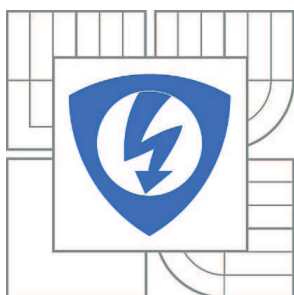


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

MODUL PRO ŘÍZENÍ A SBĚR DAT Z PYRANOMETRU

THE MODULE FOR CONTROL AND DATA ACQUISITION OF PYRANOMETERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

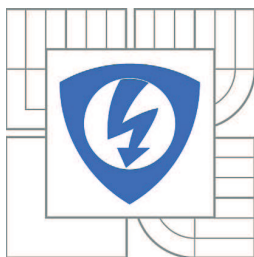
Bc. MARTIN HALM

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADEK STOJAN

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Martin Halm

ID: 98693

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Modul pro řízení a sběr dat z pyranometru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s metodami měření intenzity slunečního záření. Zaměřte se na stanovení intenzity globálního záření a stanovení difúzní a přímé složky záření pomocí pyranometru. Navrhněte systém, který bude automaticky dlouhodobě monitorovat intenzitu globálního a difúzního slunečního záření a vyhodnoťte naměřené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Radek Stojan

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt:

Tato práce pojednává o měření intenzity slunečního záření pomocí pyranometru. Teoreticky rozebírá princip vzniku slunečního záření a jeho vliv na fotovoltaické články. Dále popisuje způsoby pro měření různých složek slunečního záření.

Úkolem práce je realizovat stanoviště pro dlouhodobé monitorování globální a difúzní složky slunečního záření pomocí pyranometru a naměřené hodnoty vyhodnotit. Vytvořený program, který ukládá dlouhodobě monitorovaná data sluneční energie je součástí měřicího stanoviště.

Abstract:

This work deals with measuring of intensity solar radiation by pyranometer. In theory discusses the principle of solar radiation and its effects on photovoltaic cells. Also describes methods to measure different components of solar radiation.

A task work is realize station for long time monitoring of global and diffuse components of solar radiation by pyranometer and measured values evaluate

Klíčová slova:

Pyranometr, intenzita slunečního záření, fotovoltaický článek

Keywords:

Pyranometer, intensity of solar radiation, photovoltaic cell

Bibliografická citace díla:

HALM, M. Modul pro řízení a sběr dat z pyranometru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 44 s. Vedoucí diplomové práce *Ing. Radek Stojan*.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne:

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Stojanovi za metodické a cíleně orientované vedení a rady při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci.

Obsah

ÚVOD.....	7
1 TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1 Slunce a vznik slunečního záření	8
1.1.1 Sluneční záření jako zdroj energie.....	9
1.1.2 Vliv atmosféry na sluneční záření	10
1.1.3 Geometrie dopadu slunečního záření	12
1.1.4 Intenzita slunečního záření v ČR.....	14
1.2 Princip fotovoltaického článku	15
1.2.1 Vývoj fotovoltaických článků	17
1.2.2 Fotovoltaické moduly	19
1.2.3 Využití pyranometru pro fotovoltaické panely	21
1.3 Měření slunečního záření	22
1.2.4 Měření globálního záření.....	22
1.2.5 Měření přímého záření.....	22
1.2.6 Měření difúzního záření.....	23
1.4 Teoretický způsob připojení	23
1.5 Proudová smyčka 4-20 mA.....	24
2 PRAKTICKÁ ČÁST	26
2.1 Pyranometr SG420	26
2.2 Popis měřicího stanoviště	27
2.3 Program pro sběr dat z multimetrů agilent	28
2.4 Popis programu na vyhodnocení dat.....	31
2.5 Vzorový výpočet výšky slunce nad obzorem	32
2.6 Vyhodnocení dat	33
2.6.1 Naměřená vlastní data	33
2.6.2 Data z meteorologické stanice	37
3 ZÁVĚR.....	41
4 POUŽITÉ ZDROJE.....	42
5 SEZNAM OBRÁZKŮ	43
6 SEZNAM TABULEK	43
7 SEZNAM SYMBOLŮ	44

ÚVOD

Dnešní civilizace je doslova závislá na elektrické energii. Je na ní závislý celý průmyslový svět a bez ní si nedovedeme už představit ani náš život. Nedávné události ve světě jako havárie těžební ropné plošiny v Mexickém zálivu a masivní znečištění moře ropou, havárie Fukušimské jaderné elektrárny s únikem jaderného paliva mimo elektrárnu způsobená přílivovou vlnou tsunami nás nutí zamyslet se nad bezpečnou energetickou strategií do budoucna. Ve světě dlouhodobě sílí snaha o omezení využívání fosilních paliv. Stále silněji je slyšet o pokusech zbavit se závislosti na jaderné energii. Tento trend zaznívá v současnosti od našich sousedů z Německa. Je však nutné něčím výpadek v produkci elektrické energie nahradit.

Využití obnovitelných zdrojů, tedy v podstatě energie slunce má však i svá úskalí. Nové výzkumy ukazují, že velké větrné elektrárny díky tomu, že svými dlouhými lopatkami promíchávají masy vzduchu, přímo podporují globální oteplování. Navíc mají i negativní vliv na populace létavých živočichů. Na nízké frekvence zvuku, který produkují, jsou zároveň citliví i někteří lidé. Pěstování biomasy je také sporné. Jsou oblasti, kde je to výhodné a přínosné. Nesmí se však zapomínat, že lidská populace na Zemi už dosáhla sedmi miliard lidí a stále roste. Využití zemědělské půdy pro pěstování energetických plodin tak do budoucna nebude možné.

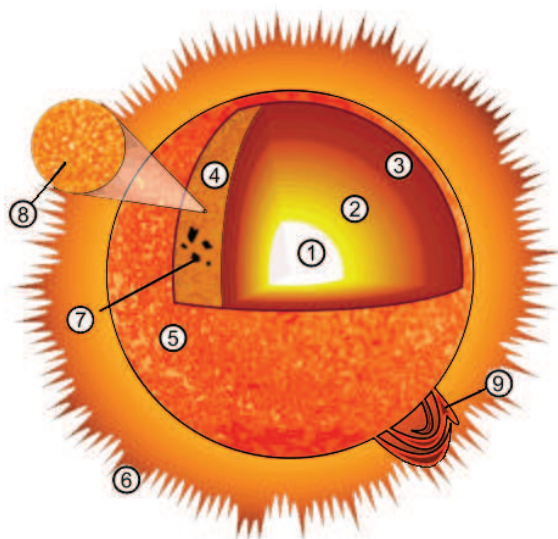
Solární elektrárny jak se zdá jsou zajímavou možností jak produkovat elektrickou energii. Jelikož Slunce je obnovitelným zdrojem energie a jeho vyhasnutí se počítá až za několik miliard let. Je sluneční energie pravou volbou. Pro určení kvalitního místa na postavení takové elektrárny je potřeba znát statistické údaje o intenzitě záření v dané lokalitě. Tato statistika je prováděna např. pomocí pyranometru. Při spojení pyranometru se stínící clonou je možné měřit i difúzní složku záření, která po odečtení od globální složky určí přímou složku intenzity slunečního záření. Z důvodu potřeby zpracování dat naměřené intenzity slunečního záření, je třeba naměřená data ukládat do souborů, jenž jsou optimální a dostupné pro běžného uživatele.

Diplomová práce má za cíl vytvořit pracoviště k měření intenzity slunečního záření a to především difúzní a globální složky. Toto pracoviště by se mohlo využívat k měření nejvhodnějšího umístění fotovoltaických panelů a provádění dlouhodobých statistických měření. Díky dlouhodobě monitorovaným hodnotám intenzity záření, je možné stanovit nejvhodnější úhel a natočení fotovoltaického panelu tak, aby účinnost byla co největší.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Slunce a vznik slunečního záření

Slunce patří k nejdůležitější a také nejbližší hvězdě naší planety. Je zdrojem veškeré energie na planetě Země. Bez slunce by naše planeta zanikla. Slunce má tvar koule o průměru $1,39 \times 10^9$ m, tj. 109krát větší než průměr Země. Složení Slunce je převážně z atomárního vodíku (70%), helia (28%) a malým množstvím jiných prvků periodické soustavy prvků (2%). Hmotnost Slunce je $1,98 \times 10^{30}$ kg. Od Země je slunce vzdáleno v průměru $1,5 \times 10^{11}$ m. Sluneční záření ze Slunce dorazí na zem přibližně za 8 minut a 19 vteřin. Ve středu Slunce dosahuje teplota 13 000 000 K. Teplota slunečního povrchu tzv. fotosféra je přibližně 5 700 K. Struktura slunce je zobrazena na obrázku Obr.1.[6]



Obr. 1: Struktura Slunce.

1 – jádro Slunce, 2 – radiační zóna, 3 – konvektivní zóna, 4 – fotosféra, 5 – chromosféra, 6 – koróna, 7 – sluneční skvrna, 8 – granule, 9 – protuberance. [6]

Zdrojem sluneční energie je termonukleární reakce (jaderná syntéza, fúze), při této reakci dochází k přeměně vodíku na helium. Podmínky pro přeměnu jsou teplota okolo 13×10^6 K a tlaku 2×10^{10} MPa. V těchto podmínkách jsou všechny atomy zcela ionizovány. Při syntéze se zmenší hmotnost hélia než hmotnost vstupujícího vodíku. Rozdíl mezi hmotnostmi vstupujícího prvku vodíku a vzniklého prvku helia se dá přepočítat dle Einsteinova vztahu $E=mc^2$ na

energii, která vznikne tímto procesem. Vyzářená energie do prostoru je $3,6 \times 10^{26}$ W a intenzita záření na povrchu Slunce je 6×10^7 W/m².

1.1.1 Sluneční záření jako zdroj energie

Slunce uvolňuje do svého okolí energii ve formě elektromagnetického záření. Na tohle záření lze pohlížet také jako na soubor fotonů, světelných částic. Budeme-li brát v potaz částicovou povahu světla, pak podle Plancova vztahu (1) má každý foton určitou energii.

$$E = h \cdot f \quad [J] \quad (1)$$

kde:

E – energie fotonu [J]

h – Planckova konstanta [J·s]

f – frekvence příslušného elektromagnetického vlnění [Hz, s⁻¹]

Ale pokud budeme světlo brát jako elektromagnetické vlnění, lze každé frekvenci f přiřadit odpovídající vlnovou délku λ dle vztahu (2).

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad [Hz] \quad (2)$$

kde:

c – rychlost světla [m·s⁻¹]

λ – vlnová délka [m]

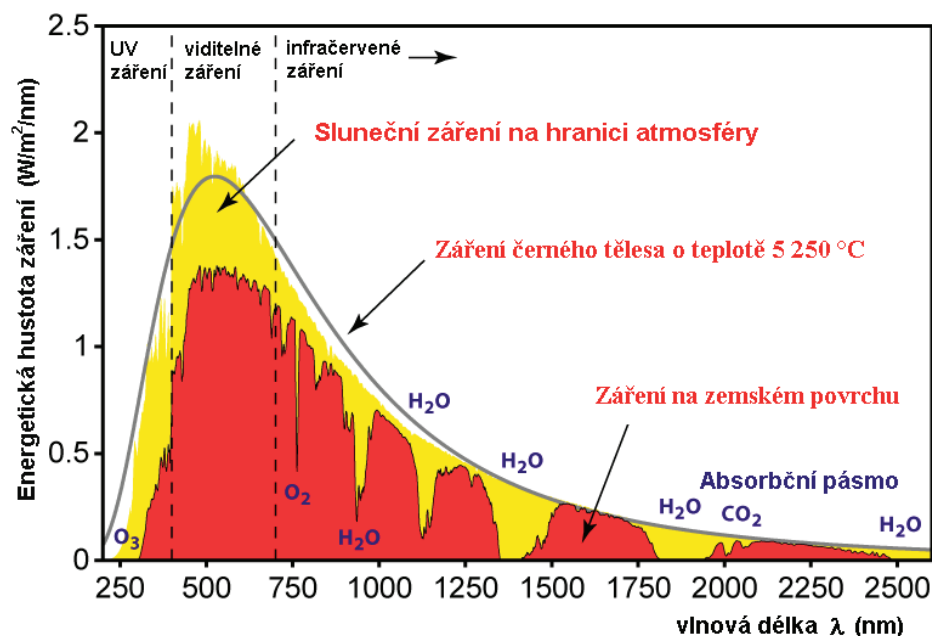
f – frekvence příslušného elektromagnetického vlnění [Hz, s⁻¹]

Tab. 1: Spektrum elektromagnetického záření

<i>název</i>	<i>vlnová délka λ</i>	<i>poznámka</i>
radiové vlny	do 1 dm	rozhlasové a televizní vysílání
mikrovlny	1 dm – 1 mm	ohřev vibracemi molekul, radar
infračervené záření (IR)	1 mm – 760 nm	tepelné záření
viditelná oblast	760 nm – 390 nm	barevná škála viditelná lidským okem
ultrafialové záření (UV)	390 nm – 10 nm	nebezpečné pro živé organismy (rakovina)
rentgenové záření (X-rays)	10 nm – 1 pm	užíváno ve zdravotnictví a bezpečnosti
gama záření (γ -rays)	nad 1 pm	velmi pronikavé, produkt jaderných reakcí

Spektrální rozsah elektromagnetického záření je od 0,1nm až 103 m. Solární zařízení tvoří rentgenové (RTG), ultrafialové (UV), viditelné, infračervené (IR) rádiové záření (viz. tab. 1), přičemž z energetického hlediska je nejvýznamnější vlnový rozsah 200 až 3000 nm. Nejvíce energie je přenášeno v oblasti viditelného spektra (Obr. 2).

