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 MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE Michal Chvátal
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Michal Chvátal ***ID:*** 195318

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měření slunečního záření

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

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

1. Zpracujte rešerši týkající se měření slunečního ozáření s důrazem na typy používaných čidel v komerčně dostupných snímačích.
2. Navrhněte a realizujte snímač s termoelektrickým článkem vhodný pro použití v provozních podmínkách, diskutujte volbu použitých součástek 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.

Bibliografická citace

CHVÁTAL, Michal. *Měření slunečního záření.* Brno, 2019. 51s. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119278. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Abstrakt

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

V práci je popsán rozdíl mezi termočlánkovými generátory a chladícími moduly. Dále je zde popsáno, jak vybrat vhodný modul pro účel měření slunečního záření. Popsán je také návrh celkového měřicího obvodu a konstrukce snímače. Nakonec jsou porovnány naměřené hodnoty s hodnotami z komerčního pyranometru SG420.

Klíčová slova: Sluneční záření, pyranometr, Peltierův modul, termočlánek, fotodioda, operační zesilovač.

Abstract

The Bachelor‘s thesis discusses design and verification of an inexpensive method for indicative measurement of direct and diffused solar radiation. The reason for the measurement of solar radiation is the estimate the heat gain of buildings.

In this paper the difference between thermoelectric generator and cooler is described. There is also described how to choose a suitable module for solar radiation measurement. The design of the measuring circuit and the construction of sensor are also described. Eventually the measured values are compared with the values from the commercial pyranometer SG420.

Keywords: Solar radiation, pyranometer, Peltier module, thermopile, photodiode, operational amplifier.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou 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 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 **13. května 2019** ……...

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. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. z ústavu elektrotechnologie za poskytnutá referenční data.

V Brně dne **13. května 2019** ……...

podpis autora

Obsah

1 Úvod ... 1
2 Sluneční záření ... 2
2.1 Difuzní sluneční záření ... 2
2.2 Přímé sluneční záření ... 3
2.3 Celkové sluneční záření ... 3
3 Typy používaných čidel v komerčně dostupných snímačích ... 4
3.1 Termočlánkový pyranometr ... 4
3.1.1 Pyranometr s černým povrchem ... 4
3.1.2 Černobílý pyranometr ... 7
3.2 Fotodiodový pyranometr ... 8
4 Funkční návrhy termočlánkového pyranometru ... 10
4.1 První práce: A Thermopile Based Pyranometer for Large Spectrum Sunlight Measurement [11] ... 10
4.2 Druhá práce: Solar intensity measurement using a thermoelectric module; experimental study and mathematical modeling [12] ... 12
4.3 Vyhodnocení teoretického průzkumu: ... 13
5 Termoelektrické články ... 14
5.1 Chladící moduly (TEC) ... 14
5.2 Termoelektrické generátory (TEG) ... 15
5.3 Porovnání modulů TEG a TEC ve funkci generátoru elektrické energie ... 16
5.4 Závěr z průzkumu: ... 16
6 Výběr vhodného TEC modulu ... 17
6.1 Měření tepelného odporu ... 17
6.1.1 Příklady výpočtů pro první sloupec Tab. 6.2 ... 19
6.2 Měření závislosti generovaného napětí na rozdílu teplot ... 19
6.3 Závěr z měření ... 21
7 Měřicí obvod pro fotodiodu ... 23
8 Zapojení celkového měřicího obvodu ... 25
8.1 Výpočet hodnot použitých součástek ... 26
8.1.1 Blokovací kondenzátor ... 26
8.1.2 Neinvertující zesilovač pro chladící modul ... 26
8.1.3 Napěťový dělič pro NTC termistory ... 26
8.1.4 Převodník proudu na napětí pro fotodiodu ... 27
8.1.5 Dolní propust za převodníkem proudu na napětí ... 27
9 Výběr vhodného materiálu pro krycí kopuli ... 28
10 Návrh a realizace konstrukce snímače ... 30
11 Ověření funkčnosti realizovaného snímače ... 32

11.1 Vyhodnocení provedeného měření 38
12 Závěr 40
13 Literatura 41
14 Přílohy 44

Seznam obrázků

Obr. 3.1 Typický pyranometr s černým povrchem [9] 4
Obr. 3.2 Konstrukce pyranometru s černým povrchem [8] 5
Obr. 3.3 Typický černobílý pyranometr [10] 7
Obr. 3.4 Typický fotodiodový pyranometr 8
Obr. 4.1 Navržený pyranometr v první práci [11] 10
Obr. 4.2 Odezva pyranometru s peltierovým modulem s nalepenou grafitovou vrstvou [11] 11
Obr. 4.3 Navržený pyranometr v druhé práci [12] 12
Obr. 4.4 Změny napětí, intenzity slunečního záření a teploty okolí v průběhu experimentu [12] 13
Obr. 5.1 Struktura chladícího modulu TEC [18] 15
Obr. 6.1 Uspořádání s přípravkem pro měření tepelného odporu vybraných modulů 18
Obr. 6.2 Uspořádání při měření závislosti generovaného napětí na rozdílu teplot 19
Obr. 6.3 Uspořádání při měření závislosti generovaného napětí na rozdílu teplot detail 20
Obr. 6.4 Graf naměřené závislosti generovaného napětí na teplotním rozdílu u jednotlivých peltierových modulů 20
Obr. 7.1 Zapojení převodníku proudu na napětí s fotodiodou 23
Obr. 8.1 Schéma zapojení celkového měřicího obvodu 25
Obr. 9.1 Spektrální charakteristika vybraných materiálů [24] 28
Obr. 10.1 Konstrukce snímače s krycí kopulí 30
Obr. 10.2 Konstrukce snímače bez krycí kopule 31
Obr. 11.1 Umístění snímačů na střeše budovy 32
Obr. 11.2 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 15.04.2019 33
Obr. 11.3 Graf naměřených průběhů teplot během dne 15.04.2019 33
Obr. 11.4 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 12.04.2019 34
Obr. 11.5 Graf naměřených průběhů teplot během dne 12.04.2019 34
Obr. 11.6 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 20.04.2019 36
Obr. 11.7 Graf naměřených průběhů teplot během dne 20.04.2019 37
Obr. 11.8 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 22.04.2019 37
Obr. 11.9 Graf naměřených průběhů teplot během dne 22.04.2019 38
Obr. 14.1 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 30.03.2019 45
Obr. 14.2 Graf naměřených průběhů teplot během dne 30.03.2019 45
Obr. 14.3 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 31.03.2019 46
Obr. 14.4 Graf naměřených průběhů teplot během dne 31.03.2019 46
Obr. 14.5 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 01.04.2019 47

Obr. 14.6 Graf naměřených průběhů teplot během dne 01.04.2019 47
Obr. 14.7 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 11.04.2019 48
Obr. 14.8 Graf naměřených průběhů teplot během dne 11.04.2019 48
Obr. 14.9 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 13.04.2019 49
Obr. 14.10 Graf naměřených průběhů teplot během dne 13.04.2019 49
Obr. 14.11 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 18.04.2019 ... 50
Obr. 14.12 Graf naměřených průběhů teplot během dne 18.04.2019 50
Obr. 14.13 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 21.04.2019 ... 51
Obr. 14.14 Graf naměřených průběhů teplot během dne 21.04.2019 51

Seznam tabulek

Tab. 6.1 Vybrané TEC moduly a jejich parametry 17
Tab. 6.2 Měření tepelného odporu vybraných modulů 18
Tab. 8.1 Seznam součástek použitých v celkovým měřicím obvodu 26
Tab. 144.1 Měření závislosti generovaného napětí na teplotním rozdílu u jednotlivých peltierových modulů 44

1 ÚVOD

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

Teoretická část se zabývá sluneční energií a rozborem principů či problémů, se kterými se u daných typů čidel v komerčně dostupných snímačích setkáme. Dále je popsán rozdíl mezi termočlánkovými chladícími moduly a generátory.

Praktická část se zaměřuje na výběr vhodného modulu pro účel měření slunečního záření, návrhu celkového zapojení měřicího obvodu a na realizaci konstrukce snímače s termoelektrickým článkem. Dále se ověří funkčnost zkonstruovaného snímače a naměřené průběhy se porovnají s průběhy naměřenými komerčním pyranometrem SG420.

2 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ

Sluneční záření je jeden z nejčistších a nejdostupnějších zdrojů energie na Zemi [1]. Jedná se o elektromagnetické záření Slunce, které je nezbytné pro život na Zemi. Je na něm závislé podnebí, změny počasí, je klíčové pro fotosyntézu a umožňuje živočichům vidět [2]. Vzniká na základě termonukleární reakce (jaderné fúze) probíhající v nitru Slunce, při které dochází k přeměně lehčích jader vodíku na těžší jádro helia [2][3]. Předpokládá se, že jaderná fúze bude pokračovat ještě 5 až 7 miliard let. Z naší perspektivy je tedy Slunce nevyčerpatelným a trvalým zdrojem energie [1][3]. Proto se řadí mezi obnovitelné zdroje.

Slunce generuje zářivou energii v celém rozsahu spektra od nejmenších vlnových délek rentgenového až po metrové délky radiového záření [1]. Podle Matušky [3]: *„Z nebezpečného rentgenového záření vznikajícího uvnitř Slunce se cestou na povrch stává převážně životodárné sluneční záření“*. Vnějším viditelným obalem Slunce (fotosférou) je do kosmického prostoru vyzařována energie, která je tvořena převážně ultrafialovým, světelným (viditelným) a infračerveným zářením. Celkově obsahuje vlnové délky od 0,2 μm až do 3 μm, kde lidské oko vnímá pouze 0,38 μm až 0,76 μm. Teplota na povrchu Slunce je přibližně 5800 K, proto je lidé vnímají jako žluté (i když maximum jeho vyzařování má vlnovou délku 501 nm, jde tedy o žluto-zelenou část viditelného spektra). Slunce je veliká koule žhavého plazmatu, která neustále produkuje ohromné množství energie. Jeho výkon je zhruba $3{,}6 \cdot 10^{26}$ W. Z tohoto celkového výkonu na naši Zemi dopadá pouze 45 miliardtin. Přibližně polovina zářivého toku Slunce je pohlcena zemským povrchem a následně je vyzářena ve formě infračerveného záření do vesmíru. Velká část této energie je spotřebována k odpaření vody v oceánech [1][3].

Lidé využívají sluneční záření pro výrobu elektřiny, zpracování užitkové vody, vytápění a také v zemědělství. Dále je potřeba počítat s jeho tepelným tokem při návrhu různých stavebních konstrukcí.

V atmosféře a na zemském povrchu se rozlišuje difuzní (rozptýlené), přímé (paprskové) a celkové (hemisférické či globální) sluneční záření.

2.1 Difuzní sluneční záření

Jedná se o záření, které se při průchodu atmosférou rozptyluje na molekulách vzduchu a atmosférických aerosolech. Aerosol atmosférický může být přirozeného nebo antropogenního původu. Do přirozeného se řadí vodní kapičky, ledové částice, částečky mořských solí, půdní a prachové částice, plynová zrna, bakterie, produkty vulkanické činnosti, hoření meteoritů v ovzduší a jiné. Kouř a popílek tvoří antropogenní aerosol [2]. Část zářivého toku pak přichází ve formě difuzního (rozptýleného) slunečního záření. To nemá směrový charakter, přichází tedy ze

všech směrů se stejnou intenzitou. Dále se k tomuto záření počítá také záření odražené. To vzniká při dopadu přímého záření na difuzní povrch, na kterém se odrazí do všech stran. [3]
Intenzita difuzního záření vzrůstá se součinitelem znečištění, jenž závisí na obsahu příměsí a atmosférickém tlaku vzduchu [1]. Pro jeho měření se využívá pyranometru se stíněným čidlem přístroje před přímou složkou záření, nejčastěji pomoci stínícího prstence. [3]

2.2 Přímé sluneční záření

Toto záření, které je nerozptýlené, je tvořené prakticky rovnoběžnými paprsky přicházejícími přímo ze směru od slunečního disku na obloze. Má tedy výrazně směrový charakter a lze říci, že přímé sluneční záření přichází tehdy, je-li viditelný sluneční kotouč. Jeho výkonová hustota je oproti difuznímu záření výrazně závislá na úhlu dopadu. Pro jeho měření se využívá pyrheliometru (někdy nazývaného aktinometru), jehož rozsah zorného pole je 5,7°. Je vždy umístěn na zařízení, které sleduje pohyb Slunce [2][3].

2.3 Celkové sluneční záření

Pro jeho měření se využívá pyranometru, který měří výkonovou hustotu přímého a difuzního záření přicházejícího z polokoule oblohy na vodorovnou rovinu [3].

3 TYPY POUŽÍVANÝCH ČIDEL V KOMERČNĚ DOSTUPNÝCH SNÍMAČÍCH

Pro účel této práce se zaměřuji na pyranometr. Je to zařízení sloužící pro měření hemisférického záření a v případě využití stínícího prvku může sloužit pro měření difuzního záření. Na základě použitého čidla dělíme pyranometry na termočlánkové a fotodiodové (fotovoltaické).

3.1 Termočlánkový pyranometr

Základem pro všechny termočlánkové pyranometry je Seebeckův jev, díky kterému dochází ke generování napětí z teplotního rozdílu mezi dvěma rozdílnými kovy nebo polovodiči. Vzniklé napětí je v řádu několika mikrovoltů na stupeň Celsia [4][5].

Využívá se dvou uspořádání pyranometru: pyranometr s černým povrchem a černobílý pyranometr.

3.1.1 Pyranometr s černým povrchem

Typickými představiteli z komerčních snímačů jsou Kipp&Zonen CMP 22 a CMP 21.

Obr. 3.1 Typický pyranometr s černým povrchem [9]

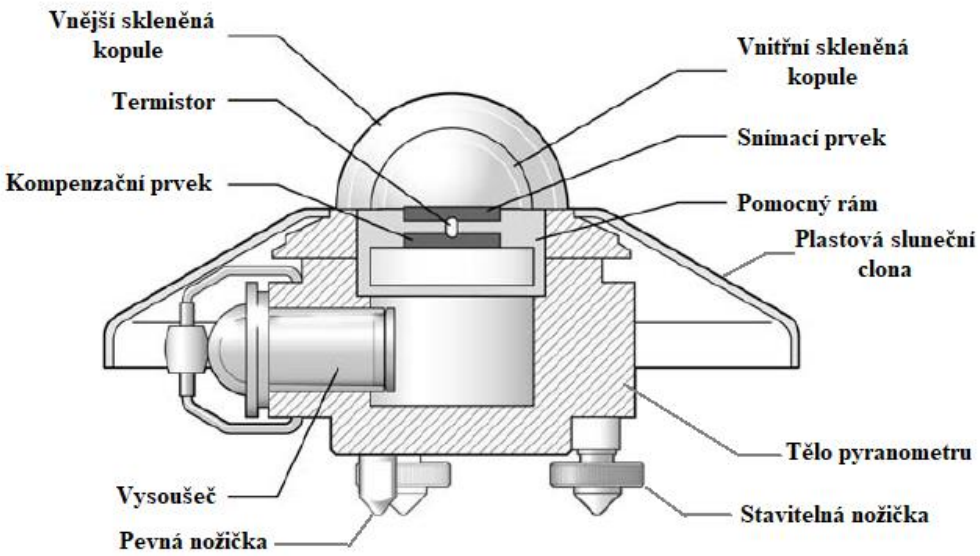
Hlavními konstrukčními vlastnostmi tohoto uspořádání jsou:

- Jeden termočlánek měřicí tepelný tok mezi černým povrchem čidla a tělem pyranometru.
- Dvě křemenné kopule, které snižují konvekční ztráty.
- Konstrukce minimalizuje závislost na azimutu.
- Měření globálního a difuzního záření je ovlivněno měřitelnými tepelnými offsety.

Aktivní segmenty termočlánku jsou připojené k černému povrchu, který je ohříván absorpcí slunečního záření. Pasivní segmenty jsou teplovodivě spojené s tělem pyranometru, který slouží jako chladič. Teplotní rozdíl mezi oběma povrchy generuje napětí řádově několika mikrovoltů na stupeň Celsia.

V některých pyranometrech se používá termočlánek s kovy měď-konstantan [4]. Kipp&Zonen uvádí, že novější pyranometry o vyšším výkonu využívají peltierova modulu, kde jsou rozdílné kovy nahrazeny rozdílnými polovodiči [6].

Přesnost měření je ovlivněna tepelnými ztrátami způsobené konvekcí, advekcí, vedením a zářením. Pro snížení ztrát konvekcí a advekcí způsobené větrem používají vysoce kvalitní pyranometry dvě skleněné kopule. Vnější skleněná kopule zabraňuje advektivním ztrátám z větru, který fouká přes čidlo a tím jej ochlazuje [4]. Dále chrání čidlo před deštěm i rosou [8]. Vnitřní působí podobně jako dvojité okno, které vrstvou vzduchu mezi kopulemi zajišťuje další snížení tepelných ztrát způsobené konvekcí. Vodivé ztráty jsou sníženy izolováním černého povrchu čidla od ostatních částí pyranometru, které by sloužily jako nechtěný chladič. Zamezení ztrát z pyranometru způsobených zářením je obtížné. Termočlánek po absorpci slunečního záření také vyzařuje (emituje) tepelné infračervené záření (vlnové délky delší než 3000nm) a skleněné kopule, které dovolují, aby část infračerveného záření ze slunečního spektra dopadala na čidlo, pak také dovolují tomuto záření projít směrem ven z pyranometru, což způsobí nežádoucí ochlazení termočlánku [4]. V těle pyranometru je umístěn vysoušeč, který zabraňuje rosení vnitřní strany kopule, což by mohlo způsobit ochlazení čidla, či ovlivnit průchod záření [8].



Obr. 3.2 Konstrukce pyranometru s černým povrchem [8]

Mezi další vlastnosti pyranometru s černým povrchem patří:

Tepelný offset (Zero offset) typu B: Tepelný tok ve snímacím prvku např. v důsledku stoupající nebo klesající teploty těla snímače normálně způsobí rušivé napětí. Ke kompenzaci tohoto napětí je instalován druhý neosvětlovaný prvek, ve kterém vznikne stejný tepelný tok. Pomocí diferenčního zapojení těchto dvou prvků se rušivé napětí výrazně potlačí. Některé pyranometry využívají plastového krytu ke snížení teplotních změn jejich těla způsobené slunečním zářením či chladným deštěm [8].

Tepelný offset (Zero offset) typu A: Podle konstrukce je černý povrch termočlánku dobrým absorbérem slunečního záření a dobrým emitorem v infračervené části spektra. Tělo pyranometru je obecně teplejší než obloha, proto pyranometr vysílá na oblohu infračervené záření, což snižuje teplotu termočlánku oproti tělu pyranometru a tím vzniká negativní signál. Dochází tak k tepelnému offsetu, jenž je závislý na rozdílu teploty okolního vzduchu a teploty oblohy. Tepelný offset je výrazně nižší v období oblačnosti s teplejší oblohou než v případě jasné oblohy s chladnějšími teplotami. Vzhledem k tomu, že různé lokality vykazují různé rozsahy teplot oblohy, kvůli množství aerosolů a atmosférických vodních par, budou tyto offsety různé, proto je obtížné přesně určit kalibrační konstantu, zejména u pyranometrů s velkým tepelným offsetem [4].

Nelinearita: Je definovaná jako odchylka od odezvy měřené při 500 W/m^2 v rozsahu od 100 W/m^2 do 1000 W/m^2. Například jestliže naměřená odezva při 500 W/m^2 je 8 $\mu V/Wm^{-2}$, pak odezva v rozsahu od 100 W/m^2 do 1000 W/m^2 musí být mezi 7,96 $\mu V/Wm^{-2}$ a 8,04 $\mu V/Wm^{-2}$, aby byla nelinearita menší než ± 0,5 %. Při vysoké intenzitě slunečního záření mají tyto pyranometry dobrou lineární odezvu, ovšem při nižším ozáření mohou vykazovat problémy s nelinearitou [4].

Spektrální odezva: Je z velké části určována spektrálním přenosem materiálu použitého pro ochranou a izolační kopuli, dále spektrální absorpcí černého povrchu na termočlánku. V ideálním případě by měl být výstup pyranometru úměrný součtu solárního toku napříč všemi slunečními vlnovými délkami [4].

Úhlová odezva: Lambertův kosinový zákon říká, že zářivá nebo světelná intenzita pozorovaná z ideálního difuzně odrazivého povrchu je přímo úměrná kosinu úhlu dopadajícího záření [7]. Pyranometr s ideální úhlovou odezvou by reagoval na dopadající záření v souladu s tímto zákonem, ovšem je nemožné vyrobit takový pyranometr, proto se jeho citlivost s úhlem dopadu mění. Optické vyrovnání snímacího prvku je velmi důležité, zejména při velkém úhlu slunečního zenitu, kde malé rozdíly v úhlu dopadu mohou způsobit velké chyby. Nedokonalosti ve skleněných kopulích, a dokonce i lom světla procházejícího kopulemi, mohou způsobit určité odchylky od skutečné Lambertianovy odezvy. Důležitá je i rovnoměrná tloušťka kopulí, jejich soustředné uspořádání vzhledem k čidlu,

kvalitní opracování, rovnoměrnost černěného povrchu na čidle a optické vyrovnání čidla v těle pyranometru. Dále prach či vlhkost na kopulích mohou významně přispět k velikosti chyby [4].

