

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MĚŘENÍ SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ A KALIBRACE SNÍMAČŮ

DATA ACQUISITION OF SOLAR RADIATION AND CALIBRATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ KNAPČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JOSEF ŠTĚTINA, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2008/09

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Knapčík Lukáš

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření solárního záření a kalibrace snímačů

v anglickém jazyce:

Data acquisition of solar radiation and calibration

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vytvořit přehled snímačů solárního záření. Sestavit metodiku jejich kalibrace a ověřit na reálných datech.

Cíle bakalářské práce:

Práce v rozsahu 15 až 30 stran. Vytipovat cenově a technicky nejvhodnější snímače pro měření.

Seznam odborné literatury:

Cihelka, J.: Solární tepelná technika. : MALINA TOMÁŠ NAKLADATELSTVÍ

Meloun, M.; Militký, J.: Statistické zpracování experimentálních dat. Plus 1995.

Murtinger K., Truxa J., Solární energie pro váš dům, ERA group 2005.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne 28.10.2008

L.S.



doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotácia

Bakalárska práca je zameraná na popis snímačov solárneho žiarenia, ich základného princípu, funkcie a vzniku možných chýb pri meraní. V závere je realizovaná kalibrácia lacnejších pyranometrov SG002 českého výrobcu pomocou etalónového pyranometru CM11, ktorý predstavuje druhotný štandard podľa ISO. Priebeh kalibrácie pozostáva z dvoch hlavných častí. Prvá časť spočíva v stanovení posuvu (offsetu) a druhá časť v stanovení prevodovej konštanty medzi správnou a kalibrovanou hodnotou.

Kľúčové slová

Pyranometer, kalibrácia, solárne žiarenie, meranie solárneho žiarenia

Annotation

Bachelor's thesis is focused on description sensors of solar radiation, main principles, function and reason of rise mistakes and faults during the measurement. At the end of thesis is performed calibration of two cheaper pyranometers SG002 from Czech producer by comparison to a reference pyranometer CM11, which represent the secondary standard. Calibration consists of two main parts. In the first part is necessary to determine offset and in the second part to specify an instrument transferring constant between the correct and calibrated value.

Key words

Pyranometer, calibration, solar radiation, measure of solar radiation

Bibliografická citácia

KNAPČÍK, L. *Měření solárního záření a kalibrace snímačů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 42 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Štětina, Ph.D

Prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Měření solárního záření a kalibrace snímačů“ vypracoval samostatne s použitím odpornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce

15. mája 2009

.....

Lukáš Knapčík

Pod'akovanie

Ďakujem týmto doc. Ing. Josefovi Štětinovi, Ph.D za cenné pripomienky, rady a ochotu pri vypracovaní bakalárskej práce.

OBSAH

ÚVOD	13
1. MERANIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA SNÍMAČMI	15
1.1 Súčasná situácia v meraní dostupnosti slnečného žiarenia.....	15
1.2 Popis pyranometra.....	15
1.3 Senzitivita pyranometra.....	16
1.4 Teplotný koeficient senzitivity.....	17
1.5 Kosínová chyba.....	17
1.6 Azimutová chyba.....	18
1.7 Nelinearita pyranometra.....	19
1.8 Chyba náklonu.....	19
1.9 Časová konštanta.....	19
1.10 Nestabilita.....	19
1.11 Získavanie informácií z pyranometra.....	19
1.12 Montáž pyranometra.....	20
2. STRUČNÝ POPIS PYRANOMETROV FIRMY KIPP & ZONEN	23
2.1 Pyranometre série CM.....	23
2.1.1 Pyranometer CM 6B.....	23
2.1.2 Pyranometer CM 11.....	24
2.2 Pyranometre série CMP.....	25
2.2.1 Pyranometer CMP 3.....	25
2.2.2 Pyranometer CMP 11.....	26
2.2.3 Pyranometer CMP 22.....	27
3. KALIBRÁCIA PYRANOMETRA ETALÓNOVANÍM K REFERENČNÉMU PYRANOMETRU	29
3.1 Postup kalibrácie pri umelom osvetlení.....	29
3.2 Postup kalibrácie pri osvetlení slnečným žiarením.....	29
4. KALIBRÁCIA PYRANOMETROV TLUSŤÁK SG002	31
4.1 Popis technických parametrov pyranometra SG002.....	31
4.2 Spracovanie dát.....	32
4.3 Kalibrácia.....	33
4.4 Overenie kalibrácie.....	39
ZÁVER	40
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	41
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV	42

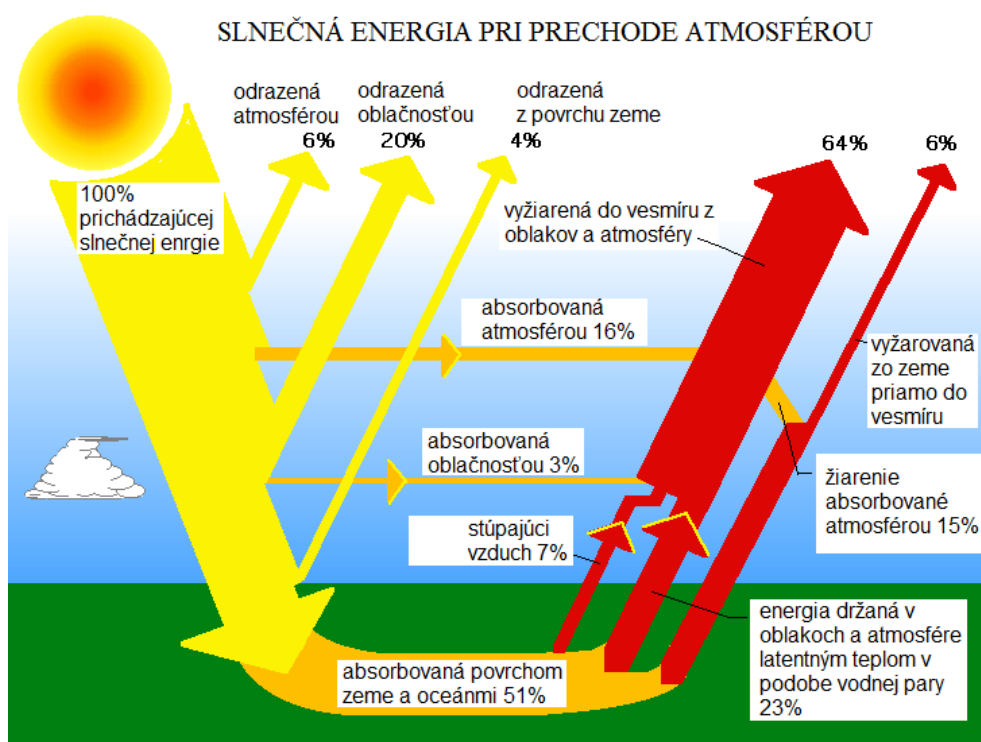
ÚVOD

Slnko ako centrálna hviezda slnečnej sústavy predstavuje zdroj energie, bez ktorého by nebol možný život na Zemi. Táto energia je výsledkom fúznej protón-neutrónovej reakcie, ktorá prebieha pri veľmi vysokých teplotách, 14 miliónov °C, pričom povrchová teplota Slnka je v priemere len 5 427 °C. Slnko vzniklo asi pred 5 miliardami rokov, a jeho životnosť sa predpokladá na ďalších 5 miliárd rokov. Znamená to, že Slnko môže zásobovať Zem slnečnou energiou ďalších 5 miliárd rokov.

Slnečné žiarenie je elektromagnetické žiarenie s vlnovými dĺžkami v rozsahu od 0,28 do 3,0 μm . Slnečné spektrum zahŕňa malý podiel ultrafialového žiarenia (0,28 – 0,38 μm), ktoré je pre ľudské oko neviditeľné a predstavuje asi 2 % solárneho spektra. Viditeľné svetlo má vlnové dĺžky od 0,38 do 0,78 μm a predstavuje asi 49 % spektra. Zvyšok tvorí infračervené žiarenie s vlnovými dĺžkami 0,78 – 3,0 μm . [1]

Na zemský povrch trvale dopadá tok slnečného žiarenia, ktoré sa zo vzdialenosti 150 miliónov km rozptýli na väčšiu plochu. Zmenší sa jeho intenzita a na povrch zemskej atmosféry pri kolmom dopade slnečných lúčov dopadá približne 1 360 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Táto hodnota sa označuje ako tzv. slnečná konštanta. [2]

Prechodom slnečných lúčov atmosférou sa intenzita slnečného žiarenia znižuje vplyvom optickej nepriepustnosti, čo je dôsledok odrazu, rozptylu a absorpcie plynmi, parami, aerosólmi a rôznymi nečistotami v atmosfére ako je zobrazené v obrázku 1. Na zemský povrch dopadá asi len 51 % z celkovej energie, ktorá je Slnkom vyemitovaná smerom k Zemi.

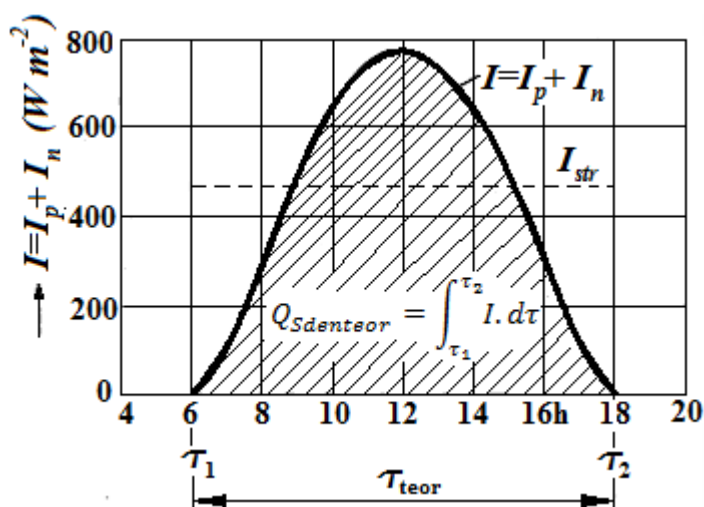


Obrázok 1- Pochody slnečnej energie pri prechode atmosférou [3]

Mierou energetického účinku slnečného žiarenia a tiež veličinou pre ďalšie energetické výpočty je intenzita žiarenia dopadajúceho na povrch Zeme, t.j. na plochu pod vrstvou

atmosféry. Ako už bolo uvedené, rozptýli a pohltí sa časť žiarenia pri prechode atmosférou, takže na povrchu Zeme je intenzita priameho slnečného žiarenia na plochu kolmú k smeru lúčov menšia, než intenzita na povrchu atmosféry. Časť rozptýleného žiarenia potom dopadá na povrch Zeme ako difúzne žiarenie.[4]

Výhody slnečnej energie v porovnaní s ostatnými konvenčnými energetickými zdrojmi sú, že slnečná energia je čistá, prakticky nevyčerpatelná a je všeobecne k dispozícii. Na druhej strane príkon slnečnej energie je ovplyvňovaný časovou a miestnou premenlivosťou, ktorá závisí na striedaní dňa a noci ako je zobrazené na obrázku 2, ročných období, na priemernej oblačnosti, ale taktiež intenzita slnečného žiarenia klesá s rastúcou zemepisnou šírkou. [2]



Plocha pod krivkou je úmerná energii dopadajúcej na oslnenú plochu za jeden deň za predpokladu, že nepretržite (od východu do západu Slnka) je jasná obloha.

