



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

SIMULÁTORY SOLÁRNÍHO ZÁŘENÍ PRO TESTOVÁNÍ SOLÁRNÍCH ČLÁNKŮ

SIMULATOR OF SOLAR LIGHT FOR THE SOLAR CELLS TESTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN PALLA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ VANĚK, Ph.D.

BRNO 2013



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 Palla

ID: 106691

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Simulátory solárního záření pro testování solárních článků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s vlastnostmi globálního slunečního záření, přímé a difúzní složky tohoto záření a jejich využitím pro solární systémy. Porovnejte jednotlivé zdroje světla s tímto přirozeným zářením a vyberte nejvhodnější pro simulátor slunečního záření. Zaměřte se na LED zdroje osvětlení a jejich kombinaci s dalšími zdroji. U vybraných zdrojů stanovte jejich výkonové a spektrální vlastnosti. Realizujte solární simulátor a stanovte jakostní třídu, do které by spadal v rámci testování fotovoltaických článků a panelů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 30.5.2013

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.

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.

Bibliografická citace práce:

PALLA, M. Simulátory solárního záření pro testování solárních článků . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Simulátory solárního záření pro testování solárních článků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 30. května 2013.

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Vaňkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 30. května 2013

.....

podpis autora

Klíčová slova

Spektrum, difúzní záření, globální záření, IEC 60904-9, Solární simulátory, Zdroje světla, využití sluneční energie.

Key words

Spectrum, diffuse radiation, global radiation, IEC 60904-9, solar simulators, light sources, the use of solar energy.

Abstrakt

První část práce se zabývá úvodem do problematiky a představením základních pojmů plynoucích ze zadání. Tyto pojmy jsou představeny a detailně popsány. Na tuto část navazuje kapitola s možnostmi využití sluneční energie. V práci je představeno, jak je možné využívat přímé i difúzní sluneční záření. Poslední část teoretické části je věnována základnímu popisu normy IEC 60904 a IEC 60904-9.

Praktická část se zabývá představením vybraných simulátorů slunečního záření a jejich proměření. Z tohoto měření je stanovena klasifikace třídy podle normy IEC 60904-9. Poslední část této diplomové práce je věnována konstrukci solárního simulátoru složeného z LED diod. Tento simulátor je následně proměřen a je stanovena jeho třída podle vyzařovaného spektra.

Abstract

The first part deals with an introduction to the basic fundamentals and presentation of theory from the assignment. The fundamentals are presented and described in detail. This part is followed by chapter describing possibilities of using solar energy. The paper presents possibilities of using both direct and diffuse solar radiation. The last chapter of the theoretical part is devoted to the basic description of the IEC 60904 and IEC 60904-9 standards.

The practical part presents selected solar simulators and their measurement. Classification class according to IEC 60904-9 is determined from this measurement. The last part of the work is devoted to the construction of a solar simulator composed of LEDs. The simulator is then measured and its class is determined by emitted spectrum.

Obsah

Úvod.....	5
Teoretická část	6
Globální záření	6
Spektrum AM	7
Ultrafialové sluneční záření.....	9
Viditelné sluneční záření	9
Infračervené sluneční záření.....	10
Využitelnost sluneční energie pro solární systémy.	10
Solární kolektorové systémy	10
Solární fotovoltaické panely.....	11
Solární tepelné elektrárny	18
Závěr kapitoly.....	21
Normy pro testování solárních článků a panelů.....	23
Norma IEC 60904	23
Měření s pomocí přirozeného osvětlení.....	24
Měření s pomocí simulovaného osvětlení	24
Rozpis tříd slunečních simulátorů	24
Norma IEC 60904-9	25
Zdroje světla.....	27
Vybrané zdroje světla.....	29
OSRAM FQ 54W/840	29
PHILIPS MHN-TD.....	30
Philips MasterColour CDM-TD	31
PHILIPS SPOTONE 30.....	31
Měření vybraných zdrojů světla	32
$\delta = \lambda_2 - \lambda_1$ Intenzita2 – Intenzita1 (2)	33
$Scel = k = xy\delta\delta$ (3)	33

Vyhodnocení naměřených hodnot	35
Praktická část	36
Část první měření diod pro stanovení vlnové délky	36
Návrh a konstrukce solárního simulátoru	43
Použité barvy a jejich vlnové délky pro konstrukci solárního simulátoru.....	43
Přístroje použité pro měření:	48
Závěr	49
Použitá literatura	50
Seznam použitých obrázků	52
Seznam příloh	54

Úvod

První část této diplomové práce se zabývá představením základních pojmů, jako jsou přímé a difúzní záření, globální záření a problematika spojená s těmito pojmy.

