k žádné akci.

### 8.1.3 Ukončení tasku



obr. 8.15 Ukončení tasku

Vykonávání tasku je zastaveno pomocí bloku „DAQmx Stop Task (VI)“ a následně je task ukončen pomocí bloku „DAQmx Clear Task (VI)“.

## 8.2 Měřicí obvod

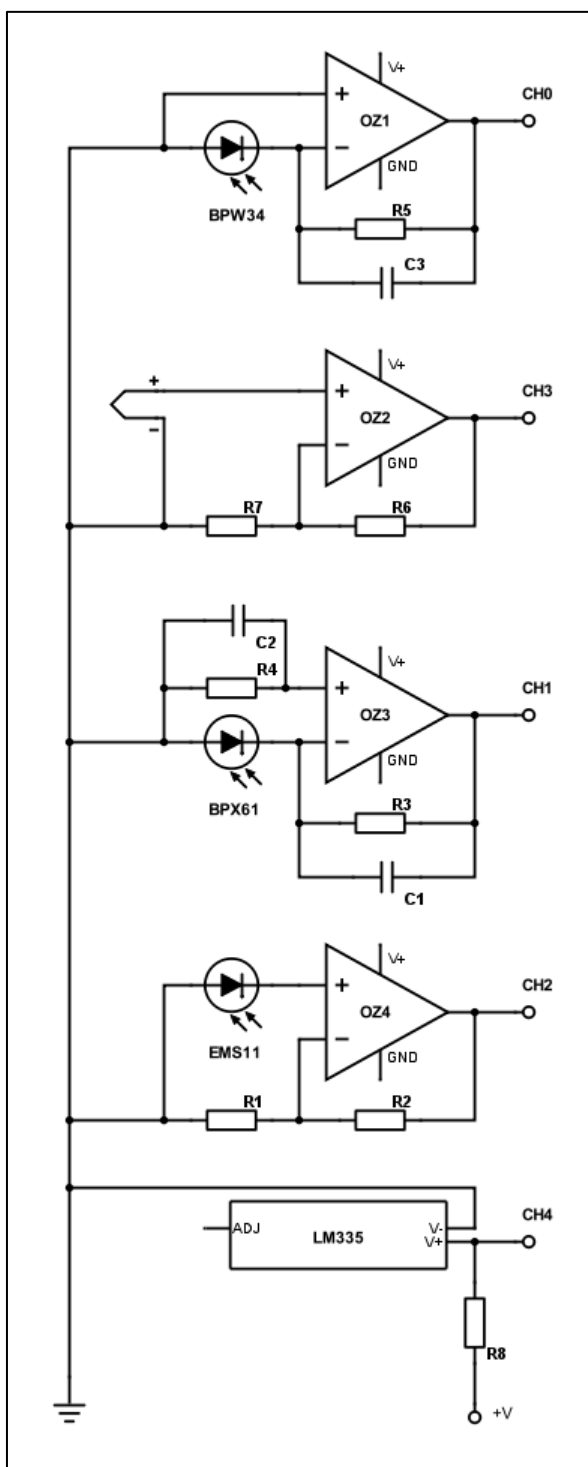
### 8.2.1 Použité snímače

Pro potřeby experimentu jsem se rozhodl použít dvě velkoplošné fotodiody OSRAM BPX61 a Vishay BPW34, přičemž obě fotodiody mají rozsah 400, resp. 430 nm až 1 100 nm. Dále jsem použil komerčně prodávaný senzor EMS EMS11 s blíže nespecifikovaným rozsahem. A nakonec Peltierův článek Vigan TEC1-12705S, jehož jednu stranu jsem nastříkal černou matnou barvou tak, aby pohlcovala co nejvíce slunečního záření, a druhou stranu jsem připevnil k chladiči, což zajišťuje co největší rozdíl teplot. Poslední senzor je teplotní čidlo s analogovým výstupem Texas Instruments LM335 s výstupem 10 mV/K.

Celý měřicí obvod je pak doplněn zesilovačem Texas Instruments LM324A.

## 8.2.2 Zapojení měřicího obvodu

Tab. 8.1 Použité prvky

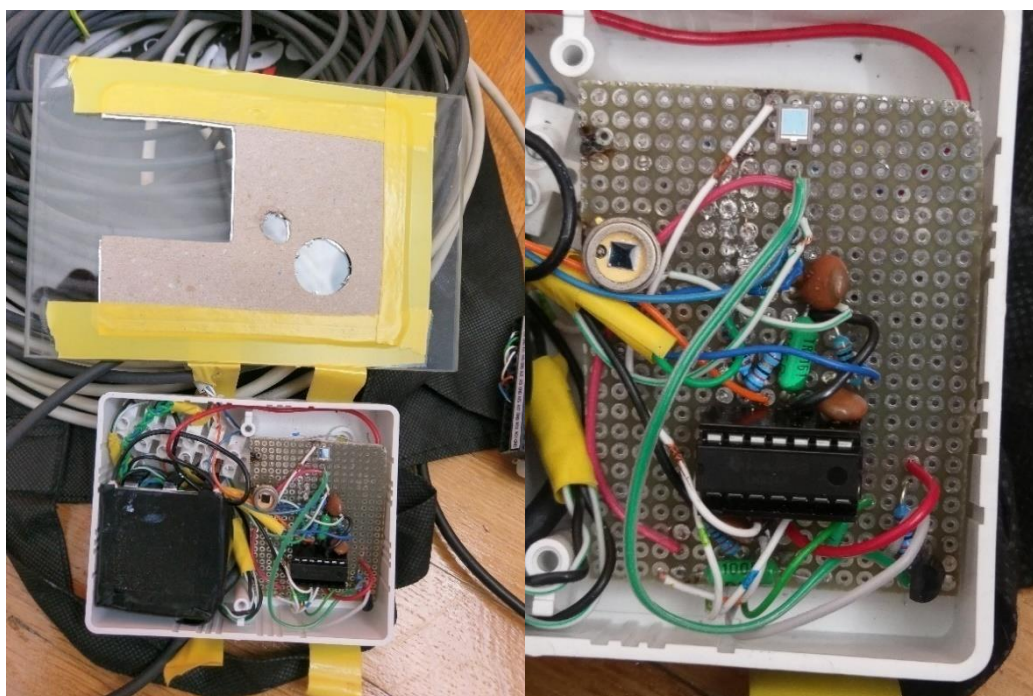


Označení	Skutečná hodnota
R <sub>1</sub>	61.8 Ω
R <sub>2</sub>	9.34 kΩ
R <sub>3</sub>	982 Ω
R <sub>4</sub>	967 Ω
R <sub>5</sub>	982 Ω
R <sub>6</sub>	9.25 kΩ
R <sub>7</sub>	101 Ω
R <sub>8</sub>	1.753 kΩ
C <sub>1</sub>	150 pF
C <sub>2</sub>	150 pF
C <sub>3</sub>	120 pF