Obrázok 2 - Množstvo energie dopadajúcej za deň na $1 m^2$ slnečnej plochy[4]

Vzhľadom na to, že slnečné žiarenie predstavuje čistú a nevyčerpatelnú formu energie, snažíme sa túto energiu aj aktívne využívať. Najčastejšie využitie je na ohrev vody prostredníctvom slnečných kolektorov, kde sa ako teplonosná kvapalina používa hlavne voda alebo nemrznúca kvapalinová zmes. Ďalšie využitie slnečnej energie je prostredníctvom fotovoltaických článkov (veľkoplošná polovodičová súčiastka), v ktorých svetelná energia konvertuje na elektrickú energiu pomocou fotoelektrického javu. Použitie fotovoltaických článkov je hlavne v kalkulačkách, satelitoch, vesmírnych sondách ale rozširuje sa aj v klasických elektrizačných sústavách.[5]

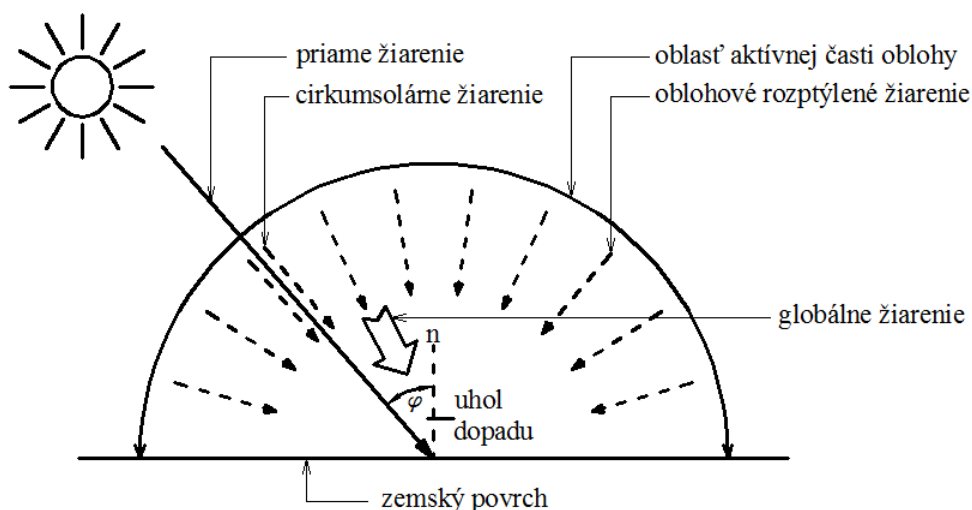
Za účelom aktívneho využívania energie slnečného žiarenia musíme poznať pomerne podrobné údaje o slnečnom žiarení, ktoré dopadá na zemský povrch jednak z hľadiska kvantity, ale aj z hľadiska kvality. [2]

1. MERANIE SLNEČNÉHO ŽIARENIA SNÍMAČMI

1.1. Súčasná situácia v meraní dostupnosti slnečného žiarenia

Potrebné údaje o dostupnosti slnečného žiarenia a jeho energie sa dajú v zásade získať dvojakým spôsobom, a to na základe aktinometrických, resp. pyranometrických meraní alebo teoretickým analytickým spôsobom, prípadne kombinovaným spôsobom s použitím údajov o relatívnom slnečnom svite alebo oblačnosti.

Vlastné merania slnečného žiarenia sa uskutočňujú pomocou pyranometrov, resp. presnejších pyrliometrov, ktoré sa používajú na ciachovanie pyranometrov, lebo tieto nemerajú energetický tok slnečného žiarenia priamo a predstavujú iba relatívne prístroje. V praxi sa bežne meria len globálne a difúzne žiarenie a priame slnečné žiarenie sa potom určí rozdielom týchto dvoch veličín. Pyrliometre sa používajú na meranie priameho slnečného žiarenia a často registrujú súčasne aj cirkumsolárne žiarenie (pozri obr.3), ktoré závisí na akceptačnom uhle pyrliometra.



Obrázok 3 - Schéma zložiek slnečného žiarenia na úrovni zemského povrchu

Pyranometrami sa meria globálne slnečné žiarenie, to znamená priame a rozptýlené žiarenie na horizontálnej rovine (pozri obrázok 3). Keď sa na meranie použije pyranometer vybavený tieniacim pásom, resp. prstencom, ktorý odtieňuje priame slnečné žiarenie, tak tento pyranometer meria difúzne žiarenie prichádzajúce zo všetkých smerov oblohovej hemisféry, s výnimkou jej časti odtieňovanej tieniacim pásom. [6]

1.2. Popis pyranometra

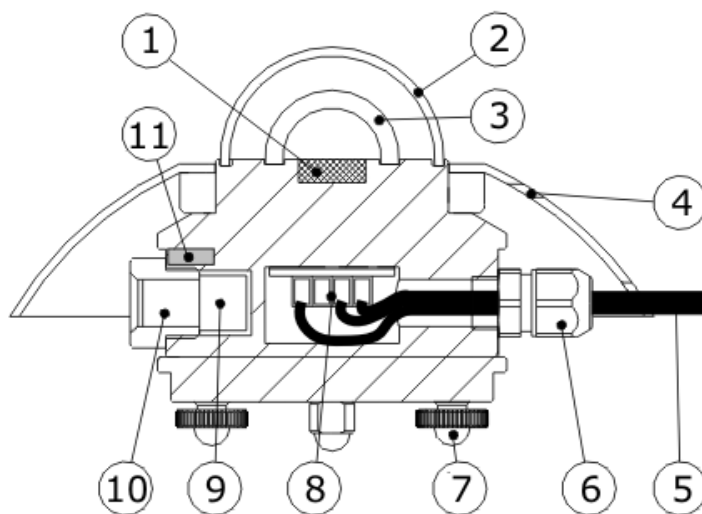
Pyranometer je typ aktinometru používaný na meranie širokého pásma intenzity slnečného žiarenia na rovinnom povrchu a je to senzor navrhnutý na meranie hustoty toku slnečného žiarenia. Typický pyranometer nevyžaduje žiadne externé napájanie k fungovaniu. [9]

Za účelom dosiahnutia správnych vlastností pozostáva pyranometer z nasledujúcich hlavných častí (pozri obrázok 4):

- **Termočlánkový senzor:**
je senzor s čiernym povrchom, ktorý absorbuje všetko slnečné žiarenie. Má presné spektrálne pokrytie v rozsahu od 300 do 50000 nanometrov a má takmer perfektnú kosínovú charakteristiku. Termočlánkový senzor je v podstate zariadenie na premenu tepelnej energie na elektrickú. Pozostáva z jednotlivých termočlánkov, ktoré sú spojené do série alebo (menej bežné) paralelne. Z toho vyplýva, že termočlánok nemeria absolútnu teplotu, ale generuje na výstupe napätie priamoúmerné lokálnej teplotnej diferencii, alebo teplotnému gradientu. [9]
- **Sklenená kupola (kryt):**
Táto kupola limituje spektrálnu charakteristiku na 300 až 2800 nanometrov (neprepustí žiarenie nad 2800 nanometrov), zatiaľ čo umožňuje príjem žiarenia z okolia pod uhlom 180 stupňov. Úlohou kupoly je aj chrániť termočlánkový senzor pred konvekciou. V priestore medzi kupolami je vákuum. [9]

Pyranometre sú štandardizované podľa normy ISO 9060, ktorá je schválená WMO (World Meteorological Organization).

- 1- Termočlánkový senzor
- 2- Sklenená kupola
- 3- Sklenená kupola
- 4- Radiačná clona
- 5- Signálny kábel
- 6- Utesnenie kábla
- 7- Nastaviteľná nožička
- 8- Plošný spoj
- 9- Vysúšací otvor
- 10- Vodováha
- 11- Termočlánkový senzor



Obrázok 4 - Hlavné časti pyranometra [9]

1.3. Senzitivita pyranometra

Citlivosť pyranometra S je definovaná ako podiel výstupného signálu U a intenzity žiarenia E prijatej snímačom.

$$S = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Vo všeobecnosti číslo senzitivity reprezentuje strednú hodnotu z rozsahu hodnôt zistených za testovacích podmienok z výstupného signálu počas určitých časových intervalov. Zvyčajné časové intervaly sú od jednej minúty až po týždne. Senzitivita

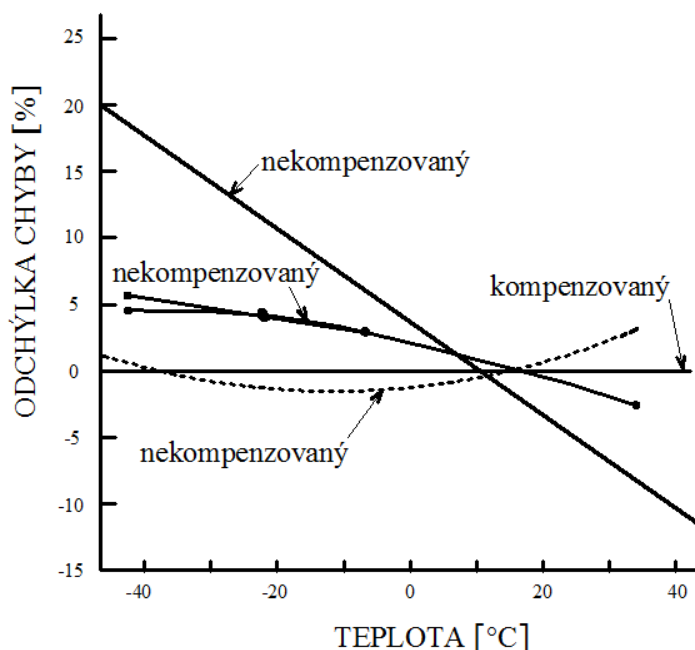
môže tiež reprezentovať hodnotu generovanú počas špecifických nastavení testovacích podmienok. Číslo senzitivity je často priradované kalibračnému faktoru. Podmienky, za ktorých je citlivosť pyranometra meraná, musia byť pre užívateľov uvedené pre správne nastavenie hodnoty pre meraný výstupný signál a konvertovanie ho do jednotiek intenzity žiarenia. [7]

1.4. Teplotný koeficient senzitivity

Senzitivita pyranometra sa mení s okolitou teplotou. Teplotný koeficient senzitivity C_T je definovaný nasledovne

$$C_T = \frac{\Delta S/S}{\Delta T} \quad (2)$$

kde ΔT je zmena v okolitej teplote. ΔS je odpovedajúca zmena v senzitivite S prístroja. Zvyčajne je C_T vyjadrené v percentuálnej zmene senzitivity v závislosti na teplote odlišujúcej sa od referenčnej hodnoty. Termistory zaradené do obvodu zabezpečujú zníženie tepelnej závislosti senzitivity. Obrázok 5 zobrazuje dáta z troch rôznych testov pre tepelne kompenzované a nekompenzované prístroje. [7]



Obrázok 5 - Veľkosť chyby ako funkcia teploty pre pyranometre, ktoré sú kompenzované a nekompenzované pre teplotné efekty (vplyvy). [7]

1.5. Kosínová chyba

Kosínové chyby sú zapríčinené nedostatočnou odozvou prístroja, v porovnaní s teoreticky požadovanou kosínovou odozvou, na prichádzajúce žiarenie pod akýmkoľvek uhlom. Dôležité príčiny tejto odchýlky sú nasledovné:

- Absorpcia detektoru sa mení s uhlom dopadu žiarenia. Absorpcia klesá veľmi rýchlo, keď sa uhol dopadu pohybuje od 80° do 90° .