Z důvodu velké vzdálenosti mezi Zemí a Sluncem se sluneční záření s rostoucí vzdáleností rozptyluje na větší plochu a tím ztrácí na intenzitě. Zářivý tok, který dopadá na povrch zemské atmosféry má výkon přibližně 1,4 kW. Tato hodnota je vztažena na metr čtvereční, pak měrný tok energie je $1,4 \text{ kW/m}^2$ tzv. solární konstanta. Z důvodu kolísání Země od Slunce je stanovena průměrná solární konstanta $I_0 = 1360 \text{ W/m}^2$.



Obr. 2 Spektrum slunečního záření při vstupu do atmosféry [2]

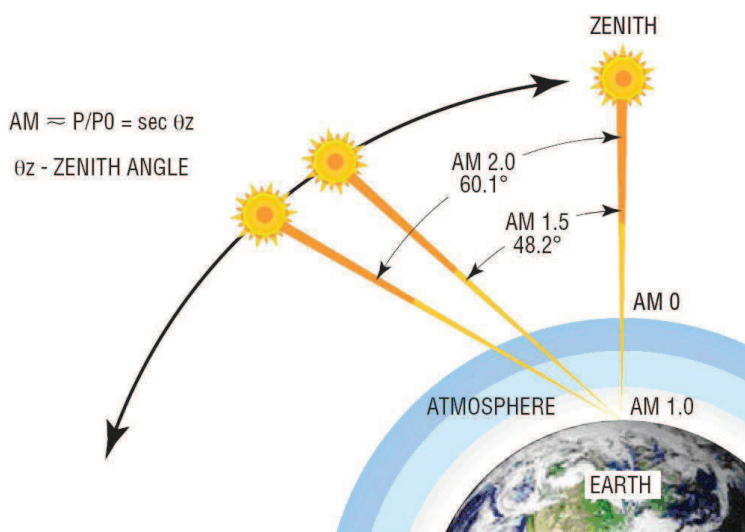
1.1.2 Vliv atmosféry na sluneční záření

Zásadní vliv na Sluneční záření, které dopadá na Zemi má stav atmosféry. A to především oblačnost. Jelikož jsou mraky největší překážkou mezi slunečním zářením a zemským povrchem. Část dopadajícího záření je od mraků odražena a zbytek je rozptýlen do různých směrů. Tímto způsobem vzniká difúzní záření, které z energetického hlediska není příliš využitelné. Dalším zdrojem rozptylu je míra znečištění atmosféry tzn. čím větší znečištění atmosféry prachovými částicemi a aerosoly, tím větší rozptyl slunečního záření.

Sluneční záření ovlivňují následující faktory:

- Zeměpisná šířka
- Roční období a denní doba
- Na intenzitu dopadajícího záření má vliv také sklon osluněné plochy a její orientace ke světovým stranám
- Tloušťka vrstvy atmosféry (AM faktor)
- Stav atmosféry

Důležitým faktorem je tloušťka vrstvy vzduchu, kterou musejí sluneční paprsky překonávat. Tloušťku vrstvy vzduchu tzv. „Air Mass“ faktor určuje především výška Slunce nad obzorem (obr. 3) a pak nadmořská výška. Nachází-li se Slunce v zenitu (tzv. nadhlavníku) je AM faktor roven jedné. Sluneční paprsky svírají v tomto případě s horizontální rovinou na povrchu Země pravý úhel a tzv. zenitový úhel je roven nule.



Obr. 3 Výška slunce nad obzorem a AM faktor [3]

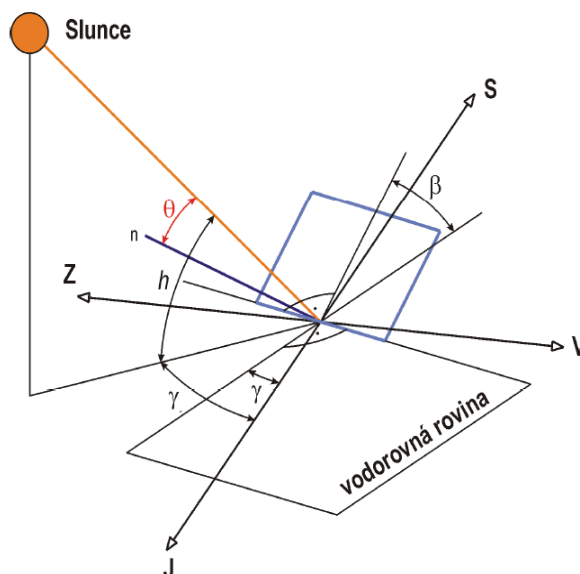
Dle vzorce (3) lze vypočítat hodnotu AM faktoru.

$$AM = \frac{1}{\cos \theta}, \text{ pro } \theta = 0^\circ - 80^\circ [-] \quad (3)$$

Kde θ je úhel mezi Sluncem v zenitu a výchozí polohou (zenitový úhel). Každé místo na Zemi má své charakteristické klimatické podmínky. Stav atmosféry může člověk jen těžko ovlivnit, jediné čím může přispět je snaha o snížení znečištění ovzduší.[4]

1.1.3 Geometrie dopadu slunečního záření

Obrázek 4. znázorňuje geometrickou závislost Slunce k Zemi. Mezi nejpodstatnější veličiny patří deklinace a sluneční časový úhel. Pro výpočty daných veličin je potřeba znát zeměpisná šířka místa, datum dne výpočtu a čas.



Obr. 4 Geometrie slunečního záření [4]

- **Deklinace δ**

Je to úhel, který svírá spojnice středů Země a Slunce s rovinou zemského rovníku (Obr. 5). Deklinaci lze stanovit z různých vztahů je potřeba znát pouze den a měsíc (3) nebo pořadí dne v roce (4), který chceme vypočítat.

Výpočet deklinace pomocí dne a měsíce:

$$\delta = 23,45^\circ \sin(0,98D + 29,7M - 109^\circ) [^\circ] \quad (3)$$

kde

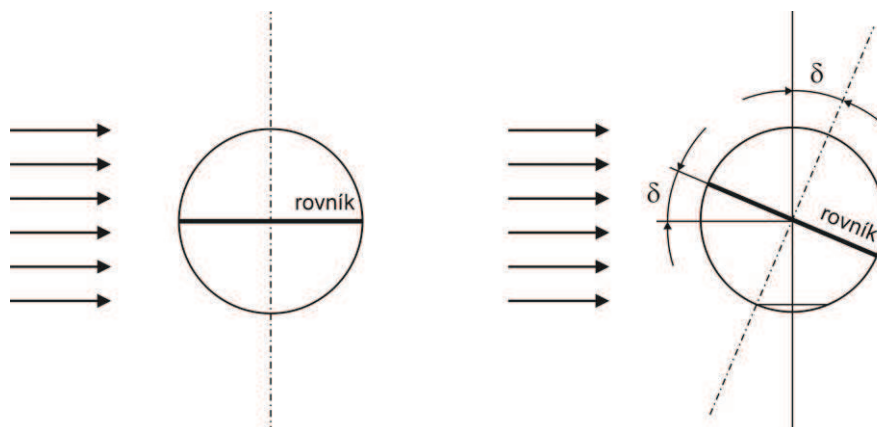
D-pořadí dne v měsíci

M-pořadí měsíce v roce

Výpočet pomocí pořadí dne v roce:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) [^\circ] \quad (4)$$

Kde
n-pořadí dne v roce



Obr. 5 definice deklinace[4]

- **Sluneční časový úhel τ**

Je to úhel zdánlivého posunu Slunce nad místními poledníky vlivem rotace Země, vztažený ke slunečnímu polední. Zeměkoule se otočí kolem své osy za 24 hodin tzn. otočí se o 360 stupňů. Posun slunce je tedy za jednu hodinu o 15 stupňů (5).

$$\tau = 15^\circ \times (ST - 12) [-] \quad (5)$$

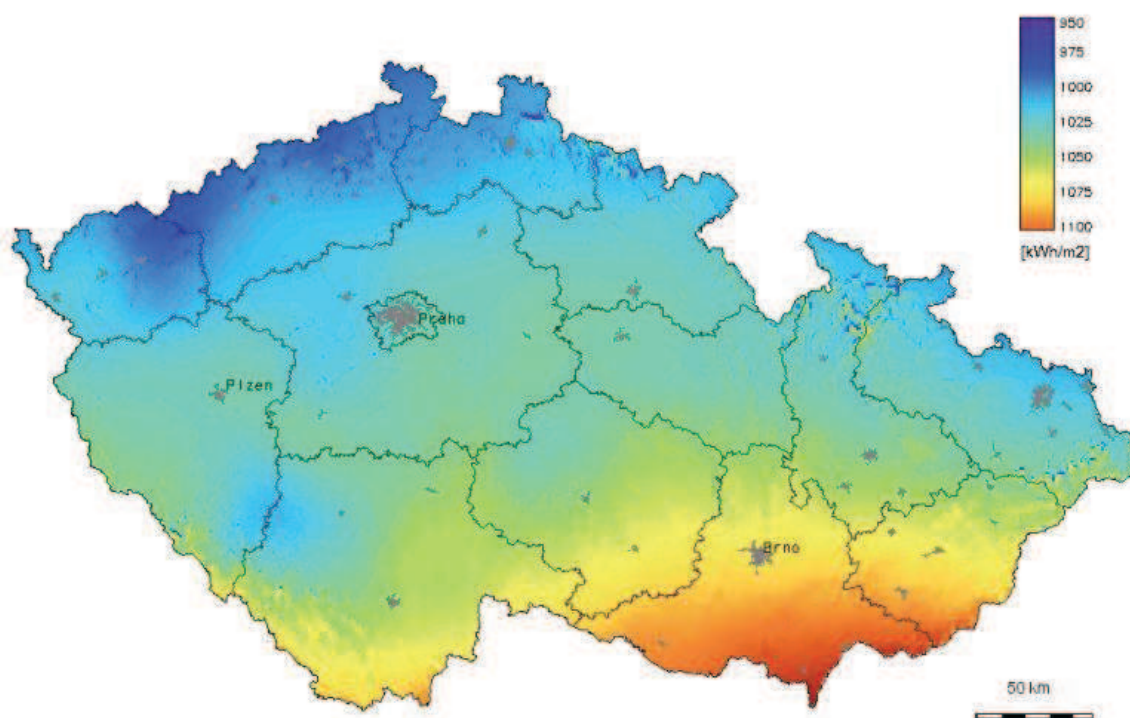
- **Výška slunce h**

Výška slunce je úhel, který svírá vodorovná plocha na zemi se Sluncem (6).

$$\sinh = \sin \delta \times \sin \Phi + \cos \delta \times \cos \Phi \times \cos \tau [^\circ] \quad (6)$$

1.1.4 Intenzita slunečního záření v ČR

Intenzita slunečního záření je veličina, která vyjadřuje souhrn globálního záření na jednotku vodorovné plochy. V České republice se pohybuje v rozmezí 950 – 1 100 kWh/m² (viz obr. 6). V nejslunnějších oblastech naší zeměkoule dosahují hodnoty intenzity slunečního záření přes 2 200 kWh/m².



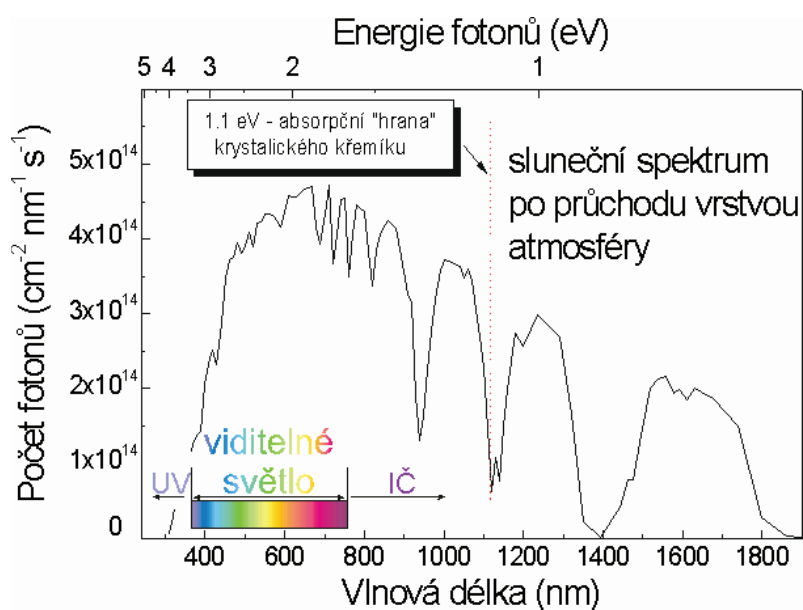
Obr. 6 Průměrná hodnota globálního záření v ČR[8]

Průměrné hodnoty intenzity slunečního záření v ČR za den[8]:

v zimě 2 – 3 kWh/m²
v létě 4,5 – 5,5 kWh/m²

1.2 Princip fotovoltaického článku

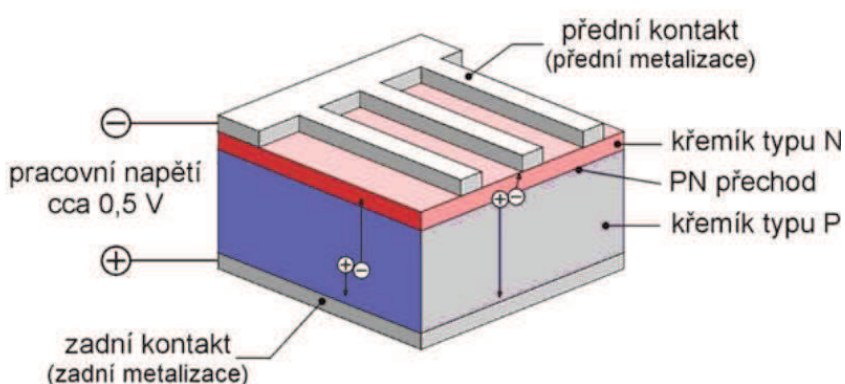
Obecně lze říci, že fotovoltaický článek přeměňuje elektromagnetické záření na elektrickou energii. Při bližším pohledu zjistíme, že vznik ustáleného toku náboje, tj. stejnosměrného proudu vzniká dodáním potřebného množství energie jednotlivým volným nosičům v polovodičích s vodivostí typu P a N spojených v PN přechod. Podle typu nosiče náboje dělíme polovodiče na vlastní a příměsové. Příměsové polovodiče mohou být dotované typu N (majoritními nosiči náboje jsou elektrony) nebo typu P (majoritními nosiči jsou díry, které se chovají jako částice s kladným nábojem)



Obr. 7: Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením vlnových délek a energií fotonů i s vyznačením šířky zakázaného pásu[5]

Křemík obsahuje 14 elektronů, má krystalovou strukturu diamantu, takže každý atom křemíku je obklopen čtyřmi nejbližšími sousedy. Poslední čtyři elektrony (valenční) vytvářejí s těmito sousedy kovalentní vazby. Energie volného elektronu, který nepodléhá působení žádných sil, může nabývat libovolných hodnot. Naproti tomu energie elektronu v krystalu křemíku nabývá pouze určitých hodnot v důsledku pohybu v poli periodického potenciálu. Tyto hladiny energie jsou rozděleny do pásů dovolených energií. Pásky dovolených energií oddělují pásy zakázaných energií viz obr. 7 [5].