Obr. 8.16 Schéma zapojení



Obr. 8.17 Celkové zapojení



Obr. 8.18 Detail zapojení

### 8.2.2.1 Návrh převodníku proudu na napětí pro fotodiody BPW34 a BPX61

Fotodiody BPX61 a BPW34 jsou zapojeny ve fotovoltaickém režimu s převodníkem proudu na napětí. Toto zapojení je pro účely této práce výhodnější, jak již bylo vysvětleno výše. Do zpětné vazby tohoto zapojení byl přidán kompenzační kondenzátor ve schématu označený jako  $C_1/C_3$ . Tento kondenzátor



má za účel zamezení oscilací způsobených nestabilitou zapojení operačního zesilovače s rezistorem ve zpětné vazbě. Kompenzační kondenzátor byl určen dle příručky Texas Instruments Transimpedance Amplifiers (TIA) [38] zabývající se výběrem správného vhodného zesilovače pro převodníky proudu na napětí pro měření signálu z fotodiod.

Prvním krokem je výběr zpětnovazebního rezistoru  $R_F$  vhodné velikosti. Obecně přijímaná maximální hodnota intenzity slunečního záření je přibližně  $I_e = 1000 \text{ W/m}^2$ . Plocha fotodiod je  $7.5 \text{ mm}^2$  u BPW34 a  $7.02 \text{ mm}^2$  u BPX61. Spektrální citlivost  $S_\lambda$  typ fotodiod je  $0.55 \text{ A/W}$  u BPW34 a  $0.62 \text{ A/W}$  u BPX61 pro  $850 \text{ nm}$ . Na základě těchto parametrů je možné vypočítat hodnotu výstupního proudu při maximální intenzitě slunečního záření pomocí vzorce:

$$I_p = I_e \cdot S \cdot S_{\lambda typ}, \quad (8.1)$$

pro BWP34 tedy:

$$I_p = I_e \cdot S \cdot S_{\lambda typ} = 1000 \cdot 7.5 \cdot 0.55 = 4.125 \text{ mA}, \quad (8.1)$$

a pro BPX61 tedy:

$$I_p = I_e \cdot S \cdot S_{\lambda typ} = 1000 \cdot 7.02 \cdot 0.62 = 4.3524 \text{ mA}. \quad (8.1)$$

Následně je možné určit hodnotu vhodného zpětnovazebního rezistoru, jelikož víme, že maximální hodnota výstupního napětí zesilovače je rovna přibližně  $V_{cc} - 1.5 \text{ V}$ , tedy  $3.5 \text{ V}$ . Poté tedy hodnota zpětnovazebního odporu  $R_F$  vychází  $848.48 \Omega$  pro BPW34 a  $804.15 \Omega$  pro BPX61. Jelikož je výstupní proud počítán pro maximální intenzitu slunečního záření a hodnota výstupního napětí je reálně přibližně  $3.8 \text{ V}$ , je možné hodnotu zpětnovazebního odporu  $R_F$  zaokrouhlit na  $1 \text{ k}\Omega$ .

Na základě stanovené velikosti zpětnovazebního rezistoru můžeme určit hodnotu kompenzačního kondenzátoru pomocí vzorce:

$$C_F = \sqrt{\frac{C_{IN}}{2\pi \cdot GBP \cdot R_F}} C_{IN} = C_D + C_{CM} + C_{DIFF}, \quad (8.2)$$

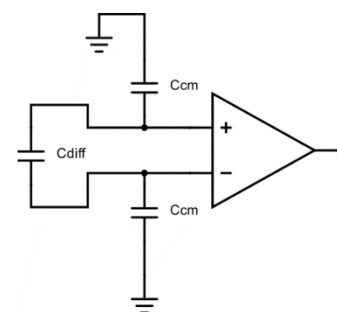
$C_D$ ...kapacita fotodiody

$C_{CM}$ ...kapacita vstupů OZ proti zemi

$C_{DIFF}$ ...kapacita mezi vstupy OZ

GBP...Gain-bandwidth product OZ

Kapacity  $C_{CM}$  a  $C_{DIFF}$  u použitého zesilovače bohužel nejsou uvedeny v datasheetu, proto jsem je zanedbal a jejich vliv na výslednou kapacitu kompenzačního kondenzátoru jsem nahradil použitím kondenzátoru s vyšší hodnotou, než je vypočítaná. Hodnota kapacity  $C_D$  fotodiody BPW34 je  $70 \text{ pF}$  a fotodiody BPX61 je  $72 \text{ pF}$ . Hodnota GBP zesilovače LM324A je  $1.2 \text{ MHz}$ .



Obr. 8.19 Kapacita OZ



Pro BPW34 tedy:

$$C_F = \sqrt{\frac{70 \cdot 10^{-12}}{2\pi \cdot 1.2 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^3}} = 96.35 \text{ pF} \doteq 120 \text{ pF}, \quad (8.2)$$

a pro BPX61:

$$C_F = \sqrt{\frac{72 \cdot 10^{-12}}{2\pi \cdot 1.2 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^3}} = 97.72 \text{ pF} \doteq 150 \text{ pF}. \quad (8.2)$$

Na neinvertující vstup operačního zesilovače OZ<sub>3</sub> převodníku proudu na napětí fotodiody BPX61 bylo přidáno paralelní spojení rezistoru R<sub>4</sub> = 1 kΩ s kondenzátorem C<sub>2</sub> = 150 pF. Toto zapojení by mělo zamezit chybě stejnosměrné složky způsobené polarizačními proudy [39]. Při porovnání naměřených dat však nebyl zaznamenán rozdíl, který by mohl být pravděpodobně způsoben touto chybou, oproti datům naměřeným pomocí fotodiody BPW34 ve spojení s OZ<sub>1</sub> převodníku proudu na napětí, který neměl na neinvertujícím vstupu toto paralelní spojení, proto považuji tuto chybu pro mé měření za zanedbatelnou.

### 8.2.2.2 Návrh neinvertujícího zesilovače pro senzor EMS 11 a Peltierův článek

Senzor EMS 11 je připojen na neinvertující zesilovač, jelikož bylo vzhledem k absenci datasheetu experimentálně zjištěno, že odezva napětí na změnu intenzity slunečního záření je lepší než při měření proudu.

Vzhledem k hodnotě 20 mV na 1000 W/m<sup>2</sup> udávané v propagačních materiálech k senzoru EMS11 a maximálnímu výstupnímu napětí zesilovače přibližně 3.5 V jsem zvolil zesílení přibližně 160 až 170 krát, čemuž dle vzorce

$$U_{vyst} = U_{vst} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right), \quad (8.3)$$

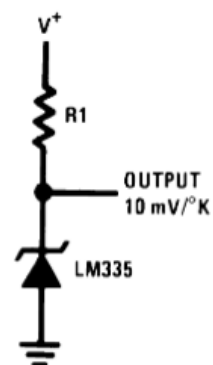
odpovídají rezistory R<sub>2</sub> = 10 kΩ a R<sub>1</sub> = 62 Ω.