- Nerovnosti na povrchu detektoru
- Nedokonalé optické vlastnosti skleneného krytu pyranometra
- Vnútorne odrazy medzi sklenenými kupolami.
- Nesprávne nastavovanie

Kosínová chyba predstavuje najväčšiu chybu vyskytujúcu sa u pyranometrov. Je udávaná v percentách a určí sa podľa vzťahu:

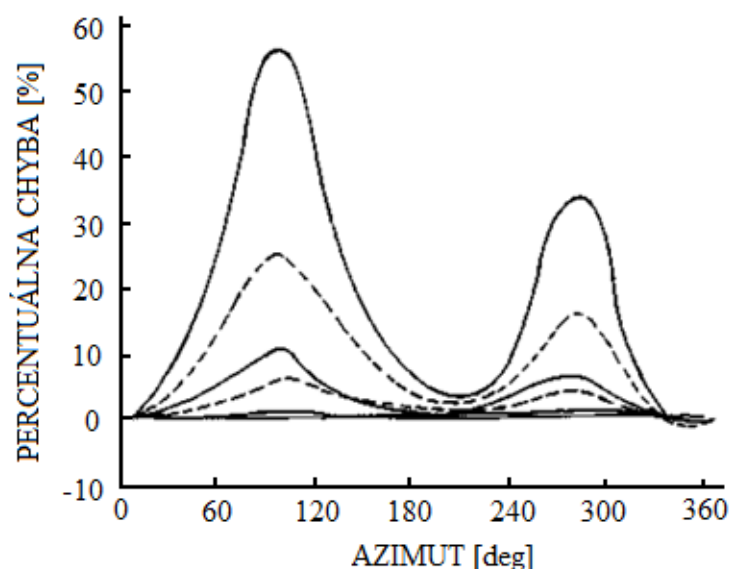
$$\text{kosínová chyba} = \frac{\text{výstup pyranometra}}{I_N \cdot \cos\theta} \cdot 100 \quad (3)$$

Kde $I_N \cdot \cos\theta$ je dopadajúce žiarenie pod uhlom θ , ktorý zvierá s normálou prístroja. Aj keď kosínová chyba je rozdielna pri rôznych uhloch dopadu žiarenia, štandardne sa meria pri uhle dopadu 80° . Kosínová chyba sa tiež líši podľa vyhotovenia pyranometra. U pyranometrov prvej triedy sa táto chyba pohybuje $\pm 3\%$, u druhej triedy je to $\pm 5 - 7\%$ a u tretej triedy $\pm 10\%$. [7]

1.6. Azimutová chyba

Ak rovina detektoru nie je v dokonalej horizontálnej polohe, alebo ak kryt nie je rovný, odozva pyranometra sa bude meniť v závislosti na zmene azimutového uhlu zdroja relatívne k pyranometru (pozri obrázok 6). Na meranie tejto chyby sa pyranometer namontuje na otáčacie zariadenie a výstupný kábel sa nasmeruje na sever (ak sa nachádzame na severnej pologuli). Svetelný zdroj je zafixovaný pod uhlom $60-75^\circ$ od vertikálnej polohy. Počas rotácie pyranometra sa monitoruje odpovedajúce výstupné napätie.

Azimutová chyba sa spočíta z výstupného napätia, kde ako referenčná hodnota sa berie napätie v okamžiku keď zdroj a výstupný kábel pyranometra ležia v jednej rovine. [7]



Obrázok 6 - Chyba merania (azimutová chyba) ako funkcia azimutu pri rôznych uhloch dopadajúceho žiarenia.[7]

1.7. Nelinearita pyranometra

Výstupný signál ideálneho pyranometra by mal byť priamo úmerný dopadajúcemu solárnemu žiareniu na úrovni solárnej konštanty (1360 W/m^2).

Najlepšie meranie linearity sa robí na slnečnom svetle so špeciálnou rotujúcou clonou. Clona je konštruovaná v tvare disku a je rozdelená na časti priesvitné a nepriehľadné, ktoré sú nastaviteľné. Clona je umiestnená tak, aby priame žiarenie prechádzalo cez priesvitné časti na pyranometer. Keď clona rotuje priame žiarenie je pravidelne prepúšťané a neprepúšťané v určitých časových intervaloch, ktoré závisia na veľkosti jednotlivých častí (priesvitné a nepriehľadné) a na rýchlosti rotácie. Rýchlosť otáčania clony musí byť dostatočne veľká, aby sa zmena priepustnosti a nepriepustnosti neobjavila na výstupe pyranometra. Pre dosiahnutie maximálnej intenzity pre tento test musí žiarenie dopadať v smere normály k pyranometru.

Štandardne sa linearita pyranometra pohybuje v rozmedzí $\pm 2 \%$. [7]

1.8. Chyba náklonu

Ak detektor pyranometra je naklonený (nie je v horizontálnej rovine) jeho výstupné napätie sa mení pre rovnakú intenzitu žiarenia a výsledná chyba (odchýlka od výstupného napätia pre naklonený a dokonale horizontálny detektor) sa nazýva chyba náklonu. Príčinou tejto chyby je konvekcia prúdov vzduchu nad snímacím elementom. Tieto prúdy vzduchu sú funkciou uhlu náklonu a úrovňou intenzity žiarenia. [7]

1.9. Časová konštanta

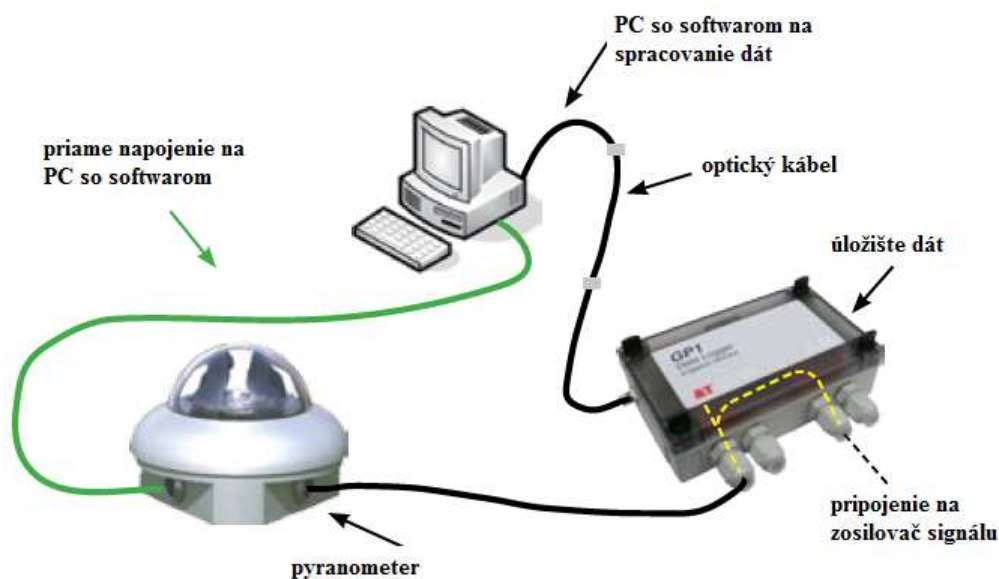
Časová odozva prístroja je definovaná ako pomer jeho odozvy a vstupu. Je to čas, za ktorý výstupný signál poklesne (vzrastie) na 10 % (90 %) finálnej ustálenej hodnoty. Časová konštanta je maximálne 25 sekúnd pre pyranometre prvej triedy, 1 minúta pre druhú triedu a maximálne 4 minúty pre tretiu triedu. [7]

1.10. Nestabilita

Senzitivita pyranometra sa mení s časom a vystavením radiácii. Preto je mnohými výrobcami doporučená pravidelná kalibrácia pre zabezpečenie schopnosti presného merania. Pyranometre by mali byť počas ďalšieho používania kalibrované každoročne. Zmeny v kalibračnom faktore v čase sú spôsobené zhoršením čierneho a bieleho prekrytia na prijímacom povrchu. [7]

1.11. Získavanie informácií z pyranometra

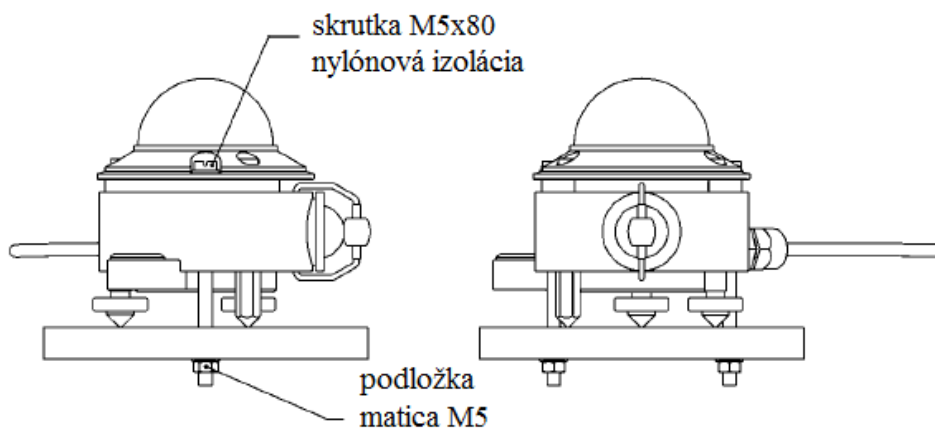
Výstupný signál pyranometra je rádovo v milivoltoch, ktorý sa konvertuje pomocou kalibračného faktora na intenzitu žiarenia. Na väčšine miest sa maximálna hodnota slnečného žiarenia pohybuje okolo 1000 W/m^2 v dôsledku znečistenia atmosféry. Výstupný signál môže byť priamo napojený na monitorovacie zariadenie, alebo v niektorých prípadoch je potreba signál zosilniť pre správne použitie v monitorovacom zariadení (pozri obrázok 7). [8]



Obrázok 7 - Schéma spracovania výstupného signálu [8]

1.12. Montáž pyranometra

a) Poloha na meranie globálneho žiarenia



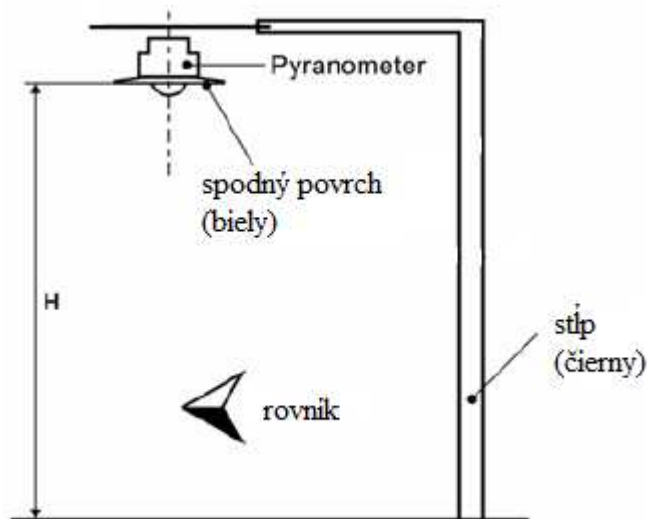
Obrázok 8 - Montáž pyranometra [10]

Tepelná fluktuácia tela pyranometra môže spôsobiť rozladenie a odchýlku signálov a preto je doporučené pyranometer tepelne izolovať od montážnej podstavy a to tak, že pyranometer položíme na jeho výškovo nastaviteľné nožičky. Musíme však zabezpečiť aj elektrický kontakt so zemou na odvádzanie prúdu ochranným káblom ktorý sa indukuje svetlom (pozri obrázok 8).