V další části práce je možno nalézt, jakým způsobem lze v dnešní době využívat energii ze slunce a to se zaměřením na fotovoltaický jev a využití tepla. Jsou zde také představeny jednotlivé typy slunečních elektráren.

Poslední kapitola teoretické části je věnována popisu normy IEC 60904 a IEC 60904-9. Tato norma je důležitá pro získání základního přehledu podmínek testování fotovoltaických součástek a zařízení. Hlavní pozornost je věnována podmínkám pro spektrální složení simulátoru a jejich rozlišení třídami.

V další části diplomové práce je srovnání slunečních simulátorů a jejich kvalita z hlediska vyzařovaného světla a toto je porovnáno s normou IEC 60904-9.

Poslední část této diplomové práce se zabývá konstrukcí solárního simulátoru z vysoce svítivých LED diod. Tento simulátor je následně proměřen spektrometrem a je určena jeho jakostní třída. Tímto simulátorem byly proměřeny i fotovoltaické články a výsledky měření byly porovnány se simulátorem s halogenovou výbojkou.

Teoretická část

Teoretická část diplomové práce se zabývá základním představením pojmů vyplývajících ze zadání diplomové práce. Jedná se především o vlastnosti globálního slunečního záření, přímé a difúzní složky a jejich využití pro solární systémy.

Globální záření

Jedná se o množství sluneční energie, která dopadne na zemský povrch. Toto globální záření je složené ze zeslabeného přímého slunečního záření a rozptýleného slunečního záření.

Přímé sluneční záření je svazek rovnoběžných paprsků, dopadající na zemský povrch v kolmém směru přímo ze slunce. Toto záření dopadá na zemský povrch při nulové nebo zanedbatelné oblačnosti. Přímé sluneční záření lze využít pro koncentrátorové systémy (jedná se o soustavu zrcadel nebo čoček pro soustředění sluneční energie). [1]

Rozptýlené sluneční záření vzniká vlivem srážek slunečních paprsků s dalšími objekty. Dochází ke srážkám a následnému ovlivnění slunečních paprsků, zejména složkami obsaženými v atmosféře. Tyto složky jsou především molekuly plynů ve vzduchu, vodních kapiček nebo vodních plynů, popř. nejrůznějších aerosolových částic vyskytující se v zemské atmosféře. V důsledku srážek slunečních paprsků s těmito částicemi dále mluvíme o difúzním záření. Difúzní elektromagnetické záření nelze použít na koncentrátorové systémy. Intenzita difúzního záření je také přímo závislá na geografických podmínkách, ročním obdobím a nadmořské výšce. V letních měsících bývá podíl difúzního záření v průměru okolo 50% a v zimních měsících je tento podíl ještě vyšší. Čím je větší podíl difúzního záření v celkovém globálním záření, tím je menší možnost využitelnosti energie z globálního záření. [1]

Pokud se tedy sečte přímé a rozptýlené (difúzní) sluneční záření dopadající na vodorovnou plochu zemského povrchu, tak tato hodnota odpovídá globálnímu záření. [1]

Intenzita záření a doba slunečního svitu je závislá na zeměpisné poloze, ročním obdobím a na povětrnostních podmínkách (oblačnosti). Pokud mluvíme o ročním úhrnu globálního záření, můžeme se dostat v nejlepších oblastech až na roční hodnoty přesahující 2300 kWh/m². V našich zeměpisných oblastech se nedosahuje ani poloviny této hodnoty. V našich nejlepších oblastech se můžeme dostat pouze k 1100kWh/m². [1]