Při návrhu neinvertujícího zesilovače pro Peltierův článek jsem při stanovení vhodného zesílení postupoval metodou pokus-omyl, a to z důvodu nemožnosti odhadu velikosti napětí generovaného v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. Z tohoto důvodu bylo zvoleno zesílení 100 krát, čemuž odpovídají rezistory R<sub>6</sub> = 10 kΩ a R<sub>7</sub> = 100 Ω.

### 8.2.2.3 Návrh zapojení LM335

Senzor teploty LM335 má definovanou závislost na teplotě 10 mV/K. Vzhledem k tomu, že nastavený měřicí rozsah karty je 0 až 5 V a  $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K}$ , a vzhledem k předpokládaným hodnotám 0 až  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , tedy 2.732 až 3.232 V, jsem se rozhodl, že signál již nebude nijak dále zesilovat.

Senzor je schopen pracovat při protékajícím proudu v rozsahu  $400\text{ }\mu\text{A}$  až 5 mA, proto jsem dle základního zapojení zvolil hodnotu rezistoru  $R_8 = 2\text{ k}\Omega$ .



Obr. 8.20 Základní zapojení LM335 [47]

## 8.3 Porovnání naměřených dat s referenčními

Zpracovaná data jsou umístěna v Příloze jako grafy 11.1 - 11.10, přičemž jednotlivé grafy znázorňují jednotlivé dny měření. Vždy jsou společně zobrazeny průběhy snímačů BPX61 s BPW34 a EMS11 s Peltierovým článkem a teplotou v přípravku. Tyto průběhy jsou zobrazeny vůči referenčnímu průběhu a zároveň také průběhu doby svitu [40]. Doba svitu vždy reprezentuje počet sekund svitu za 10 minut (hodnota 300 tedy znamená, že slunce svítilo pět z celkových deseti minut).

Experiment byl umístěn na střeše ústavu elektroenergetiky, na budově Technická 12, kde je v blízkosti také umístěn komerční měřicí přístroj – pyranometr s termočlánkem, patřící tomuto ústavu, přičemž tento pyranometr považuji pro mé měření za referenční.



*Obr. 8.21 Umístění snímačů na střeše ústavu elektroenergetiky (detail)*



*Obr. 8.22 Umístění snímačů na střeše ústavu elektroenergetiky*

Ústav elektroenergetiky má v místě měření umístěny ještě další komerční senzory, avšak z mnoha různých důvodů jsem jako referenční zvolil pouze zmíněný komerční pyranometr – CMP21 společnosti Kipp & Zonen, jehož parametry jsou popsány v tab. 6.1a.

Měření probíhalo v časovém rozmezí od 9. 5. do 15. 5. 2017, avšak kvůli technickým potížím, kdy kvůli chybě z blíže nezjištěného důvodu vypadlo měření, byla použita pouze data přibližně od 11. 5. 15h do 15. 5. 9h.

Naměřená průměrná data byla nejprve pomocí LabVIEW znormalizována tak, aby amplituda nabývala hodnot od 0 do 2. Data z referenčního pyranometru byla vyčítána s pětiminutovou periodou, přičemž naměřená průměrná data měly minutovou periodu, tak jsem tato naměřená průměrná data za minutu znovu zprůměroval tak, aby měla pěti minutovou periodu. Následně byla znormalizovaná a zprůměrovaná data vynásobena určitým koeficientem tak, aby co nejlépe aproximovala data z referenčního pyranometru. Koeficient se pro každý snímač lišil, jelikož při normalizaci byla brána v potaz pouze minimální a maximální hodnota průběhu, bez ohledu na zbytek tohoto průběhu. Dalším důležitým krokem bylo sesouhlasení časových průběhů tak, aby si vzájemně odpovídaly.

Z grafů umístěných v příloze je vidět, že aproximace referenčního průběhu průběhem snímače BPW34 se ve většině případů pohybuje s odchylkou do přibližně 10 %. Odchytky větší než 10 % jsou pak hlavně způsobeny tím, že hodnoty amplitudy referenčního průběhu jsou hodnoty aktuální v době odečtů, přičemž hodnoty amplitudy snímače BPW34 jsou hodnoty průměrné za pět minut. Zároveň také odchytky větší než 10 % způsobuje rozdílný spektrální rozsah, kdy v případě, že začne převažovat přímé sluneční záření, dojde také ke zvýšení podílu infračerveného záření, které snímač BPW34 není schopen snímat.

Z grafů umístěných v příloze je dále vidět, že aproximace referenčního průběhu průběhem snímače BPX61 se pohybuje ve většině případů s odchylkou do přibližně 20 %. Odchytky větší než 20 % jsou způsobeny stejnými důvody jako v případě odchylek u snímače BPW34. Zároveň se zde projevuje velmi významná odchylka během ranních hodin, do cca 10h, která je způsobena úhlem snímání pouze 110° oproti 130° u BPW34 a 180° u referenčního pyranometru. Tato významná odchylka je navíc podpořena nevhodným umístěním snímače na desce plošných spojů umístěné v přípravku, což způsobilo, že snímač byl umístěn pod úhlem 5 až 10°.

Pomocí průběhu použitého Peltierova článku není možné referenční průběh aproximovat, a to kvůli jeho nízké citlivosti. Zejména hodnoty intenzity slunečního záření nižší než cca 350 W/m<sup>2</sup> nejsou měřitelné. Stejná chyba nastává se snímačem EMS11 v použitém zapojení, jehož hranice je však přibližně 250 W/m<sup>2</sup>. U EMS11 však vzhledem k absenci datasheetu nelze odpovědně rozhodnout o příčině této chyby.

## 9 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce naplnila požadavky svého zadání. Byla provedena patentová rešerše, průzkum trhu a byly představeny výsledky této rešerše a průzkumu. Následně bylo navrženo ideální provedení měřicího obvodu, kde byly představeny různé materiály, principy a parametry, které je nutné vzít v úvahu při výběru ideálního provedení a na jejichž základě byl pak proveden teoretický výběr možných ideálních provedení. Na závěr bylo provedeno praktické ověření vybraných levných a snadno dostupných snímačů v porovnání s referenčním pyranometrem. Toto praktické ověření bylo také doplněno o data slunečního svitu poskytnutá Českým hydrometeorologickým úřadem.