Zhoršení odezvy: Černý povrch čidla je vystaven slunečnímu záření, a především díky dlouhodobému působení ultrafialové složky na jeho povrch dojde ke změně barvy jeho povrchu a tím ke změně absorpce přijímače. Čím více je snímač vystaven slunečnímu záření, tím rychleji se mění jeho citlivost [4].

Teplotní závislost: I když se využívá prvotřídních obvodů kompenzujících okolní teplotu, tak jsou termočlánkové pyranometry teplotně závislé. Korekce teplotní odezvy při jedné teplotě ovlivní odezvu v jiném teplotním rozsahu [4].

3.1.2 Černobílý pyranometr

Typickými představiteli jsou Eppley 8-48 a Schenk Star pyranometr.

Obr. 3.3 Typický černobílý pyranometr [10]

Hlavní vlastnosti tohoto uspořádání:

- Použití termočlánků se střídáním bílého a černého povrchu.
- Citlivost má měřitelnou teplotní závislost.
- Citlivost se mění s azimutem.
- Citlivost ovlivněna náklonem pyranometru.
- Omezený tepelný offset.

Tyto pyranometry se skládají ze střídavě uspořádaných černobílých povrchů. Ty jsou připojené k aktivním a pasivním segmentům termočlánku. Když se vystaví slunečnímu záření, výsledný teplotní rozdíl mezi aktivními a pasivními segmenty generuje napětí [4].

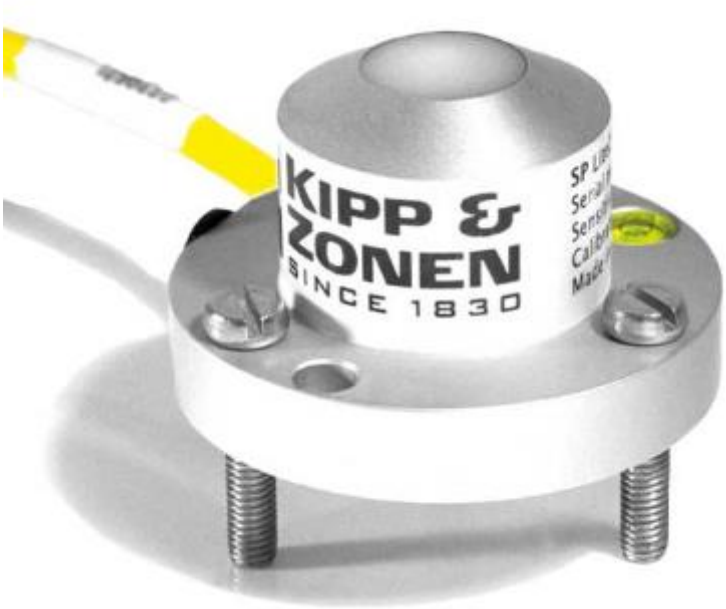
Citlivost poměrně velké plochy detektoru se významně mění v závislosti na azimutovém úhlu a náklonu. Jedním z hlavních důvodů je, že jejich střídající se

černobílé povrchy jsou citlivé na sluneční azimut. Citlivost je různá, je-li Slunce přímo zarovnané s bílým nebo s černým povrchem. Tento problém lze řešit do jisté míry zmenšením plochy nebo použitím jiných geometrických vzorů případně namontováním snímače na sledovací jednotku, která se bude točit za sluncem. Hlavním problémem je citlivost, která závislí na náklonu přístroje, protože gravitace začne ovlivňovat konvekční tok tepla. S náklonem jeho citlivost klesá, nejsou tedy doporučovány pro měření na nakloněných rovinách. Stejně jako u předchozího uspořádání je i zde teplotní závislost. Tyto pyranometry by se měly umisťovat, tak aby byla mezi základnou přístroje a montážní plochou vzduchová mezera, aby se zachovala tepelná izolace. Pro ochranu před vnějšími vlivy je opět použita kopule [4].

Vysoce odrazivá barva bílého povrchu je v infračervené oblasti stejně dobrým emitorem jako černý povrch. Proto obě plochy vyzařují téměř stejné množství infračerveného záření, což má za následek minimální tepelný offset [4].

3.2 Fotodiodový pyranometr

Typický představitel SP Lite2 od Kipp&Zonen.



Obr. 3.4 Typický fotodiodový pyranometr

Hlavní vlastnosti tohoto pyranometru:

- Rychlá odezva.
- Založený na proudech nakrátko ze solárních článků (křemíkové fotodiody).
- Výstupním signálem může být proud nebo napětí.
- Citlivost má teplotní závislost.

- Citlivost závisí na spektrálních charakteristikách dopadajícího záření.
- Citlivost není ovlivněna náklonem přístroje – protože nepracují na tepelném principu.
- Měření na nakloněných rovinách jsou ovlivněna spektrálními charakteristiky odraženého záření od země.

Článek používaný ve fotodiodě je oproti klasickému solárnímu článku často vylepšený tak, aby měl lepší odezvu v modré části slunečního spektra. Pyranometry využívají křemíkové fotodiody s podobnou konstrukcí jako mají fotovoltaické či solární články. Fotodiody měří dopadový tok sledováním napětí přes přesný odpor s nízkým teplotním koeficientem, skrz který fotoproud teče. To odpovídá měření proudu nakrátko u solárního článku. Ovšem oproti fotodiodám se větší část solárních článků používá k přeměně dopadající sluneční energie na elektrickou energii, proto se provozují jinak než fotodiody. [4].

Na první pohled je poměrně snadné postavit pyranometr pomocí fotodiody, ovšem externí kvantová účinnost fotodiody generující proud závisí na vlnové délce dopadajícího záření. Fotodiody užívající solární článek na bázi křemíku dobře reagují na vlnové délky mezi 450 nm a 900 nm, ovšem pod 300 nm a nad 1100 nm již nereagují. Navíc proud za tmy (signál generovaný při absenci slunečního záření) a fotoproud jsou ovlivňovány teplotou fotodiody. Profesionální pyranometry pro minimalizování teplotní závislosti měří teplotu pyranometru a použijí korekci na změnu teploty. Nejistota měření je také závislá na denní době (úhlu slunečního zenitu a azimutu), spektrálním složení měřeného záření a na znečištění či vlhkosti na zmíněném difuzéru. Pyranometry s fotodiodou se používají pro měření globálního záření za jasné i zamračené oblohy, ale jsou kalibrovány pouze za jasné oblohy [4].

Teplotní odezva fotodiody se liší od teplotní odezvy solárních článků. Fotodiody pracují ve stavu nakrátko s velmi malým úbytkem napětí v obvodu, zatímco solární články, které se používají k výrobě elektřiny, pracují na maximálním napájecím bodu, který je blíže napětí naprázdno. Napětí naprázdno výrazně klesá s teplotou, což znamená, že výkon solárního článku s teplotou klesá. Naopak fotodioda je při vyšších teplotách citlivější [4].

Tyto pyranometry nejsou tak přesné jako termočlánkové, ovšem v určitých aplikacích mohou fungovat stejně dobře ne-li lépe. A to díky své extrémně rychlé odezvě, která je asi o 5 řádů lepší než u termočlánkových pyranometrů [4]. Jsou také vhodnější pro sledování výkonu fotovoltaických systémů, které reagují na stejné vlnové délky dopadajícího záření jako tento pyranometr.

4 FUNKČNÍ NÁVRHY TERMOČLÁNKOVÉHO PYRANOMETRU

Provedl jsem průzkum, při kterém jsem nalezl dvě práce zabývající se návrhem a konstrukcí levného pyranometru s peltierovým modulem.

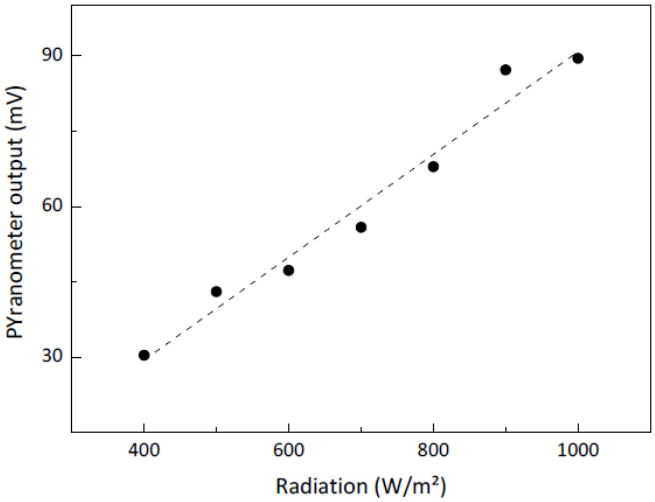
4.1 První práce: A Thermopile Based Pyranometer for Large Spectrum Sunlight Measurement [11]

Autoři navrhují a realizují pyranometr pro měření ve vlnových délkách 300-2500 nm. Jako čidlo je použit peltierův modul, ovšem zvolený typ není zmíněn. Provedenými experimenty bylo zjištěno, že absorbované sluneční záření generovalo velmi nízké napětí. Z tohoto důvodu autoři nalepili na teplou stranu modulu grafitovou vrstvu pomocí stříbrného lepidla. Ta měla zvýšit absorpci slunečního záření a tím i hodnotu generovaného napětí.

Autoři se inspirovali komerčně dostupnými snímači a za pomocí programu Solid-Works navrhli konstrukci pyranometru. Zvolené materiály a postupy při jejich výběru nebyly opět uvedeny. Konstrukce má tři části. První část je tvořena skleněnými kopulemi a peltierovým modulem, druhá část je samotné tělo pyranometru obsahující plošný spoj s elektronickým obvodem a třetí část slouží jako kryt k ochraně pyranometru před slunečními paprsky a také k omezení nárůstu tepla.

Pro měření teploty okolí bylo použito čidlo LM35. Jeho výstup byl stejně jako výstup z peltierova modulu zesílen, vyfiltrován a přiveden na analogově digitální převodník mikrokontroléru PIC18F255, který přijaté signály zpracovává.

Obr. 4.1 Navržený pyranometr v první práci [11]



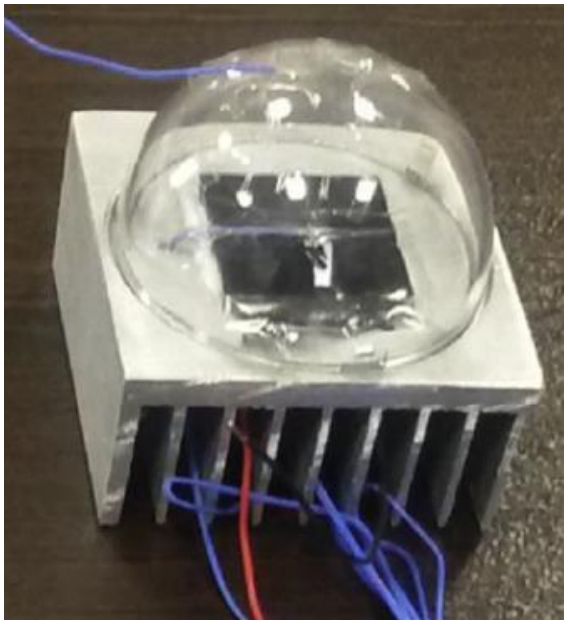
Obr. 4.2 Odezva pyranometru s peltierovým modulem s nalepenou grafitovou vrstvou [11]

Kalibrace pyranometru byla provedena na solárním simulátoru v CRTSE (Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs) v Alžírsku. Měření bylo prováděno při teplotě 25 °C s intervalem 10 minut, aby bylo zajištěno ustálení solárního simulátoru. Intenzita byla proměřena v rozsahu od 400 W/m^2 do 1000 W/m^2. Měřen byl článek bez grafitové vrstvy i s grafitovou vrstvou. Poté byla pomocí lineární regrese u pyranometru s modulem bez grafitové vrstvy zjištěna citlivost 67 μV/Wm^{-2} a s grafitovou vrstvou 102 μV/Wm^{-2} (viz. Graf 1). Grafit tedy zvýšil citlivost pyranometru zhruba o 65 %.

Závěr: V práci sice chybí srovnání s profesionálním pyranometrem v reálných podmínkách, kde by byl vyrobený pyranometr vystaven vnějším vlivům prostředí, ale i tak lze s určitou rezervou říci, že je možné vyrobit levný pyranometr, který využívá peltierův modul.

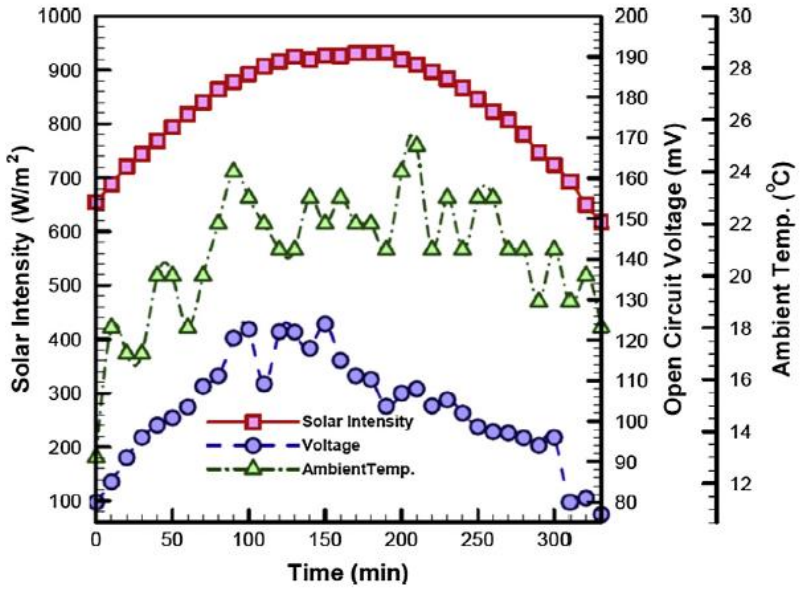
4.2 Druhá práce: Solar intensity measurement using a thermoelectric module; experimental study and mathematical modeling [12]

Autoři navrhují pyranometr, který se skládá ze tří hlavních částí. Ze skleněné kopule, termoelektrického modulu a hliníkového chladiče. Hlavním důvodem použití skleněné kopule je zabránit tepelným ztrátám z termoelektrického modulu do okolí. Jako termoelektrický modul byl použit TEC-12708, který je původně určený ke chlazení. Průměr kopule byl zvolen 8 cm a rozměr chladiče 12x12 cm s třinácti žebry o tloušťce 5 mm a výšce 5 cm. Autoři dále určili matematický model celé sestavy. S vyrobeným pyranometrem byly provedeny experimenty za typického zimního dne v Íránu (teplota okolí se pohybovala mezi 13 a 25 °C). Každých deset minut byly měřeny hodnoty generovaného napětí, teploty vzduchu, teploty teplé a studené strany modulu a teploty skla. Intenzita slunečního záření byla měřena pyranometrem s termočlánkem od firmy Kipp&Zonen. Přesný typ přístroje nebyl blíže určen. Ukázalo se, že výstupní napětí peltierova modulu je výrazně závislé na intenzitě slunečního záření a okolní teplotě, která svým kolísáním ovlivňuje velikost vygenerovaného napětí viz Obr. 4.4.



Obr. 4.3 Navržený pyranometr v druhé práci [12]

Dále stojí za zmínku, že změna tepelného odporu chladiče silně závisí na okolních podmínkách, jako je rychlost větru a okolní teplota. Za účelem navržení rovnice pro výpočet intenzity slunečního záření z vygenerovaného napětí a okolní teplotě byly využity experimentálně naměřená data. Nakonec byly stanoveny dvě korelace s přibližnou přesností 10 %.



Obr. 4.4 Změny napětí, intenzity slunečního záření a teploty okolí v průběhu experimentu [12]

První korelace: $I = 15{,}843 \cdot U^{0{,}713} \cdot T^{0{,}214} \quad [W/m^2]$, (4.1)

Druhá korelace: $I = 5{,}54 \cdot U + 12{,}34 \cdot T \quad [W/m^2]$, (4.2)

kde I je výsledná intenzita slunečního záření [W/m²], U je vygenerované napětí peltierovým modulem [mV] a T je teplota okolí [°C]. Autoři dokázali, že změna tepelného odporu chladiče je silně závislá na okolní teplotě a rychlosti větru. Z tohoto důvodu je dobré použít vnější kryt chladiče alespoň pro uchránění před chladným deštěm či větrem.

Závěr: Z výsledků měření bylo dokázáno, že je možné navrhnout a postavit levný pyranometr s peltierovým modulem pro měření slunečního záření s chybou 10 %.

4.3 Vyhodnocení teoretického průzkumu:

Z provedeného průzkumu vychází, že je možné s určitou chybou vyrobit pyranometr využívající peltierův modul. Byla dokázána silná závislost výstupního napětí modulu na okolní teplotě. Z tohoto důvodu je velmi důležité provádět korekci na tuto nekonstantní teplotu. Pro ochranu čidla před počasím a k omezení tepelných ztrát je také důležité použití ochranné kopule. Její materiál se volí s ohledem na propustnost vlnových délek slunečního záření. Výhoda použití peltierova modulu oproti fotodiodě je možnost pokrytí celého spektra slunečního záření jedním snímačem.

5 TERMOELEKTRICKÉ ČLÁNKY

Termočlánek je označení pro zdroj stejnosměrného napětí, v němž se využitím termoelektrického jevu přeměňuje tepelná energie na elektrickou nebo opačně [13].

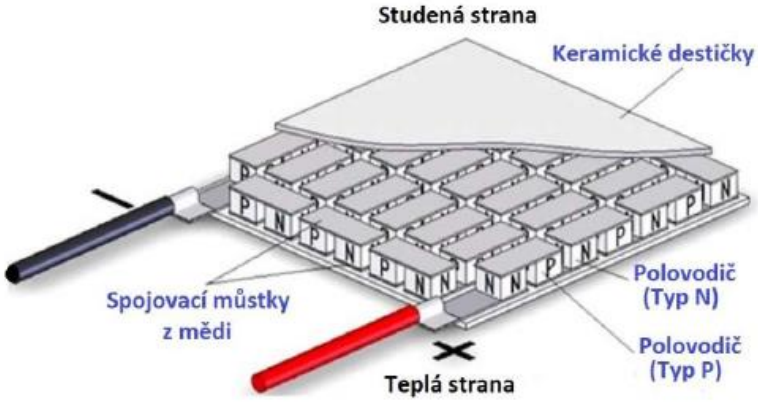
Dělí se do tří skupin podle využití:

- Měření teplot (nejčastěji spojení dvou různých kovů či kovových slitin),
- Chladící TEC (Thermoelectric cooling),
- Generátory elektrické energie z tepelné TEG (Thermoelectric generator).

Tato práce se zajímá především o poslední dva druhy, tedy TEC a TEG, kde jsou termočlánky tvořené z polovodičů. Spojením vice termočlánků vzniká termoelektrický modul.

5.1 Chladící moduly (TEC)

Jejich funkce je založena na Peltierově jevu, a tak jsou někdy nazývány jako Peltierovy moduly či Peltierovy termobaterie. Rozlišuje se teplá a studená strana modulu, kde po připojení stejnosměrného napětí vzniká teplotní rozdíl úměrný procházejícímu proudu. Vzniklý teplotní rozdíl se využívá převážně pro chlazení a při změně polarity proudu pro ohřev [16]. Tvoří jej několik elektricky do série (tepelně paralelně) spojených termoelektrických dvojic umístěných mezi dvěma keramickými deskami, které zprostředkovávají přívod tepla, zajišťují elektrickou izolaci od okolí a poskytují článku potřebnou pevnost. Keramické desky musí dosahovat dobrých tepelných vodivostí, a proto se pro jejich výrobu nejčastěji využívá oxidu hlinitého, který dosahuje nejlepšího poměru mezi cenou a tepelnou vodivostí. Termoelektrické dvojice jsou tvořeny polovodičovými termoelementy typu P a N nejčastěji ve tvaru sloupků. Jako základní materiál se většinou používá vizmut-tellurid (N typ - Bi-Te-Se a P typ - Bi-Sb-Te), protože má malý elektrický odpor a malý součinitel tepelné vodivosti. Termoelektrické dvojice se pravidelně střídají a jsou vzájemně spojeny do série tenkými kovovými můstky, které zajišťují elektrický kontakt a přenos tepla. Kovové spojovací můstky jsou zhotovené převážně z mědi a k jednotlivým termoelementům jsou připájeny [14] [15]. Tyto pájené spoje jsou funkčním omezením, protože teplota tavení pájky je zároveň maximální pracovní teplotou modulu [17]. Modul bývá na bočních stranách utěsněn tepelně odolným silikonovým nebo epoxidovým tmelem. Zamezí se tím vniku možných nečistot a možné kondenzace vodních par, což by způsobilo oxidaci článků [18].



Obr. 5.1 Struktura chladícího modulu TEC [18]

5.2 Termoelektrické generátory (TEG)

Pracují na principu Seebeckova jevu, což je jev inverzní k Peltierovu jevu. Přeměňují tepelnou energii na elektrickou v závislosti na teplotním rozdílu mezi studenou a teplou stranou modulu. Od modulu TEC se principiálně neliší. Je rozdíl pouze v použitých technologiích při skládání a pájení modulu a v řešení přívodních vodičů [19]. TEC mají vyšší a užší termoelementy než TEG, kde širší prvky znamenají větší průtok tepla modulem a tím vyšší výkon [20]. TEG mají oba přívodní vodiče izolované teflonem (teflon odolává vyšším teplotám, TEC používají jako izolační materiál PVC) a připojené ke studené straně modulu, která je chrání před teplem. Navíc jsou dráty tenčí, protože TEG jsou na menší proudy než TEC. Obecně platí, že TEG moduly jsou konstruovány pro práci při teplotách typicky 200–300 °C a klasické TEC moduly jsou určené pro teploty do cca 100 °C [19]. Dražší moduly se také mohou lišit v použitém materiálu polovodičových termoelementů a keramických destiček.