Důležitou roli mají valenční pás, poslední zakázaný pás a vodivostní pás. Valenční pás sestává z energetických stavů valenčních elektronů. Protože těchto stavů je stejný počet jako valenčních elektronů v celém krystalu, budou za velmi nízkých teplot všechny obsazené. Po valenčním pásu následuje pás zakázaných energií, kde žádný elektron nemůže mít energii odpovídající stavu v tomto pásu. Dále následuje pás vodivostní, kde stavy tohoto pásu za velmi nízkých teplot nejsou obsazené. Rozdíly mezi jednotlivými energetickými hladinami uvnitř pásů dovolených energií jsou neměřitelně malé [5].



Obr. 8: Princip fotovoltaického článku[5]

K fotovoltaické přeměně dochází v polovodičových fotovoltaických článcích, kde se energie dopadajících fotonů mění na elektrickou energii. Pokud na fotovoltaický článek dopadají fotony s větší energií, než jaká odpovídá šířce zakázaného pásu, tyto fotony generují páry elektron-díra. Na místě uvolněného elektronu zůstává neobsazený stav-díra, do kterého mohou přeskakovat sousední elektrony, které jsou vázány v kovalentní vazbě. Tímto způsobem se může tento neobsazený stav pohybovat krystalem jako kladný náboj. Mluvíme proto o vytvoření páry elektron-díra interakcí s fotonem. Elektron se může vrátit zpátky do neobsazeného stavu ve vazbě, v takovém případě mluvíme o rekombinaci elektronu a díry. Pokud v krystalu existuje nehomogenita, se kterou je spojeno vnitřní elektrické pole – takovou nehomogenitou může být třeba přechod PN, jsou tímto elektrickým polem rozděleny páry elektron-díra a to tak, že elektrony jsou urychleny do oblasti N a díry do oblasti typu P [1].

Tímto způsobem se oblast typu N nabíjí záporně a oblast typu P nabíjí kladně tak, že na osvětleném polovodiči s přechodem PN vzniká fotovoltaické napětí (Obr. 8).

1.2.1 Vývoj fotovoltaických článků

Během vývoje fotovoltaických článků bylo vynalezeno mnoho typů a konstrukcí s využitím různých materiálů. Pro přehlednost se fotovoltaické články dělí na tři generace.

První generace

Jedná se o fotovoltaické články vyráběné z destiček monokrystalického křemíku, v nichž je vytvořen PN přechod. Tato generace je v současné době na trhu nejrozšířenější, a přestože je jejich výroba relativně drahá (velká spotřeba velmi čistého křemíku) budou na trhu v průběhu dalších let stále dominovat. Tento typ se vyznačuje dobrou účinností (sériová výroba 16 až 19%, speciální struktury až 24%) a dlouhodobou stabilitou výkonu. Další druh vyráběných fotovoltaických článků jsou z polykrystalického křemíku, které jsou jasně modré a je u nich zřejmá výrazná krystalická struktura. Polykrystalické fotovoltaické články bývají čtvercové. Účinnost polykrystalických článků je sice nepatrně nižší, ale lépe dokáží proměňovat difúzní světlo a světlo přicházející z boku, takže prakticky jsou v dnešní době zcela rovnocenné s články monokrystalickými. Obvykle bývají nepatrně levnější. Články první generace se prodávají od sedmdesátých let [1].

Druhá generace

V rozvoji článků druhé generace byla především snaha o snížení množství potřebného křemíku a zlevnit tak výrobu tím, že se používají tenkovrstvé články. Články druhé generace se vyznačují 100 krát až 1000 krát tenčí aktivní absorbující polovodičovou vrstvou. Používají se články např. z mikrokystalického nebo amorfního křemíku. Nicméně na úrok snížení výrobních nákladů klesla znatelně také účinnost (sériová výroba 10%) a stabilita, která dále s časem klesá. Výhodou těchto článků je jejich pružnost a ohebnost. Existují například fotovoltaické fólie, které se nalepí při konstrukci na střeche a plní funkci nepropustné fólie a současně vyrábí elektřinu. Jejich využití se najde i například v armádě, kde tvoří součást oblečení či batohu a umožňují tak napájet přenosná zařízení (mobilní telefon, vysílačku, notebook). Články druhé generace se prodávají od poloviny osmdesátých let.[1]

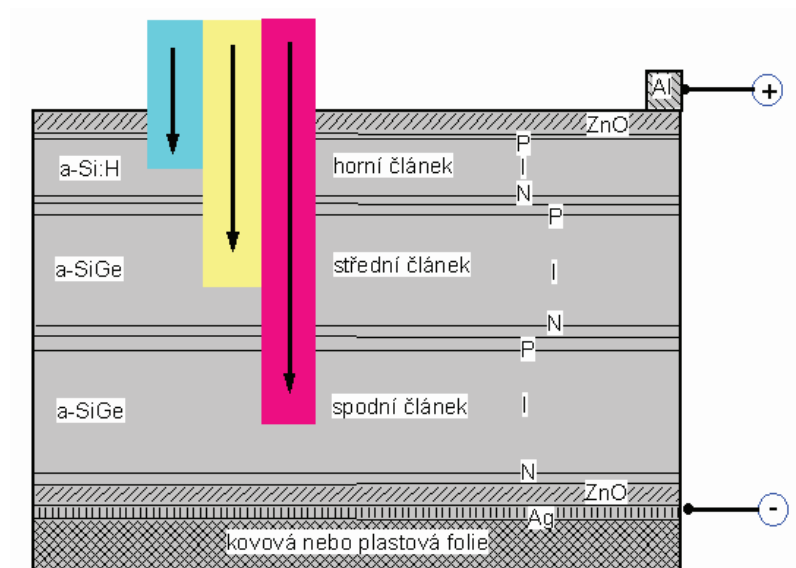
Třetí generace

Co se týče článků třetí generace, jedná ze zde spíše o určitý směr dalšího výzkumu, než o nějaké konkrétní zástupce. Vývoj směřuje k překročení Shockley-Queisserovy hranice, jejíž podstatou je předpoklad, že 1 foton 1 využitelný exciton o energii, která se rovná zakázanému pásu. Zbylá energie se přemění na teplo. Existuje několik směrů, kterými se může budoucí výzkum ubírat, z nichž je možné zmínit následující:

- tandemové solární články
- články s vícenásobnými pásy
- články využívající termofotovoltaické přeměny, kde je absorbér současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii
- termofotonická přeměna, nahrazení absorberu elektroluminiscencí
- články, které by využívaly kvantové jevy v kvantových tečkách nebo kvantových jamách
- prostorově strukturované články vzniklé samoorganizací při růstu aktivní vrstvy
- organické články

Jednou ze zmíněných variant, která se již dočkala realizace jsou tandemové solární články. Jedná se o vícevrstvé struktury. Dvojvrstvé – tzv. tandemy a trojvrstvé články. Každá substruktura (p-i-n) absorbuje určitou část spektra a tím dochází k maximalizaci energetické využitelnosti fotonů. Jedním z příkladů tandemového solárního článku je struktura, která se skládá z p-i-n přechodu amorfního křemíku (a-Si:H) a p-i-n přechodu mikrokrytalického křemíku (μ c-Si:H). Amorfní křemík má vysokou absorpci v oblasti modré, zelené a žluté části spektra. Mikrokrytalický křemík má navíc dobrou absorpci i v oblasti červeného a infračerveného spektra. Současně se dá tento materiál připravit při nízké teplotě, obvykle 200° C. Je tedy možné jej nanášet na levné podložky, například sklo, některé plastické hmoty nebo kovové fólie. To ve výsledku umožní snížit cenu slunečního článku. Mikrokrytalický křemík je možné nahradit i „slitinou“ křemíku s germániem. Zvolené poměry obou materiálů stanovují jejich optické a elektrické vlastnosti. Tento materiál se využívá pro trojvrstvé solární články, přičemž dva spodní články jsou vyrobeny s různou koncentrací Si a Ge. Základní podmínka dobré funkce vícevrstevných článků je, aby všechny články generovaly stejný proud. Pokud tomu tak není, limituje horší z článků dosažitelnou účinnost. Výsledné napětí je dáno součtem napětí všech článků. Malé laboratorní články dosahují stabilní účinnosti přes 13%. V hromadné výrobě dochází ve snaze dosažení co nejnižší ceny k zjednodušení některých technologických detailů a díky tomu účinnost v současnosti dosahuje 7-8%. Na obrázku 9 je

zobrazena struktura tandemového solárního článku, pro zlepšení sběru fotogenerovaných nositelů je volena struktura p-i-n, to znamená, že velká většina elektronů a děr je generována v oblasti silného vnitřního elektrického pole v intrinsické (i) vrstvě [1].

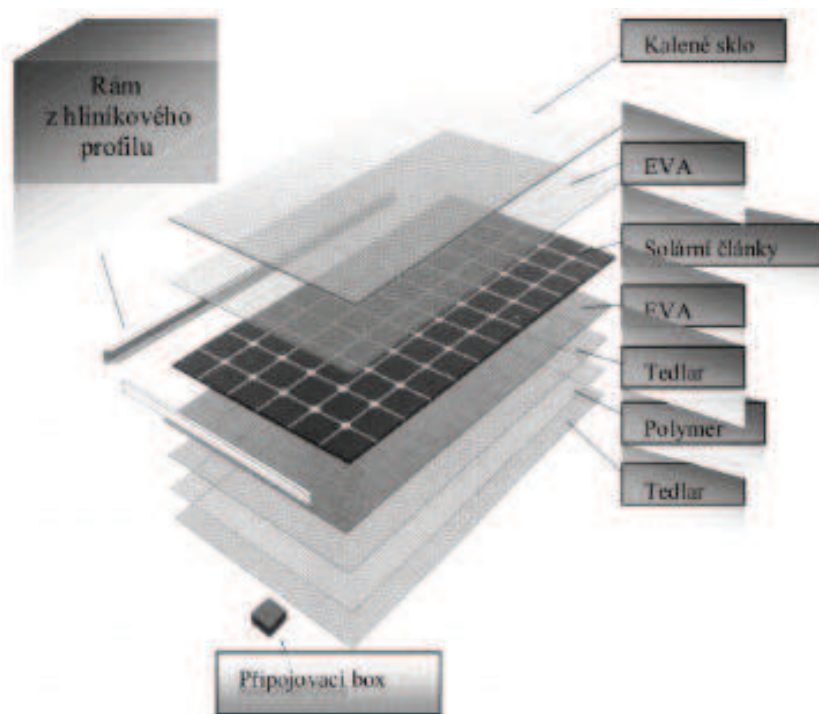


Obr. 9: Tandemový solární článek [1]