Na základě závěru osmé kapitoly, zhodnocujícím data naměřená v určitém omezeném časovém období, lze konstatovat, že pro měření přímého a difuzního slunečního záření je možné s velmi dobrou přesností použít levných snímačů s cenou v řádech desítek korun, jako je například fotodioda Vishay BPW34, která dle prodejce GME stojí 20 Kč/ks. V případě vhodného umístění těchto snímačů například na konstrukci tvaru polokoule, lze pak za použití nízkého počtu snímačů zároveň stanovit směr záření, což může při umístění na vyvýšený bod budovy a kalibraci dat získávaných ze snímačů umožnit velmi dobrý odhad tepelného zisku různých částí budov.

## 10 BIBLIOGRAFIE

- [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. 2016-10-28]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Slunce>
- [3] HOLLY, Zell, ed. Layers of the Sun. In: *National Aeronautics and Space Administration* [online]. Washington (DC): NASA, 2015 [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/iris/multimedia/layerzoo.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/iris/multimedia/layerzoo.html)
- [4] Solar energy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_energy)
- [5] Black-body radiation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body\\_radiation](https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation)
- [6] The Sun As A Source Of Energy. In: *ITACA* [online]. b.r. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: <http://www.itacanet.org/the-sun-as-a-source-of-energy/>
- [7] Basics of Solar Energy. In: *University of Oregon* [online]. Eugene (OR), b.r. [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: <http://zebu.uoregon.edu/disted/ph162/l4.html>
- [8] *Lecture Notes of the JMA/WMO Training Workshop on Calibration and Maintenance of Meteorological Instruments in RA II (Japan, 2013)* [online]. In: . Japan: Japan Meteorological Agency, 2013, c. 7, pg. 5 - 14 [cit. 2016-10-31].
- [9] PROKHOROV, Alexander. *Bol'shaia sovetskaia entsiklopediia*. 3. izd. Moskva: Sovetskaia entsiklopediia, 1970-1981. OCLC: 14476314.
- [10] GARG, H.P. a S.N. GARG. INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Measurement of solar radiation—I. Radiation instruments*. New Delhi: Centre for Energy studies, 1993.
- [11] DR01 Hukseflux. In: *Hukseflux* [online]. Delft, 2016 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: [http://hukseflux.com/sites/default/files/product\\_brochure/DR01\\_v1620.pdf](http://hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/DR01_v1620.pdf)



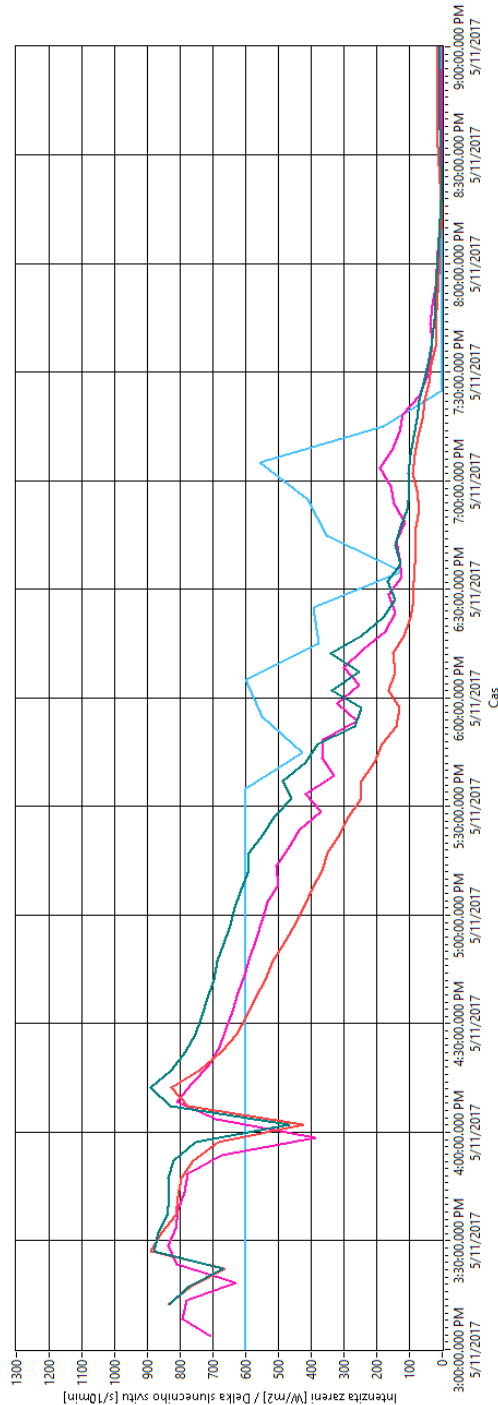
- [12] 240-152 Shadow Band. In: *NovaLynx* [online]. Grass Valley, c1988-2016 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://novalynx.com/store/pc/240-152-Shadow-Band-p505.htm>
- [13] ML-01 Si-Pyranometer. In: *EKO Instruments* [online]. 2016 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <https://eko-eu.com/products/solar-radiation-and-photonic-sensors/small-sensors/ml-01-si-pyranometer>
- [14] The Working Principle of a Thermopile Pyranometer. In: *Kipp & Zonen* [online]. Delft, 2015 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <http://www.kippzonen.com/News/572/The-Working-Principle-of-a-Thermopile-Pyranometer#>
- [15] SR20 Hukseflux. In: *Hukseflux* [online]. Delft, 2016 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: [http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product\\_brochure/SR20\\_v1506.pdf](http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/SR20_v1506.pdf)
- [16] *Pyranometers and Reference Cells, What's the Difference?* [online]. In: . Oak Ridge: National Renewable Energy Laboratory, 2012-04 [cit. 2016-10-31].
- [17] Pyranometer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-10-28]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pyranometer>
- [18] Calibrated Photovoltaic Reference Cells. In: *PV Measurements* [online]. Boulder (CO), 2014 [cit. 2016-11-07]. Dostupné z: <http://www.pvmeasurements.com/I-V-Health/calibrated-photovoltaic-reference-cells.html>
- [19] Albedo. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2016-10-31]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Albedo>
- [20] ISO 9060:1990. *Solar energy: Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation*. 1st. Geneva: ISO, 1990.
- [21] ISO - 9060 Standard & Pyranometer Measurement Accuracy. In: *Hukseflux USA* [online]. Center Moriches, NY, 2012 [cit. 2016-12-24]. Dostupné z: [https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pres/SOLAR2012\\_0829\\_presentation.pdf](https://ases.conference-services.net/resources/252/2859/pres/SOLAR2012_0829_presentation.pdf)
- [22] *Rotating shadowband pyranometer*. 2003. US6849842 B2. Zapsáno 2003-06-11.
- [23] *Shadow band assembly for use with a pyranometer and a shadow band pyranometer incorporating same*. 2010. US8481905 B2. Zapsáno 2010-02-17.