Protože moduly TEC i TEG pracují na stejném principu, je teoreticky možné využít modul TEC také jako generátor pro výrobu elektrické energie.

5.3 Porovnání modulů TEG a TEC ve funkci generátoru elektrické energie

Z důvodu vyšší ceny a horší dostupnosti modulu TEG byl proveden průzkum, zda je jej možné v naší aplikaci nahradit TEC modulem, který je původně určený pro chlazení.

Práce, kterou publikovali Marco Nesarajah a Georg Frey s názvem: Thermoelectric Power Generation: Peltier Element versus Thermoelectric generator [20], se zabývá právě tím, v jakém teplotním rozsahu a za jakých podmínek je možné nahradit nákladný TEG levnějším TEC pro výrobu elektrické energie. Nejdříve popisují rozdíl mezi oběma moduly a vysvětlují jejich princip. Následně zvolí dvě termoelektrická zařízení TEG (GM250-127-14-10) a TEC (TEC1-12706) o stejných rozměrech stejném počtu termočlánků se stejným materiálem. Poté projdou oba prvky stejným měřicím postupem, kde z jedné strany dochází k zahřívání prvku pomocí výhřevné desky a z druhé strany je připevněn chladič. Obě zařízení jsou k prvku připojená pomocí měděných destiček, které zaručují rovnoměrné rozložení tepla na celém povrchu modulu. Z výsledku měření bylo zjištěno, že pro výrobu elektrické energie v teplotním rozmezí 0-100 °C, lze použít TEC stejně dobře jako TEG. Při nízkých teplotách od 20 °C do 40 °C byl TEC dokonce trochu lepší.

Podobného výsledku bylo dosaženo v práci [21].

5.4 Závěr z průzkumu:

Na základě získaných poznatků z provedeného průzkumu lze říci, že pro použití snímacího elementu v budoucím pyranometru, kde by teplota neměla překročit 100 °C, je možné využít levnější a lépe dostupnější modul TEC.

6 VÝBĚR VHODNÉHO TEC MODULU

Při výběru TEC modulu za účelem chlazení je důležité, aby jeho vnitřní elektrický odpor byl co nejmenší, protože obecně platí, čím menší elektrický odpor, tím větší chladící výkon. Toho se nejčastěji dosáhne při malé výšce modulu.

Za účelem zjištění, jaký parametr je důležitý při výběru vhodného TEC použitého v generátorickém režimu s nulovým proudem (tj. režim naprázdno), vyberu několik různých modulů, na kterých provedu měření. Protože výrobce u TEC modulů neuvádí velikost tepelného odporu, sám tento odpor změřím. Dále ověřím, zda je generované napětí TEC modulem nějak závislé na jeho vnitřním elektrickém odporu, výšce, ploše či počtu termoelementů.

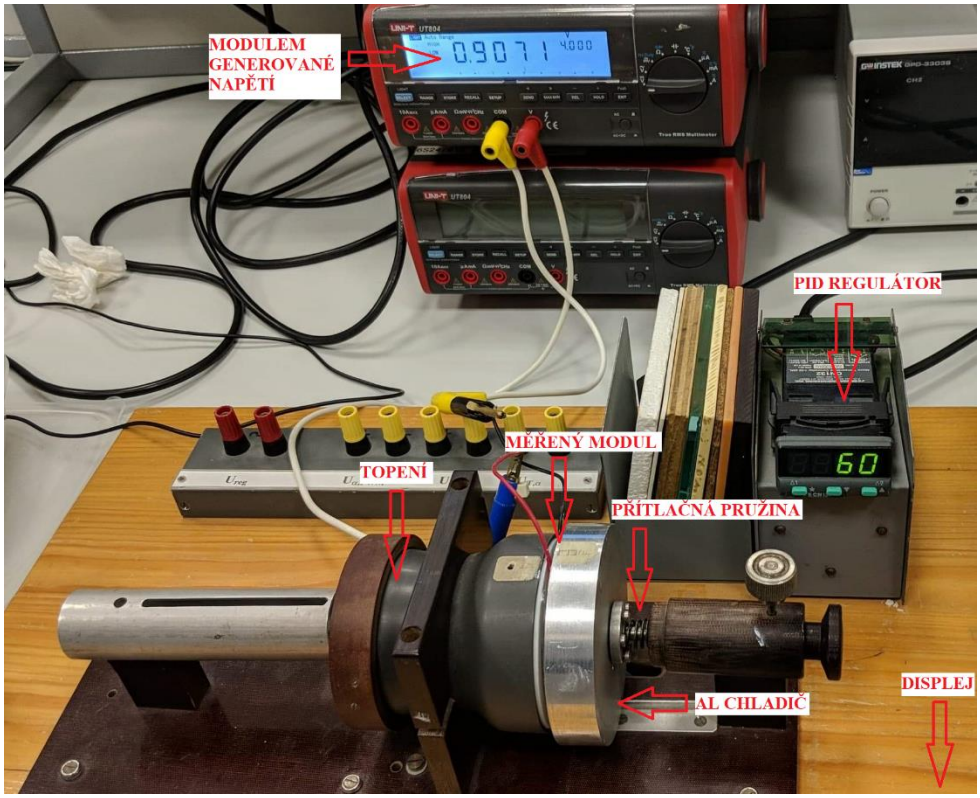
Pro testování byly vybrány moduly uvedené v Tab. 6.1. V tabulce jsou také uvedeny jejich parametry při teplotě teplé strany modulu 25 °C, kde *Ri* značí vnitřní elektrický odpor [Ω], *d* výšku modulu [m] a *Qc* chladící výkon [W].

Tab. 6.1 Vybrané TEC moduly a jejich parametry

Typ	Ri [Ω]	d [mm]	Qc [W]	Počet termoelementů [-]	Rozměr [mm]	Cena [Kč]
TEC1-127140S	0,94	3,2	122	127	40x40	441
TEC1-127030S	4,37	4,2	26,4	127	40x40	238
TEC1-071080S	0,86	3,3	38,5	71	30x30	171
TES1-127040S	3,4	3,2	33,4	127	30x30	199

6.1 Měření tepelného odporu

Na univerzitě je dostupný přípravek pro měření tepelného toku vzorkem určitého materiálu. Ten je pro účel měření tepelného odporu dostačující. Přípravek je vybaven topením, jehož teplota je nastavitelná a regulovaná regulátorem PID. Dále obsahuje snímač tepelného toku a Al chladič, který je na měřený vzorek přitlačován pružinou. Na displeji, který je součástí přípravku se zobrazuje teplota chladiče, teplota vyhřívané strany a napětí na snímači tepelného toku, jehož citlivost je 921 $W \cdot m^{-2}/mV$ (tzn. jeden mV na výstupu snímače odpovídá hustotě tepelného toku 921 $W \cdot m^{-2}$).



Obr. 6.1 Uspořádání s přípravkem pro měření tepelného odporu vybraných modulů

V Tab. 6.2 jsou naměřené a vypočítané hodnoty, kterých bylo dosaženo při určování tepelného odporu modulu. *T1* značí teplotu na teplé straně modulu [°C], *T2* teplotu na studené straně modulu [°C], *ΔT* rozdíl teplot [°C], *UG* napětí generované modulem [V], *Up* napětí naměřené snímačem tepelného toku [mV], *Φ* hustotu tepelného toku [W/m²], *d* výšku modulu [mm], *S* plochu modulu [m²], *λ* měrnou tepelnou vodivost modulu [W/(m·K)] a *Rt* tepelný odpor měřeného modulu [K/W].

Tab. 6.2 Měření tepelného odporu vybraných modulů

Typ	TEC1-127140S	TEC1-127030S	TES1-127040S	TEC1-071080S
T1 [°C]	60	61	62,5	61,6
T2 [°C]	28,8	26,1	31,4	30,2
ΔT [°C]	31,2	34,9	31,1	31,4
UG [V]	0,491	1,1684	0,907	0,4177
Up [mV]	8,17	4,83	6,26	5,89
Φ [W/m²]	7524,57	4448,43	5765,46	5424,69
d [mm]	3,2	4,2	3,2	3,3
S [m²]	0,0016	0,0016	0,0009	0,0009
λ [W/(m·K)]	0,77	0,54	0,59	0,57
Rt [K/W]	2,59	4,90	5,99	6,43

6.1.1 Příklady výpočtů pro první sloupec Tab. 6.2

$$\Delta T = T1 - T2 = 60 - 28{,}8 = 31{,}2\ °C \tag{6.1}$$

$$\Phi = 921 \cdot Up = 921 \cdot 8{,}17 = 7524{,}57\ \frac{W}{m^2} \tag{6.2}$$

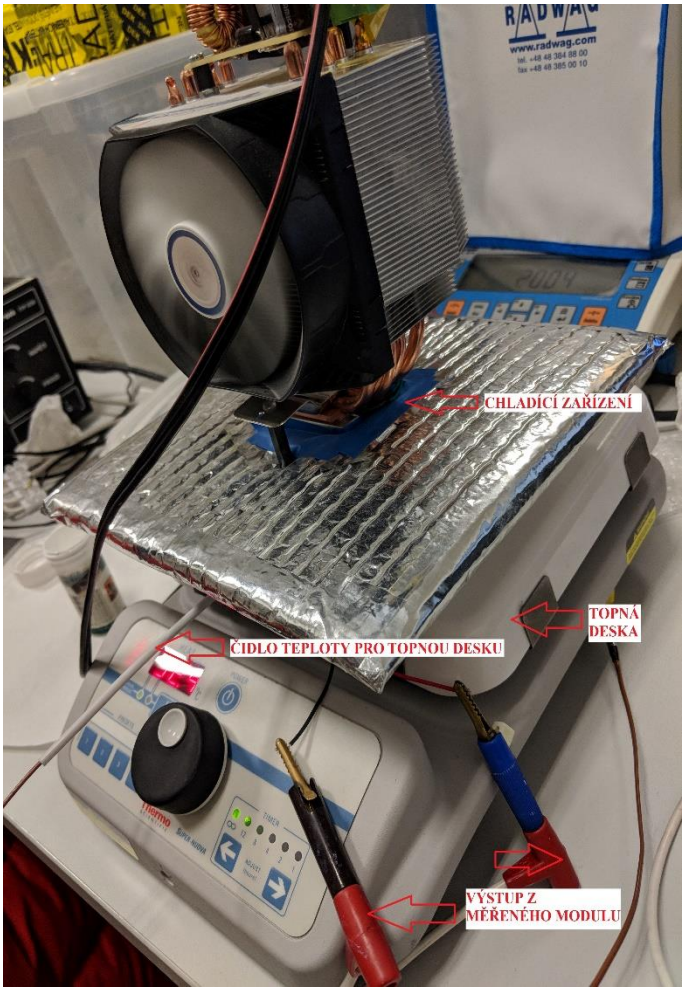
$$S = (40 \cdot 10^{-3})^2 = 0{,}0016\ m^2 \tag{6.3}$$

$$\lambda = \frac{\Phi \cdot d}{\Delta T} = \frac{7524{,}57 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-3}}{31{,}2} = 0{,}77\ \frac{W}{mK} \tag{6.4}$$

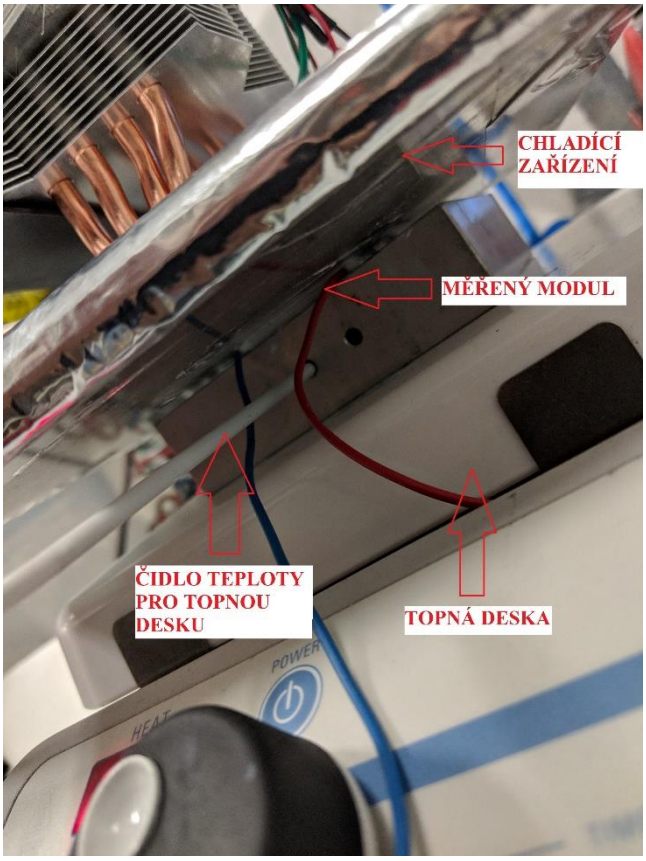
$$Rt = \frac{d}{S \cdot \lambda} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}0016 \cdot 0{,}77} = 2{,}59\ \frac{K}{W} \tag{6.5}$$

6.2 Měření závislosti generovaného napětí na rozdílu teplot

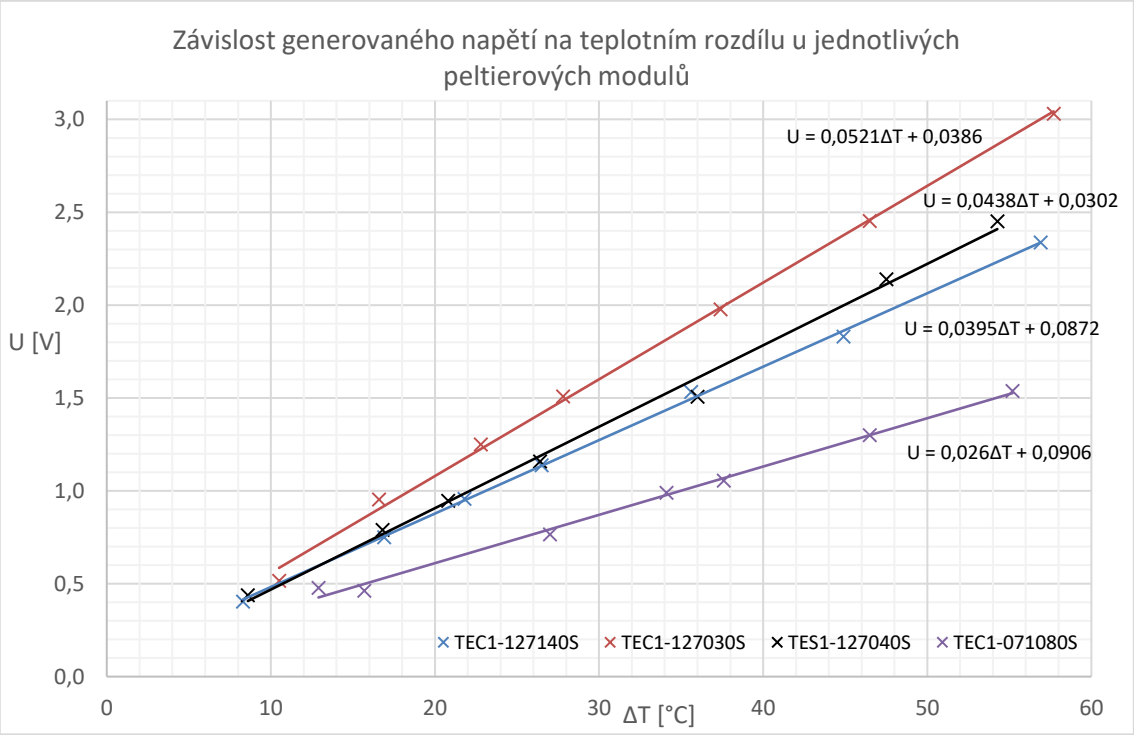
Při měření závislosti generovaného napětí na rozdílu teplot, byla pro zahřívání teplé strany modulu použita topná deska s nastavitelnou teplotou. Pro chlazení studené strany bylo využito chladící zařízení s peltierovým modulem, jehož teplota je programově nastavitelná.



Obr. 6.2 Uspořádání při měření závislosti generovaného napětí na rozdílu teplot



Obr. 6.3 Uspořádání při měření závislosti generovaného napětí na rozdílu teplot detail



Obr. 6.4 Graf naměřené závislosti generovaného napětí na teplotním rozdílu u jednotlivých peltierových modulů

6.3 Závěr z měření

Při porovnání naměřených hodnot u modulů TEC1-127140S a TES1-127040S je zřejmé, že velikost generovaného napětí není závislá na ploše modulu. Dále je z Obr. 6.4 zřejmé, že generované napětí je tím menší, čím menší počet termoelementů modul obsahuje. Příkladem je TEC1-071080S, který má oproti ostatním pouze 71 termoelementů (ostatní mají 127). Protože jsou termoelementy s největší pravděpodobností zapojené do série, můžeme napětí generované TEC1-071080S přepočítat tak, aby bylo možné zjistit, jaké napětí by generoval, kdyby obsahoval 127 termoelementů. Přepočet lze provést podle: $U2 = \frac{U1}{71} \cdot 127 = \frac{1{,}5}{71} \cdot 127 = 2{,}68\ V$, kde *U1* je původní napětí se 71 termoelementy a *U2* je přepočítané napětí se 127 termoelementy. Z výsledku vyplývá, že přepočítané napětí by bylo téměř shodné s napětím ostatních modulů. Z měření také vyplývá nezávislost generovaného napětí na vnitřním elektrickém odporu modulu. Tento závěr je vysvětlitelný tím, že pokud připojíme k modulu pouhý voltmetr s vysokým vstupním odporem, který je přibližně 10 MΩ, proud obvodem bude nulový a na vnitřním elektrickém odporu nevznikne žádný úbytek napětí. Modul se tedy chová jako zdroj napětí naprázdno. Na velikost generovaného napětí bude mít nejspíše vliv materiál, ze kterého jsou jednotlivé termoelementy vyrobeny, ovšem u vybraných typů není tento údaj uveden, proto není možné zmíněnou úvahu ověřit. Podle výsledků všechny typy, při stejném teplotním rozdílu, generují velmi podobné napětí.

Hlavním parametrem při výběru vhodného TEC tedy bude tepelný odpor samotného modulu. A to z důvodu přenosu tepla z jedné strany modulu na druhou. Čím vyšší tepelný odpor bude mít, tím lze dosáhnout většího teplotního rozdílu na obou stranách TEC (teplo z teplé strany se bude méně přenášet na studenou stranu modulu), a tedy vygenerované napětí a tím i citlivost čidla bude vyšší. Protože většinou výrobci u TEC modulu zmíněný údaj neuvádí, lze toto zjištění s určitou rezervou zjednodušit. Ve většině případů bude platit, že čím bude modul vyšší a mít menší plochu, tím větší jeho tepelný odpor bude.

Na základě provedeného měření má modul TEC1-071080S největší tepelný odpor a byl by tedy vhodným kandidátem, ale protože obsahuje pouze 71 termoelementů, bylo by jeho vygenerované napětí mnohem menší než u modulu TES1-127040S, který má druhý největší tepelný odpor, proto jsem zvolil ten. Pro udržení teplotního rozdílu při měření slunečního záření, bude nutné tento modul umístit na chladič. Ten musí mít menší tepelný odpor, než má samotný modul, aby zajistil spolehlivý odvod tepla, a udržoval tak studenou stranu modulu na teplotě okolí. U zvoleného TEC byl určen tepelný odpor 5,99 K/W. Chladič by měl mít tepelný odpor ideálně alespoň 10x menší, tedy 0,6 K/W. Ovšem kvůli vysokým cenám chladičů s takto nízkým tepelným odporem, jsem udělal kompromis a vybral chladič s názvem SK 89/100/SA, který má tepelný odpor 0,7 K/W a jeho cena je 360

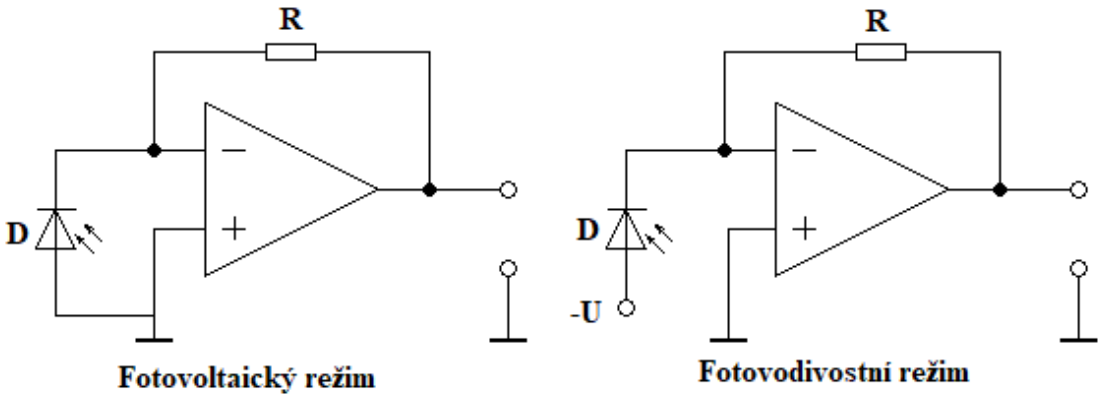
Kč. Pokud by byl pro odvod tepla nedostatečný, musel by se použít přídavný ventilátor, který by napomáhal studenou stranu udržovat na teplotě okolí.