1.2.2 Fotovoltaické moduly

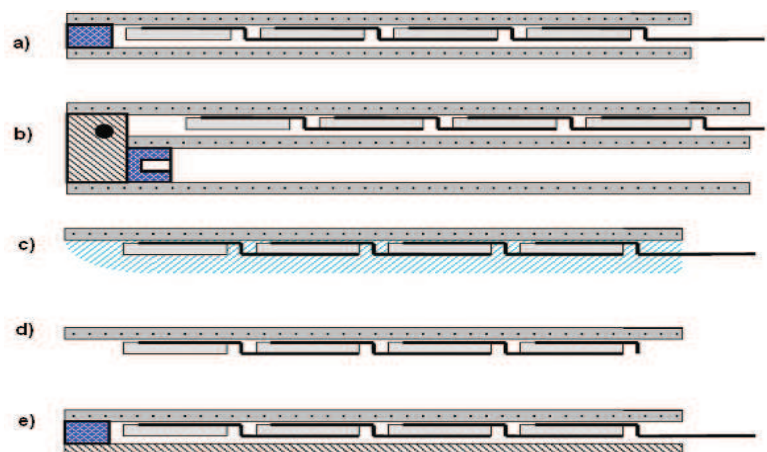
Z důvodu křehkosti a také proto, že ve venkovním prostředí by kontakty článků podléhaly korozi se solární články zapouzdřují do solárních modulů. Jednotlivé články se do solárních modulů skládají v sérioparalelní kombinaci. Je nutné, aby panel byl hermeticky zapouzdřen. Mechanická pevnost a odolnost je také jednou z důležitých vlastností panelu, protože někdy bývají moduly vystaveny drsným klimatickým podmínkám. Dochází-li k prudkým teplotním změnám, zvyšuje se riziko narušení vodivých spojů na solárních článcích. Z toho důvody bývají panely zpevněny prostřednictvím kovových nebo plastových rámců. Přední krycí materiál musí být schopen solární články ochránit i při případném silném krupobití. Maximální výkon panelu závisí na velikosti celkové plochy fotovoltaických článků. Běžná konstrukce fotovoltaického panelu je následující. Na přední straně fotovoltaického panelu se nachází temperované (tzv. kalené) sklo. Předností těchto skel je jejich vysoká odolnost proti nárazu. Na sklo se položí fólie z etylvynilacetátu (EVA) a na tu se skládají a propojují fotovoltaické články. Články jsou znovu překryty další EVA fólií a zadní stěna je zpravidla tvořena laminátovou kompozicí Tedlar (PVF) – Polymer – Tedlar. Tato struktura je naznačena na

obrázku 10. Poté je z modulu vyčerpán vzduch, který se nacházel mezi těmito vrstvami a panel se zahřeje nad teplotu tání EVA fólie. Teplotním zpracováním dojde k roztečení fólie a ta následně zalije fotovoltaické články v prostoru mezi předním sklem a zadní laminátovou stěnou panelu. Nakonec jsou panely orámovány a zatmeleny do hliníkových profilů. Hotové fotovoltaické panely se utěsní proti vodě a jiným nečistotám. Životnost kvalitních panelů na bázi krystalických polovodičů bývá až 30let.



Obr. 10: Struktura solárního panelu [1]

Existuje několik druhů solárních panelů, jejich konstrukce se většinou podobá základní konstrukci popsané výše. Několik nejběžnějších druhů solárních modulů je na následujícím obrázku 11. U varianty a) je solární panel s oboustranným zasklením, b) u této varianty je použito izolační dvojsklo, c) zadní strana těchto modulů je zalévána do pryskyřice, d) v tomto případě je zadní strana laminována folií, e) u této konstrukce je na zadní stranu použit netransparentní materiál [1]



Obr. 11: Základní druhy solárních modulů [1]

Dalším typem solárních panelů jsou tzv. koncentrátorové systémy. V principu se snaží o soustředění slunečního záření na solární články prostřednictvím čoček nebo zrcadlových ploch. Při použití Fresnellovy lineární čočky nebo bodové čočky může být koncentrace záření navýšena 10 krát až 500 krát. Pro tento typ modulů se využívají především křemíkové solární články s malou plochou. Použije-li se jiný materiál, například arsenid galia, je možné dosáhnout větší účinnosti a panely provozovat při vyšší teplotě. Nevýhodou v tomto případě je výrazně vyšší cena. Zrcadlové plochy se využívají ke zvýšení výkonu panelů. To je umožněno buď dosažením vyšší intenzity slunečního záření anebo prodloužením doby vystavení panelu slunečnímu záření. Aby byly solární články neustále v ohnisku čoček, je nutné tyto moduly neustále orientovat na slunce. Tyto panely nejsou vhodné pro oblasti, ve kterých se často vyskytuje velká oblačnost. [1]

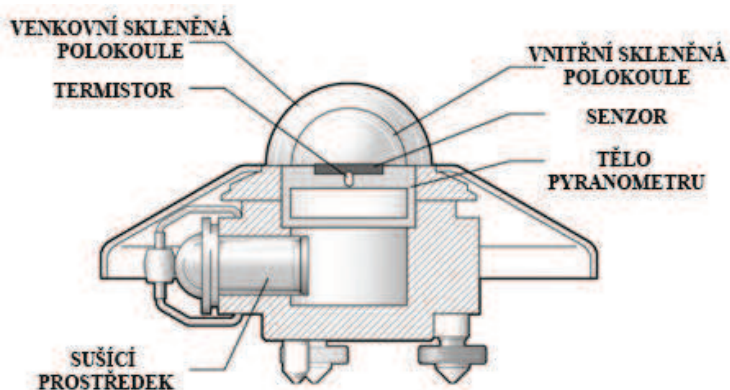
1.2.3 Využití pyranometru pro fotovoltaické panely

V dnešní době je pyranometr jedním z mnoha přístrojů, které jsou součástí meteorologických stanic. Je to tomu tak z důvodu měření intenzity slunečního záření v různých lokalitách České republiky. V souvislosti s fotovoltaickými panely se pyranometr využívá ke kalibraci těchto panelů. To znamená, že pomocí pyranometru se dá zjistit, který úhel je nejefektivnější pro příjem slunečního záření v daném časovém rozmezí, což znamená větší výkonnost fotovoltaických panelů. Spojením pyranometru a fotovoltaických panelů za předpokladu, že by se fotovoltaické panely natáčely podle výstupních hodnot pyranometru, dosáhla by výkonnost panelu maximálních hodnot. Tohle zapojení je velice cenově nákladné, a proto se ve velké míře nepoužívá.

1.3 Měření slunečního záření

1.2.4 Měření globálního záření

K měření celkového slunečního záření se využívají přístroj zvaný pyranometry (Obr. 12). Pyranometr porovnává teplotu oslněné a neoslněné plochy, nebo rozdíl teplot na černém a bílém povrchu, který je ukryt pod skleněným krytem. Teplotní rozdíl na těchto plochách určuje intenzitu dopadajícího záření. Přesné a kvalitní pyranometry obsahují velký počet sériově řazených termočlánků, pro zajištění dostatečně velkého výstupního napětí.



Obr. 12 Pyranometr Kipp&Zonen CM6B

Čidlo, které porovnává rozdíl teplot pomocí termočlánků na bílé a černé ploše vytváří podle ozáření napětí. Tohle napětí odpovídá intenzitě dopadajícího záření. Převod dopadající energie na teplo černých a bílých oblastí zajišťuje frekvenční nezávislost pro tento typ pyranometru. Nevýhodou pyranometru tohoto typu je cenová dostupnost, která se pohybuje v řádech tisíců až statisíců.

Druhým typem jsou pyranometry na bázi solárního článku. Obsahují malý fotovoltaický článek, který s velikostí ozáření vytváří odpovídající proud. Tahle možnost patří k levnějším variantám pyranometrů. Cena se pohybuje v řádech desetitisíců korun. Hlavní nevýhodou je nepřesnost pyranometru, jelikož fotovoltaický článek pohltí pouze určitou část spektra, což způsobí chybu měření.

1.2.5 Měření přímého záření

Pro měření přímého slunečního záření se používá tzv. pyrhelimetr Obr. 13, který má navíc od pyranometru stínění na difúzní složku záření a musí být pyrhelimetr umístěn na pohyblivém zařízení, které sleduje pohyb slunce po obloze (Obr.14 b). Jinak pracuje stejně

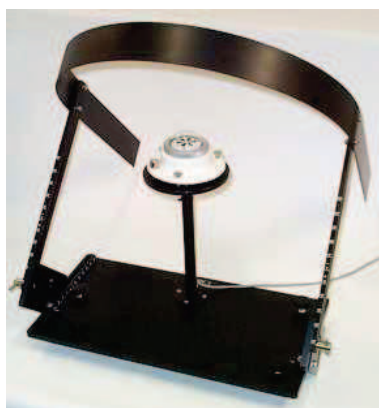
jako pyranometr. Pokud chceme měřit přímé sluneční záření pouze na určitých vlnových délkách, musí být pyrliometr vybaven vyměnitelnými filtry.



Obr. 13 Pyrliometr

1.2.6 Měření difúzního záření

K měření difúzního slunečního záření se používají pyranometry opatřené stínícím přístrojem, který brání dopadu přímé sluneční složky. Obvykle se používá prstenec nebo sun tracker. Sun tracker je zařízení, které sleduje pohyb slunce na obloze a podle něho natáčí stínící koule (Obr. 14a). Prstenec je většinou z černě eloxovaného hliníku o průměru cca 60 cm a šířce 7,5 cm (Obr. 14b). Na rozdíl od sun trackeru nepotřebuje tenhle způsob sledování pohybu slunce. Prstenec se přenastavuje jednou za cca 14 dní pouze při změně deklinace.



Obr. 14 Pyranometr se stínícím prstencem (a) a sun tracker (b)

Většinou se používá při synchronizovaném měření s druhým nestíněním pyranometrem, z rozdílu naměřených hodnot se pak zjišťuje hodnota přímé složky slunečního záření.

1.4 Teoretický způsob připojení

Pyranometr patří k senzorům, které měří neelektrickou veličinu. Měřenou veličinu převádí v poměru na analogovou elektrickou veličinu, podle druhu pyranometru jsou výstupní

veličiny proudu nebo napětí. Při použití pyranometru SG 400, je výstupní veličina proud. Jelikož chceme měřit napětí, musíme použít I/U převodník, který bude připojen k voltmetru. Výstupní hodnoty pyranometru se budou zobrazovat na voltmetru. Dále se hodnoty budou posílat a ukládat na PC, který bude připojen k voltmetru pomocí vybraného rozhraní např. LAN, GPIB, RS – 232 nebo USB. Schéma zapojení viz Obrázek 15.



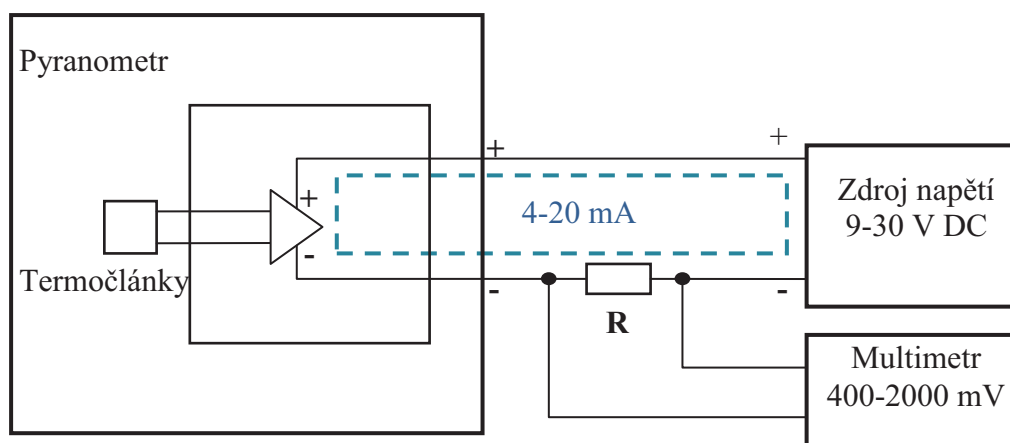
Obr. 15: Princip zapojení

1.5 Proudová smyčka 4-20 mA

V praxi je často vyžadováno měření neelektrických veličin pomocí senzorů, které danou fyzikální veličinu převádí v určitém poměru na analogovou elektrickou veličinu – nejčastěji velikost napětí nebo proudu. Protože senzory mohou být umístěny v agresivním prostředí, je nutné odměřený údaj vhodným způsobem přenést do podmínek příznivějších k elektronickým zařízením. Možností je bezdrátový přenos, ale je senzorů více, je nutno z elektromagnetického spektra využít více pásem (aby se neovlivňovala) nebo implementovat rozlišovací algoritmy. Takové řešení však zatěžuje okolí elektromagnetickým zářením a naopak v některých prostředích samo podléhá značnému rušení. Další možností je smyčka – senzor je součástí elektrického obvodu, kde je informace přenášena skrz vodiče v podobě úrovně napětí nebo hodnoty proudu, obojí v daných intervalech se známým koeficientem převodu.[7]

Proudové smyčky (Obr. 16) jsou v průmyslu naopak pro své přednosti využívány velmi často. Napětí je ve smyčce rozloženo na jednotlivé zátěže a též vznikají napěťové ztráty na vedení, ale přenos informace je vázán na hodnotu proudu. Je využito I. Kirchhoffova zákona, dle kterého vtékající proud do uzavřené smyčky musí také celý vytéci, nemůže se „ztratit“. Proud, který protéká takovou uzavřenou sériovou smyčkou, má všude stejnou hodnotu, na straně vysílače informace i na straně příjemce; veškeré nosiče náboje putující ze zdroje přes vodiče a komponenty smyčky se zase do zdroje musí vrátit. Tím je dána spolehlivost

proudové smyčky při přenosu informace a značná odolnost proti rušení. U proudových smyček je potřeba hlídat celkové požadavky na napětí ve smyčce. Pokud napěťové požadavky smyčky převýší možnosti zdroje, začne proud smyčkou klesat. Do požadavků je při návrhu smyčky nutné zahrnout nejenom nutné úbytky na straně vysílací a na straně přijímací, ale i ztráty na vedení a úbytky napětí na případných dalších komponentách ve smyčce. [7]



Obr. 16 Proudová smyčka

V průmyslu bylo ustanoveno několik standardů proudových smyček. Pro měření fyzikálních veličin pomocí elektrických senzorů je rozšířena proudová smyčka 4 – 20 mA při napětí od 12 V nebo 24 V. Z hlediska robustnosti smyčky je výhodné napětí 24 V, v aplikacích napojených na digitální zpracování dat bývá použito spíše napětí 12 V. Proud 4 mA informačně odpovídá nule na čidle. Je-li smyčka přerušena, odečítaná hodnota klesne mimo používaný rozsah. To je využíváno ke snadné kontrole uzavřenosti smyčky.[7]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Pyranometr SG420

Měří intenzitu globálního slunečního záření. Obsahuje 12 termočlánků zapojených do série pod skleněnou kopulí. Ve spodní části čidla je umístěna výměnná šroubovací vysoušecí vložka s barevným indikátorem účinnosti a také připojovací konektor. Čidlo se připevňuje na čep o průměru 12 mm a je zajištěno bočním šroubem M4.