Presné meranie globálneho žiarenia vyžaduje správne vyrovnanie povrchu termočlánku do horizontálnej polohy. Toto vyrovnanie sa robí otáčaním nastaviteľných závitových nožičiek. [10]

b) Poloha na meranie odrazeného globálneho žiarenia

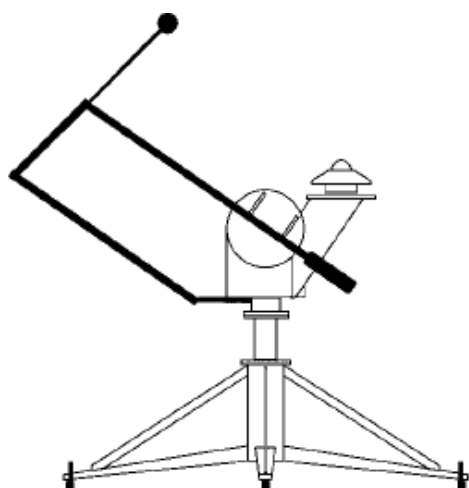
Invertná poloha pyranometra umožňuje merať odrazené žiarenie. Podľa WMO (World Meteorological Organization) výška H by mala byť 1 až 2 metre nad povrchom pokrytým nakrátko pokosenou trávou ako je zobrazené na obrázku 9. [10]



Obrázok 9 - Uchytenie na meranie odrazeného globálneho žiarenia [10]

c) Poloha na meranie difúzneho žiarenia

Na meranie difúzneho žiarenia musí byť priame solárne žiarenie odtienené. Najlepšie je priame žiarenie zachytené malým diskom alebo guľou (pozri obrázok 10). Tieň z disku musí kompletne pokryť kupolu pyranometra. Avšak je potreba nasledovať zdanlivý pohyb slnka a preto je nevyhnutné elektrické polohové zariadenie. [10]



a)



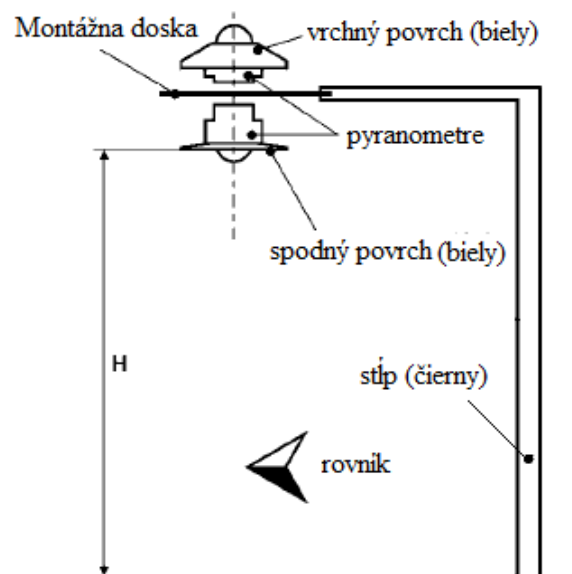
b)

Obrázok 10 – a). Schéma meranie difúzneho žiarenia, b). Meranie difúzneho žiarenia v praxi pomocou tieniacej gule polohového zariadenia [10]

d) Poloha na meranie činiteľa odrazu (meranie albeda)

Činiteľ odrazu predstavuje pomer medzi odrazeným žiarením a priamym žiarením. Meranie sa uskutočňuje pomocou albedometra. Nižší senzor albedometra je pyranometer v invertnej polohe a meria odrazené solárne žiarenie. Podľa WMO (World Meteorological Organization) výška H by mala byť 1 až 2 metre nad povrchom pokrytým nakrátko pokosenou trávou ako je zobrazené na obrázku 11.

Vrchný povrch chráni telo pyranometra pred prehrievaním od slnečného žiarenia a špeciálny spodný povrch chráni pred priamym osvetlením kupoly od slnka pri jeho západe a východe. [10]



Obrázok 11 - Schéma albedometra [10]

2. STRUČNÝ POPIS PYRANOMETROV FIRMY KIPP & ZONEN

2.1. Pyranometre série CM

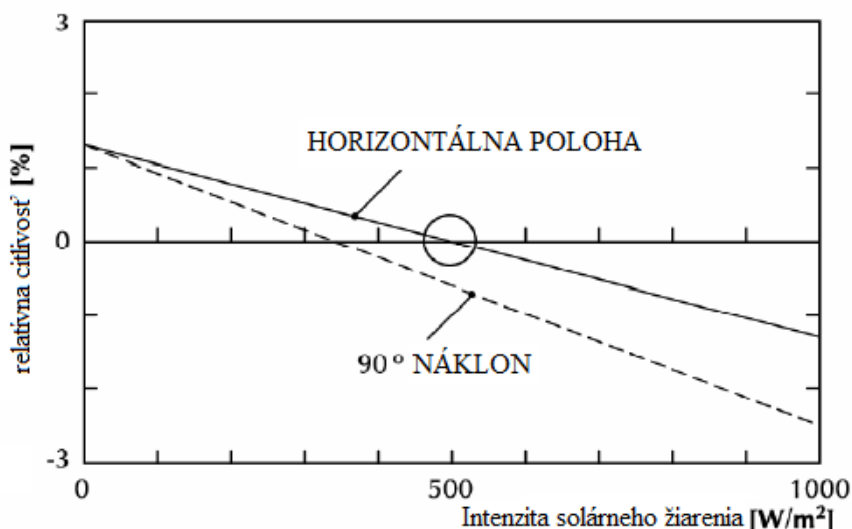
Pyranometre a Albedometre série CM sú prístroje na báze termočlánku. Táto séria bola vyrábaná niekoľko rokov a je uznávaná po celom svete na meranie intenzity solárneho žiarenia a odpovedá štandardom WMO (World Meteorological Organisation) a ISO. Špeciálne pyranometre CM 6B a CM 11 sú najčastejšie používané vo väčšine meteorologických sietí. Tieto pyranometre sú navrhnuté na meranie intenzity solárneho žiarenia na rovinnom povrchu. Zmeraná intenzita predstavuje dopad priameho žiarenia a difúzneho žiarenia. V invertnej polohe môžu merať odrazené slnečné žiarenie. [10]

2.1.1. Pyranometer CM 6B

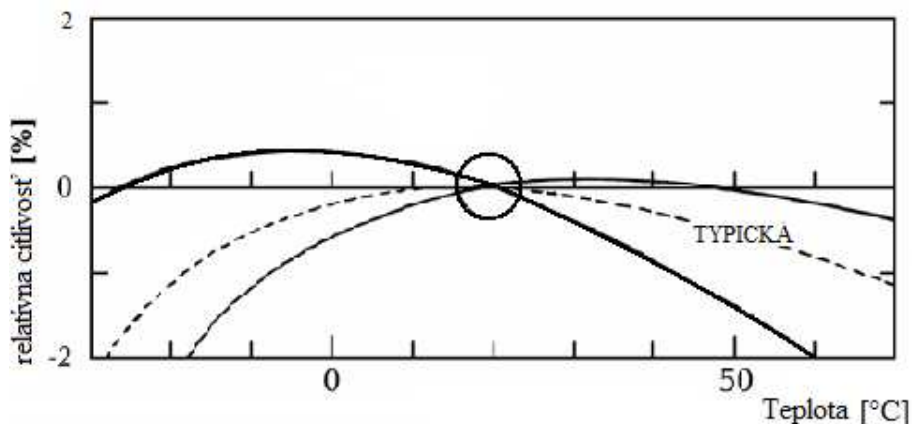
Svojimi parametrami a presnosťou vyhovuje zaradeniu medzi pyranometre prvej triedy.

Tabuľka 1 - Technické parametre pyranometra CM 6B

TECHNICKÉ PARAMETRE	
Spektrálny rozsah	305- 2800 nm
Citlivosť	9-15 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedancia	70-100 Ω
Časová konštanta	< 18 s
Nelinearita (pozri obrázok 12)	< $\pm 1,2$ %
Teplotný koeficient senzitivity (pozri obrázok 13)	< ± 2 % (-10 °C do +40 °C)
Kosínová chyba	< ± 3 %
Chyba náklonu	< ± 1 %
Operačné teploty	-40 °C do +80 °C
Výhľadový uhol	2π
Rozsah meranej intenzity	0- 1400 W/m^2 (max. 2000 W/m^2)
Nestabilita	< ± 1 % zmena citlivosti za rok
Trieda podľa ISO	Prvá trieda



Obrázok 12 - Nelinearita v zmene citlivosti na intenzite solárneho žiarenia [10]



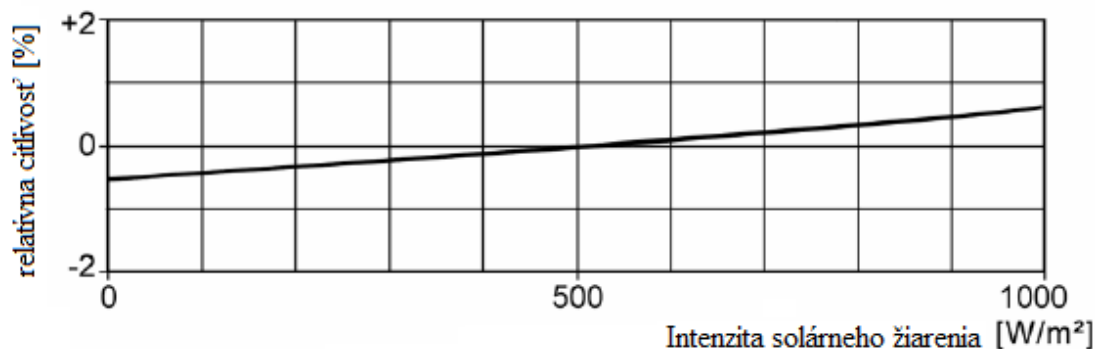
Obrázok 13 - Zmena citlivosti so stúpajúcou teplotou prístroja [10]

2.1.2. Pyranometer CM 11

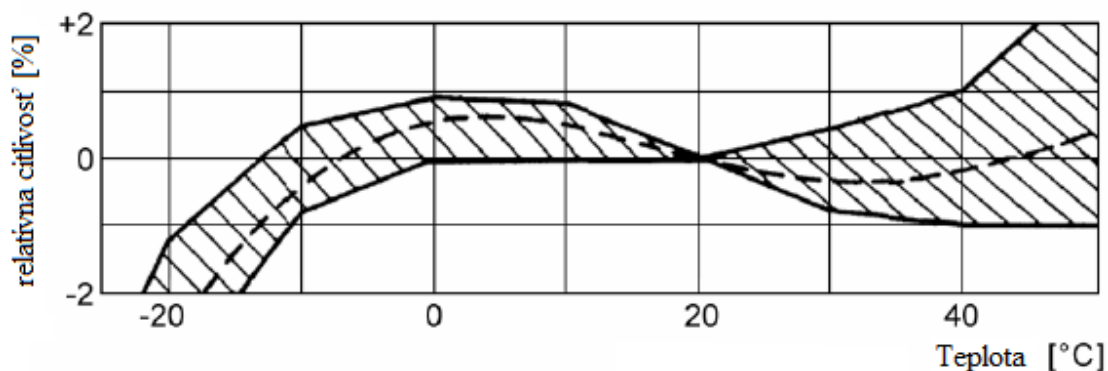
Pyranometer CM 11 je podľa klasifikácie WMO (World Meteorological Organisation) a ISO klasifikovaný ako druhotný štandard. To znamená, že pre druhotný štandard sú očakávané celkové chyby počas hodinovej radiácie maximálne 3 % a počas dennej radiácie sú očakávané celkové chyby tiež maximálne 3 %. [10]

Tabuľka 2- Technické parametre pyranometra CM 11

TECHNICKÉ PARAMETRE	
Spektrálny rozsah	340- 2200 nm
Citlivosť	4-6 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedancia	700-1500 Ω
Časová konštanta	< 15 s -24 s
Nelinearita (pozri obrázok 14)	< 0,6 %
Teplotný koeficient senzitivity (pozri obrázok 15)	<1 % (-10 °C do +40 °C)
Chyba náklonu	<0,25 %
Operačné teploty	-40 °C do +80 °C
Výhľadový uhol	2π
Rozsah meranej intenzity	0- 1400 W/m^2 (max. 4000 W/m^2)
Nestabilita	<0,5 % zmena citlivosti za rok
Trieda podľa ISO	Druhotný štandard



Obrázok 14 - Nelinearita v zmene citlivosti na intenzite solárneho žiarenia [10]



Obrázok 15 - Zmena citlivosti so stúpajúcou teplotou prístroja [10]

2.2. Pyranometre série CMP

V súčasnosti Kipp & Zonen ponúka sériu pyranometrov CMP, ktoré majú nové ergonomické vlastnosti pre uľahčenie inštalácie, údržby a recalibrácie. Nová CMP séria priamo nahrádza predošlú sériu CM a je plne kompatibilná s existujúcimi doplnkami ako sú napríklad tieniace krúžky alebo polohové zariadenia pre meranie difúzneho žiarenia. [10]

2.2.1. Pyranometer CMP 3

Pyranometer CMP 3 (pozri obrázok 16) sa podľa technický parametrov radí do druhej triedy. Je určený na meranie krátko vlnného globálneho žiarenia v spektrálnom rozsahu 310 až 2800 nm. Termosnímač je meria intenzitu žiarenia do 2000 W/m^2 s časovou odozvou <math><18\text{sekúnd}</math> a citlivosťou $10 \mu\text{V/Wm}^{-2}$ ktorá má odchýlku menej ako 5 % v závislosti na zmene teploty od $10 \text{ }^\circ\text{C}$ do $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Operačné teploty majú rozsah $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ až $80 \text{ }^\circ\text{C}$, pričom stabilita je lepšia ako 1 % za rok. [10]