- [24] *Direct, diffuse, and total radiation sensor*. 2010. US2011273704 A1. Zapsáno 2010-05-06.
- [25] *Cloud cover sensor*. 1980. US4355896 A. Zapsáno 1980-06-27.
- [26] *Light sensing system and method of driving the same*. 2010. US8581164 B2. Zapsáno 2010-05-13.
- [27] *Solar radiation sensor and system including same for measuring solar radiation distribution*. 1981. US4491727 A. Zapsáno 1981-07-01.
- [28] *Solar radiation sensor*. 2007. WO2008145796 A3. Zapsáno 2007-05-31.
- [29] *Tracking solar energy collector assembly*. 1979. US4297572 A. Zapsáno 1979-08-14.
- [30] *Solar collection system*. 1980. EP0047084 B1. Zapsáno 1980-09-02.
- [31] *Method of and apparatus for measuring amount of solar radiation received directly*. 1982. US4719344 A. Zapsáno 1982-09-17.
- [32] SR25 pyranometer. In: *Hukseflux* [online]. Delft, 2016 [cit. 2016-11-26]. Dostupné z: <http://www.hukseflux.com/product/sr25-pyranometer>
- [33] Light Dependent Resistors. In: *TOKEN* [online]. New Taipei City, 2017 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.token.com.tw/pdf/resistor/cds-resistor-pgm.pdf>
- [34] Thermopile IR Sensor Applications. In: *Amphenol: Advanced Sensors* [online]. 2015 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <https://www.amphenol-sensors.com/en/component/edocman/73-temperature-sensors/90-infrared-ir-sensors/370-thermopile-ir-sensor-applications>
- [35] DEVICES, Analog. *Practical design techniques for sensor signal conditioning: HIGH IMPEDANCE SENSORS*. Norwood, Mass: Analog Devices, 1999. ISBN 09-165-5020-6.
- [36] USER GUIDE NI USB-6008/6009. In: *National Instruments* [online]. 2015 [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf>
- [37] *National Instruments: Technická podpora* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support.html>
- [38] Transimpedance Amplifiers (TIA): Choosing the Best Amplifier for the Job. In: *Texas Instruments* [online]. 2017 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snoa942a/snoa942a.pdf>

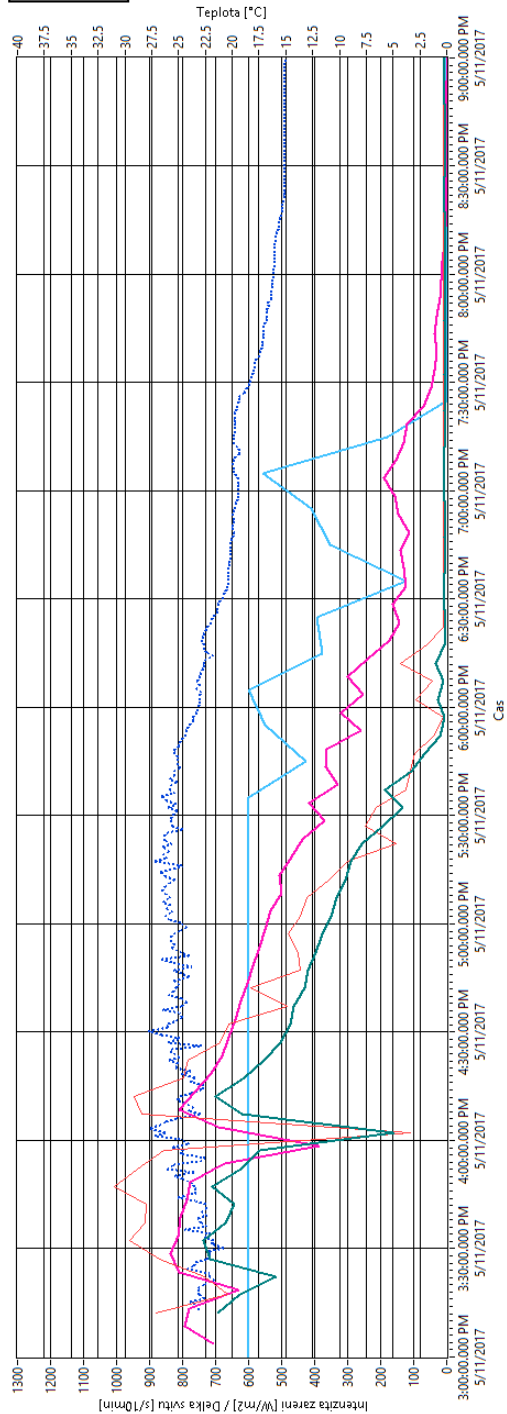
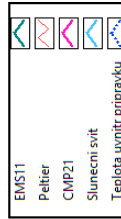


- [39] MARTÍNEZ, Miguel, José ANDÚJAR a Juan ENRIQUE. A New and Inexpensive Pyranometer for the Visible Spectral Range. *Sensors*. 2009, **9**(6), 4615-4634. DOI: 10.3390/s90604615. ISSN 1424-8220. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/9/6/4615/>
- [40] *Meteorologická data ČHMÚ: stanice Brno Žabovřesky 11. - 15. 5. 2017*. Brno, 2017. Dostupné také z: <http://portal.chmi.cz/>
- [41] SPN1 Sunshine Pyranometer. In: *Delta-T Devices Ltd* [online]. Burwell, 2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.delta-t.co.uk/product/spn1/>
- [42] DX-0165. In: *Dexter Research* [online]. Dexter, MI, b.r. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <https://www.dexterresearch.com/?module=Store&event=ViewFamily&ID=12>
- [43] Silicon Pyranometer SP-Lite. In: *Thies Clima* [online]. Göttingen, b.r. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [https://thiesclima.com/global\\_radiation.html#PyranometerSPLite](https://thiesclima.com/global_radiation.html#PyranometerSPLite)
- [44] DSD2 - Dual Band Si/InGaAs Detector. In: *Thorlabs, Inc.* [online]. Newton, NJ, c1999-2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DSD2>
- [45] Choosing the Right Material: What is the difference between glass and crystalline material?. In: *Rayotek Scientific Inc.* [online]. San Diego (CA), 2014 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <https://rayotek.com/tech-specs/material-comparisons.htm#q6>
- [46] Single Point Detectors: Sensors. In: *HORIBA Scientific* [online]. Edison (NJ), b.r. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: <http://obbcorp.com/staging/horiba/single-point-detectors.html>
- [47] LMx35, LMx35A Precision Temperature Sensors. In: *Texas Instruments* [online]. 2015 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm335.pdf>