Pokud je barva vysoušecí vložky modrá, je vše v pořádku. Vlivem navlhání však mění svou barvu na zelenou, růžovou až bílou. Pak je nutné vložku vyšroubovat a vysušit suchým teplem. Vložka by se neměla při vysoušení zahřívat víc jak cca 80°C. Vysoušení je dokončeno, až je barva vysoušecí vložky opět modrá.



Obr. 17: Pyranometr SG 420.

Vysoušení se doporučuje provést jednou za rok. Na obrázku 17 je zobrazeno čidlo slunečního záření SG420. Technické parametry pyranometru SG 420 jsou uvedeny v tabulce 2. Výrobce pyranometr SG420 kalibruje v daném spektrálním rozsahu 0,3 až 3 μm porovnáním s pracovním normálem KIPP CM6B, pomocí kalibračního přípravku, zajišťujícího diferenci obou veličin v rozsahu měření 0 – 1150 W/m². Výstupní veličina je zaznamenávána a po ukončení měření se pomocí přípravku elektricky nastavuje kalibrované čidlo. Výrobce doporučuje kalibrovat pyranometr SG420 po jednom roku.[8]

Tab. 2: Technické parametry pyranometru

<u>Název parametru</u>	<u>Hodnota</u>
Měřicí rozsah	0 - 1200W/m ²
Spektrální rozsah	300 - 3000 nm
Výstupní proud	4 až 20 mA
Napájecí napětí na čidle	9 – 30 V DC
Časová konstanta	50 s pro 95%
Rozsah prac. teplot	-30 až +60°C
Přesnost měření	±3%
Chyba vlivem nelinearity v rozsahu 100 – 1000 W/m ²	0,25% max
Max. zatěžovací impedance	500
Připojení	dvoudrátové
Výrobce	Tm J. Tlustýák

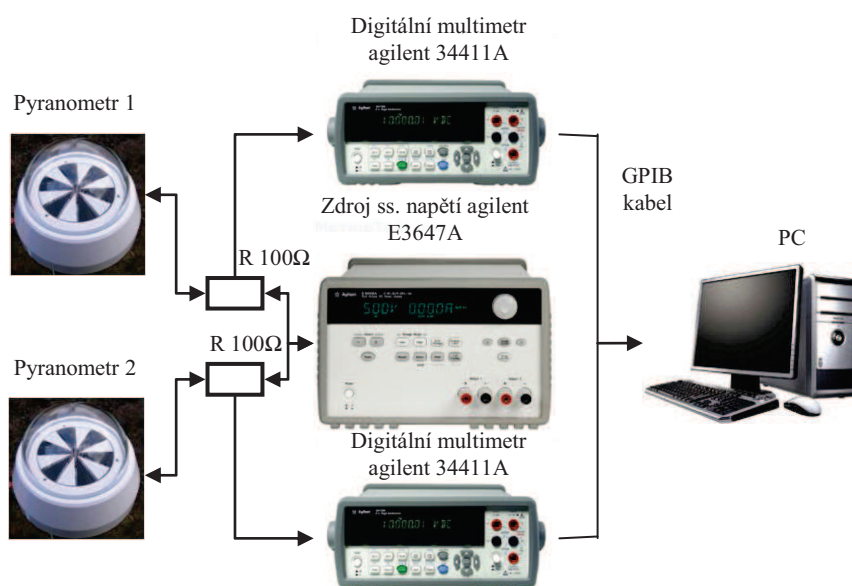
Výrobce pyranometr SG420 kalibruje v daném spektrálním rozsahu 0,3 až 3μm porovnáním s pracovním normálem KIPP CM6B, pomocí kalibračního přípravku, zajišťujícího diferenci obou veličin v rozsahu měření 0 – 1150 W/m². Výstupní veličina je zaznamenávána a po ukončení měření se pomocí přípravku elektricky nastavuje kalibrované čidlo. Výrobce doporučuje kalibrovat pyranometr SG420 po jednom roku.[1]

2.2 Popis měřícího stanoviště

Jak je vidět na obrázku. 18 zapojení se skládá se dvou pyranometrů SG420, multimetrů agilent 34410A, jednoho stejnosměrného zdroje napájení agilent E3647A a laboratorního počítače.

Použité pyranometry jsou upevněny na dvou různých držácích. Pyranometr P1 je upevněn na držáku se stínící clonou (obr. 19a), která je zhotovena z plechu o průměru 600 mm a šířky 150 mm. Pyranometr P1 měří hodnotu difúzního slunečního záření. Druhý pyranometr je upevněn na držáku bez clony a měří globální sluneční záření (obr. 19b). Pyranometry jsou napájeny stejnosměrným zdrojem AGILENT, který je nastaven na 16 V. Na záporných pólech jsou zapojeny odpory R o měrné hodnotě 100Ω, na kterých se měří úbytek napětí. Úbytek napětí na odporech se mění s velikostí změny intenzity záření na pyranometrech. Tato změna je způsobena změnou velikosti proudu v okruhu zapojení viz kapitola 1.5. Naměřené hodnoty jsou z multimetrů agilent posílány přes datové rozhraní GPIB

do PC, kde jsou ukládána pomocí mnou vytvořeným programem do tabulkového editoru EXEL.



Obr. 18 Zjednodušené zapojení měřícího pracoviště



Obr. 19 Stanoviště pro měření difúzního záření (a) a pro měření globálního záření (b)

2.3 Program pro sběr dat z multimetrů agilent

Pomocí programovacího prostředí Visual Basic jsem naprogramoval v tabulkovém editoru MS exel funkci pro ukládání dat z agilent multimetrů, které jsou připojeny k PC přes

GPIB kabel. Hodnoty, které jsou načítány z multimetrů, jsou ve formátu text, proto se hodnoty musí konvertovat do datového formátu číslo, se kterým umí excel pracovat. Jak je vidět na obrázku 19 hodnoty jsou zaznamenány každou minutu. Program je opatřen start a stop tlačítkem pro přerušení měření a znovu zapnutí.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Datum	Čas	Difuzní záření	Globální záření			
2	14.4.2012	10:07	146.57	154.03	START		
3	14.4.2012	10:08	142.75	152.96			
4	14.4.2012	10:09	141.19	158.98	STOP		
5	14.4.2012	10:10	143.60	286.82			
6	14.4.2012	10:11	146.88	205.92			
7	14.4.2012	10:12	150.57	206.40			
8	14.4.2012	10:13	156.11	223.91			
9	14.4.2012	10:14	166.83	226.53			
10	14.4.2012	10:15	186.88	388.09			
11	14.4.2012	10:16	190.87	266.56			
12	14.4.2012	10:17	198.33	246.46			
13	14.4.2012	10:18	209.61	252.98			
14	14.4.2012	10:19	223.69	260.19			
15	14.4.2012	10:20	242.18	276.38			
16	14.4.2012	10:21	258.67	284.24			
17	14.4.2012	10:22	267.79	286.19			
18	14.4.2012	10:23	274.92	290.75			
19	14.4.2012	10:24	280.47	297.02			
20	14.4.2012	10:25	280.25	300.53			
21	14.4.2012	10:26	276.73	301.99			
22	14.4.2012	10:27	276.19	304.01			
23	14.4.2012	10:28	274.04	315.68			
24	14.4.2012	10:29	277.84	322.62			
25	14.4.2012	10:30	274.42	328.45			

Obr. 20 Záznam hodnot z Agilent multimetru

Jelikož daný program zaznamenává úbytek napětí na odporu R, je potřeba udělat převod z napětí na intenzitu záření. Pyranometry SG 420 výstupní veličinu proud má výstupní rozsah 4 – 20 mA. Tento proud protéká odporem R, který má měrnou hodnotu 100Ω . Dle Ohmova zákona lze vypočítat úbytek napětí při průtoku minimálního a maximálního proudu, což je pro 4 mA úbytek 400 mV a pro 20mA je úbytek 2000mV. Tabulka 3 ukazuje rozdíl mezi teoretickým napěťovým rozsahem a reálným, který byl získán měřením na pyranometru.

Tab. 3 Rozsah pyranometru

Pyranometr	Teoretický rozsah	Reálný rozsah	Konstanty
Měření difúzního záření	1600mV	1601mV	1334
Měření globálního záření		1617mV	1347

Při rozsahu měření intenzity pyranometru SG 420 od 0 – 1200W/m², lze stanovit přesný převod jednotek. Pro stanovení převodu je nejprve potřeba stanovit konstantu, která se vypočítá ze vztahu 7. Při dosazení do vzorce je výsledná konstanta pro pyranometr 1 – 1334 a pro pyranometr 2 – 1347.

$$\text{konstanta} = \frac{\text{reálný rozsah}}{\text{rozsah pyranometru}} \times 1000 \quad [-] \quad (7)$$

$$\text{konstanta pro P1} = \frac{1601}{1200} \times 1000 = 1334 \quad [-]$$

$$\text{konstanta pro P2} = \frac{1617}{1200} \times 1000 = 1347 \quad [-]$$

Po vypočítání konstanty můžeme provést výpočet zobrazené hodnoty, která se ukládá do programu. Dosazením do vztahu (8).

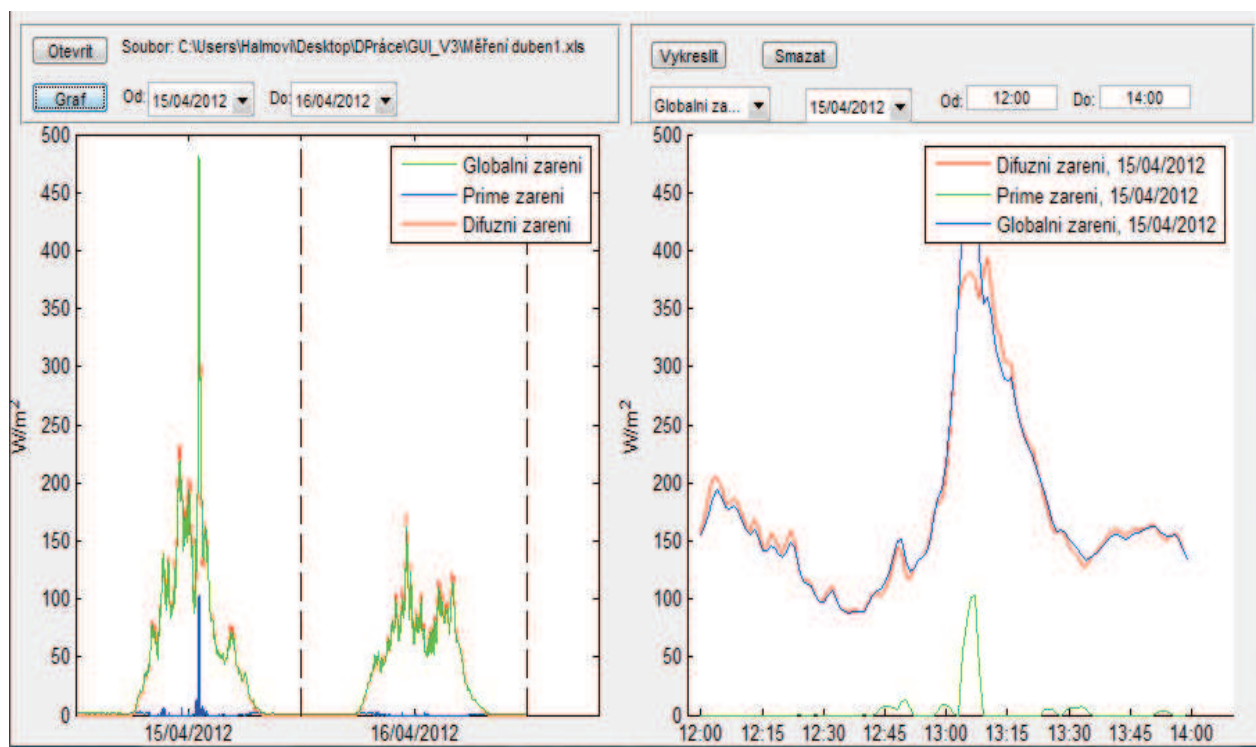
$$\text{ukládáná hodnota} = \left(\frac{\text{hodnota multimetru}}{\text{konstanta}} \times 1000 \right) - \text{konstanta} \alpha \quad [\text{W/m}^2] \quad (8)$$

$$\text{ukládáná hodnota} = \left(\frac{399}{1334} \times 1000 \right) - 299 = 0 \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\text{ukládáná hodnota} = \left(\frac{383}{1347} \times 1000 \right) - 284 = 0 \quad [\text{W/m}^2]$$

2.4 Popis programu na vyhodnocení dat

Navržený program pro vyhodnocení dat naměřených na pyranometrech je realizován v programovacím prostředí Matlab. V tomto prostředí bylo, také navrženo uživatelské prostředí viz Obrázek 21.