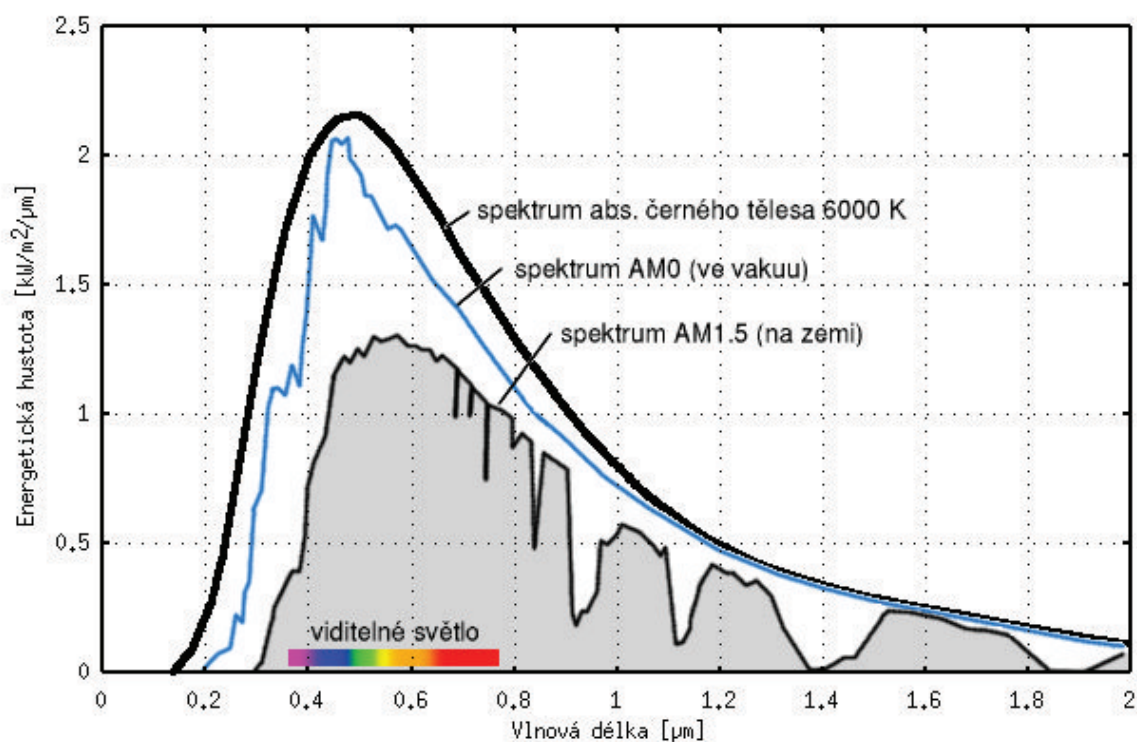
Obrázek 1 Ukázka mapy s vyznačenou intenzitou záření pro jednotlivé oblasti. [2]

Z obrázku č. 1 je tedy patrné, že největší intenzita záření na jeden metr čtvereční je v africké oblasti. Pro střední Evropu je roční hodnota energie záření kolem 1100 kWh/m². [1]

Spektrum AM

U slunečních simulátorů se nejčastěji setkáváme s označením spektra AM 1,5. Jedná se o sluneční spektrum po průchodu bezoblačnou atmosférou s celkovou energetickou hustotou 1000 W/m² v našich zeměpisných šířkách. Toto spektrum se nejčastěji udává pro sluneční simulátory pro testování solárních článků a panelů. V reálných podmínkách ale toto spektrum závisí na skutečné průhlednosti atmosféry. Celkový teoreticky využitelný výkon slunečního záření odpovídá šedé ploše pod křivkou AM 1,5. [3]

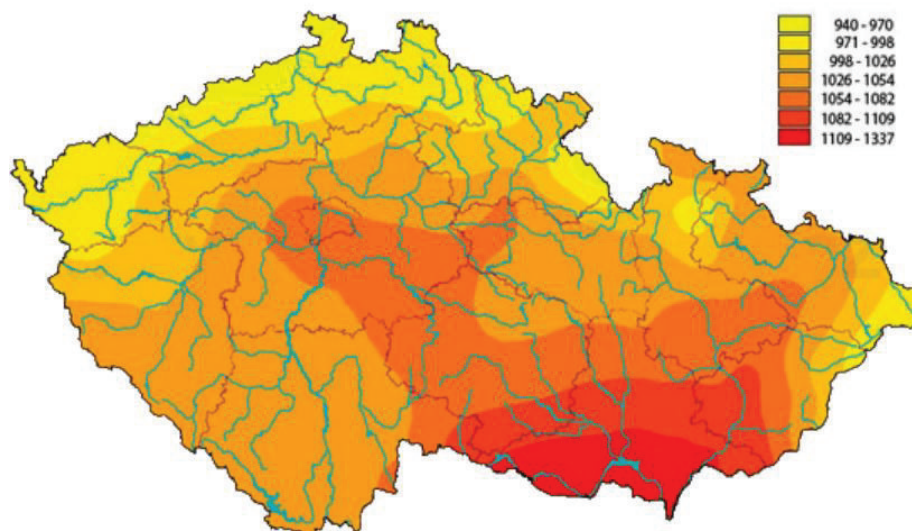
Spektrum AM 0 je na rozdíl od spektra AM 1,5 nefiltrované, není tedy ovlivněno průchodem zemské atmosféry a neztrácí tak na intenzitě a spektru. Spektrum AM 0 je pak tedy definováno jako sluneční spektrum ve vakuu. [3]



Obrázek 2 Ukázka spekter AM [3]

Intenzitu slunečního záření určuje tzv. solární konstanta, která udává, kolik energie obsahuje sluneční záření na horní hranici atmosféry. Solární konstanta je přibližně 1370 W/m^2 , což znamená, že na horní hranici atmosféry by na plochu 1 m^2 kolmou na sluneční záření dopadlo 1370 W sluneční energie. [2]