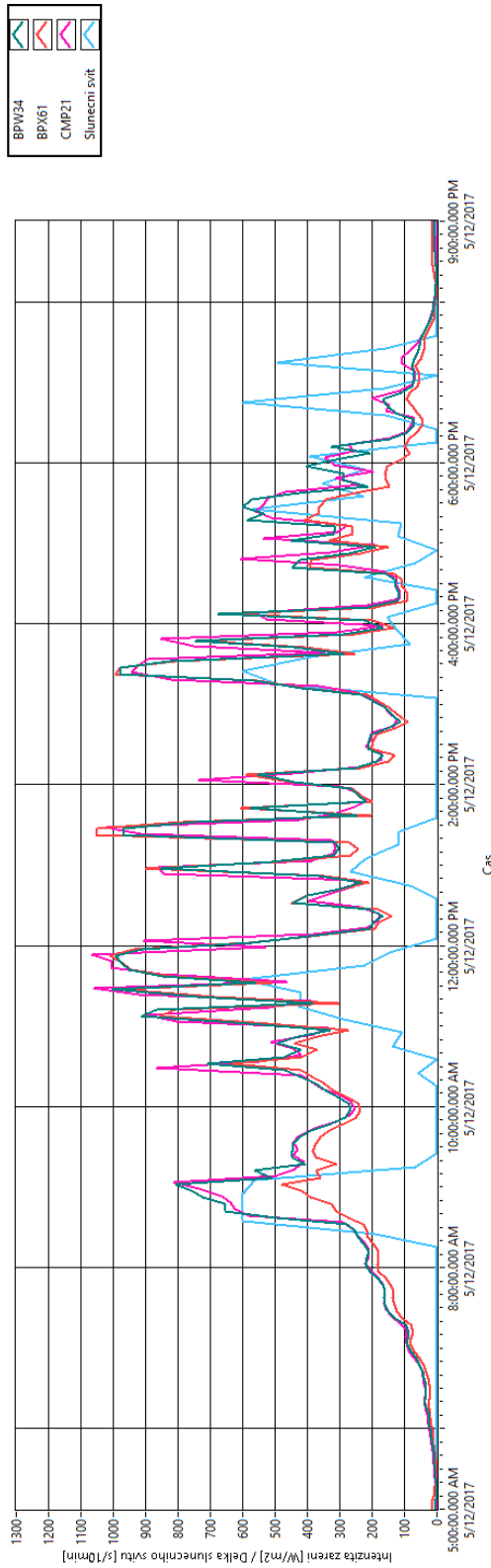
# 11 PŘÍLOHY



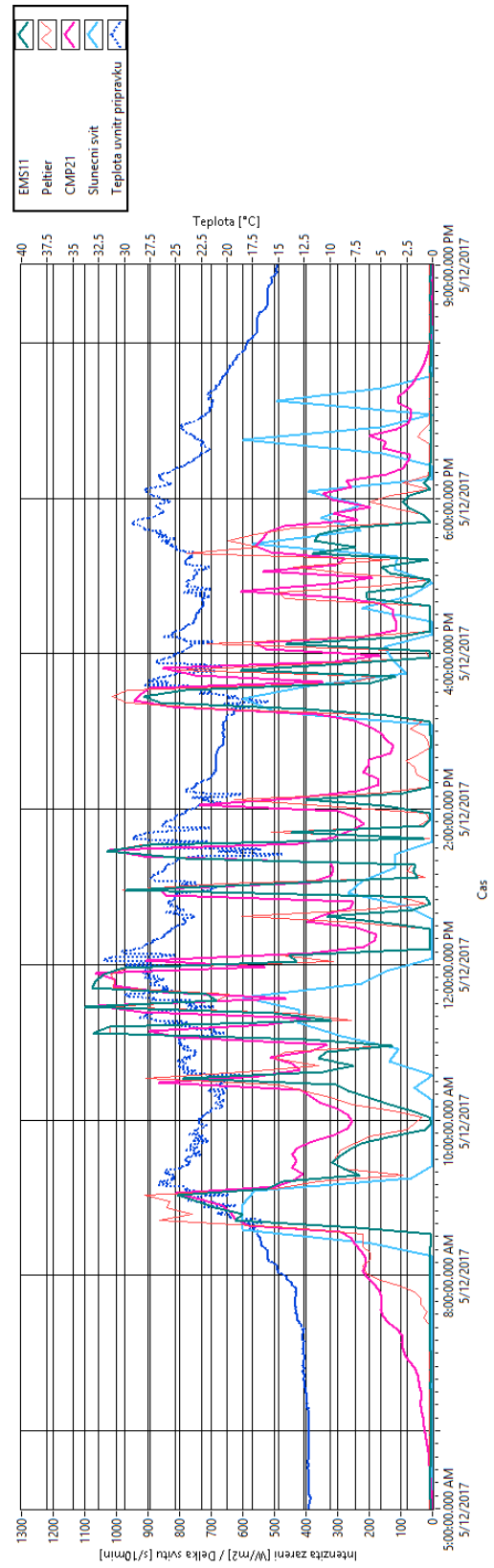
Graf 11.1 5/11/2017 BPW34, BPX61



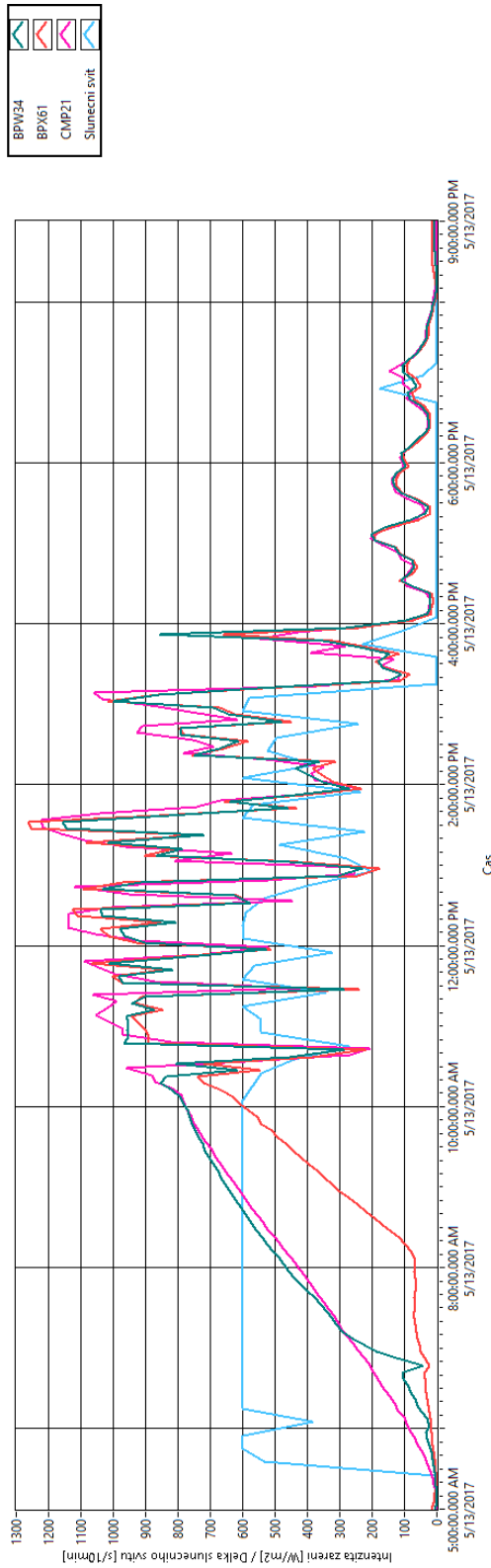
Graf 11.2 5/11/2017 EMS11, Peltierův článek