Obrázok 16 - Pyranometer CMP 3 [10]

Tabuľka 3- Technické parametre pyranometra CMP 3

TECHNICKÉ PARAMETRE	
Spektrálny rozsah	310- 2800 nm
Citlivosť	5-20 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedancia	20-200 Ω
Časová konštanta	< 18 s
Nelinearita	$\pm 2,5$ %
Teplotný koeficient senzitivity	± 5 % (-10 °C do +40 °C)
Chyba náklonu	± 3 %
Operačné teploty	-40 °C do +80 °C
Výhľadový uhol	2π
Rozsah meranej intenzity	0- 2000 W/m^2
Nestabilita	$< \pm 1$ % zmena citlivosti za rok
Očakávaná denná presnosť	± 10 %
Trieda podľa ISO	Druhá trieda

2.2.2. Pyranometer CMP 11

Pyranometer CMP 11 (pozri obrázok 17) využíva vysokokvalitnú sklenú kupolu a verziu detektorovej technológie, ktorá je o úroveň vyššie vo výkonnosti v porovnaní s CMP3. Tento pyranometer predstavuje druhotný štandard v presnosti merania. Má výbornú linearitu, rýchlu časovú odozvu a nízku chybu náklonu. [10]



Obrázok 17 - Pyranometer CMP 11 [10]

Tabuľka 4- Technické parametre pyranometra CMP 11

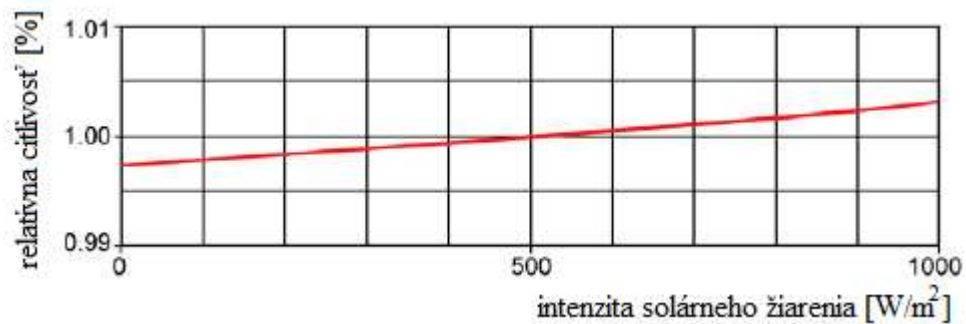
TECHNICKÉ PARAMETRE	
Spektrálny rozsah	310- 2800 nm
Citlivosť	7-14 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedancia	10-100 Ω
Časová konštanta	< 5 s
Nelinearita	$\pm 0,2$ %
Teplotný koeficient senzitivity	± 1 % (-10 °C do +40 °C)
Chyba náklonu	$\pm 0,2$ %
Operačné teploty	-40 °C do +80 °C
Výhľadový uhol	2π
Rozsah meranej intenzity	0- 4000 W/m^2
Nestabilita	$< \pm 0,5$ % zmena citlivosti za rok
Očakávaná denná presnosť	± 2 %
Trieda podľa ISO	Druhotný štandard

2.2.3. Pyranometer CMP 22

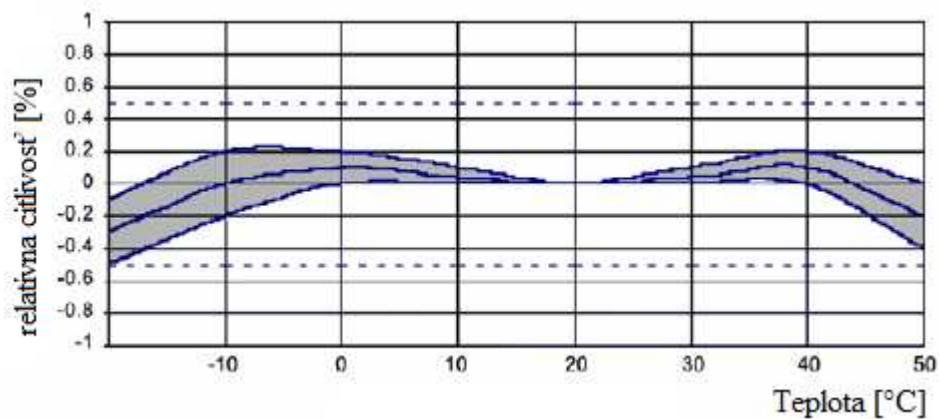
Pyranometer CMP 22 (pozri obrázok 18) využíva veľmi kvalitné kremičité kupoly pre širší spektrálny rozsah. Vďaka svojej presnosti a rýchlosti predstavuje najlepší aktuálne dostupný pyranometer na trhu a je zaradovaný medzi druhotný štandard v meraní intenzity solárneho žiarenia. [10]



Obrázok 18 - Pyranometer CMP 22 [10]



Obrázok 19 - Nelinearita v zmene citlivosti na intenzite solárneho žiarenia [10]



Obrázok 20 - Zmena citlivosti so stúpajúcou teplotou prístroja [10]

Tabuľka 5- Technické parametre pyranometra CMP 22

TECHNICKÉ PARAMETRE	
Spektrálny rozsah	200- 3600 nm
Citlivosť	7-14 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedancia	10-100 Ω
Časová konštanta	< 5 s
Nelinearita (pozri obrázok 19)	$\pm 0,2$ %
Teplotný koeficient senzitivity (pozri obrázok 20)	$\pm 0,5$ % (-10 °C do +40 °C)
Chyba náklonu	$\pm 0,2$ %
Operačné teploty	-40 °C do +80 °C
Výhľadový uhol	2π
Rozsah meranej intenzity	0- 4000 W/m^2
Nestabilita	< $\pm 0,5$ % zmena citlivosti za rok
Očakávaná denná presnosť	± 1 %
Trieda podľa ISO	Druhý štandard

3. KALIBRÁCIA PYRANOMETRA ETALÓNOVANÍM K REFERENČNÉMU PYRANOMETRU

Medzinárodný štandard špecifikuje dve preferované metódy kalibrácie pyranometrov za použitia referenčného pyranometra. Jedna metóda, vonkajšia kalibrácia alebo typ I, používa slnečné žiarenia ako zdroj, zatiaľ čo druhá metóda, vnútorná kalibrácia alebo typ II, používa zdroj umelého žiarenia. Medzinárodný štandard je aplikovateľný na väčšinu pyranometrov bez ohľadu na typ použitého snímača. Vo všeobecnosti, všetky pyranometre používané na dlhodobé monitorovanie intenzity solárneho žiarenia môžu byť kalibrované použitím týchto metód za predpokladu, že kalibrácia je uskutočňovaná pri rovnakom uhle náklonu od horizontu pri akom bol kalibrovaný referenčný pyranometer. [11]

3.1. Postup kalibrácie pri umelom osvetlení

Po ustavení oboch pyranometrov a zaistení zdroja žiarenia je potreba počkať približne 30 sekúnd, aby sa prístroje stabilizovali. Následne potom zaznamenávame výstupné napätie po dobu 30 sekúnd. Potom oboja pyranometre prekryjeme a po 30 sekundách zaznamenávame tzv. nulový offset (posunutie nuly) pre oboja pyranometre po dobu 30 sekúnd. Intenzita žiarenia v pozícii 1 (pyranometer „a“) môže byť odlišná od intenzity v pozícii 2 (pyranometer „b“) v dôsledku asymetrie v optike lampy. Z tohto dôvodu sú polohy pyranometrov vymenené pomocou rotujúceho stola a celá procedúra sa opakuje. [10]

Citlivosť neznámeho pyranometra sa spočíta podľa vzorca:

$$S_a = \frac{A + A'}{B + B'} \cdot S_b \quad (4)$$

S_a - citlivosť referenčného pyranometra

A - Výstup testovaného pyranometra v pozícii 1

A' - Výstup testovaného pyranometra v pozícii 2

B - Výstup referenčného pyranometra v pozícii 1

B' - Výstup referenčného pyranometra v pozícii 2

S_b - citlivosť testovaného pyranometra

3.2. Postup kalibrácie pri osvetlení slnečným žiarením

Táto kalibrácia spočíva v dlhodobom snímaní intenzity žiarenia na referenčnom a kontrolovanom pyranometre, následnom štatistickom spracovaní získaných hodnôt a určení prevodovej závislosti medzi referenčným a kontrolovaným pyranometrom. Pre kalibráciu sa vyberú dni s čo najväčšou a najstabilnejšou intenzitou žiarenia, počas ktorých je celodenne jasná obloha, aby bol zabezpečený rovnaký dopad žiarenia na oboja pyranometre. Závislosť medzi intenzitou slnečného žiarenia I a výstupným napätím pyranometra U môžeme pre linearizovaný výstup vyjadriť v tvare:

$$I = k \cdot U + q \quad (5)$$

Kde k je tzv. prevodný pomer a q tzv. offset (posunutie nuly).

Prvým krokom je preto pri kalibrácii stanovenie offsetu. Keďže meranie prebieha nepretržite 24 hodín denne, posunutie nuly je stanovené z hodnôt v nočných hodinách, kedy je intenzita žiarenia nulová (medzi polnocou a 2. hodinou ráno) a výsledný posun je stanovený ako aritmetický priemer z hodnôt v určitom časovom intervale. Po stanovení offsetu môžeme korigovať prevodný pomer k .

4. KALIBRÁCIA PYRANOMETROV TLUSŤÁK SG002

Bude použitá metóda kalibrácie pri osvetlení slnečným žiarením. Pri tejto kalibrácii je ako referenčný pyranometer použitý pyranometer CM11 od firmy Kipp and Zonen, ktorý sa na základe svojej presnosti radí medzi druhotné štandardy.

4.1. Popis technických parametrov pyranometra SG002

Prístroj slúži k meraniu intenzity slnečného žiarenia. Meranie je založené na princípe teplotnej diferencie, vzniknutej slnečným žiarením na čiernej a bielej ploche. Vplyvom teplotnej diferencie vzniká na pripojených termočlánkoch elektrické proporcionálne napätie, ktoré po zosilnení je priamo závislé na intenzite slnečného žiarenia. [12]

Tabuľka 6 - Technické parametre SG002 [12]

Merací rozsah	0 ÷ 1200 Wm ⁻²
Spektrálny rozsah	0,3 ÷ 3 μm
Výstup (napäťový)	0 ÷ 2 V
Napájacie napätie	18 ÷ 30 V (DC)
Časová konštanta	50s
Rozsah pracovných teplôt	-30 ÷ +60 °C
Min. zaťažovacia impedancia	500 Ω
Presnosť merania	±3 %
Trieda podľa ISO	Prvá trieda

V spodnej časti snímača je umiestená výmenná skrutkovacia vysušacia vložka s farebným indikátorom účinnosti, pripojovací vodotesný konektor a komín na pripojenie pyranometra na čap $\phi 12$ mm s bočnou zaistovacou skrutkou M4. Pyranometer upevňujeme vo vodorovnej polohe v mieste, kde okolité predmety nemôžu brániť slnečnému svitu. Nemal by sa upevňovať v blízkosti vysielačích antén. Farebný indikátor vysušacej vložky upozorňuje, kedy je nutné vložku vybrať a vysušiť. Farba suchej vložky je modrá, ktorá vplyvom vlhkosti postupne prechádza na ružovú až bielu farbu. Vložka sa po vysušení môže opätovne použiť. [12]



Obrázok 21 - Pyranometer SG002 a jeho schéma s označením vývodov [12]

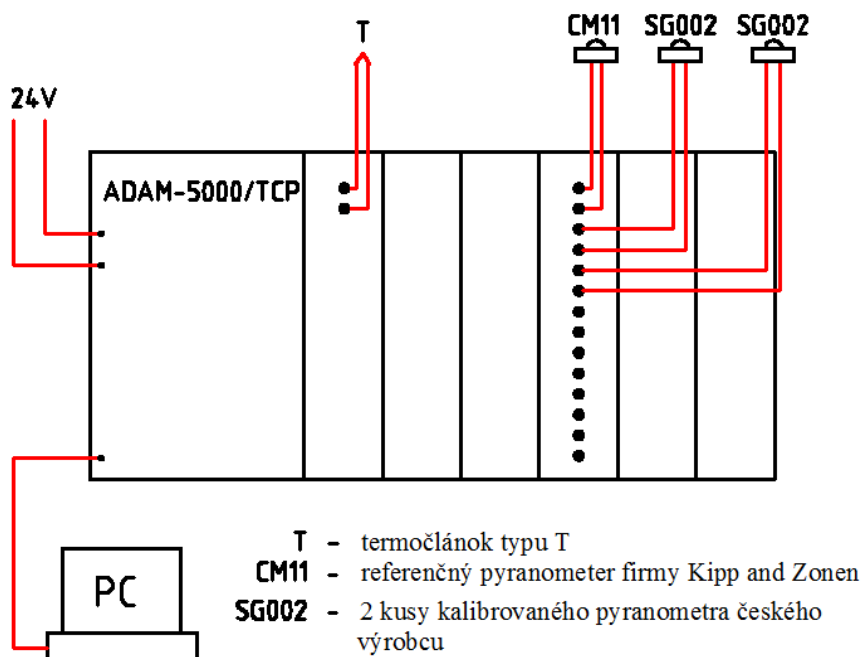
4.2. Spracovanie dát

Postup kalibrácie spočíva v prvotnom získaní dát meraním intenzity slnečného žiarenia pomocou referenčného pyranometra CM11 a v jeho blízkosti umiestnených dvoch kusov pyranometrov SG002 (pozri obrázok 22), ktoré je potreba nakalibrovať.