7 MĚŘICÍ OBVOD PRO FOTODIODU

Protože budu porovnávat naměřený signál z TEC modulu také s fotodiodou, musím pro fotodiodu navrhnout měřicí obvod.

Fotodiody generují malý proud, který je přímo úměrný intenzitě osvětlení. Z důvodu linearity je proud nakrátko často používán jako měřítko absolutních úrovní světla. Napětí naprázdno na fotodiodě roste přibližně logaritmicky s intenzitou osvětlení a kvůli velkému teplotnímu koeficientu se napětí naprázdno používá jen zřídka pro přesné měření světelné intenzity [22].

Pro měření proudu nakrátko generovaného fotodiodou je vhodné tento proud převést na napětí pomocí operačního zesilovače. Používá se zapojení převodníku proudu na napětí, jak je zobrazeno na Obr. 7.1. Fotodiody mohou být provozovány s nulovým předpětím, tedy ve fotovoltaickém režimu nebo ve fotovodivostním režimu s malým předpětím, jak je zobrazeno na Obr. 7.1 [22].



Obr. 7.1 Zapojení převodníku proudu na napětí s fotodiodou

Nejpřesnější lineární provoz je dosažen ve fotovoltaickém režimu, zatímco vysoké spínací rychlosti jsou dosažitelné pouze ve fotovodivostním režimu, kde se ovšem projevuje nelinearita. Ve fotovoltaickém režimu není žádný proud za tmy, zatímco ve fotovodivostním ano. Proud za tmy je proud, který teče diodou při nulové intenzitě osvětlení [22].

Pro měření intenzity slunečního záření bude mnohem důležitější lineární závislost proudu na osvětlení než dosažení vysokých spínacích rychlostí. Proto použiji zapojení fotodiody ve fotovoltaickém režimu.

Při výběru vhodného operačního zesilovače je důležitým parametrem jeho klidový proud, který by měl být alespoň o dekádu menší, než je proud fotodiody při minimální dopadající intenzitě. Dále offset operačního zesilovače by měl být co nejmenší. Pro tyto účely se nejvíce hodí unipolární operační zesilovače s technologií BiFET. V případě nedostupnosti symetrického napájení jsou částečně nahraditelné operačními zesilovači s technologií LinCMOS.

Velikost zpětnovazebního odporu určíme podle požadovaného výstupního napětí.

$$R = \frac{Uvýst}{Imax}\ [\Omega] \tag{7.1}$$

, kde *Imax* je proud generovaný fotodiodou při maximální možné intenzitě slunečního záření (většinou je to asi 1000 W/m^2) [A] a *Uvýst* je výstupní napětí operačního zesilovače [V]. S tím, že musíme brát ohled na maximální možné výstupní napětí operačního zesilovače, které je omezeno jeho napájecím napětím.

Kvůli stabilitě celého obvodu se připojuje paralelně ke zpětnovazebnímu rezistoru kompenzační kondenzátor *Ck,* jehož hodnota se určí podle rovnice (7.2) [23].

$$Ck = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R \cdot fc} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot Ci \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot fc}\right)\ \ [F] \tag{7.2}$$

, kde *R* je hodnota zpětnovazebního rezistoru [Ω], *fc* je gain-brandwidth product operačního zesilovače [Hz] a *Ci* je součet kapacity fotodiody a kapacity na vstupech operačního zesilovače [F].

Kompenzační kondenzátor by měl mít dielektrikum z polypropylenu. Zpětnovazební rezistor by měl být bezindukční a všechny připojení ke vstupům OZ co nejkratší. Při použití vodiče pro připojení fotodiody se doporučuje, aby byl vodič co nejkratší a s teflonovou izolací [22].

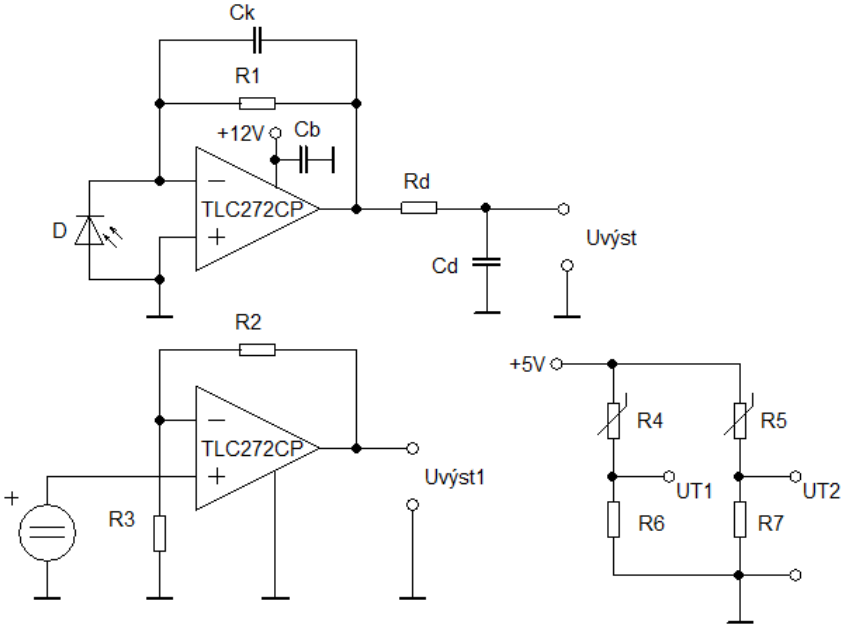
8 ZAPOJENÍ CELKOVÉHO MĚŘICÍHO OBVODU

V šesté kapitole jsem jako čidlo snímače zvolil chladící modul TES1-127040S. Na základě mého předpokladu, že na obou stranách modulu bude dosaženo teplotního rozdílu maximálně 4 °C, mohu podle Obr 6.4 určit maximální předpokládanou velikost generovaného napětí. Tato velikost se pohybuje kolem hodnoty 200 mV. Pro měření výstupního napětí z modulu využiji měřicí kartu USB-6008 od společnosti National Instruments. Analogový vstup této karty dovoluje měřit napětí do hodnoty maximálně 10 V. Pro dosažení co nejlepších výsledků, a tedy využití celého měřicího rozsahu karty, je potřeba signál z modulu zesílit celkem 50 krát. Za tímto účelem využiji neinvertujícího zapojení s operačním zesilovačem.

V obvodu bude také jako doplňkový senzor použita fotodioda BPW34. Na základě parametrů této fotodiody jsem s využitím sedmé kapitoly zvolil operační zesilovač TLC272CP typu LinCMOS. Ten současně využiji pro zesílení signálu z chladícího modulu.

Součástí měřicího obvodu budou také dva NTC termistory v zapojení napěťového děliče. Tyto termistory využiji pro měření okolní teploty uvnitř krytu snímače a měření teploty chladiče, na němž bude umístěna studená strana TEC modulu. Zvolený typ termistorů je NTC 640-10K s odporem 10 kΩ při teplotě 25 °C.

Na Obr 8.1 je celkové schéma měřicího obvodu. Napětí *UT1* a *UT2* značí výstupní napětí z děliče, jejichž velikost je závislá na hodnotě odporu termistorů a tedy na teplotě. Dále *Uvýst* značí výstupní signál z převodníku proudu na napětí, tj. signál z fotodiody a *Uvýst1* značí zesílené napětí, které generuje chladící modul TES1-127040S. Hodnoty použitých součástek jsou uvedeny v Tab. 8.1.



Obr. 8.1 Schéma zapojení celkového měřicího obvodu

Tab. 8.1 Seznam součástek použitých v celkovým měřicím obvodu

Označení	hodnota	Označení	hodnota
TLC272CP		R7	10 kΩ
R1	2 kΩ	Rd	2 kΩ
R2	51 kΩ	Ck	82pF/50V
R3	1 kΩ	Cb	100nF/50V
R4	NTC 10 kΩ	Cd	1 µF/50V
R5	NTC 10 kΩ	D	BPW34
R6	10 kΩ	Zdroj	TES1-127040S

8.1 Výpočet hodnot použitých součástek

8.1.1 Blokovací kondenzátor

Blokovací kondenzátor Cb je v obvodu zapojený, aby zabránil průniku vysokofrekvenčního rušení od napájení a zlepšil stabilitu napájecího napětí. Kondenzátor se zpravidla umisťuje v těsné blízkosti k napájecímu pinu operačního zesilovače a jeho hodnota se nejčastěji volí 100 nF.

8.1.2 Neinvertující zesilovač pro chladící modul

Požadované napěťové zesílení *Ku* má mít na základě předpokladu z osmé kapitoly hodnotu 50.

$$Ku = 1 + \frac{R2}{R3} = 50\ [-] \tag{8.1}$$

$$\frac{R2}{R3} = 49\ [-] \tag{8.2}$$

Odpor rezistoru *R3* zvolím 1 kΩ, pak bude odpor rezistoru *R2* 49 kΩ, ovšem tato hodnota odporu není v řadě, proto zvolím hodnotu 51 kΩ.

8.1.3 Napěťový dělič pro NTC termistory

Při návrhu hodnot rezistorů *R6* a *R7* se musí brát v potaz zatěžovací konstanta termistoru *D* [W/K]. Ta udává hodnotu elektrického příkonu potřebného k ohřátí termistoru o 1 °C. Aby se tedy zbránilo ohřevu termistoru vlivem procházejícího proudu, musí se zvolit odpory rezistorů tak, aby příkonu udávaného zatěžovací konstantou D nebylo nikdy dosaženo.

V datasheetu NTC termistoru je uvedena zatěžovací konstanta 7 mW/K. Maximální předpokládaná hodnota odporu termistoru je 42 157 Ω. Této hodnoty se dosáhne při teplotě -10 °C. Napájecí napětí děliče bude 5 V. Maximální dovolený proud lze spočítat následovně:

$$Imax = \sqrt{\frac{D}{Rmax}} = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{-3}}{42157}} = 4{,}07 \cdot 10^{-4}\ A \tag{8.3}$$

Požadovaný odpor při napájecím napětí 5 V bude:

$$R = \frac{U}{Imax} = \frac{5}{4{,}07 \cdot 10^{-4}} = 12\,285\ \Omega \tag{8.4}$$

Protože odpor termistoru klesne pod 2500 Ω až při překročení teploty 60 °C (a této teploty by se na termistoru nemělo nikdy dosáhnout), zvolím pro rezistory *R6* a *R7* velikost odporu 10 kΩ. Součet odporu termistoru a rezistoru *R6* nebo *R7* bude tedy vždy větší než 12 285 Ω a nebude tak docházet k samovolnému ohřevu žádného z termistorů.

8.1.4 Převodník proudu na napětí pro fotodiodu

Z datasheetu fotodiody byla zjištěna její hodnota kapacity *CD* 70 pF, plocha *S* 7,5 mm^2 a citlivost *K* 0,67 A/W, při vlnové délce dopadajícího záření 950 nm. Dále z datasheetu operačního zesilovače jeho kapacita je *Cin* 12 pF a gain-brandwidth product *fc* 2,2 MHz.

Požadovaná maximální hodnota výstupního napětí, z důvodu využití celého měřicího rozsahu karty, je *Uvýst* 10 V. Předpokládaná maximální hodnota intenzity slunečního záření je *Iemax* 1000 W/m2.

Určení velikosti zpětnovazebního odporu (s využitím rovnice 7.1):

$$Uvýst = R1 \cdot Imax = 10V \tag{8.5}$$

$$Imax = Iemax \cdot S \cdot K = 1000 \cdot 7{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}67 = 5{,}025\ mA \tag{8.6}$$

$$R1 = \frac{Uvýst}{Imax} = \frac{10}{5{,}025 \cdot 10^{-3}} = 1990\ \Omega => 2\ \text{k}\Omega \tag{8.7}$$

Kapacita kompenzačního kondenzátoru (s využitím rovnice 7.2):

$$Ck = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R1 \cdot fc} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot (Cin + CD) \cdot 2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot fc}\right) = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 2000 \cdot 2{,}2 \cdot 10^6} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot (82 * 10^{-12}) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2000 \cdot 2{,}2 \cdot 10^6}\right) = 75\ pF => 82\ pF \tag{8.8}$$

8.1.5 Dolní propust za převodníkem proudu na napětí

Po otestování obvodu, kdy na výstupu převodníku proudu na napětí nebyla zapojená dolní propust, bylo výstupní napětí silně zašuměné signálem o kmitočtu 10kHz až 100 kHz (frekvence byla závislá na velikosti proudu generovaném fotodiodou). Toto rušení se také indukovalo do ostatních čidel a naměřené průběhy byly silně kmitavé. Z tohoto důvodu jsem pro odfiltrování rušivého signálu navrhl dolní propust, která vysoké kmitočty nepropustí.

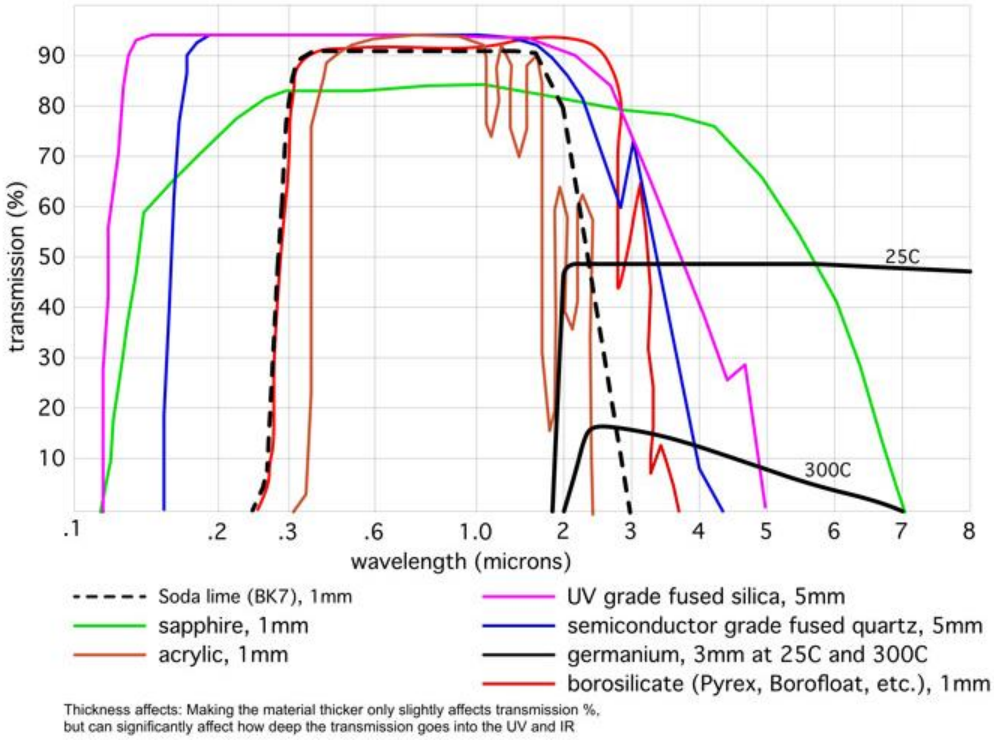
Dolní propust je, kvůli předpokládané velmi nízké frekvenci měřeného signálu, navržena pro mezní kmitočet *fm* 80 Hz.

Rezistor *Rd* jsem zvolil 2 kΩ a kapacita kondenzátoru *Cd* má hodnotu:

$$Cd = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Rd \cdot fm} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2000 \cdot 80} = 1\ \mu F \tag{8.9}$$

9 VÝBĚR VHODNÉHO MATERIÁLU PRO KRYCÍ KOPULI

Za účelem ochrany senzoru před působením vnějších vlivů, je nutné použít krycí materiál. Ten by měl být podle třetí kapitoly ve tvaru duté polokoule. Zmíněný tvar zaručí zorný úhel 180° a napomůže stékání spadlé rosy či dešťové vody, na jejichž kapičkách by docházelo k odrazu dopadajícího záření. Dalším požadavkem na krycí materiál je jeho spektrální propustnost, tj. schopnost propustit veškeré vlnové délky, ze kterých je spektrum slunečního záření složeno. Aby nedošlo k omezení měřicího rozsahu čidla, je splnění tohoto požadavku zásadní.



Obr. 9.1 Spektrální charakteristika vybraných materiálů [24]

Z Obr 9.1 je možné usoudit, že z pohledu propustnosti může být pro krycí kopuli vhodným materiálem křemenné, borosilikátové nebo safírové sklo. První dvě zmíněná skla se využívají například pro výrobu chemických či lékařských pomůcek, safírové sklo se nejčastěji používá jako sklo do hodinek. Dalším ale už méně vhodným kandidátem pro krycí materiál je sodnovápenaté sklo. To se nejčastěji využívá pro výrobu láhví či sklenic a zároveň se jedná o nejběžněji používaný druh skla. Plexisklo, jakožto akrylátové sklo, má při vyšších vlnových délkách nestabilní spektrální charakteristiku, a proto je nevhodným materiálem pro krycí kopuli. Stejně tak není vhodné germaniové sklo, které se používá například v optických systémech termovizních kamer.

Z cenového hlediska a snazší dostupnosti krytu, je pro usnadnění výběru možné na základě předchozího odstavce s určitou rezervou říci, že většina

skleněných materiálů podmínce pro kryt vyhovují, naopak většina plastových materiálů podmínce pro výběr krycí kopule nevyhovují.

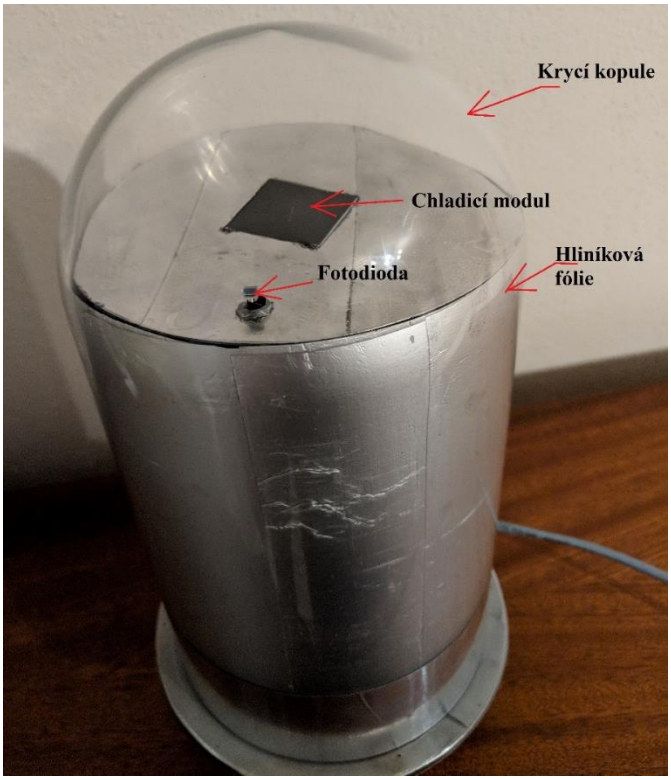
10 NÁVRH A REALIZACE KONSTRUKCE SNÍMAČE

Při realizaci konstrukce snímače s termoelektrickým článkem, který má být vhodný pro použití v provozních podmínkách je jedním z důležitých prvků krycí kopule. Ta má být podle deváté kapitoly skleněná. Jedním z vhodných kandidátů je kopule, jenž je primárně určena pro vystavení dekorací. Ta je velmi snadno dostupná a její cena je poměrně nízká. V obchodě IKEA byla koupena za 350 Kč.

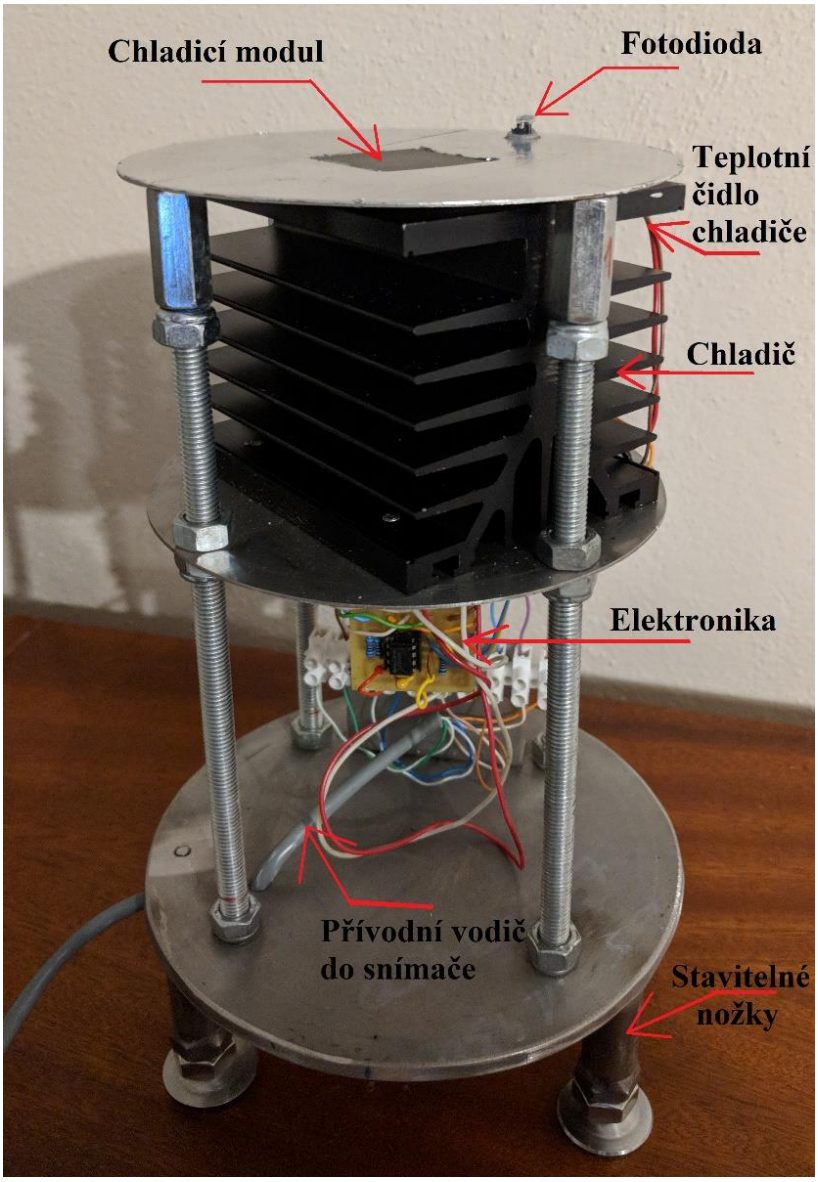
Zakoupená kopule je poměrně vysoká a pro účely měření ji bude nutné buď zaříznout nebo vyrobit vhodnou konstrukci pro umístění čidla v horní části této kopule.