Obr. 21 Uživatelské prostředí programu pro vyhodnocení dat

Program je naprogramován tak, že uživatel načítá uložená data ze souboru MS excel do kterého jsou data ukládána, jak bylo popsáno v kapitole 2.3. Cestu k danému souboru najde uživatel pomocí tlačítka Otevrit.

Po načtení daných hodnot ze souboru máme k dispozici dva grafy. Graf, který je umístěn na levé straně vyhodnocuje data dle dne měření. Je možno nastavit vykreslení grafu od zvoleného dne v měření do jiného zvoleného dne měření. Načtení grafu se projeví po stlačení ikony Graf. V grafu jsou znázorněny celodenní hodnoty všech měřených hodnot, tedy intenzity globálního, difúzního a přímého slunečního záření.

Na pravé straně uživatelského rozhraní je umístěn graf, který vykresluje přímou, difúzní i globální složku. Program tyto složky vykresluje podle nastavení uživatele. Zde si může uživatel vybrat den a časové rozmezí, které chce vykreslit. Dále po rozkliknutí pole se objeví

nabídka, kde je na výběr mezi měřenými složkami slunečního záření. Uživatel si může vybrat, jakou složku chce vykreslit. Tato skutečnost je dobrá k porovnávání stejných veličin v různé dny.

Vykreslené grafy lze tlačítkem Smazat odstranit a načíst nové podle jiných požadavků a přání uživatele.

2.5 Vzorový výpočet výšky slunce nad obzorem

Při měření difúzního slunečního záření byla potřeba stanovit výška slunce nad obzorem, aby mohl být nastaven úhel stínícího prstence. Pro výpočet úhlu nastavení prstence byly použity vztahy z kap. 1.1.3 a byly stanoveny potřebné parametry k výpočtu:

- zeměpisná šířka místa měření - Brno 49,2°
- datum 1. 5. 2012 nebo den v roce
- sluneční poledne 0° (slunce je na nejvyšším bodě nad obzorem)

Vypočítá deklinace Slunce dle vztahu (3):

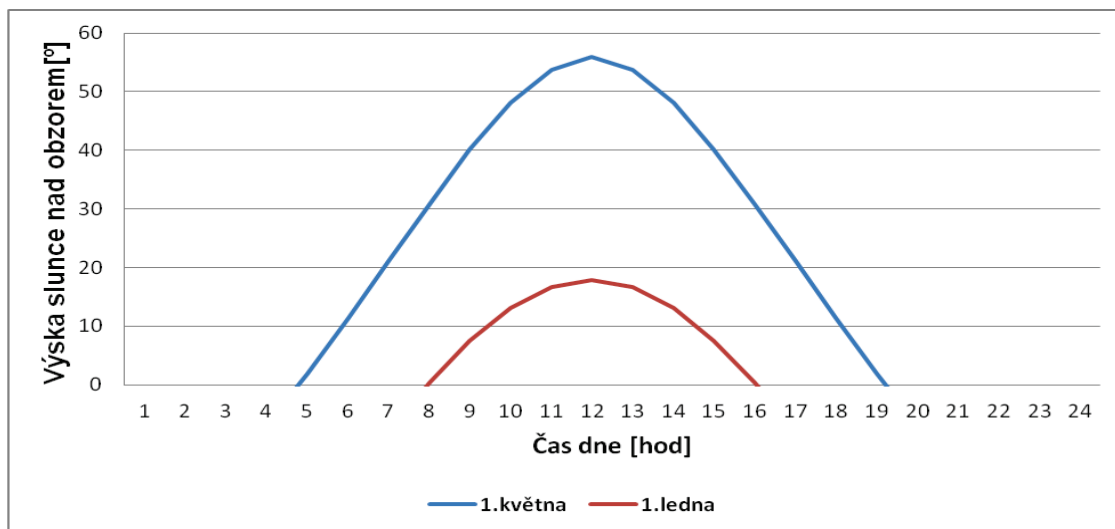
$$\begin{aligned}\delta &= 23,45^\circ \sin(0,98D + 29,7M - 109^\circ) = 23,45^\circ \sin(0,98 \times 1 + 29,7 + 5 - 109^\circ) \\ \delta &= 23,45^\circ \sin(0,98 \times 1 + 29,7 + 5 - 109^\circ) \\ \delta &= 15,13^\circ\end{aligned}$$

Nyní můžeme vypočítat výšku slunce nad obzorem dle vztahu (6):

$$\begin{aligned}\sinh &= \sin \delta \times \sin \Phi + \cos \delta \times \cos \Phi \times \cos \tau \\ \sinh &= \sin 15^\circ 13' \times \sin 49,2^\circ + \cos 15^\circ 13' \times \cos 49,2^\circ \times \cos 0^\circ \\ \sinh &= 0,8283537 \\ h &= 55,93^\circ\end{aligned}$$

Jak jde vidět z vypočteného příkladu 1.kvěťka je slunce nejvýše nad obzorem ve sluneční poledne, což je 55,93°. Pro porovnání jsem vypočítal pohyb slunce po obloze pro dva různé dny.

Jak jde na obrázku 22 vidět v rozdílné dny je výška slunce nad obzorem odlišná, tato skutečnost je dána pohybem Země kolem Slunce.



Obr. 22 Výška slunce nad obzorem

2.6 Vyhodnocení dat

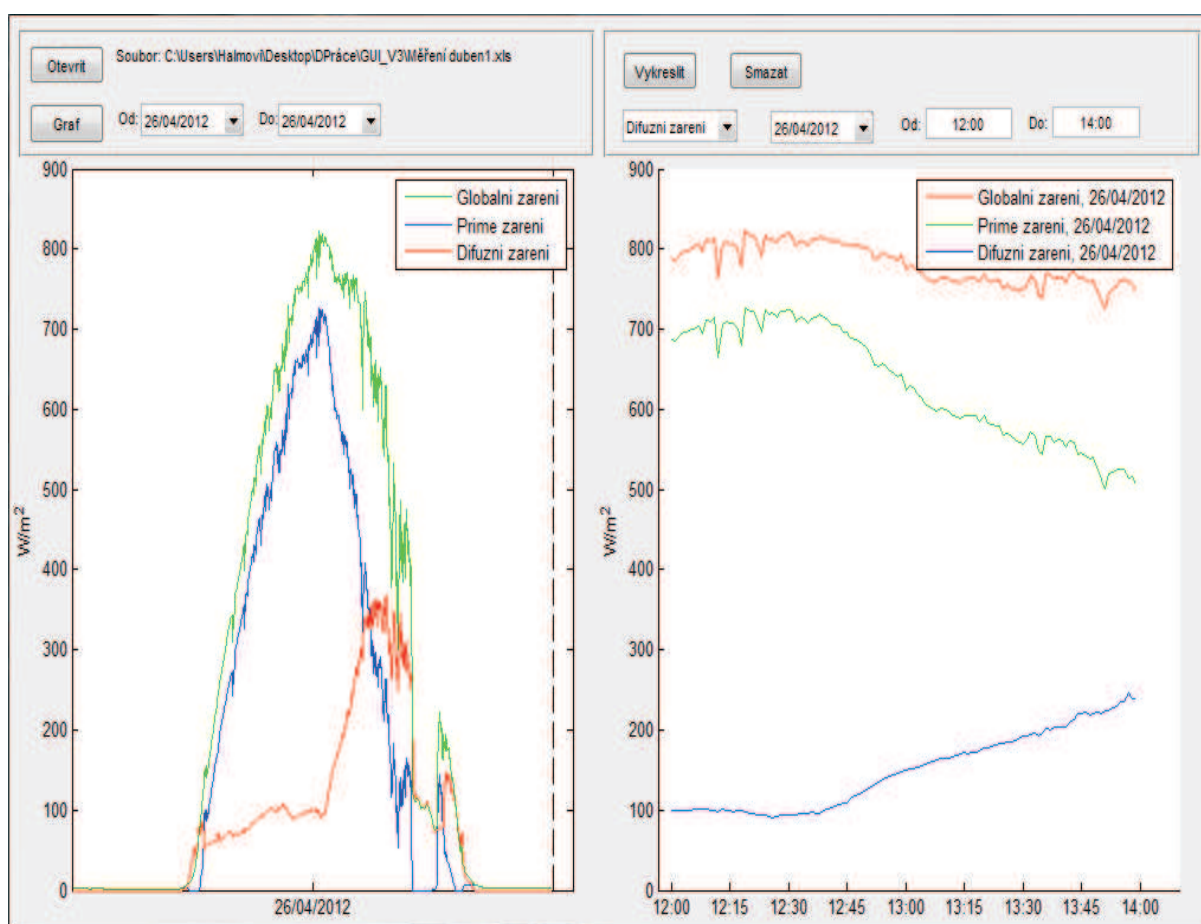
2.6.1 Naměřená vlastní data

Měření probíhá na střeše budovy VUT v Brně fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií. Měření probíhalo od 7. 4. 2012 do 7. 5. 2012. Měřená data jsou globální a difúzní intenzita záření, ze kterých byla dopočtena složka přímého záření. Z naměřených hodnot je zřejmý vliv přímé složky na intenzitu globálního záření. Dále zle pro měřené období stanovit z naměřených hodnot optimální umístění fotovoltaického článků, který je střeše umístěn. Tohle umístění dle měřených hodnot a teoretických poznatků musí být orientováno na jižní stranu. V měřeném období je ideální uhel naklonění cca 35 stupňů, tako skutečnost je dána z pravděpodobností tabulky záření. Umístění panelu by mělo být co nejdále od budovy, která stíní záření na daný panel. Jak bylo zjištěno měřením, proto střecha na které probíhalo měření není optimální k umístění fotovoltaického panelu.

Na obrázku 22 a 23 je vidět vliv při nízké a zvýšené oblačnosti. Použitá data jsou ze dne 16. 04. 2012 a 26. 04. 2012. Tyto dny byla naměřena tato meteorologická data viz tabulka 4.

Tab. 4 Naměřená meteorologická data

Den měření	max. denní teplota (°C)	Min. denní teplota (°C)	Rychlost větru (Km/h)	Srážky (mm)	Událost
16. 4. 2012	8,1	4	21,7	3,6	Děšť
26. 4. 2012	21,2	6,5	21,7	0	-

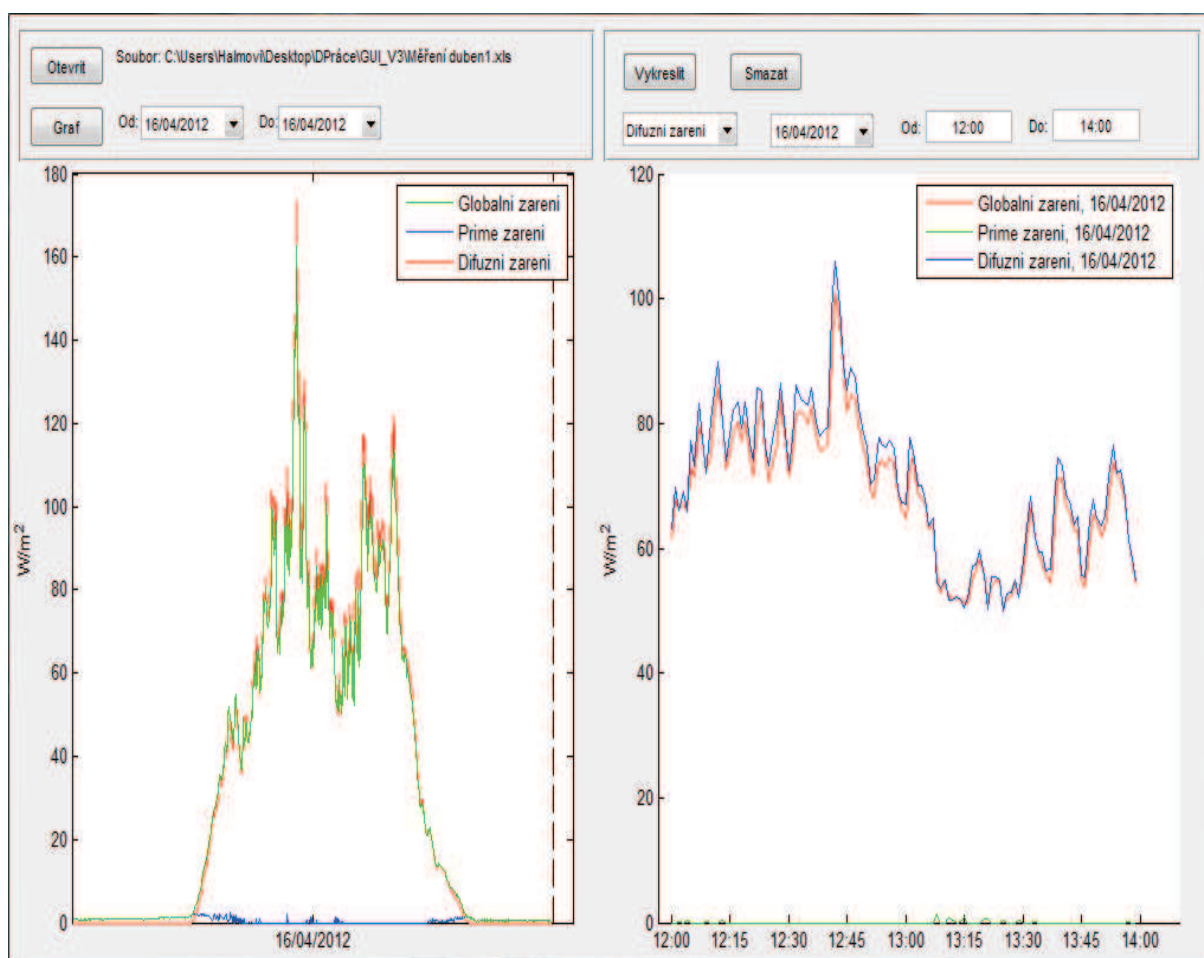


Obr. 23 Měřená data z 26. 04. 2012

Na obrázku 23 jsou vidět dva grafy, které ukazují průběh slunečního záření v den měření. První graf (vlevo) průběh za celý den, kde zelená křivka znázorňuje globální záření, které dosahuje až 825 W/m². Modrá křivka ukazuje velikost přímé složky a červená křivka

znázorňuje difúzní složku záření. Z grafu vidíme závislost globálního záření na přímém. Je vidět, že globální záření se téměř rovná globálnímu při zhoršené oblačnosti. Z toho je zřejmé, že při zastínění obou pyranometrů jejich hodnoty budou stejné.