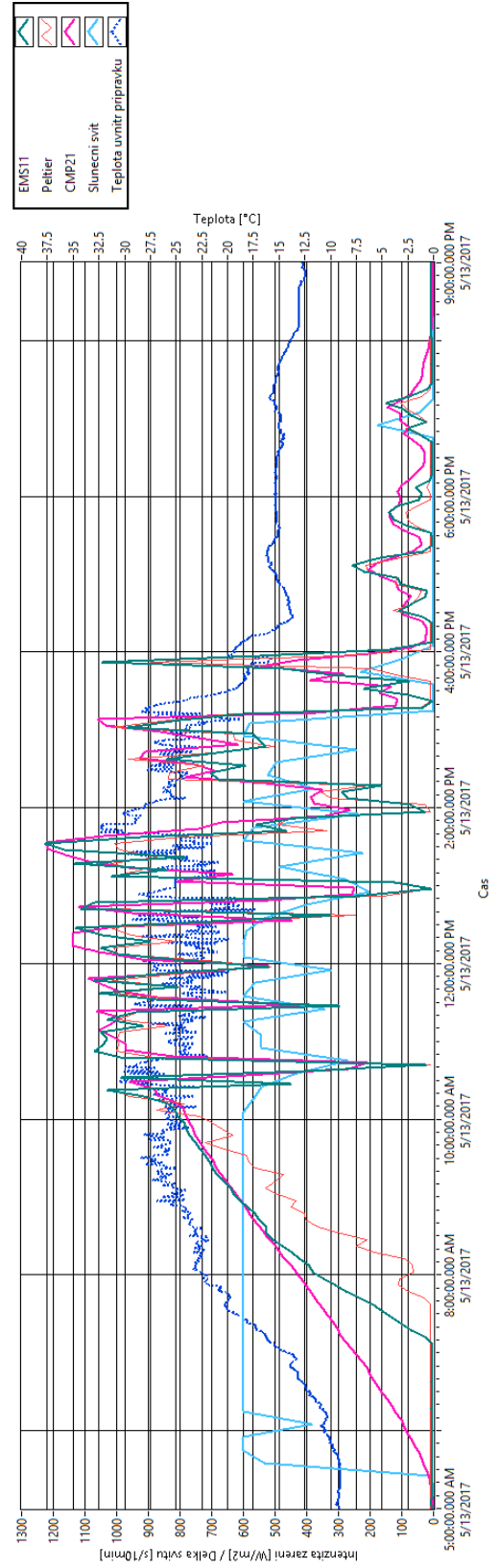
Graf 11.3 5/12/2017 BPW34, BPX61



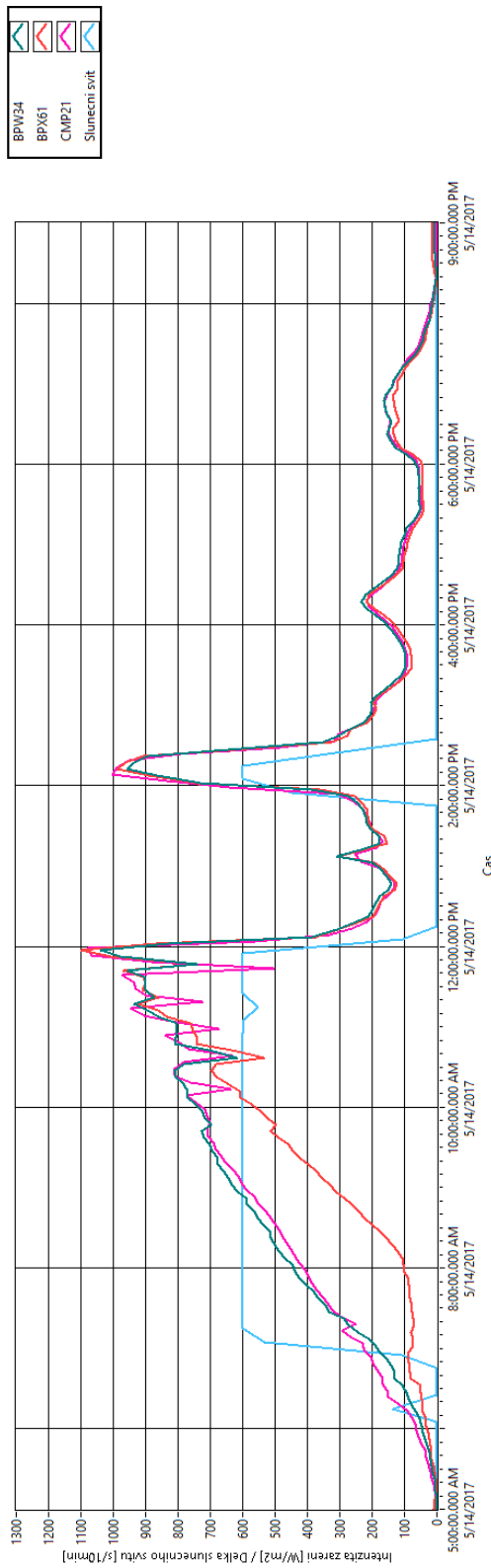
Graf 11.4 5/12/2017 EMS11, Peltierův článek