Já se rozhodl pro výrobu vhodné konstrukce. Ta, jak již bylo zmíněno, musí být schopná zajistit umístění čidla v horní části kopule, dále pojmout elektroniku, chladič, zabránit vstupu vlhkosti pod skleněnou kopuli, ale také zabránit dopadu slunečního záření jinam než na citlivý prvek. S ohledem na stabilitu celého snímače jsem zvolil kovovou konstrukci a jako materiál použiji nerez. Pro odstínění dopadajícího slunečního záření použiji lepicí hliníkovou fólii a pro zabránění vstupu vlhkosti či dešťové vody pod kopuli zalepím spodní část snímače silikonovým tmelem.

Výsledná konstrukce je zobrazena na Obr. 10.1 a Obr 10.2.



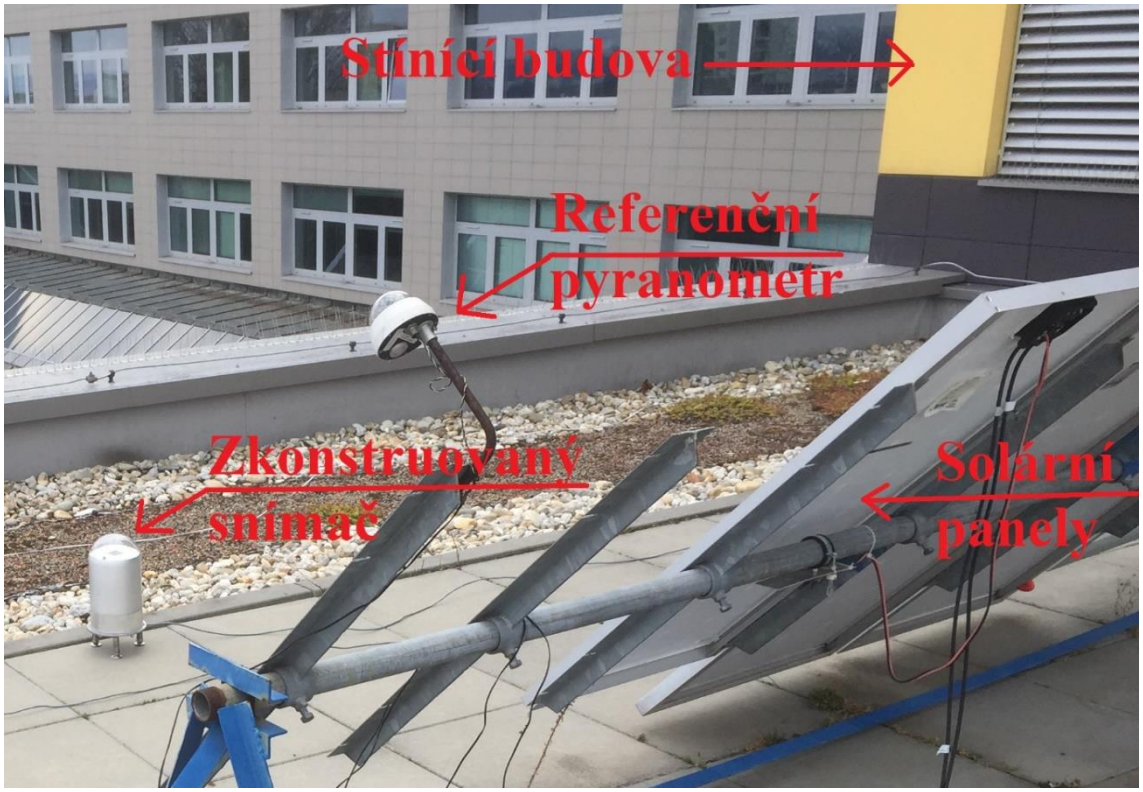
Obr. 10.1 Konstrukce snímače s krycí kopulí



Obr. 10.2 Konstrukce snímače bez krycí kopule

11 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI REALIZOVANÉHO SNÍMAČE

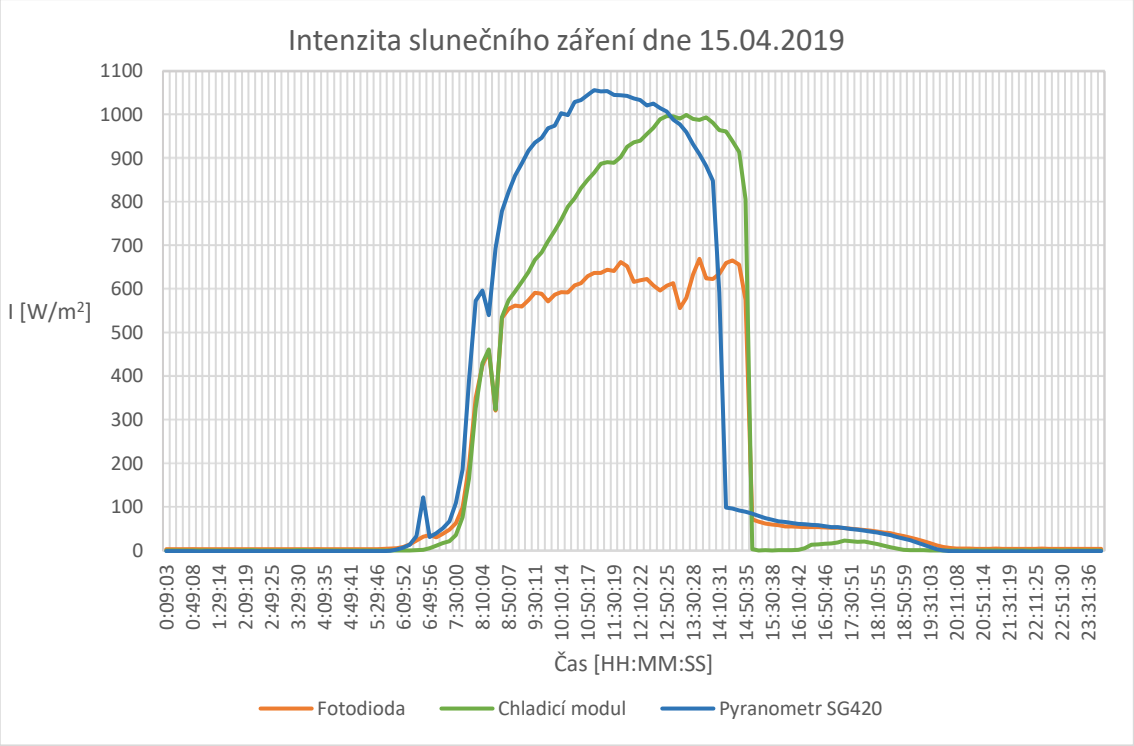
Pro ověření funkčnosti realizovaného snímače porovnám průběhy napětí naměřené na fotodiodě a chladícím modulu s hodnotami z profesionálního pyranometru. Na fakultě je k dispozici komerční pyranometr SG420, který je trvale umístěný na střeše budovy ústavu elektrotechnologie. Tento pyranometr slouží jako referenční snímač pro testování solárních panelů. Z tohoto důvodu je spolu se solárními panely ukotven pod úhlem 45°. Snímač zkonstruovaný v této práci bude vodorovně umístěn vedle zmíněných solárních panelů tak, aby jimi nebyl zastíněn. Protože se v těsné blízkosti na západní straně této střechy nachází vyšší budova, lze předpokládat, že bude na snímače v odpoledních hodinách vrhán stín. Tím dojde ke zkrácení užitečné denní doby pro měření intenzity slunečního záření. Umístění snímačů je zobrazeno na Obr. 11.1.



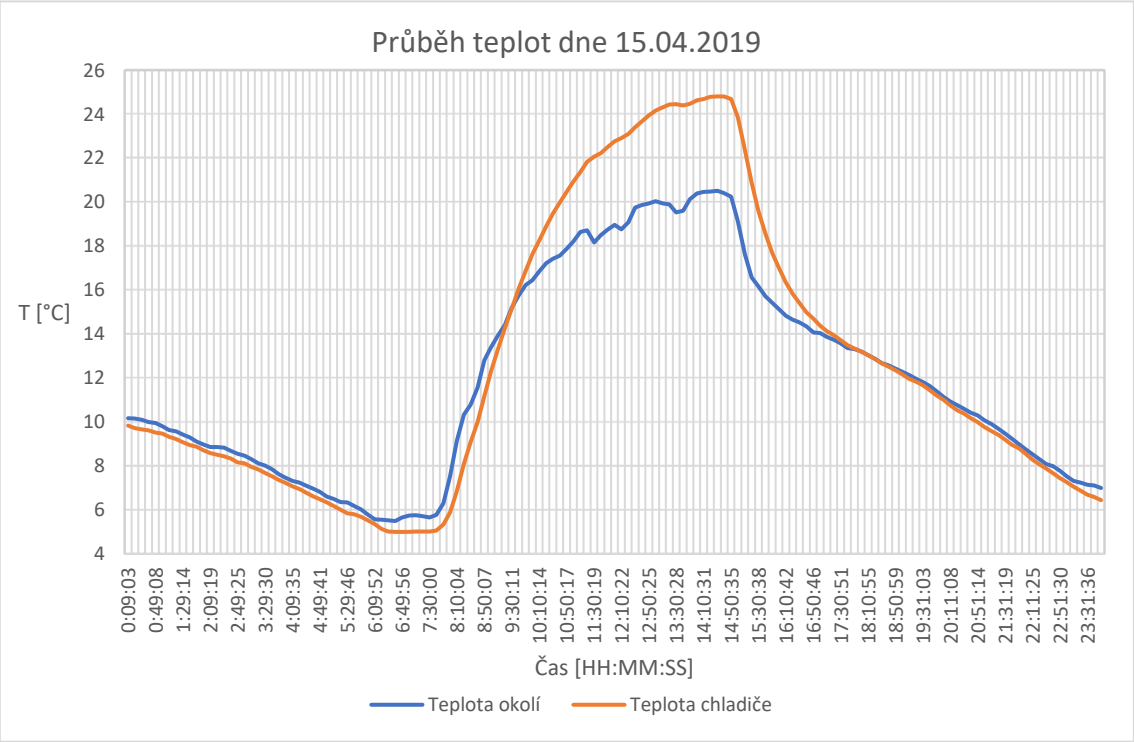
Obr. 11.1 Umístění snímačů na střeše budovy

První série měření probíhala mezi dny 29.03. až 16.04.2019, ovšem kvůli rozsahu této práce jsem zpracoval pouze některé z těchto dní. Průběhy ze dvou dnů této série měření jsou pro ukázku zobrazeny na Obr. 11.2, Obr. 11.3, Obr. 11.4 a na Obr 11.5. Na Obr. 11.2 jsou vyneseny průběhy intenzity slunečního záření naměřené během slunného dne. V následujícím grafu jsou vyneseny teploty z tohoto dne a další

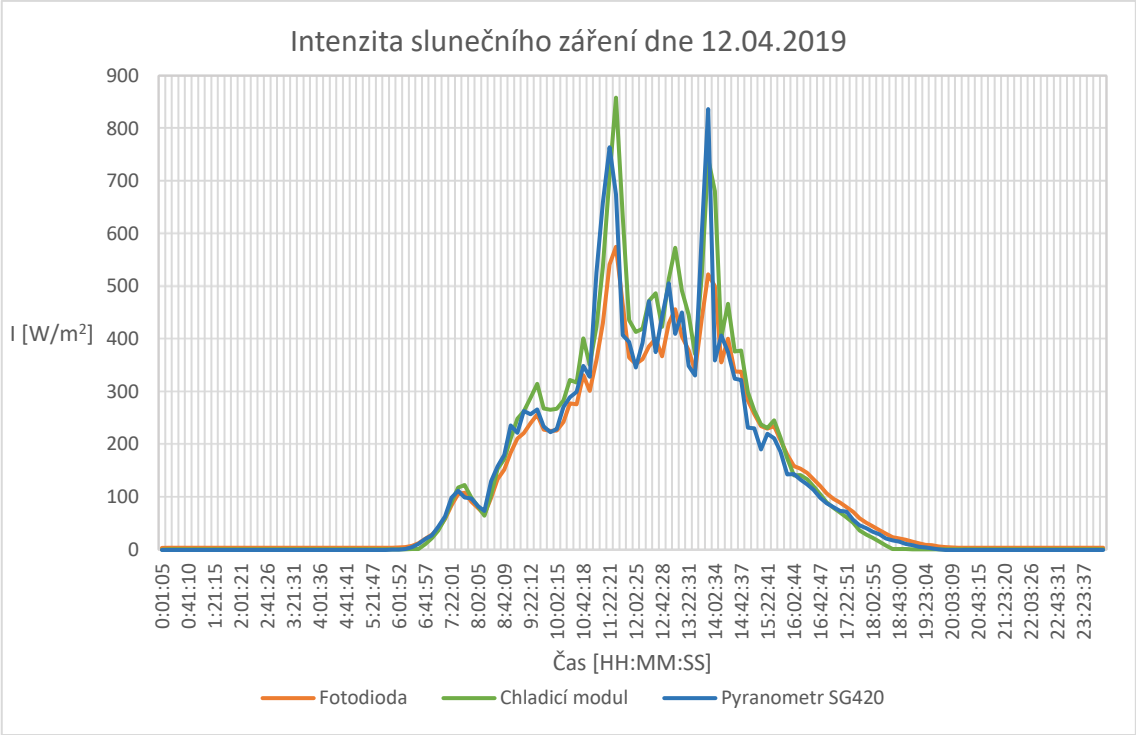
dva grafy znázorňují data naměřená během dne, kdy byla obloha pod mrakem. Ostatní zpracované dny jsou uvedeny v příloze této práce. Na výsledných průbězích nebyla dělána žádná korekce.



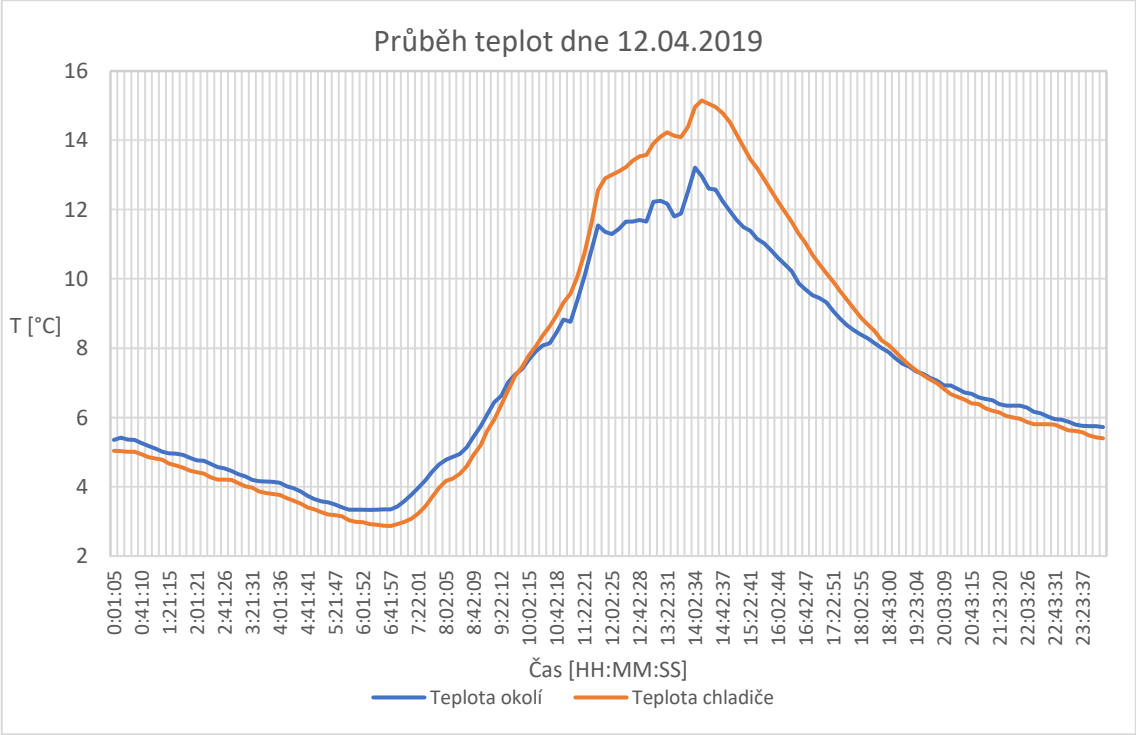
Obr. 11.2 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 15.04.2019



Obr. 11.3 Graf naměřených průběhů teplot během dne 15.04.2019



Obr. 11.4 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 12.04.2019



Obr. 11.5 Graf naměřených průběhů teplot během dne 12.04.2019

Jak je možné vidět na výše uvedených průbězích a průbězích uvedených v příloze, tak během každého slunného dne je viditelné zpoždění poklesu měřené intenzity mezi referenčním pyranometrem a zkonstruovaným snímačem. Tento pokles se u referenčního pyranometru zpravidla vyskytuje kolem druhé hodiny

odpolední a u zkonstruovaného snímače o hodinu později. Je to způsobené vrženým stínem od budovy, která stojí na západní straně střechy. Při pohybu Slunce směrem na západ dojde nejdříve k zastínění referenčního pyranometru a následně také k zastínění zkonstruovaného snímače.

Další viditelný rozdíl je v hodnotách intenzit naměřených fotodiodou a chladícím modulem. Při vyšších intenzitách slunečního záření je signál z fotodiody výrazně omezen. A protože maximální naměřené napětí na fotodiodě se během slunných dnů pohybuje kolem 6 V, je možné vyloučit vliv nedostatečného rozsahu měřicí karty či omezení výstupního signálu operačního zesilovače jeho napájecím napětím. Příčinou je pravděpodobně úzké pásmo citlivosti fotodiody, která již na vyšší vlnové délky dopadajícího záření nedokáže reagovat. Stejný jev je vidět na Obr 11.3. Fotodioda je tedy jako snímač intenzity slunečního záření při vyšších intenzitách nepoužitelná.

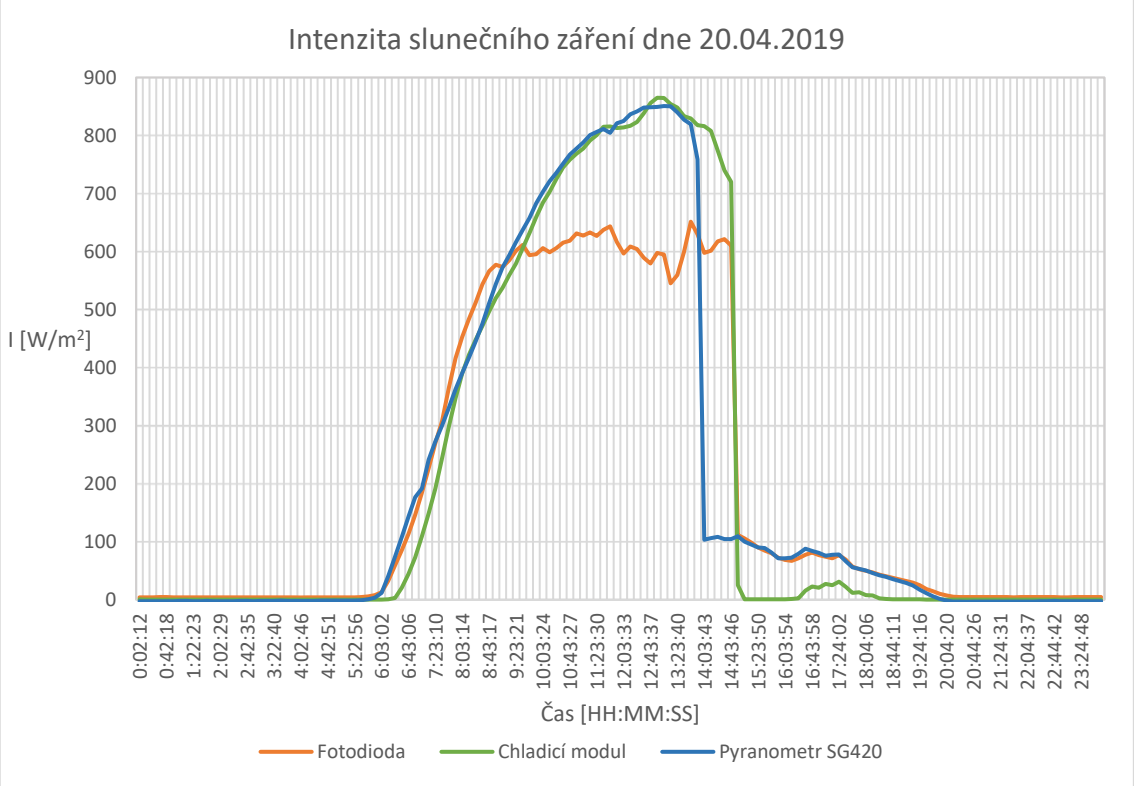
Další rozdíl je také zjevný v pozdních hodinách, kdy chladící modul ukazuje nulovou hodnotu intenzity a fotodioda kopíruje nenulový průběh referenčního pyranometru. To ovšem platí pouze za slunného dne. Ve dnech, kdy je obloha pod mrakem, dokáže chladící modul opět kopírovat průběh z referenčního pyranometru. Příčina, která jev způsobuje, nemůže být v nedostatečné spektrální propustnosti materiálu krycí kopule, protože by odfiltrování daných vlnových délek mělo vliv také na fotodiodu, což v tomto případě neplatí. Protože se jev vyskytuje pouze za slunných dnů je velmi pravděpodobné, že je způsobený opačným rozdílem teplot na modulu. Nahřátý chladič nedokáže v tak krátké době odvést dostatečné množství tepla a nahřívá tak studenou stranu modulu, která se díky zastíněnému Slunci stává teplejší než teplá strana modulu. To by způsobilo generování záporného napětí, ale protože je operační zesilovač napájen nesymetricky, nedokáže záporné napětí přenést na svůj výstup. Zmíněný předpoklad by tedy měli potvrzovat naměřené teploty, ovšem jejich hodnoty jej nepotvrzují. Důvodem je nejspíše hliníková fólie, která je nanesena na celém obvodu krycí kopule. Fólie tak zamezuje úniku tepla do okolí a drží vnitřní teplotu snímače oproti venkovní teplotě na vyšší hodnotě a tímto je naměřená teplota uvnitř krycí kopule zkreslena. Řešením problému by mohla být záměna hliníkové fólie za jiný stínící materiál, který by dostatečně odrážel sluneční záření a zároveň by neměl vliv na průběh teploty uvnitř snímače. Příkladem je nátěr bílé barvy.