Obrázok 22 - Referenčný (v strede) a kalibrovateľné pyranometre (na stranách) [13]

Pre spracovanie informácií je použitý 8 kanálový modul ADAM-5000/TCP (pozri obrázok 24), do ktorého sú zapojené všetky tri pyranometre a tiež termočlánok typu T pre meranie vonkajšej teploty (pozri obrázok 23). Tento modul slúži na spracovanie dát získaných meraním a vysokorýchlostnú komunikáciu s okolitou počítačovou sieťou, na ktorú je napojený.



Obrázok 23 - Schéma získavania a zaznamenávania dát

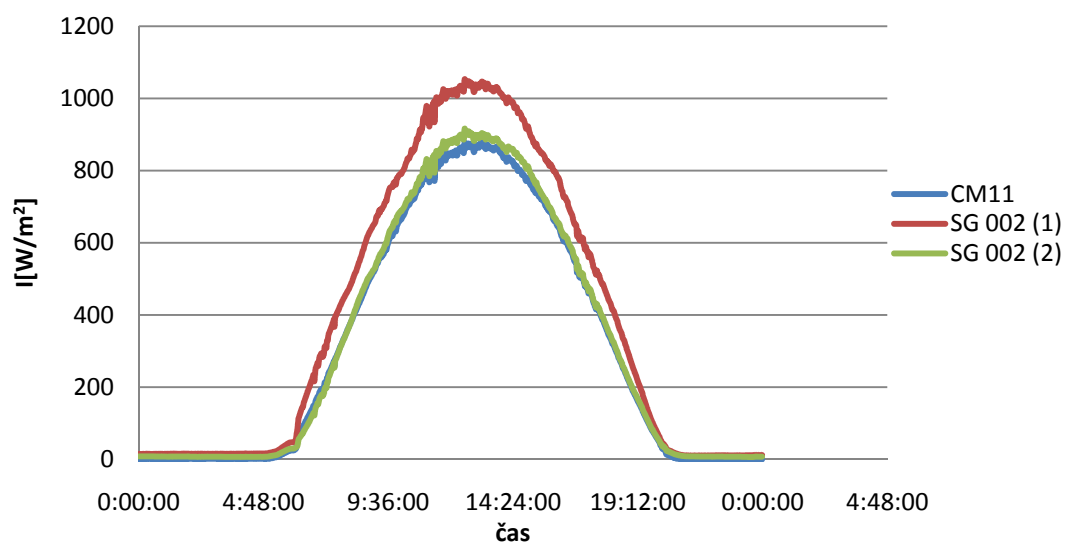


Obrázok 24 - Zapojený modul ADAM 5000/TCP

Všetky získané dáta sú okamžite k dispozícii a je možné vidieť aktuálny priebeh v podobe grafov na PC. Všetky získané hodnoty sú ukladané na počítače, aby sa mohli následne spracovať a pyranometre nakalibrovať.

4.3. Kalibrácia

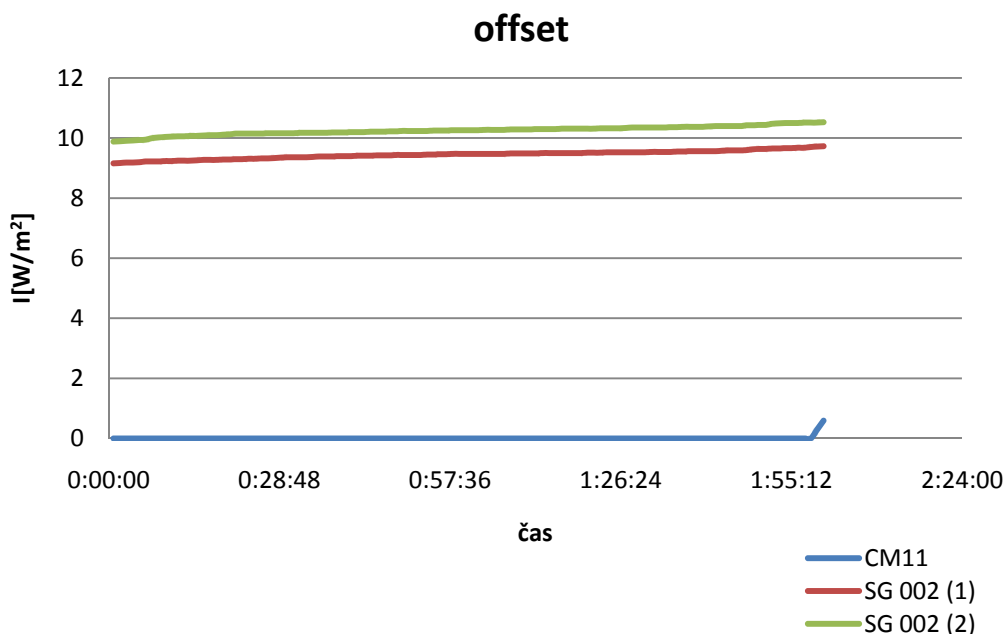
Pre kalibráciu si vyberieme dáta z dní v letnom období, kedy počas celého dňa bola jasná obloha, aby sme nemali priebeh intenzity žiarenia ovplyvnený difúznym žiarením z oblačnosti, pre hladký priebeh krivky. Na obrázku 25 môžeme vidieť veľké rozdiely v intenzite žiarenia zmeranej pomocou pyranometrov SG 002 a referenčným CM11. Práve preto je potreba tieto pyranometre nakalibrovať, aby tieto rozdiely boli minimálne.



Obrázok 25 - Priebeh intenzity žiarenia počas slnečného dňa pred kalibráciou

a) Stanovenie offsetu q

Prvý krok v kalibrácii spočíva v nájdení offsetu (posunutie nuly). Kvalitný a správne nakalibrovaný pyranometer by mal počas noci dávať signál, ktorý je rovný nulovej intenzite žiarenia. Preto si offset stanovíme z nočných dát medzi polnocou a 2. hodinou ráno, kedy je zaručená tma (pozri obrázok 26). Offset sa stanoví ako aritmetický priemer z hodnôt intenzity žiarenia v tomto časovom intervale .



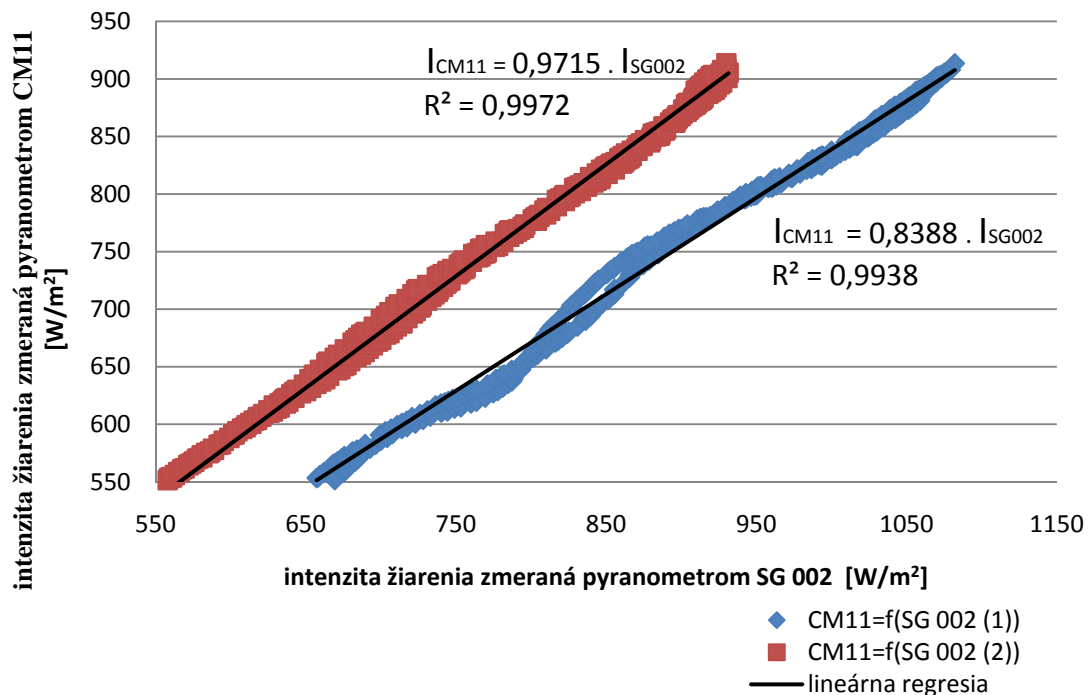
Obrázok 26 - Intenzita žiarenia v čase medzi polnocou a 2. hodinou ráno

Tabuľka 7 - Stanovenie offsetu

Typ pyranometra	Offset (q)
CM11	0
SG 002 (1)	-9,44582
SG 002 (2)	-10,25148

b) Stanovenie konštanty k pomocou lineárnej regresie

Pre ďalší postup kalibrácie je potreba priebeh zlinearizovať a určiť konštantu k , ktorá predstavuje smernicu (sklon) priamky získanej lineárnou regresiou. Pre túto časť kalibrácie je potreba pracovať s dátami v časovom intervale, kedy zaručene svieti slnko, aby výsledná regresia nebola ovplyvnená nočnými nulovými hodnotami. Preto je pri tejto kalibrácii použitý časový interval od 9.00 do 17.00, čo približne odpovedá intenzite žiarenia v intervale od 550 do 900 W/m^2 (pozri obrázok 27).



Obrázok 27 - Lineárny priebeh závislosti intenzity žiarenia medzi referenčným a kalibrovanými pyranometrami

Na obrázku 27 môžeme pozorovať priebeh závislosti a lineárnu regresiu, ktorá je na grafe matematicky vyjadrená pre obidve závislosti. V týchto rovniciach nám vystupuje konštanta k , ktorú použijeme na kalibráciu jednotlivých pyranometrov. Na grafe sa tiež nachádza hodnota R^2 , čo je hodnota spoľahlivosti s akou je preložená lineárna regresia cez rozptyl hodnôt závislosti intenzity žiarenia.