Druhý graf ukazuje průběh hodnot v časovém rozmezí 12:00 až 14:00. Graf je detailem maxima dne. Je zde také vidět zřejmý vliv přímé složky na globální záření.

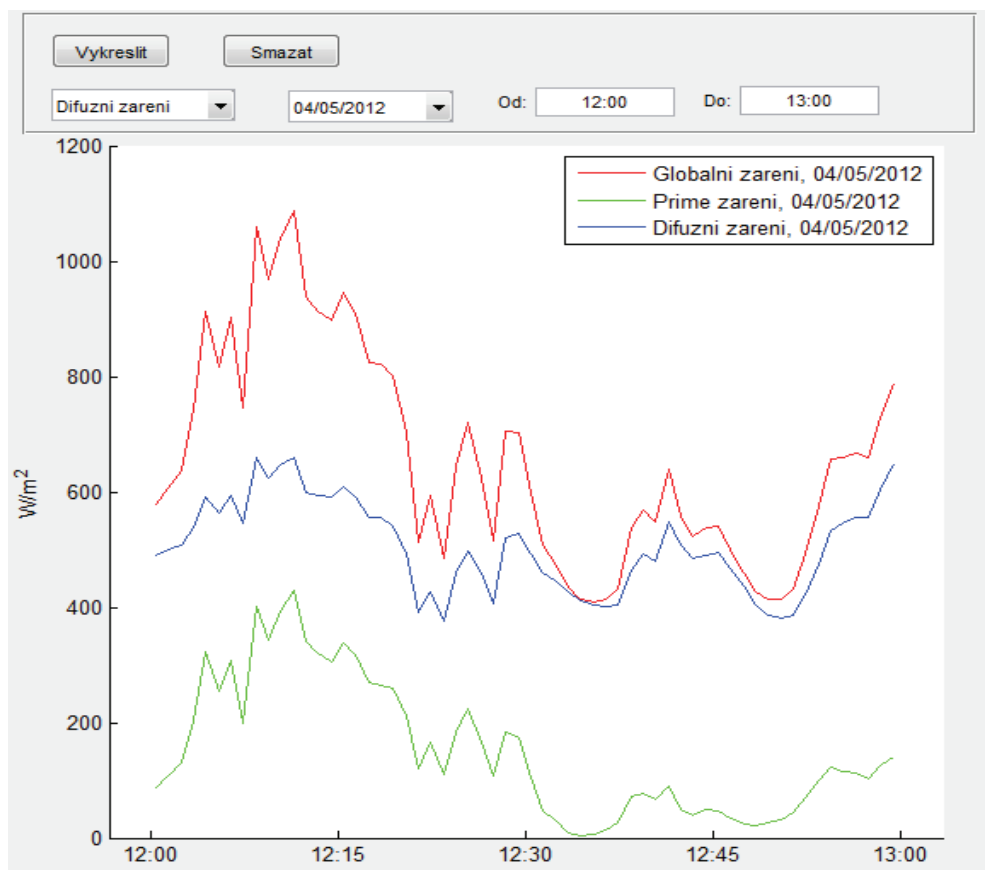


Obr. 24 Měřená data z 16. 04. 2012

Na obrázku 24 je vidět průběh měření ze dne 16. 04. 2012 kdy meteorologické podmínky nebyly ideální, pro průnik přímé složky záření. Jak je vidět z prvního grafu (vlevo) celý den byla velká oblačnost, která zamezila průniku přímé složky. Je zde vidět i maximální dosažená hodnota globálního a difúzního záření což je 174 W/m^2 .

Druhý graf (vpravo) ukazuje detailní pohled na průběh od 12:00 do 14:00 hodin. Zde je vidět, že intenzita přímé složky je nulová. Difúzní a globální složka je stejná.

Maximální hodnota intenzity záření byla naměřena dne 4. 5. 2012 mezi 12:00 – 13:00, kdy hodnota záření dosáhl $1088,2 \text{ W/m}^2$ viz obr. 24.

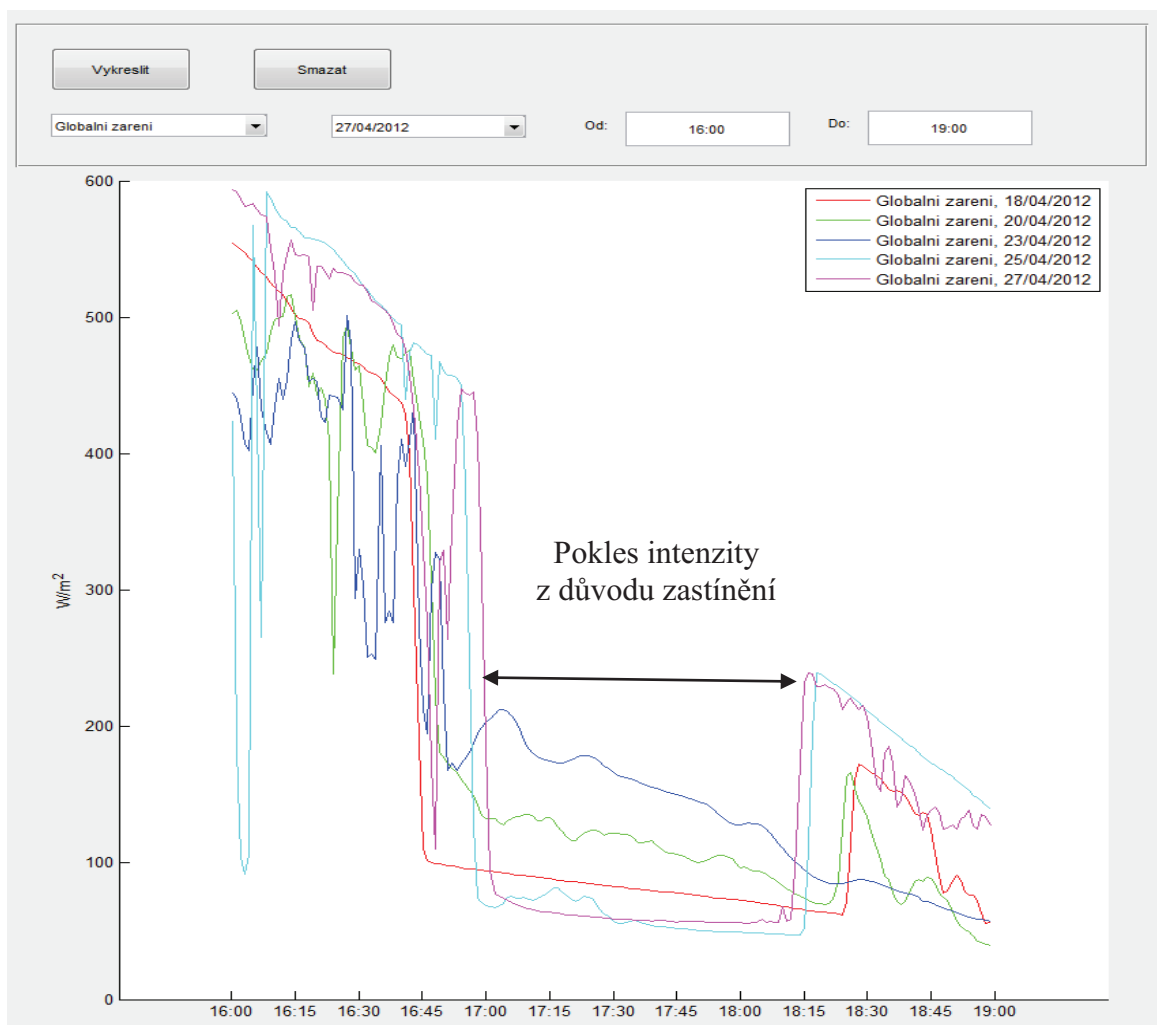


Obr. 25 Maximální naměřená intenzita

Z grafu jde pozorovat, že v den kdy byla maximální intenzita naměřena, byly dobré meteorologické podmínky, tuhle skutečnost potvrzují i historická meteorologická data. Dále se potvrzuje fakt, že difúzní záření má největší procentuální podíl na globální intenzitu záření. Z teoretických poznatků je to 50-70% z globálního záření. Při zatažené obloze dosahují hodnoty globálního a difúzního záření stejných hodnot.

Při vyhodnocování naměřených dat byla zjištěna skutečnost, že místo měření, které se nachází na střeše budovy VUT v Brně není optimální k měření celodenních dat intenzity slunečního záření. Skutečnost potvrzují i naměřené hodnoty, které jsou vyhodnoceny v programu Matlab, jak je vidět na obrázku 26.

Začátek zastínění místa měření je pro každý o něco jiný, je to způsobeno pohybem slunce po obloze. Kdy je každý den slunce je o něco výše a tím se posunuje začátek a konec doby zastínění v řádech minut. Zastínění začínalo v době měření cca 16:45 a končilo cca 18:15 podle dne a meteorologických podmínek.



Obr. 26 Vliv stínění budovy na intenzitu záření

2.6.2 Data z meteorologické stanice

Pro porovnání naměřených dat jsem opatřil naměřená data z meteorologické stanice, která je v jiné lokalitě. Meteorologická stanice se nachází v obci Počátky na vysočině v 614 n.m.v.

Stanice je vzdálena od fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně vzdušnou čarou cca 97 Km.

Stanice je opatřena moderními měřicími čidly od americké firmy David Instruments viz obrázek 27. Tahle meteorologická stanice se řadí mezi špičku mnoha celosvětových výrobců zařízení tohoto druhu a jejich uživatelé jsou především univerzity, školy, zemědělce a amatérské meteorologické stanice. Stanice ukládá naměřená data do textového editoru.

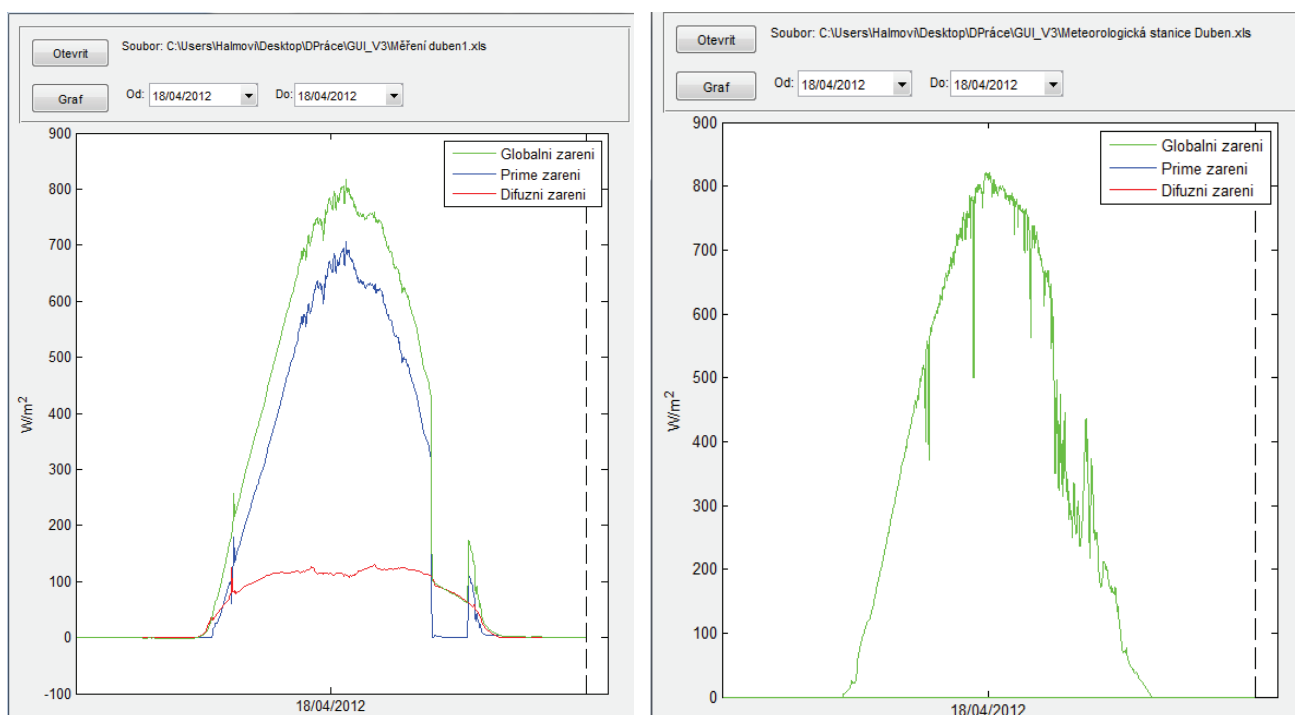
Měřená data stanicí jsou:

- maximální a minimální denní teploty
- rychlost větru
- relativní a absolutní hodnota tlaku
- teplota rosného bodu
- faktor ochlazení teplem
- čidlo UV a solárního záření



Obr. 27 Měřicí čidla od firmy Instruments

Pro porovnání jsem použil dva stejné dny s podobnými meteorologickými podmínkami. Porovnaná data jsou z různých lokalit, proto výsledky spolu nekorrespondují. V grafu je vykreslena pouze globální složka záření, jelikož meteorologická stanice měří jen globální intenzitu záření. Použité hodnoty jsou ze dne měření 15. 04. 2012 a 18. 04. 2012. Pro srovnání byly použity dny s vysokou intenzitou záření a s nízkou intenzitou záření.