Z naměřených průběhů je také viditelné, že během každého slunného dne je od ranních hodin až do 12:00 naměřená intenzita jak u fotodiody, tak u chladícího modulu oproti referenci oříznuta. Tento jev může být způsoben několika různými faktory. Jedním z nich může být odlišný náklon referenčního pyranometru a zkonstruovaného snímače. Mohlo by tak docházet k dopadu většího množství slunečních paprsků na referenci než na zkonstruovaný snímač. Dalším z faktorů,

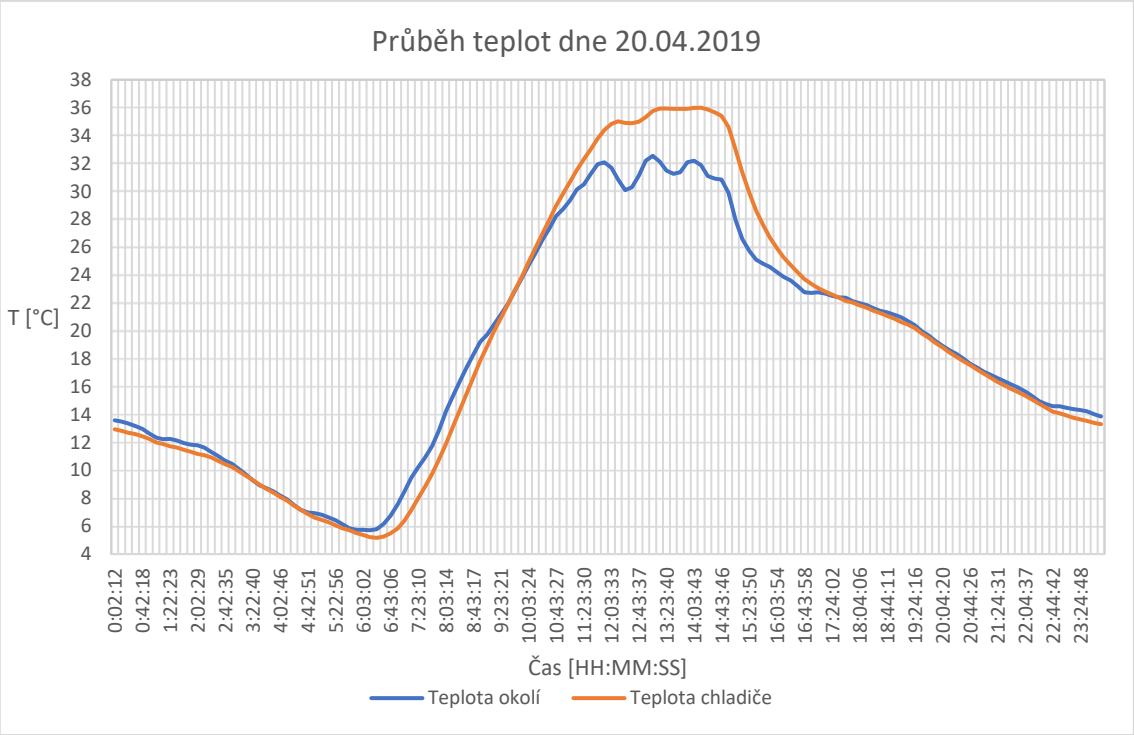
který by mohl tento jev způsobit, je nekvalitní opracování krycí kopule, ta má viditelně nehomogenní povrch. Stejně tak může mít vliv na průchod slunečních paprsků materiál skla, z něhož je krycí kopule vyrobena. Pokud by se jednalo o sodnovápenaté sklo, znamenalo by to, že od vlnových délek 2 µm a výše by bylo dopadající sluneční záření silně tlumeno. Další, ovšem méně pravděpodobný, vliv může mít zamlžení krycí kopule. Tento poslední bod nelze vyloučit, protože není známo, zda se kopule během ranních hodin zamlžuje. Je ovšem velmi málo pravděpodobné, že by zamlžení trvalo déle než 4 hodiny, a proto zde bude nejspíše jiný výše uvedený faktor, který oříznutí signálu způsobuje.

Jediné, co lze v tuto chvíli ovlivnit je natočení referenčního pyranometru do vodorovné polohy. Proto byla kontaktována jeho obsluha, která jej natočila do požadované pozice.

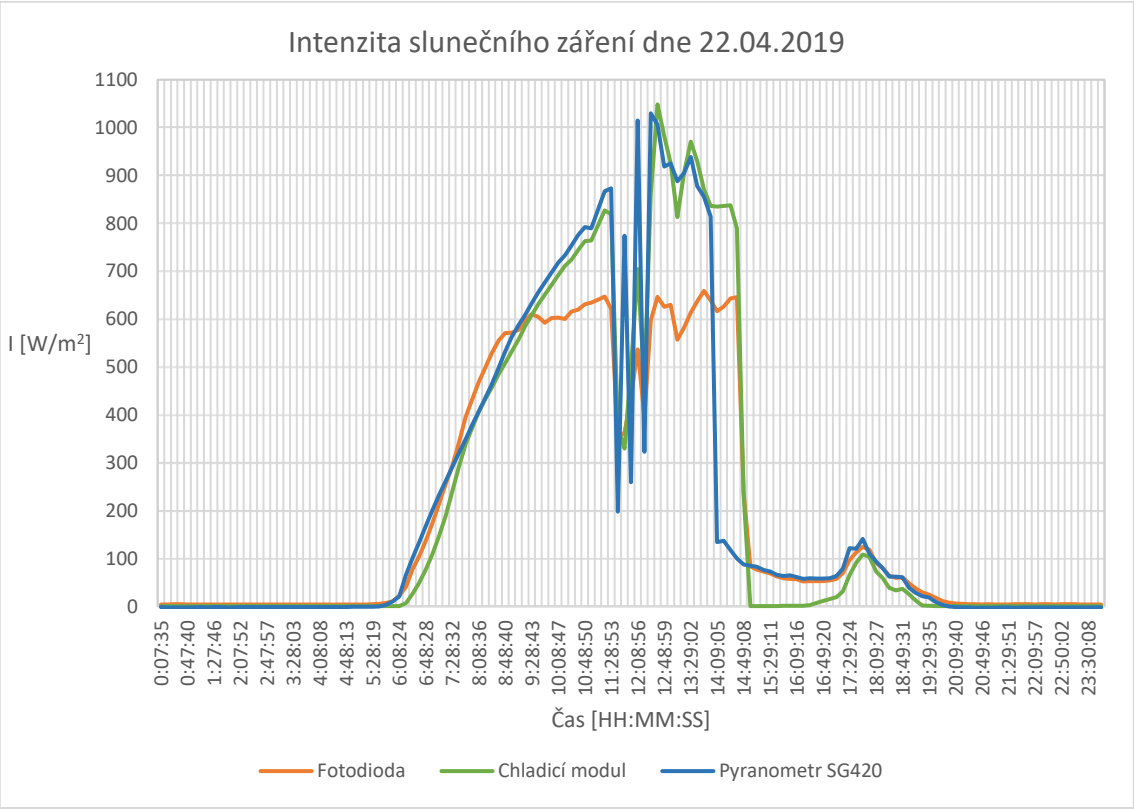
Následně proběhla druhá série měření, a to mezi dny 18.04 a 23.04.2019. Opět jsou zpracované pouze některé dny a dva z nich jsou zobrazeny na Obr 11.6, Obr.11.7, Obr.11.8 a Obr.11.9. Ostatní dny jsou uvedeny v příloze této práce. Opět nebyla na zobrazených průbězích provedena žádná korekce.



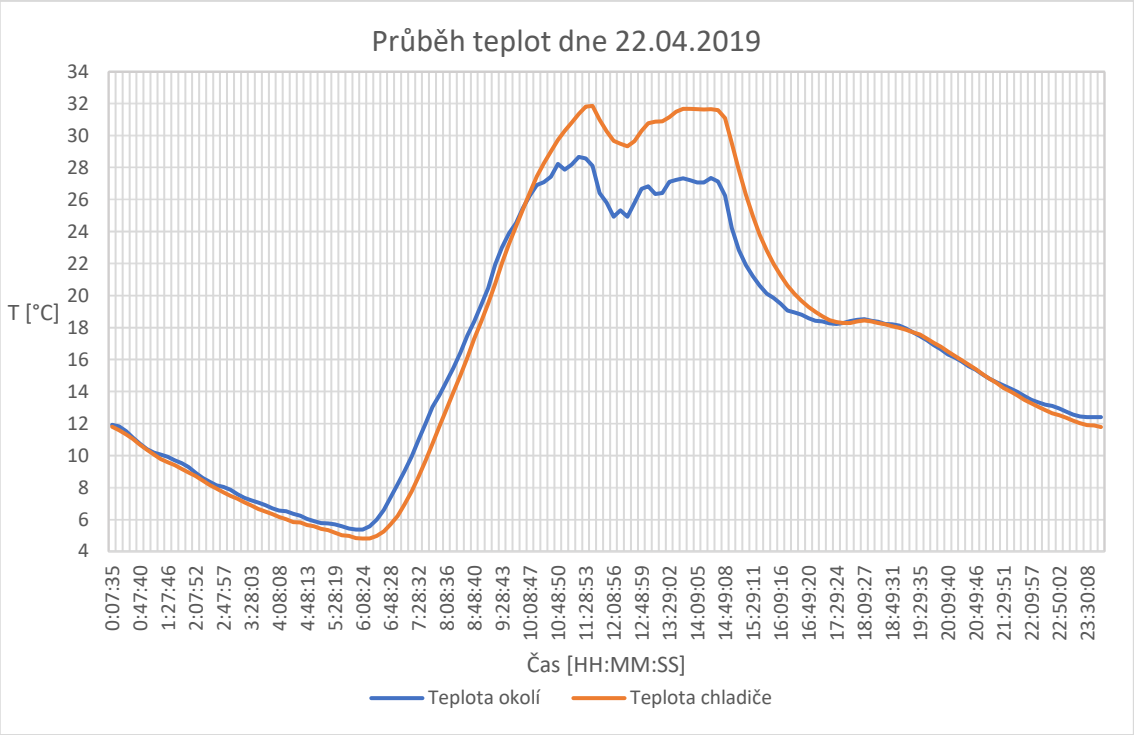
Obr. 11.6 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 20.04.2019



Obr. 11.7 Graf naměřených průběhů teplot během dne 20.04.2019



Obr. 11.8 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 22.04.2019



Obr. 11.9 Graf naměřených průběhů teplot během dne 22.04.2019

Z hodnot získaných ze druhé série měření je jasně viditelné zlepšení, co se týče oříznutého průběhu intenzity slunečního záření v ranních hodinách. Bylo tedy zcela dokázáno, že náklon přístroje má velký vliv na hodnotu naměřené intenzity. Zároveň byl také vyloučen vliv nedostatečné propustnosti materiálu současné krycí kopule a jejího zamlžení.

Průběh z fotodiody ovšem stále zůstává, kvůli její nedostatečné citlivosti v infračerveném spektru záření, omezený. A protože byla jako stínící materiál po obvodu krycí kopule ponechána hliníková fólie, která má jistý vliv na její vnitřní teplotu, není možné provést korekci opačných polarit teplot na chladícím modulu.

I přes všechny zmíněné nedostatky je již v této chvíli zřejmé, že zkonstruovaný snímač s chladícím modulem bude schopen s určitou odchylkou konkurovat profesionálnímu pyranometru SG420. Po dalších menších úpravách, jako je nahrazení hliníkové fólie jiným stínícím prvkem a následné korekci na rozdíl okolní teploty a teploty naměřené na chladiči, se pravděpodobně průběh chladícího modulu k průběhu referenčního pyranometru ještě více přiblíží.

11.1 Vyhodnocení provedeného měření

Z provedeného měření vyplývá, že je možné s využitím peltierova modulu sestavit jednoduchý snímač intenzity slunečního záření, který bude schopen v některých aplikacích nahradit drahé komerční pyranometry.

Byla navíc dokázána silná závislost naměřené intenzity na náklonu přístroje. Z tohoto důvodu je velmi důležité umisťovat snímač do vodorovné polohy. Stejně tak bylo dokázáno, že je peltierův modul, díky své schopnosti pokrýt celé spektrum slunečního záření, vhodnější čidlo než samotná fotodioda. V této aplikaci se navíc žádným způsobem neprojevila ani jeho desetkrát delší časová konstanta.

12 ZÁVĚR

Ve druhé kapitole bylo popsáno sluneční záření, jaké složky a jaké vlnové délky obsahuje. Třetí kapitola podrobně rozebírá, na jakém principu pracují termočlánkové a fotodiodové pyranometry a jakým problémům je nutné u těchto snímačů čelit. Protože Kipp&Zonen uvádí, že ve svých snímačích využívá peltierův modul, jsou následující kapitoly zaměřeny hlavně na ověření, zda je možné vyrobit levný pyranometr využívající právě peltierův modul. Ve čtvrté kapitole byl proveden průzkum, při kterém jsem nalezl dvě práce zabývající se touto problematikou. Autoři zmínili možnost využití TEC modulu, který je levnější a snadněji dostupný než modul TEG, jenž je primárně určený pro generování napětí na základě teplotního rozdílu. Pátá kapitola se tedy věnuje rozdílům mezi TEC a TEG moduly. Z kapitoly vyplývá, že rozdíl mezi TEC a TEG je pouze nepatrný a je teoreticky možné tyto dva moduly mezi sebou zaměnit. Abych toto tvrzení potvrdil, provedl jsem další průzkum, který se věnuje pracím, jenž prakticky ověřují toto tvrzení. Bylo dosaženo závěru, že pro teploty 0 °C až 100 °C jsou generovaná napětí těchto dvou modulů velice podobná, a tedy jejich záměna je možná. V šesté kapitole je prakticky ověřeno, jaký parametr je při výběru vhodného TEC modulu pro účely této práce důležitý. Z výsledků vyplývá, že nejdůležitějším parametrem je jeho tepelný odpor. Na základě tohoto zjištění byl vybrán vhodný TEC a k němu vhodný chladič. Protože bylo pravděpodobné použití fotodiody jako doplňkového čidla, věnuje se sedmá kapitola měřicím obvodům pro zpracování signálu z fotodiody. Následující kapitola pak popisuje návrh zapojení celkového měřicího obvodu snímače. Devátá kapitola se věnuje výběru vhodného materiálu pro krycí kopuli a je zavedeno zjednodušení, že zvolený materiál musí být skleněný. Plastové materiály jsou díky své nedostatečné propustnosti nevhodným materiálem. V desáté kapitole je popsán návrh a realizace konstrukce snímače. Volba kovové konstrukce se v průběhu měření potvrdila jako správná, protože dokázala udržet stabilní polohu snímače i při silnému větru. V poslední kapitole byla ověřena funkčnost zkonstruovaného snímače a z naměřených hodnot vyplývá, že fotodioda není vhodným kandidátem pro měření intenzity slunečního záření, a to hlavně při vysokých hodnotách intenzit. Aby bylo možné zkonstruovat snímač, kde bude hlavním senzorem fotodioda, je nutné použít několik druhů fotodiod, které společně pokryjí celé spektrum slunečního záření. Naproti tomu pelierův modul vyšel jako dobrý kandidát pro sestavení jednoduchého a levného snímače intenzity slunečního záření, který bude mít uplatnění například v aplikaci měření tepelného zisku budov, kde není zapotřebí vysoké přesnosti, jejž dosahují profesionální pyranometry.

13 LITERATURA

[1] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.

[2] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhu záření*.1.vyd. Praha: BEN, 2007. Senzory neelektrických veličin 5. díl. 192 s. ISBN 978-80-7300-193-3

[3] MATUŠKA, Tomáš. *Solární zařízení v příkladech*. 1. vyd. Praha: Grada, 2013, 254 s. ISBN 978-80-247-3525-2.

[4] VIGNOLA, Frank, Joseph MICHALSKY a Thomas L STOFFEL. *Solar and infrared radiation measurements*. Boca Raton, FL: CRC Press, c2012. ISBN 978-14-398-5189-0.

[5] Termoelektrický jev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikipedia Foundation, 11. 12. 2006, last modified on 04. 10. 2017 [cit. 2018-10-03]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Termoelektrick%C3%BD_jev

[6] The Working Principle of a Thermopile Pyranometer. In: *Kipp & Zonen* [online]. Delft, 2015 [cit. 2018-10-03]. Dostupné z: http://www.kippzonen.com/News/572/The-Working-Principle-of-a-Thermopile-Pyranometer#

[7] Lambert's cosine law. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikipedia Foundation, 25. 02. 2002, last modified on 06. 10. 2018 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lambert%27s_cosine_law

[8] Manual of the CM 21 pyranometer.In. *Kipp&Zonen* [online]. Delft, 2004 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: http://www.kippzonen.com/Download/52/CM-21-Pyranometer-Manual?ShowInfo=true

[9] Pyranometer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikipedia Foundation, 22. 12. 2004, last modified on 24. 05. 2018 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Pyranometer

[10] Black & White Pyranometer MODEL 8-48. In: *The Eppley Laboratory INC* [online]. Newport, c1917-2018 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: http://www.eppleylab.com/wp-content/uploads/pdf/EPPLEY160919-8-48-Diffuse.pdf

[11] HAFID, Abdel Akram; MEDDAH, Karim; ATTARI, Mokhtar; REMRAM, Youcef. *A Thermopile Based Pyranometer for Large Spectrum Sunlight Measurement*. In: Conference: International Conference on EMBEDDED SYSTEMS in TELECOMMUNICATIONS and INSTRUMENTATION [online]. Annaba, 2014

[cit. 2018-10-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/295703324

[12] RAHBAR, Nader a Amin ASADI. Solar intensity measurement using a thermoelectric module; experimental study and mathematical modeling. *Energy Conversion and Management* [online]. Elsevier, 2016, 129(C), 344-353 [cit. 2018-10-25]. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.10.007. ISSN 0196-8904. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416309050?via%3Dihub

[13] REICHL, Jaroslav. *Encyklopedie fyziky: Termoelektrické články* [online]. c2006 – 2018. Poslední změna 2009-02-19, [cit. 2018-20-25]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/909-termoelektricke-clanky

[14] BRÁZDIL, M. *Peltierovy články pro výrobu elektrické energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/handle/11012/1167

[15] MÜLLER, Petr. *Použití Peltierových článků pro tepelné cyklování.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Šandera, Ph.D.. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=54744

[16] KOZÁK, Jan. *Termoelektrický generátor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=38175

[17] BRÁZDIL, Marian. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/9794

[18] MARCEL, Radek. *Využití termoelektrických jevů v elektrotechnice*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2014. 58s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Krpal. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/handle/11025/15299

[19] MACH, Jiří. *Nouzové napájecí zařízení s termoelektrickým generátorem.* Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, 2015. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Adam Bouřa, Ph.D. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/handle/10467/61817

[20] NESARAJAH, Marco a Georg FREY. Thermoelectric power generation: Peltier element versus thermoelectric generator. In: *Industrial Electronics Society, IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE* [online]. IEEE, 2016, s. 4252-4257 [cit. 2018-10-25]. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793029. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/7793029

[21] CHEN, Wei-Hsin, Chen-Yeh LIAO, Chen-I HUNG a Wei-Lun HUANG. Experimental study on thermoelectric modules for power generation at various operating conditions. *Energy* [online]. Elsevier, 2012, **45**(1), 874-881 [cit. 2018-10-25]. DOI: 10.1016/j.energy.2012.06.076. ISSN 0360-5442. Dostupné z: https://ieeexplore.ieee.org/document/7793029

[22] DEVICES, Analog. Practical design techniques for sensor signal conditioning: HIGH IMPEDANCE SENSORS. Norwood, Mass: Analog Devices, 1999. ISBN 09-165-5020-6.