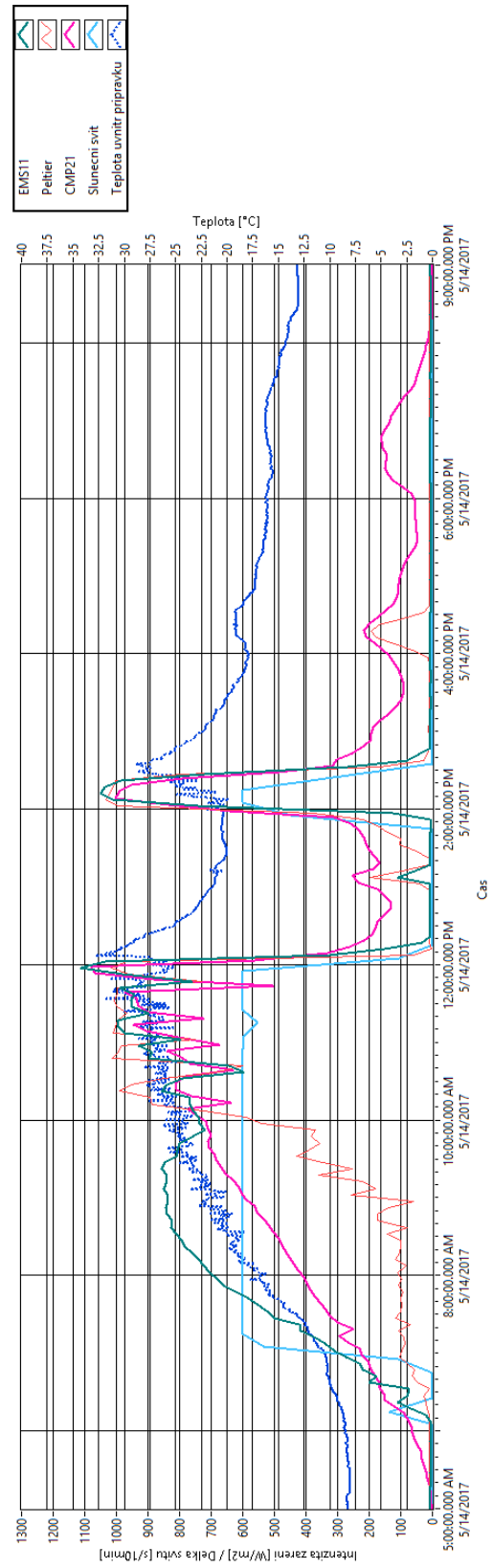
Graf 11.5 5/13/2017 BPW34, BPX61



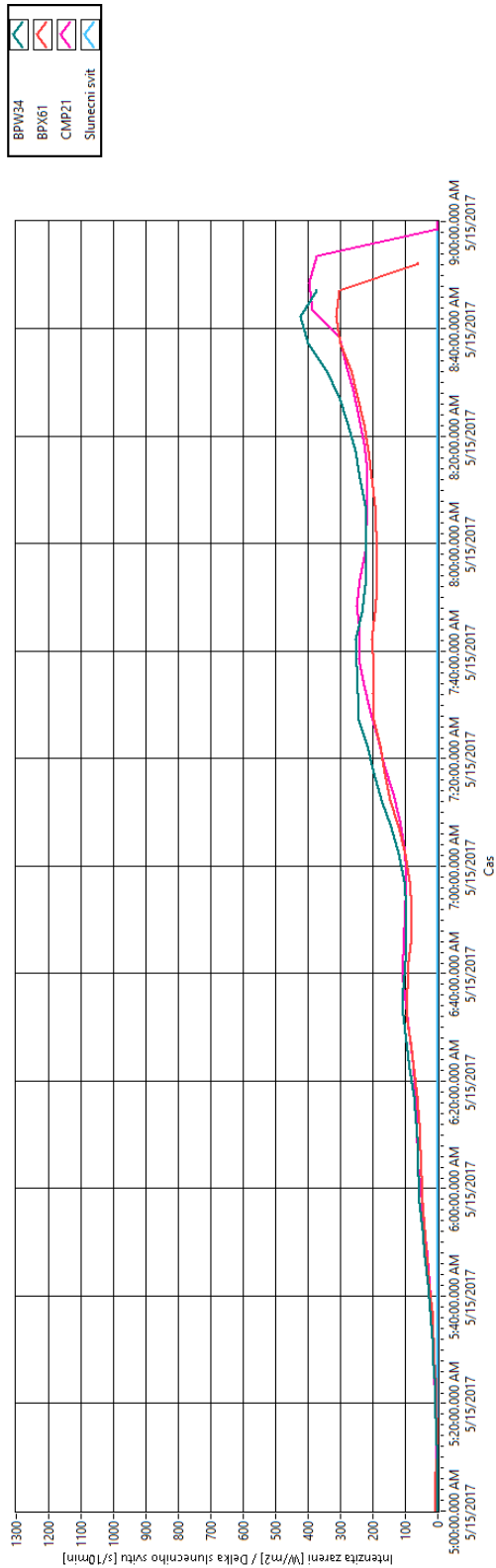
Graf 11.6 5/13/2017 EMS11, Peltierův článek



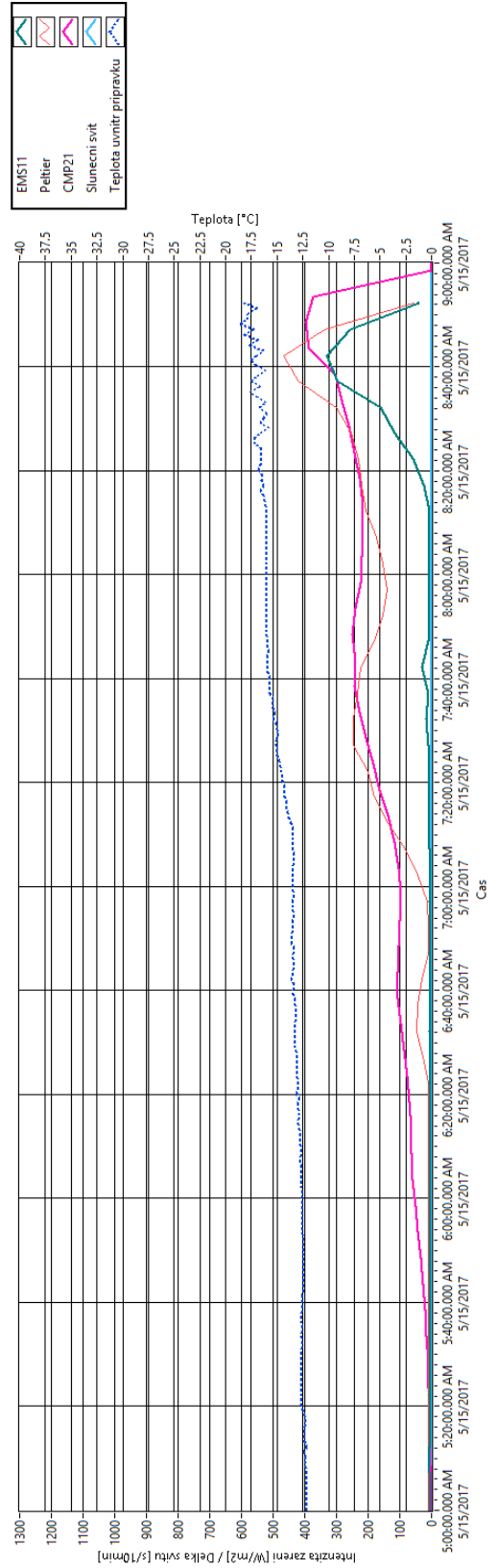
Graf 11.7 5/14/2017 BPW34, BPX61



Graf 11.8 5/14/2017 EMS11, Peltierův článek



Graf 11.9 5/15/2017 BPW34, BPX61



Graf 11.10 5/15/2017 EMS11, Peltierův článek