Obr. 28 Celodenní naměřené hodnoty Brno (a) a meteorologická stanice Počátky (b)

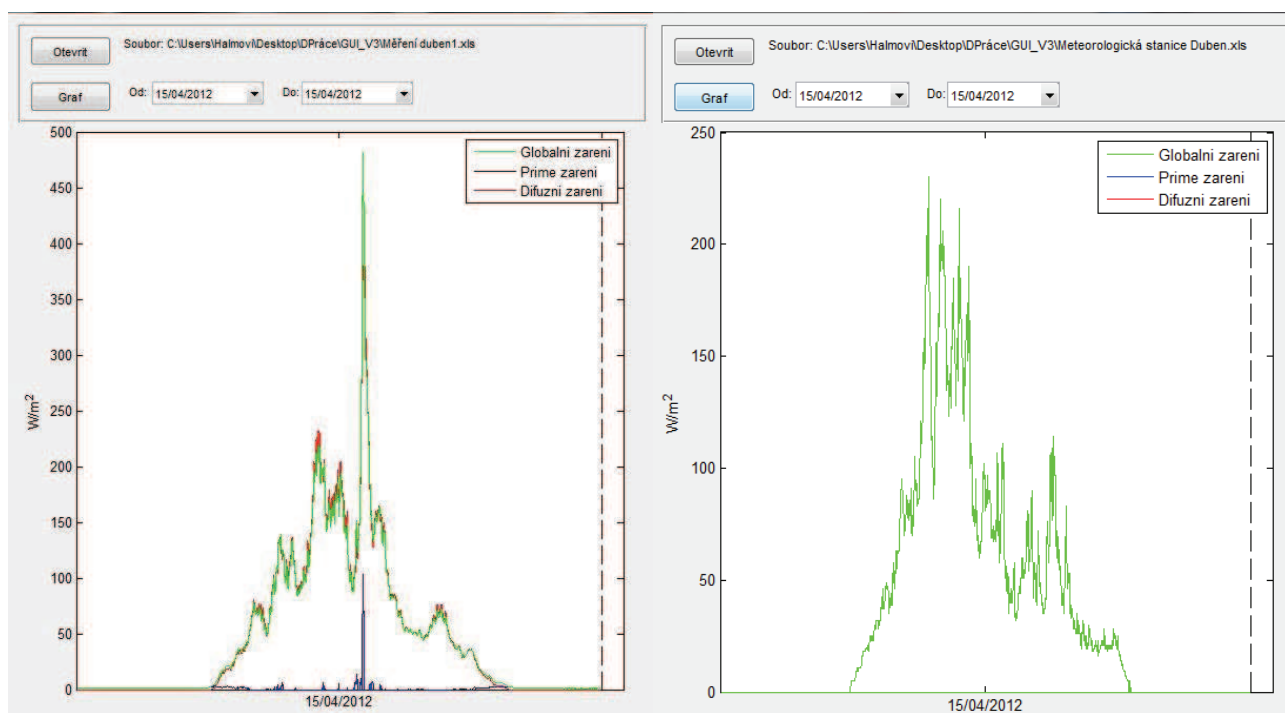
V první řadě bych ukázal graf při dobrých meteorologických podmínkách pro měření sluneční intenzity tzn. bez oblačnosti viz obrázky 27. Na obrázku je vidět graf průběhu globálního záření v obou lokalitách, kdy záření dosahovalo maxima okolo 800 W/m^2 . Z grafu jde vidět podobnost dopadajícího záření i přes odlišnost lokalit. Tato skutečnost je způsobena podobnými meteorologickými hodnotami dne měření. Hodnoty jsou zapsány v tabulce 6.

Tab. 5 Naměřená meteorologická data

Den měření	max. denní teplota (°C)	Min. denní teplota (°C)	Rychlost větru (Km/h)	Srážky (mm)	Událost
18. 4. 2012 Brno	13,9	-1	10,7	0	-
18. 4. 2012 Počátky	11,6	-3,1	2,6	0	-

Pro druhé porovnání dvou různých lokalit jsem použil data, při neoptimálních podmínkách pro měření intenzity slunečního záření. V den měření byly špatné meteorologické podmínky, což koresponduje k výsledkům měření. Jak je vidět hodnoty

z meteorologické stanice nepřesahují hodnotu 240 W/m^2 . U měření na střeše objektu VUT v Brně došlo k protrhání oblačnosti. Tím se maximální hodnota měření přiblížila 480 W/m^2 , toto protrhání trvalo pouze několik minut a pak měřená data byla opět velice podobná s porovnávanou druhou lokalitou, kde sídlí meteorologická stanice Počátky. V tabulce 6 jsou zapsána zaznamenané meteorologické hodnoty ze dne měření z obou lokalit.



Obr. 29 Celodenní naměřené hodnoty Brno (a) a meteorologická stanice Počátky (b)

Tab. 6 Naměřená meteorologická data

Den měření	max. denní teplota (°C)	Min. denní teplota (°C)	Rychlost větru (Km/h)	Srážky (mm)	Událost
15. 4. 2012 Brno	11,5	8	21,7	0	Vysoká oblačnost
15. 4. 2012 Počátky	7,9	5,2	9,1	1,40	Oblačnost a mrholení

3 ZÁVĚR

Diplomová práce obsahem popisuje základní princip vzniku slunečního záření, geometrie slunce a působení intenzity slunečního záření na fotovoltaický článek. V práci jsou detailně popsány způsoby měření intenzity slunečního záření pomocí pyranometru. Dále je navržena měřicí stanice pro dlouhodobé měření intenzity slunečního záření.

V praktické části jsou popsány základní vlastnosti použitého pyranometru SG 420, který je základním zařízením pro dále vytvořenou monitorovací stanici. Navržené pracoviště je složeno ze dvou pyranometrů SG 420, zdroje stejnosměrného napětí agilent, dvou multimetrů agilent a osobního počítače. Pro měření difúzního záření byl navrhnut a mnou sestaven stínící prstenec. Pro nastavení daného prstence byl vypočítán vzorový příklad pro určení maximální polohy slunce nad obzorem. Nastavení prstence se muselo měnit po čtrnácti dnech z důvodu změny výšky slunce nad obzorem.

Zároveň byl vytvořen software v programu MS Exel, který naměřená data ukládal v časovém intervalu po jedné minutě. Pro vyhodnocení naměřených dat byla vytvořena aplikace s grafickým prostředím v programu Matlab. Tato aplikace umožňuje vykreslit naměřená data ve vytvořeném uživatelském prostředí, dle nastavení časového intervalu uživatele. Nastavení vyhodnocení může být buď celodenní, nebo v různých zvolených časových intervalech. Dále umožňuje porovnání všech tří složek intenzity slunečního záření.

V závěru diplomové práce bylo provedeno dlouhodobé měření, které ověřilo celkovou funkčnost daného řešení. S naměřených dat bylo stanoveno optimální umístění a naklonění fotovoltaického panelu v místě měřicího stanoviště. Z měřených dat vyplynulo, že umístění měřicí sestavy na VUT není úplně ideální. Část měřicího stanoviště byla pravidelně zastiňována přilehlou budovou. Právě tyto poznatky je možné pomocí této měřicí stanice zmapovat. Pak je možné se při návrhu umístění fotovoltaických panelů vyvarovat případným problémům. Součástí vyhodnocení měřených dat je i porovnání s hodnotami jiné meteostanice.

4 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] VANĚK, J.; KŘIVÍK, P.; NOVÁK, V. Alternativní zdroje energie – elektronický text, Brno: VUT, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 163 s.
- [2] Chemistry of the Environment: Greenhouse Effect. [online]. 2002 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://bouman.chem.georgetown.edu/S02/lect23/lect23green.html>
- [3] PHOTOVOLTAICS: Measuring the 'Sun'. *LaserFocusWorld* [online]. 2009 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/05/photovoltaics-measuring-the-sun.html>
- [4] MATUŠKA, T. FSID.CVUT [online]. 2009 [cit. 2012-05-13]. Skripta Solární tepelná technika. Dostupné z: http://www.fsid.cvut.cz/~matustom/skriptastt_2009.pdf
- [5] VANĚČEK, M. Přeměna sluneční energie v energii elektrickou. [online]. 2000 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.fzu.cz/popularizace/premena-slunecni-energie-v-energii-elektrickou>
- [6] Wikipedia The Free Encyclopedia. In: *Wikipedia* [online]. 2005 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sun>
- [7] BOBALÍK, L. *Zařízení pro měření intenzity slunečního záření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 48s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Radek Stojan.
- [8] STOJAN, R. *Zařízení pro měření intenzity slunečního záření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 41s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

5 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Struktura Slunce.	8
Obr. 2 Spektrum slunečního záření při vstupu do atmosféry [2].....	10
Obr. 3 Výška slunce nad obzorem a AM faktor [3]	11
Obr. 4 Geometrie slunečního záření [4]	12
Obr. 5 definice deklinace[4]	13
Obr. 6 Průměrná hodnota globálního záření v ČR[8].....	14
Obr. 7: Spektrum slunečního záření po průchodu atmosférou s vyznačením vlnových délek a energií fotonů i s vyznačením šířky zakázaného pásu[5]	15
Obr. 8: Princip fotovoltaického článku[5].....	16
Obr. 9: Tandemový solární článek [1].....	19
Obr. 10: Struktura solárního panelu [1].....	20
Obr. 11: Základní druhy solárních modulů [1].....	21
Obr. 12 Pyranometr Kipp&Zonen CM6B	22
Obr. 13 Pyrheliometr	23
Obr. 14 Pyranometr se stínícím prstencem (a) a sun tracker (b)	23
Obr. 15: Princip zapojení.....	24
Obr. 16 Proudová smyčka.....	25
Obr. 17: Pyranometr SG 420.	26
Obr. 18 Zjednodušené zapojení měřícího pracoviště	28
Obr. 19 Stanoviště pro měření difúzního záření (a) a pro měření globálního záření (b).....	28
Obr. 20 Záznam hodnot z Agilent multimetru	29
Obr. 21 Uživatelské prostředí programu pro vyhodnocení dat.....	31
Obr. 22 Výška slunce nad obzorem.....	33
Obr. 23 Měřená data z 26. 04. 2012	34
Obr. 24 Měřená data z 16. 04. 2012	35
Obr. 25 Maximální naměřená intenzita	36
Obr. 26 Vliv stínění budovy na intenzitu záření.....	37
Obr. 27 Měřicí čidla od firmy Instruments	38
Obr. 27 Celodenní naměřené hodnoty Brno (a) a meteorologická stanice Počátky (b)	39
Obr. 28 Celodenní naměřené hodnoty Brno (a) a meteorologická stanice Počátky (b)	40

6 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Spektrum elektromagnetického záření	9
Tab. 2: Technické parametry pyranometru	27
Tab. 3 Rozsah pyranometru	29
Tab. 4 Naměřená meteorologická data	34
Tab. 5 Naměřená meteorologická data	39
Tab. 6 Naměřená meteorologická data	40

7 SEZNAM SYMBOLŮ

AM0	[W·m ⁻²]	- intenzita slunečního záření na hranici atmosféry (1367 ± 7 W·m ⁻²)
AM1	[W·m ⁻²]	- intenzita slunečního záření na zemském povrchu se sluncem v zenitu
AM1.5	[W·m ⁻²]	- intenzita slunečního záření na zemském povrchu při sklonu cca 45° mezi zemským povrchem a dopadajícím zářením (zhruba 1000 W·m ⁻²)
E	[J]	- obecně energie
E _G	[eV]	- energie zakázaného pásu, běžně udávána v elektrovoltech
I	[W·m ⁻²]	- intenzita záření
I _{smyčka}	[A]	- proud protékající proudovou smyčkou
T	[K]	- termodynamická teplota
U _d	[V]	- napětí P-N přechodu
c	[m·s ⁻²]	- rychlost světla (299 792 458 m·s ⁻²)
eV		- elektronvolt, jiná jednotka energie (1 eV = 1,602·10 ⁻¹⁹ J)
f	[Hz]	- kmitočet vlnění
h	[J·s]	- Planckova konstanta (6,626·10 ⁻³⁴ J·s)
k	[J·K ⁻¹]	- Boltzmannova konstanta (1,381·10 ⁻²³ J·K ⁻¹)
m ₀	[kg]	- hmotnost volného elektronu (9,109·10 ⁻³¹ kg)
q	[C]	- elementární náboj (1,602·10 ⁻¹⁹ C)
t	[s]	- čas
Φ _e	[W]	- zářivý tok
ε ₀	[F·m ⁻¹]	- permitivita vakua (8,854·10 ⁻¹² F·m ⁻¹)
λ	[m]	- vlnová délka záření
δ	[°]	- deklinace
τ	[-]	- sluneční časový úhel