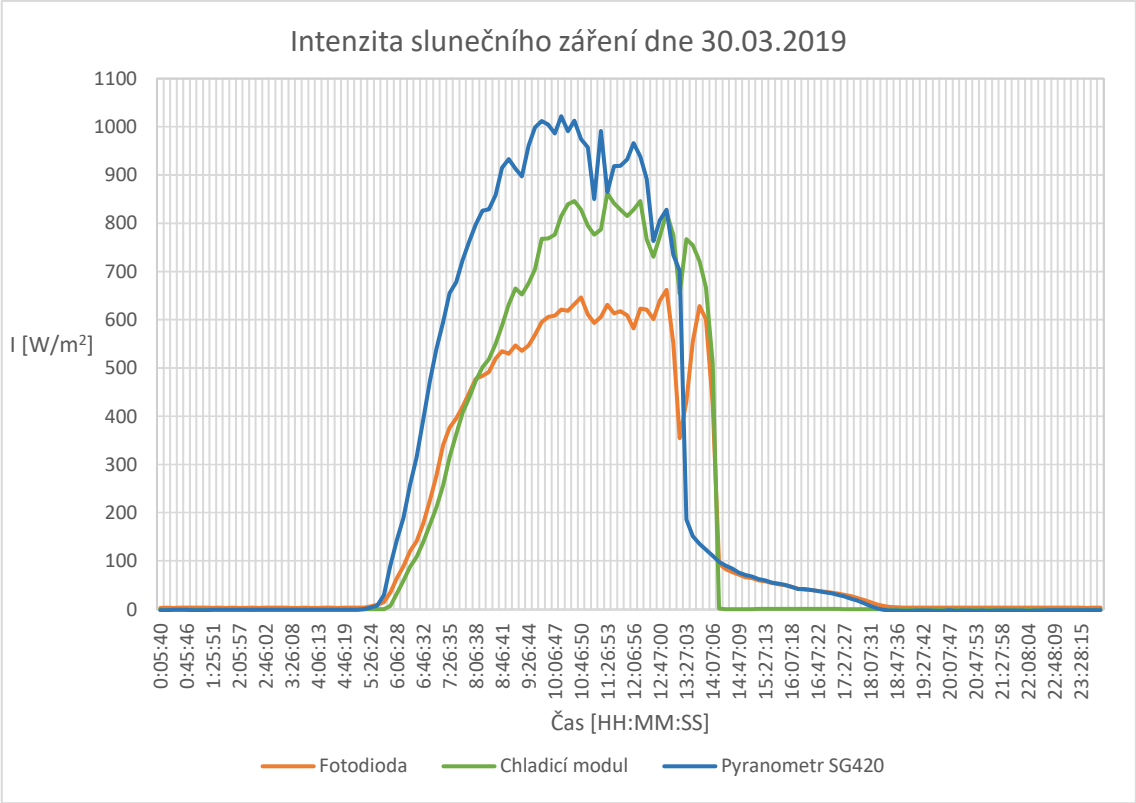
[23] GRAEME, Jerald G. Photodiode amplifiers: Op Amp Solutions. Boston, Mass: McGraw-Hill, c1996, 252 s. ISBN 0-07-024247-X.

[24] Transparent Materials Comparsion. In: *Rayotek Scientific Inc.* [online]. San Diego (CA), 2014 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: https://rayotek.com/tech-specs/material-comparisons.htm#q6

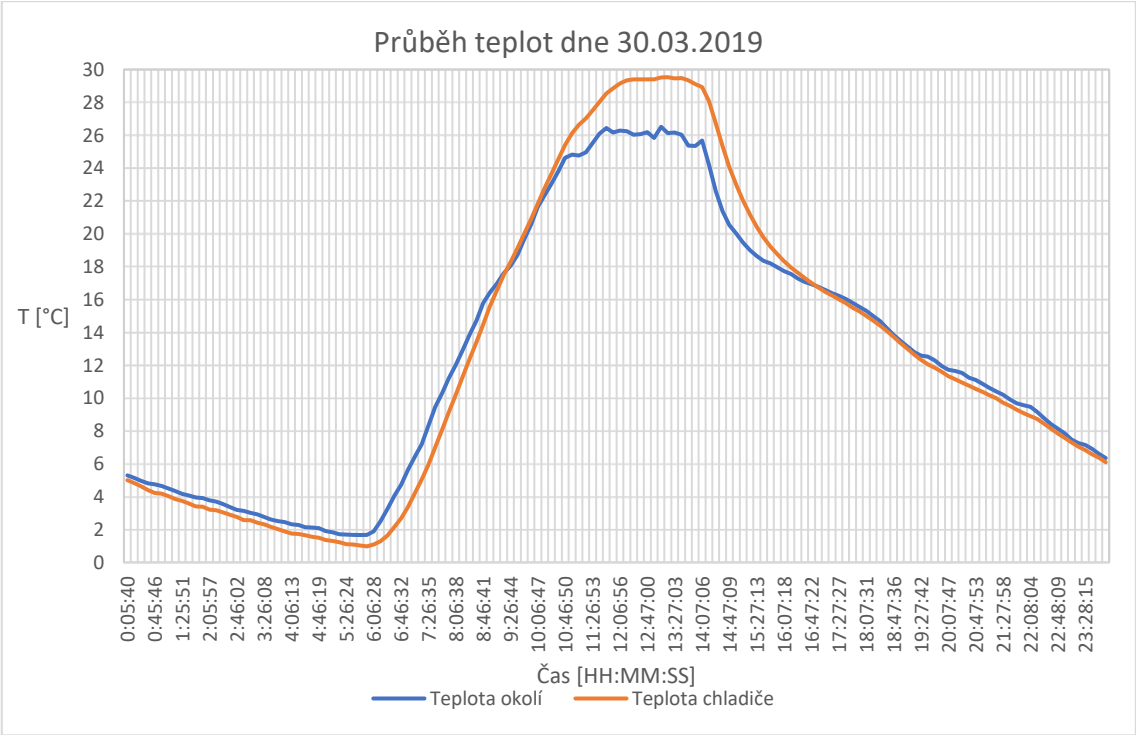
14 PŘÍLOHY

Tab. 144.1 Měření závislosti generovaného napětí na teplotním rozdílu u jednotlivých peltierových modulů

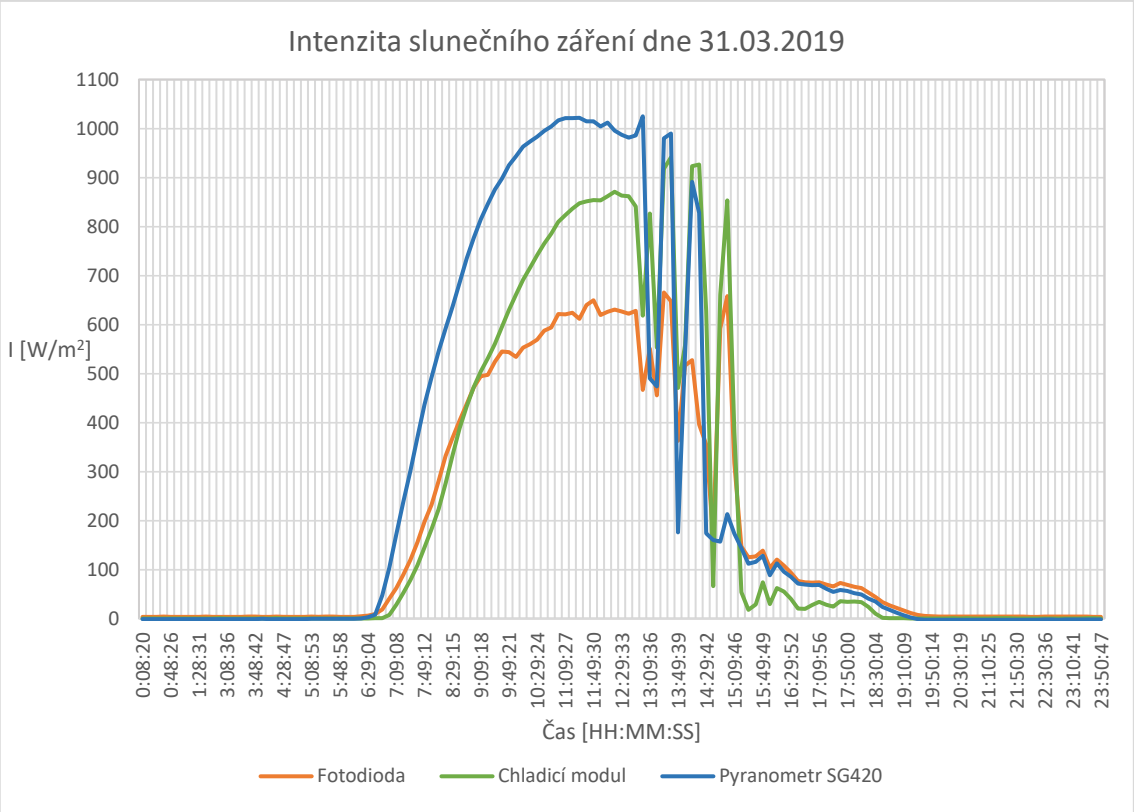
TEC1 – 127140S							
T1 [°C]	29,30	37,90	42,80	53,10	70,80	79,40	79,90
T2 [°C]	21,00	21,00	21,00	26,60	35,20	34,50	23,00
ΔT [°C]	8,30	16,90	21,80	26,50	35,60	44,90	56,90
U [V]	0,4042	0,7495	0,9567	1,1374	1,5321	1,8307	2,3370
TEC1 – 127030S							
T1 [°C]	31,5	37,6	43,8	48,8	58,4	67,5	78,7
T2 [°C]	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
ΔT [°C]	10,50	16,60	22,80	27,80	37,40	46,50	57,70
U [V]	0,52	0,9529	1,2493	1,5079	1,978	2,4535	3,031
TES1 – 127040S							
T1 [°C]	29,6	37,8	41,8	47,4	57	68,8	75,5
T2 [°C]	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	21,30	21,23
ΔT [°C]	8,60	16,80	20,80	26,40	36,00	47,50	54,27
U [V]	0,4382	0,7905	0,946	1,1591	1,5069	2,1398	2,452
TEC1 – 071080S							
T1 [°C]	33,3	36,7	48	55,1	58,6	67,5	78,1
T2 [°C]	20,40	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00	22,90
ΔT [°C]	12,90	15,70	27,00	34,10	37,60	46,50	55,20
U [V]	0,4772	0,4628	0,7655	0,9897	1,0558	1,3008	1,5385



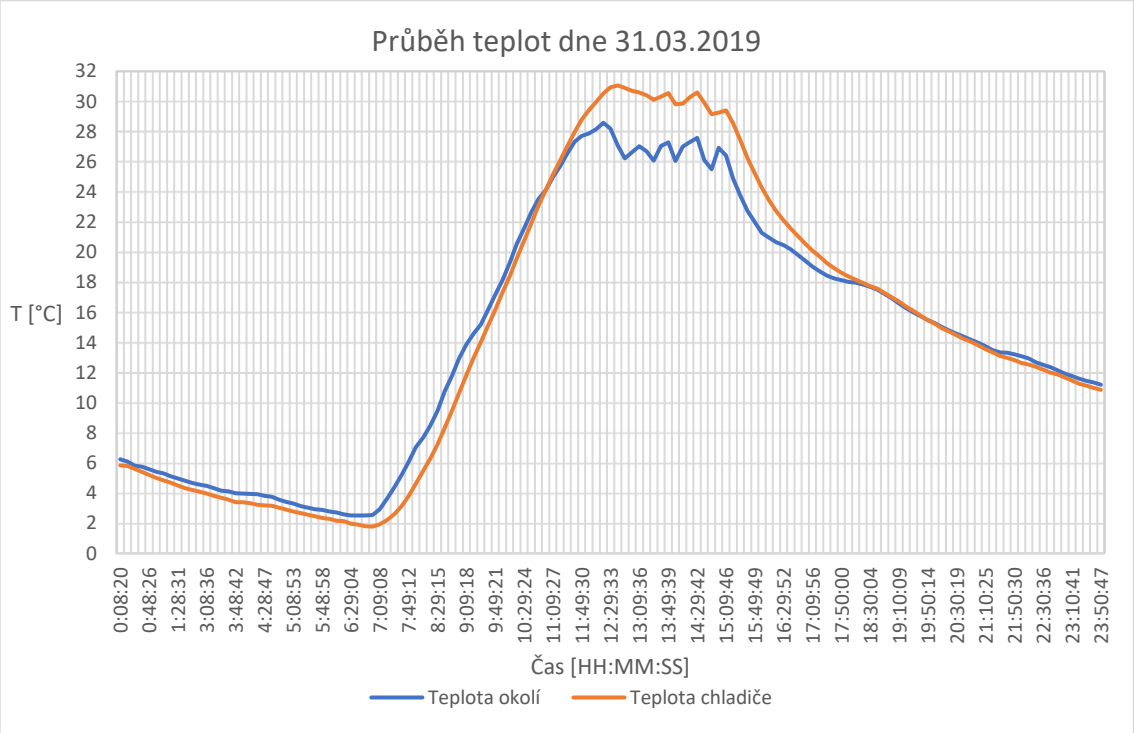
Obr. 14.1 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 30.03.2019



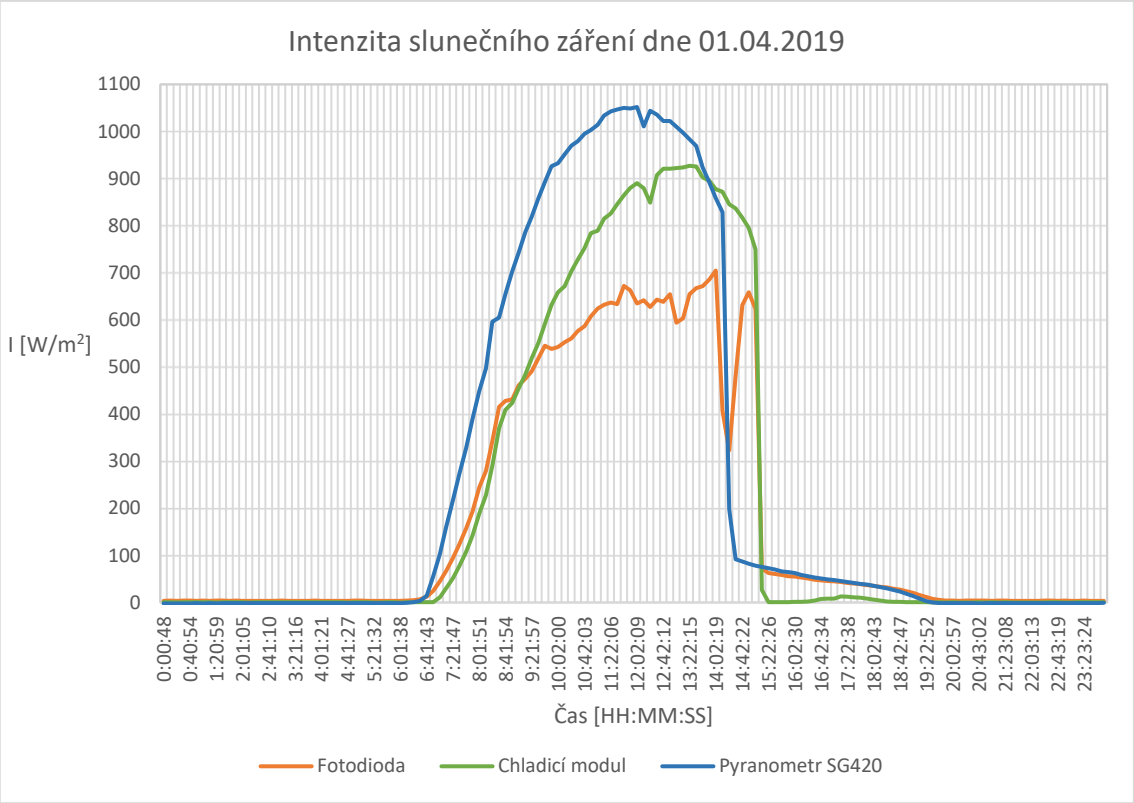
Obr. 14.2 Graf naměřených průběhů teplot během dne 30.03.2019



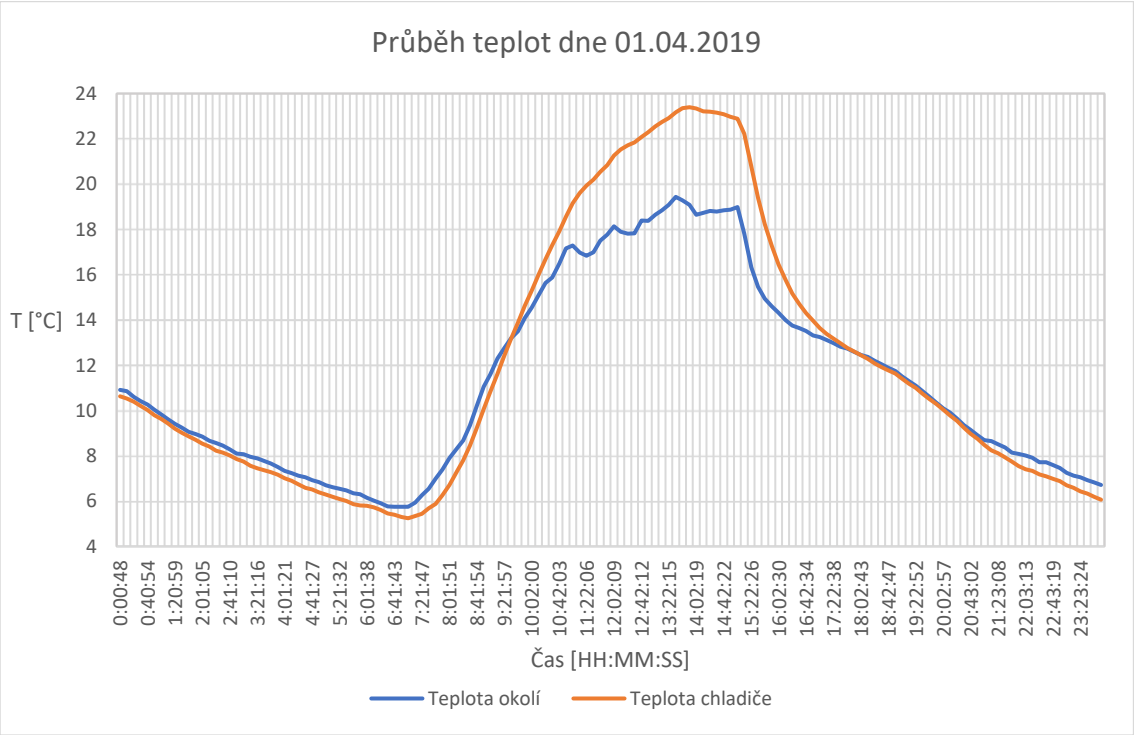
Obr. 14.3 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 31.03.2019



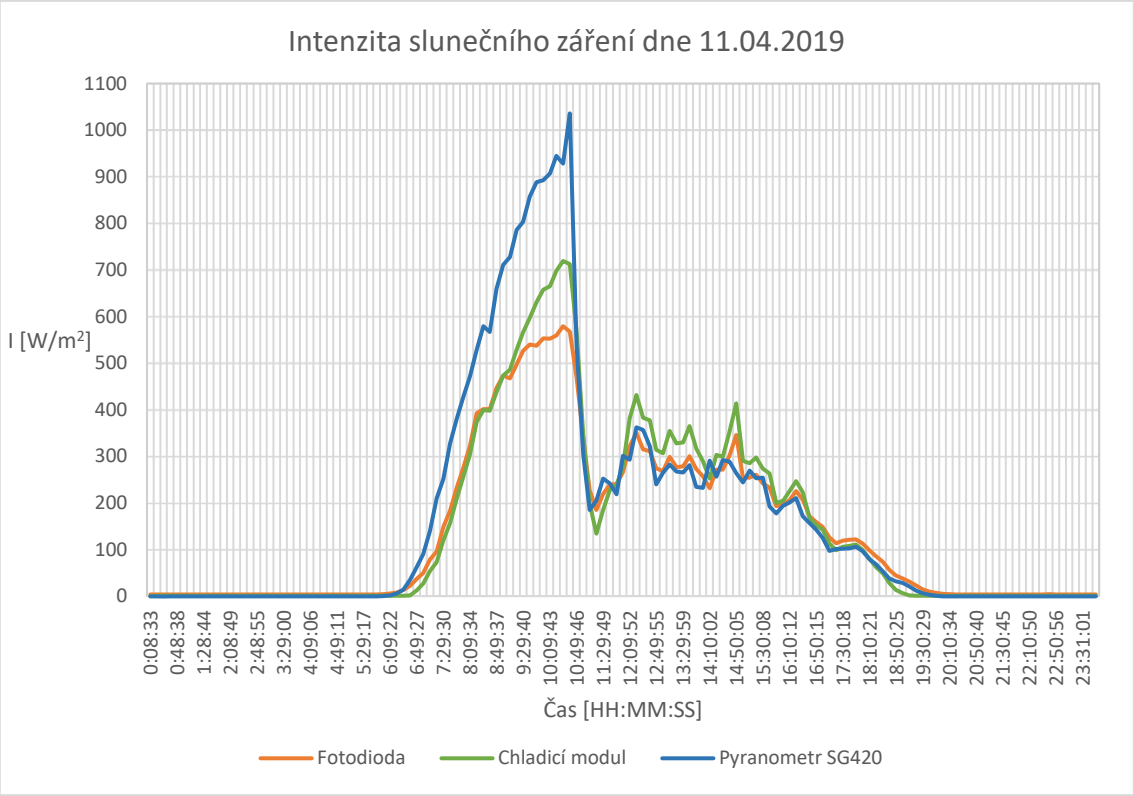
Obr. 14.4 Graf naměřených průběhů teplot během dne 31.03.2019