Tabuľka 8 - Konštanta k

Typ pyranometra	Konštanta k	Koeficient spoľahlivosti R^2
SG002 (1)	0,838840	0,9938
SG002 (2)	0,971513	0,9972

c) Stanovenie konštanty k pomocou mediánu

Ďalším možným spôsobom určenia smernice k je pomocou mediánu. Medián predstavuje prostrednú alebo centrálnu hodnotu, ktorá rozdeľuje postupnosť podľa veľkosti zoradených výsledkov na dve rovnako početné polovice. Pri hľadaní hodnoty mediánu, a teda konštanty k opäť postupujeme tak, že použijeme hodnoty intenzity žiarenia z časového intervalu od 9.00 do 17.00 a pre každý časový okamžik, v ktorom pyranometer sníma intenzitu žiarenia, vypočítame konštantu k . Následne stanovíme z týchto hodnôt medián, a táto hodnota predstavuje smernicu, ktorú môžeme aplikovať na samotnú kalibráciu.

Tabuľka 9 - Konštanta k (medián)

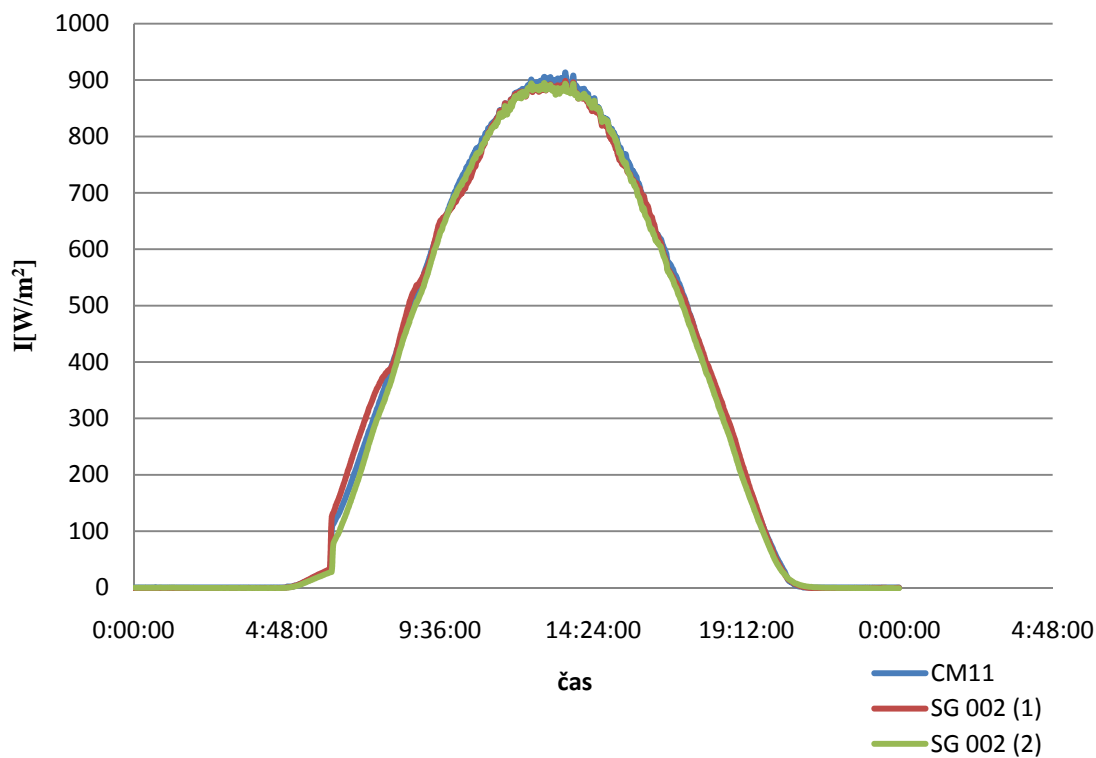
Typ pyranometra	(Medián) Konštanta k
SG002 (1)	0,849122
SG002 (2)	0,983419

d) Kalibrácia pomocou konštanty získanej lineárnou regresiou

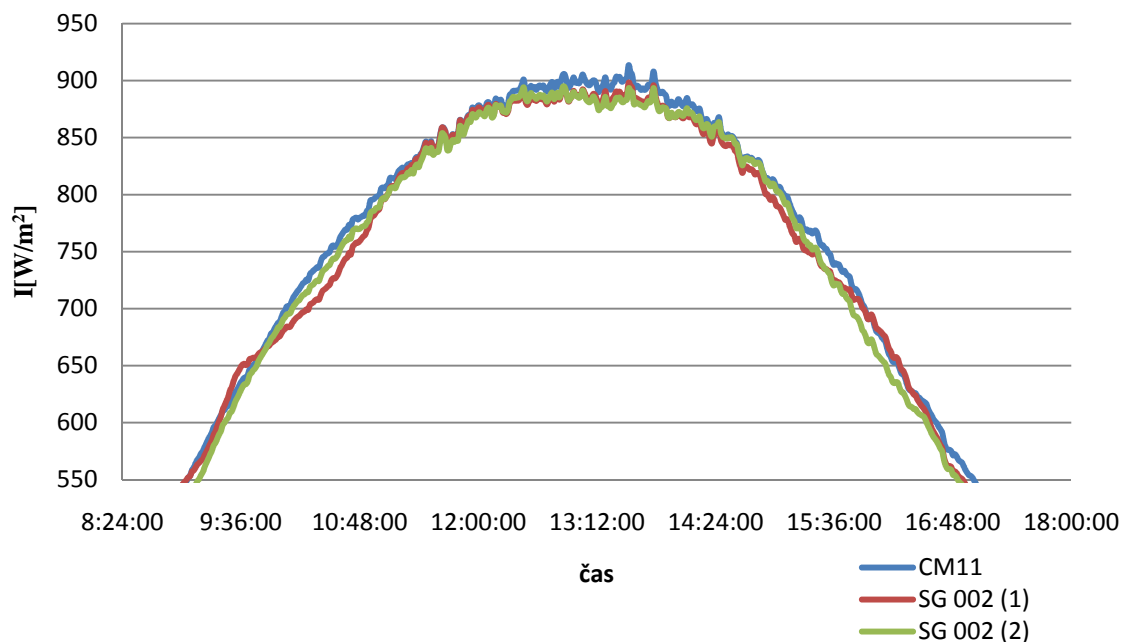
Kalibrovať budeme podľa rovnice:

$$I_{NAKALIBROVANÉ} = k \cdot I_{SG002} + q \quad (6)$$

- $I_{NAKALIBROVANÉ}$ - intenzita žiarenia získaná po kalibrácii
 I_{SG002} - intenzita žiarenia kalibrovaného pyranometra
 k - kalibračná konštanta (získaná lineárnou regresiou)
 q - offset (posunutie nuly)



Obrázok 28 - Priebeh intenzity žiarenia po kalibrácii obidvoch pyranometrov



Obrázok 29 - Priebeh intenzity žiarenia po kalibrácii (časový interval od 9.00 do 17.00)

Mierou zhody nakalibrovaných pyranometrov by mala byť suma intenzity žiarenia za celý deň respektíve plocha pod krivkou, čo predstavuje energiu dopadajúcu na oslnenú plochu za celý deň.

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} I \cdot d\tau \quad [Wh/m^2] \quad (7)$$

Tabuľka 10 - Energia dopadnutá na 1 m² za celý deň a odchýlka od referenčnej hodnoty

Typ pyranometra	Energia za jeden deň	Odchýlka od CM11	
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[%]
CM11	8060,172	-	-
SG 002 (1)	8064,369	-4,197	0,052
SG 002 (2)	7862,334	197,8386	2,51

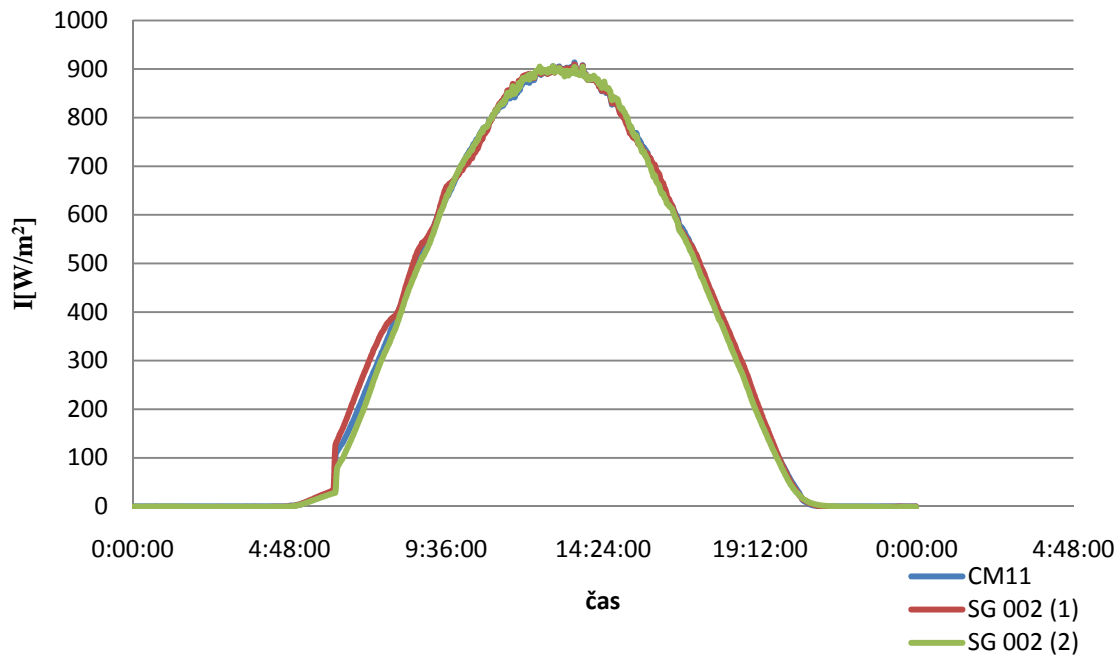
Pozn. : ako referenčná hodnota je považovaná hodnota zistená pyranometrom CM11

e) Kalibrácia pomocou konštanty získanej ako medián

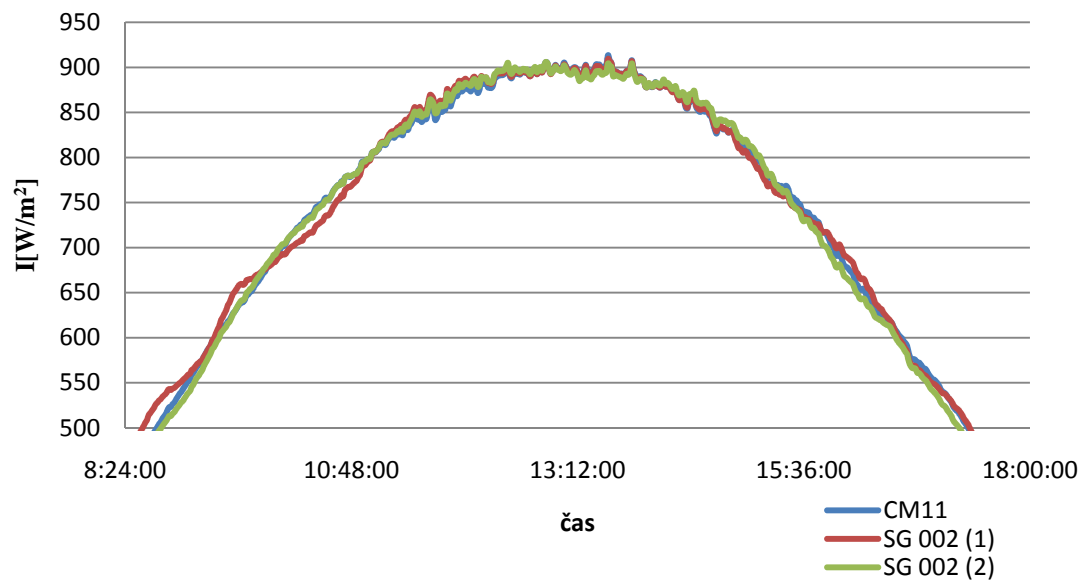
Pri kalibrácii postupujeme rovnako ako v predošlom prípade, len namiesto konštanty k zistenej lineárnou regresiou použijeme hodnotu mediánu.

$$I_{NAKALIBROVANÉ} = k \cdot I_{SG002} + q \quad (8)$$

- $I_{NAKALIBROVANÉ}$ - intenzita žiarenia získaná po kalibrácii
- I_{SG002} - intenzita žiarenia kalibrovaného pyranometra
- k - kalibračná konštanta (získaná ako medián)
- q - offset (posunutie nuly)



Obrázok 30 - Priebeh intenzity žiarenia po kalibrácii obidvoch pyranometrov pomocou mediánu



Obrázok 31 - Priebeh intenzity žiarenia po kalibrácii (časový interval od 9.00 do 17.00)

Tabuľka 11 - Energia dopadnutá na 1 m² za celý deň a odchýlka od referenčnej hodnoty

Typ pyranometra	Energia za jeden deň		Odchýlka od CM11	
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[%]
CM11	8060,172	-	-	-
SG 002 (1)	8165,995	-105,823	1,29	
SG 002 (2)	7961,703	98,469	1,23	

4.4. Overenie kalibrácie

Po nakalibrovaní pyranometrov je potreba skontrolovať, či kalibračné konštanty a offsety môžeme aplikovať aj na ďalšie dni, počas ktorých boli získavané dáta. A preto si opäť nájdeme slnečné dni a overíme kalibráciu. Na overenie použijeme ďalšie tri dni.