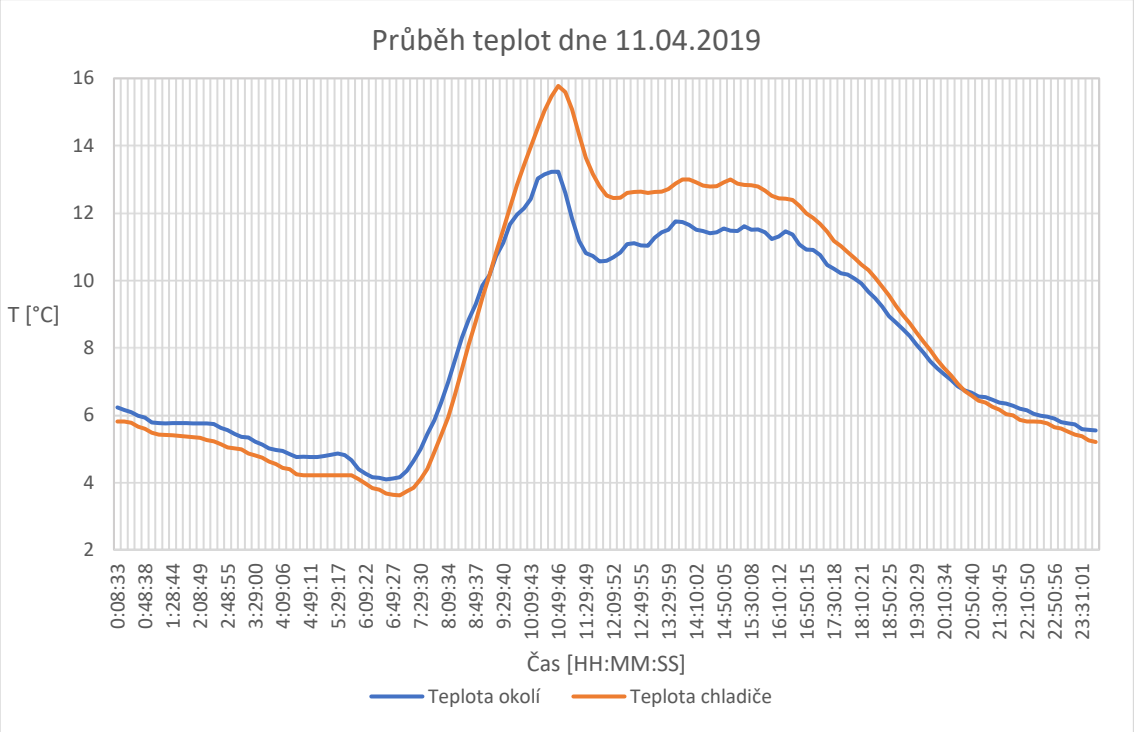
Obr. 14.5 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 01.04.2019



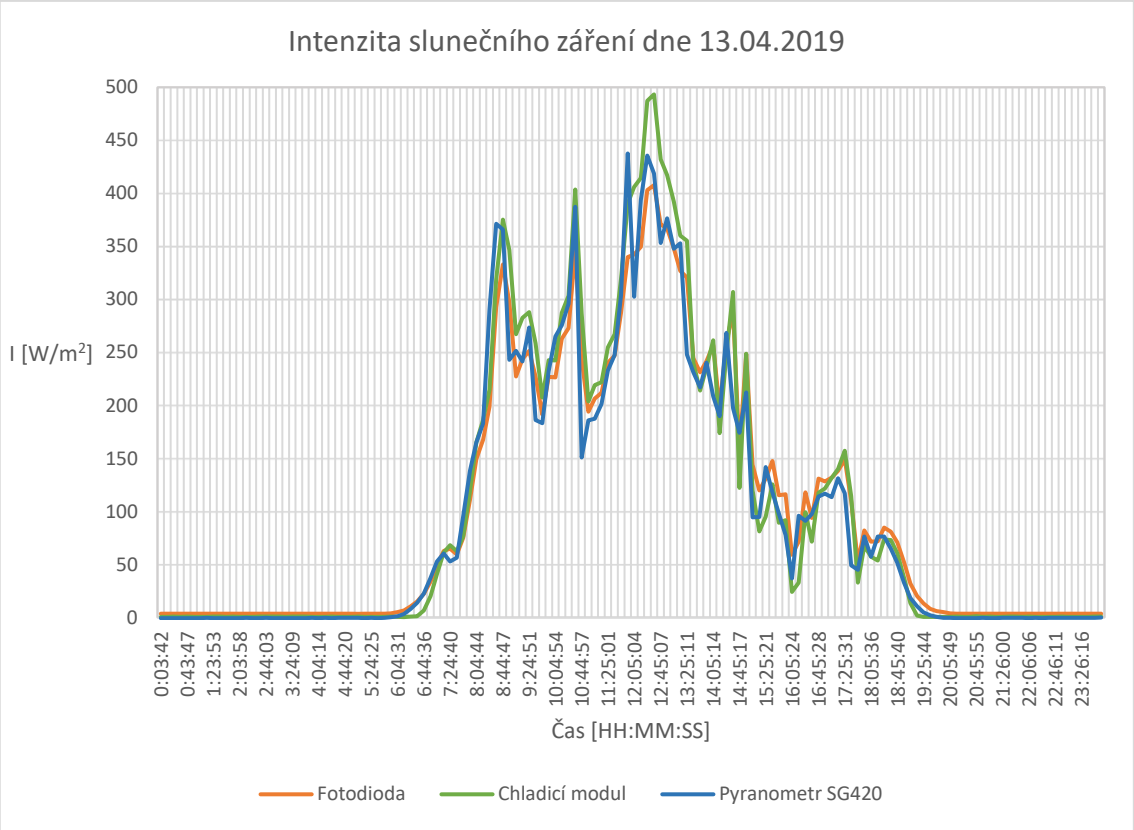
Obr. 14.6 Graf naměřených průběhů teplot během dne 01.04.2019



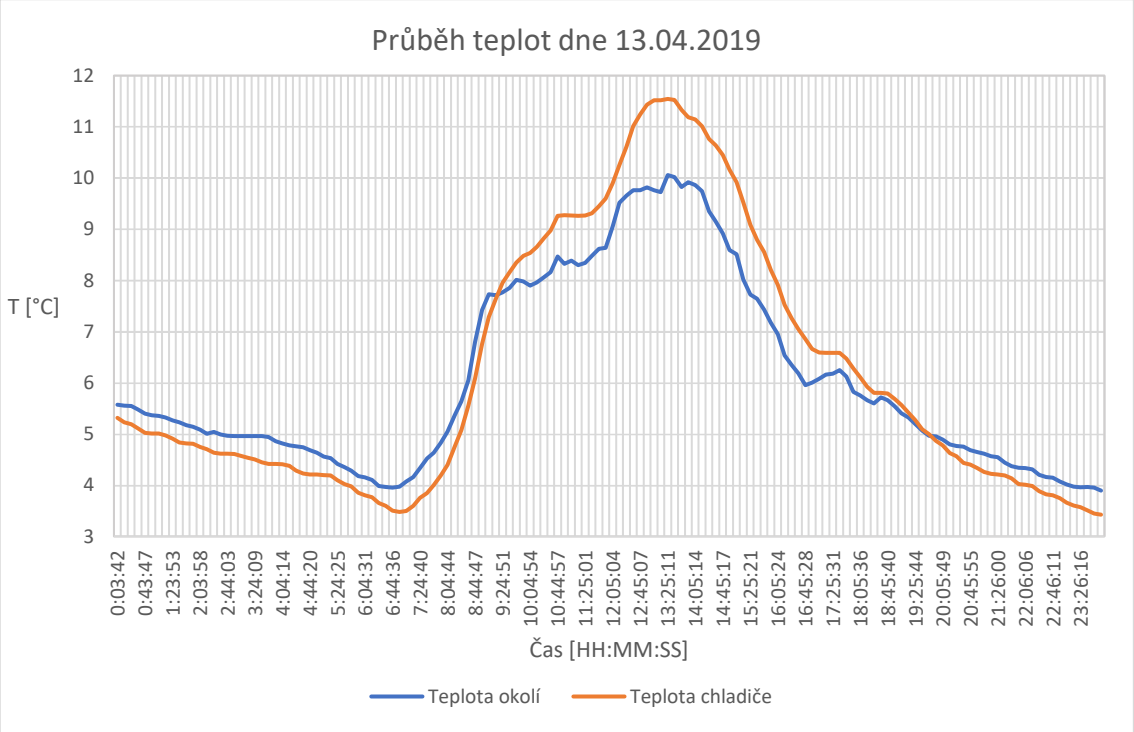
Obr. 14.7 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 11.04.2019



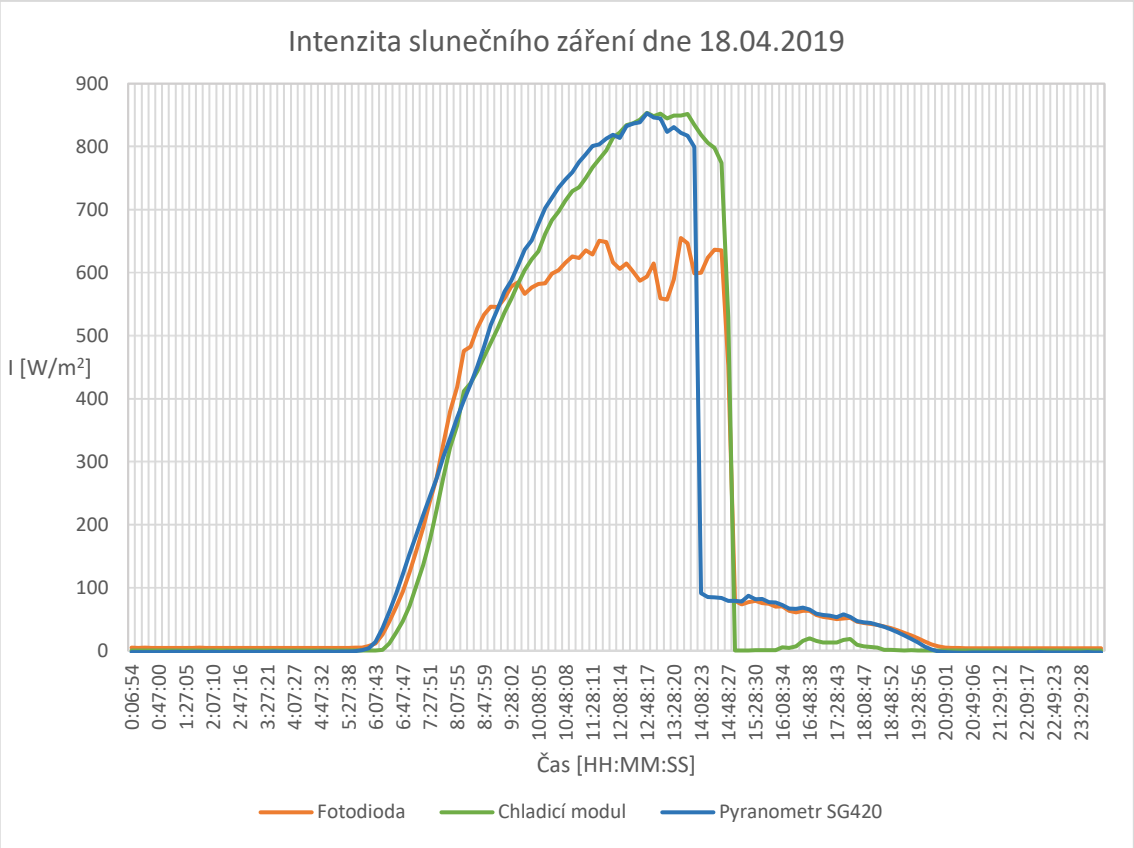
Obr. 14.8 Graf naměřených průběhů teplot během dne 11.04.2019



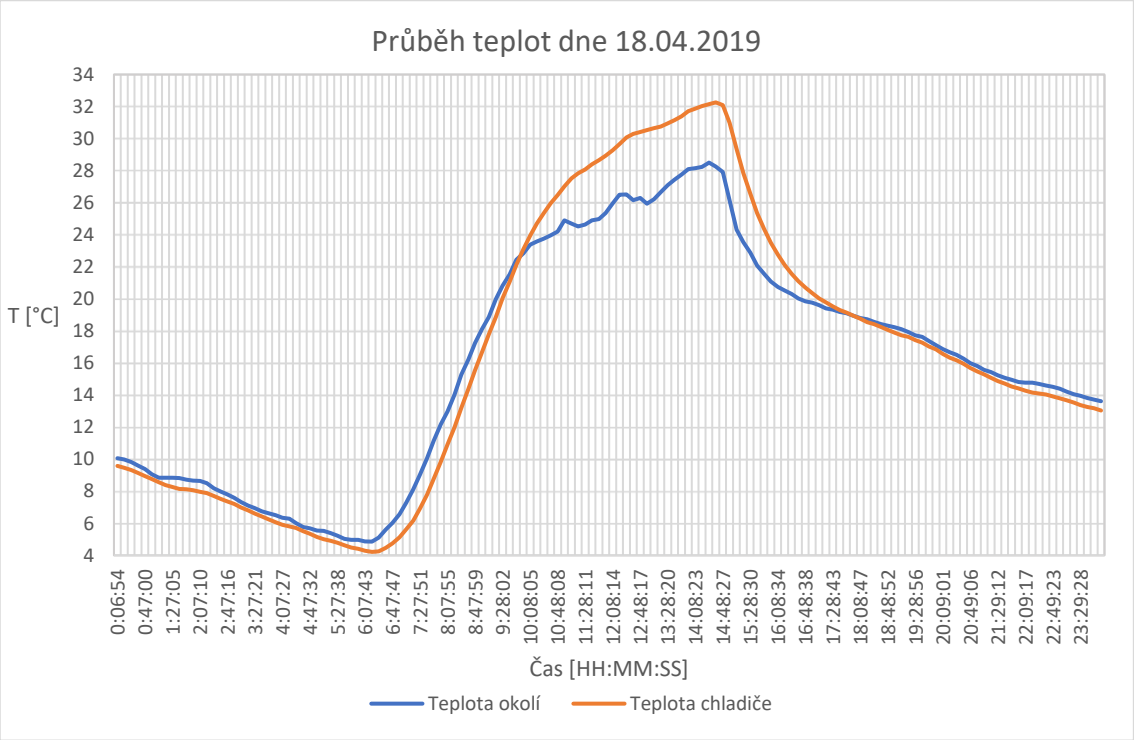
Obr. 14.9 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 13.04.2019



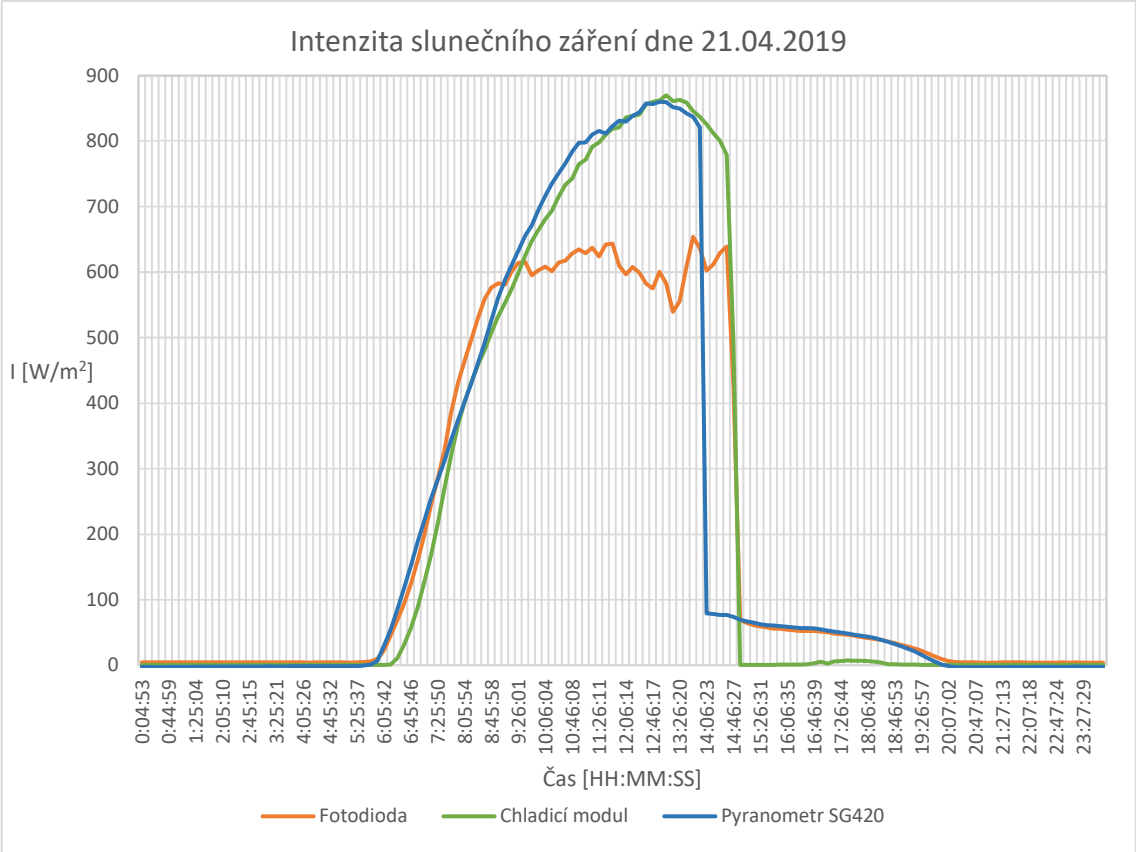
Obr. 14.10 Graf naměřených průběhů teplot během dne 13.04.2019



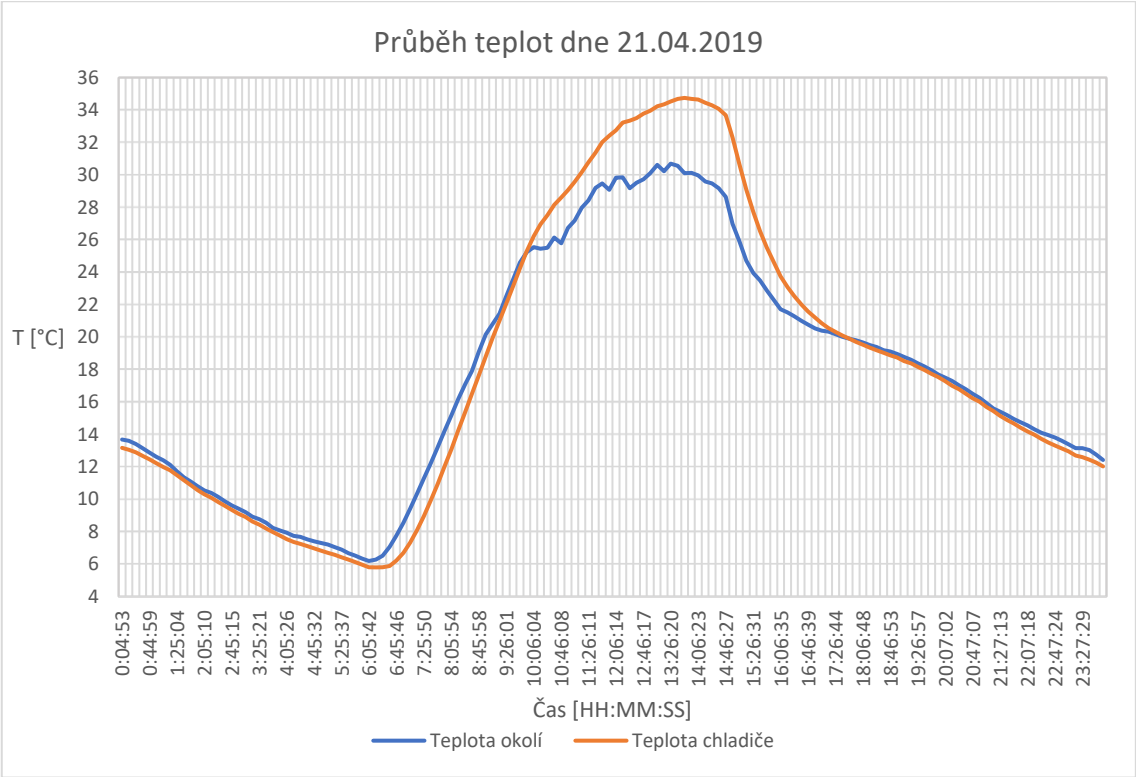
Obr. 14.11 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 18.04.2019



Obr. 14.12 Graf naměřených průběhů teplot během dne 18.04.2019



Obr. 14.13 Graf naměřených intenzit slunečního záření během dne 21.04.2019



Obr. 14.14 Graf naměřených průběhů teplot během dne 21.04.2019