Tabuľka 12 - Vypočítané hodnoty energie dopadnutej na 1 m² za 1 deň po kalibrácii a odchýlky od referenčných hodnôt energie.

deň	Typ pyranometra	Kalibrácia prostredníctvom lineárnej regresie			Kalibrácia prostredníctvom mediánu		
		Energia za jeden deň	Odchýlka od CM11		Energia za jeden deň	Odchýlka od CM11	
		[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[%]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[%]
18.7.2007	CM11	7104,354	-	-	7104,354	-	-
	SG 002 (1)	7178,667	-74,312	1,03	7269,436	-165,081	2,27
	SG 002 (2)	7005,573	98,781	1,41	7094,442	9,913	0,14
17.7.2007	CM11	7435,965	-	-	7435,965	-	-
	SG 002 (1)	7491,482	-55,51	0,74	7586,084	-150,119	1,97
	SG 002 (2)	7297,188	138,77	1,90	7389,63	46,335	0,62
15.7.2007	CM11	7835,394	-	-	7835,394	-	-
	SG 002 (1)	7864,785	-29,391	0,37	7963,963	-128,569	1,61
	SG 002 (2)	7665,849	169,545	2,21	7762,809	72,585	0,93

Tabuľka 13 - Odchýlky energie dopadnutej na 1 m² za jeden deň pred kalibráciou (pre porovnanie o koľko sa zmenší odchýlka po kalibrácii)

Typ pyranometra	Energia za jeden deň	Odchýlka od CM11	
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[%]
CM11	7104,355	-	-
SG 002 (1)	8829,01	-1724,65	19,53
SG 002 (2)	7465,166	-360,811	4,83

ZÁVER

Pre efektívne využívanie solárneho žiarenia a vhodné naprojektovanie a umiestnenie solárnych systémov ako sú napríklad fotovoltaické články alebo kolektory je potreba pomerne presne poznať intenzitu solárneho žiarenia pre danú oblasť. Na to nám slúžia pyranometre, ktoré dokážu relatívne presne túto intenzitu zaznamenať. Vo všeobecnosti však platí, že ľudia sa snažia aj pri týchto meračoch skombinovať výhodnú cenu s kvalitou, pretože napríklad cena kvalitného a presného pyranometra firmy Kipp & Zonen CM11, ktorý sme použili ako referenčný pyranometer pri kalibrácii je približne 41 650 Kč a cena pyranometra SG002 od firmy Tlust'ák, ktorý sme kalibrovali, sa pohybuje okolo 10000 Kč. Po kalibrácii však môžeme aj u lacnejších pyranometrov dosiahnuť zrovnateľnú presnosť s kvalitnými pyranometrami.

Pri kalibrácii sme teda mali k dispozícii referenčný pyranometer CM11, ktorý sa radí medzi druhotné štandardy a dva pyranometre českého výrobcu Tlust'ák SG002, ktoré sa radia medzi pyranometre prvej triedy. Pred kalibráciou sa energia dopadnutá na 1 m^2 za jeden deň, ktorá bola s nimi zmeraná líšila u prvého o takmer 20 % a u druhého o skoro 5 % od referenčného, čo neodpovedá ich technickým parametrom, ktoré hovoria, že ich presnosť sa pohybuje okolo 3 %. Preto bola potreba tieto pyranometre nakalibrovať. Ako prvý krok pri kalibrácii bolo určenie offsetu, čo predstavuje posunutie počiatku voči nule a bol stanovený ako aritmetický priemer z nočných hodnôt. Pri kalibrácii boli použité dve metódy hľadania kalibračnej konštanty. Prvá metóda bola pomocou lineárnej regresie, ktorá pracuje na princípe metódy najmenších štvorcov a rozptyl hodnôt prekladá priamkou. Druhá metóda spočívala v nájdení prevodovej konštanty medzi referenčným a kalibrovaným pyranometrom pomocou mediánu. Po aplikovaní oboch metód a nakalibrovaní, môžeme porovnaním výslednej plochy pod krivkou stanoviť mieru zhody. Podľa tabuľky 12 môžeme konštatovať, že použitím oboch metód sme dosiahli mieru zhody, ktorá je menšia ako 3 % a teda vyhovuje technickým parametrom kalibrovaných pyranometrov. Zároveň si však môžeme všimnúť, že lineárna regresia je vhodnejšia pre prvý pyranometer SG002, a metóda pomocou mediánu je zasa vhodná na druhý pyranometer SG002 pretože sa tam dosahuje menšia chyba a vyšší stupeň zhody, rádovo okolo 1 %.

Na záver môžeme konštatovať, že kalibrácia bola úspešná a aj lacnejšie pyranometre umožňujú po kalibrácii pomerne presné meranie intenzity žiarenia. Veľká nevýhoda, ktorá sa dá vypočítavať na získaných dátach pyranometrov SG002 je, že u nich dochádza k pomerne značnému kolísaniu hodnôt offsetu, počas jedného mesiaca až o 5 W/m^2 . Je to spôsobené zmenou okolitej teploty. Priamoúmerne okolitej teplote sa mení teplota prístroja a spôsobuje tepelné prúdy vo vnútri prístroja a tomuto offsetu hovoríme offset typu B, ktorý nemôžeme priamo ovplyvniť [10].

Preto je vhodné tieto pyranometre používať napríklad pri meraní intenzity žiarenia dopadajúceho na solárne kolektory, prípadne pri solárnych elektrárnach, kde ich presnosť postačuje. Použitie nachádzajú aj v poľnohospodárstve pri rozhodovaní sa o vhodnosti pestovania určitej plodiny pri danej intenzite slnečného žiarenia. Ale sú vhodné aj na testovanie vplyvu slnečného žiarenia na rôzne materiály, prípadne farby a laky, kde dôležitým faktorom je aj UV žiarenie.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] *Slnečné žiarenie*. Álló, Š. [online]. 28.2.2009 [cit. 2008-12-07].
Dostupný z WWW: <<http://www.windpower.sk/?a=article&id=364>>
- [2] Lulkovičová, O., Takács, J. *Netradičné zdroje energie-prednášky*.
Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2003. ISBN 80-227-1838-6
- [3] *Earth's energy budget*. NASA [online]. 28.2.2009 [cit. 2008-04-24].
Dostupný z WWW: <http://www.nasa.gov/centers/goddard/images/content/172159main_polar_radiation_budget_large.gif>
- [4] Cihelka, J. *Sluneční vytápěcí systémy*. Praha: Vydavatelství SNTL, 1984.
ISBN 04-236-84
- [5] *Fotovoltaický článok*. Wikipedia: *slobodná encyklopédia* [online]. 28.2.2009
[cit. 2009-01-30]. Dostupný z WWW:
<http://sk.wikipedia.org/wiki/Fotovoltaick%C3%BD_%C4%8DI%C3%A1nok>
- [6] Kittler, R., Mikler, J. *Základy využívania slnečného žiarenia*. Bratislava:
Vydavateľstvo VEDA, 1986. ISBN 71-013-06
- [7] Garg, H. P., Garg, S. N., Measurement of solar radiation-II. Calibration and
standardization. *Renewable Energy*. [online]. 1993, vol. 3, no. 4,5
[cit. 2009-03-07], s. 335-348. Dostupný z WWW: <www.springerlink.de>
- [8] *Sunshine pyranometer*. Propagačné materiály firmy Dynamax Inc [online].
Dostupný z WWW: <www.dynamax.com>
- [9] *Pyranometer*. Wikipedia: *free encyclopedia* [online]. 11.2.2009
[cit. 2009-03-06]. Dostupný z WWW: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Pyranometer>>
- [10] *Instruction manual*. Propagačné materiály firmy Kipp & Zonen [online].
Dostupný z WWW:
<<http://www.kippzonen.com/?downloadcategory/551/Pyranometers.aspx>>
- [11] *Calibration of field pyranometer*. ISO 9847 [online]. 1991 [cit. 2009-03-21],
Dostupný z WWW: <<http://www.solar.demokritos.gr/standard/9847.html>>
- [12] *Pyranometr SG002*. Technické materiály firmy Tlust'ák
- [13] *Kalibrace pyranometrů*. Projekt GAČR 103/07/0907 [online]. [cit. 2009-04-09].
Dostupný z WWW:
<<http://ottp.fme.vutbr.cz/index.php?lang=1&menu=4&polozka=5>>
- [14] *Pyranometr SG002*. [foto]. Dostupný z WWW:
<http://www.fiedler-magr.cz/index.php?str=v/SG002&__e1a>
- [15] *Medián*. Wikipedia: *free encyclopedia* [online]. 23.2.2009 [cit. 2009-04-17].
Dostupný z WWW: <<http://sk.wikipedia.org/wiki/Medi%C3%A1n>>

Zoznam použitých symbolov

Veličina	Symbol	Jednotka
Výstup testovaného pyranometra v pozícii 1	A	μV
Výstup testovaného pyranometra v pozícii 2	A'	μV
Výstup referenčného pyranometra v pozícii 1	B	μV
Výstup referenčného pyranometra v pozícii 2	B'	μV
Teplotný koeficient senzitivity	C_T	%
Montážna výška pyranometra nad zemou	H	m
Intenzita celkového žiarenia	I	W/m^2
Intenzita žiarenia referenčného pyranometra	I_{CM11}	W/m^2
Intenzita difúzneho žiarenia	I_n	W/m^2
Dopadajúce žiarenie pod uhlom θ	I_N	W/m^2
Intenzita žiarenia získaná po kalibrácii	$I_{\text{NAKALIBROVANÉ}}$	W/m^2
Intenzita priameho žiarenia	I_P	W/m^2
Intenzita žiarenia kalibrovaného pyranometra	I_{SG002}	W/m^2
Stredná intenzita žiarenia	I_{str}	W/m^2
Prevodová konštanta	k	$\frac{\text{W}/\text{m}^2}{\mu\text{V}}$
offset	q	W/m^2
Energia dopadajúca na oslnenú plochu za celý deň	Q	Wh/m^2
Energia dopadnutá na oslnenú plochu za deň	Q_{Sdenteor}	Wh/m^2
Koeficient spoľahlivosti	R^2	-
Citlivosť pyranometra	S	$\frac{\mu\text{V}}{\text{W}/\text{m}^2}$
Citlivosť referenčného pyranometra	S_a	$\frac{\mu\text{V}}{\text{W}/\text{m}^2}$
Citlivosť testovaného pyranometra	S_b	$\frac{\mu\text{V}}{\text{W}/\text{m}^2}$
Výstupné napätie pyranometra	U	μV
Zmena v senzitivite prístroja	ΔS	$\frac{\mu\text{V}}{\text{W}/\text{m}^2}$
Zmena v okolitej teplote	ΔT	$^{\circ}\text{C}$
Uhol dopadajúceho žiarenia	θ	$^{\circ}$