Toto sluneční záření je zeslabováno při průchodu atmosférou, částečně rozptýlováno, částečně odraženo a částečně pohlcováno. Na zemský povrch pak dopadá jednak zeslabené přímé sluneční záření, což je to, které se pohybuje v původním směru a vrhá stíny a podobně, a rozptýlené sluneční záření, díky kterému vidíme i při zatažené obloze. Bez rozptýleného záření by ve stínu byla tma. [2]



Obrázek 3 Střední hodnoty energie globálního záření na území ČR (kWh/m²) [4]

Sluneční záření je elektromagnetické vlnění složené z různých spekter vlnových délek, které se nejčastěji dělí na tři hlavní skupiny: ultrafialové záření, viditelné sluneční záření a infračervené záření. [4]

Ultrafialové sluneční záření

Jedná se o vlnové délky pod hodnotou 390 nm. Toto záření před vstupem do zemské atmosféry tvoří přibližně 7% z celkového elektromagnetického záření. Z větší části je toto ultrafialové záření absorbováno ozónovou vrstvou ve stratosféře. [5]

Viditelné sluneční záření

Jde o elektromagnetické záření s vlnovými délkami od 390 nm až po 760 nm. Jedná se o záření, které je možné vnímat lidským okem. Toto spektrum je vnímáno lidským okem formou barev a to od fialové až po červenou barvu. Jednotlivý rozpis barev podle záření je uveden v Tabulka 1 Rozpis vlnových délek viditelného spektra vnímaného lidským okem. Toto spektrum má celkový podíl 48% z elektromagnetického slunečního záření před vstupem do atmosféry. [5]

Barva vnímaná lidským okem	Rozsah vlnové délky (nm)	Střed vlnové délky (nm)
Fialová	390 – 430	400
Modrá	430 – 485	450
Modrozelená	485 – 505	495
Zelená	505 - 550	525
Žlutozelená	550 – 575	555
Žlutá	575 – 585	580
Oranžová	585 – 620	600
Červená	620 – 760	650

Tabulka 1 Rozpis vlnových délek viditelného spektra vnímaného lidským okem

Infračervené sluneční záření

Infračervené záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou od 760 nm do 4000 nm. Toto elektromagnetické záření tvoří přibližně 45% záření před vstupem do zemské atmosféry. Po infračerveném záření následuje ještě dlouhovlnné záření. Toto záření je definováno vlnovou délkou od 4000 nm do 100 000 nm. [5]

Využitelnost sluneční energie pro solární systémy.

Solární systémy je dnes možno vidět takřka „na každém rohu“. Využívanost sluneční energie každým rokem stoupá a technologie k získávání této energie ztrácejí na ceně a stávají se dostupnějšími. V této kapitole si představíme základní solární systémy pro získání a využití solární energie.

Solární kolektorové systémy

Jedná se o systémy většinou využívané pro ohřev vody nebo vytápění. Pomocí selektivní absorpční vrstvy je teplo předáváno proudící kapalině, která pak pomocí výměníků ohřívá teplou užitkovou vodu, bazénovou vodu nebo vodu topného systému. [6]

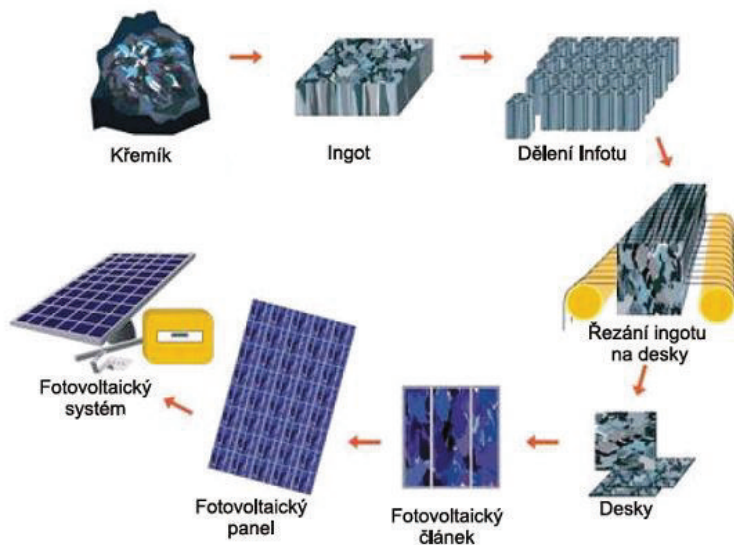
Proti ochlazování je zařízení izolováno tepelnou izolací. Tou může být např. minerální vata nebo také vakuum. Aby teplo nebylo vyzařováno zpět do prostoru, jsou kolektory kryty speciálním sklem, které, na rozdíl od obyčejného okenního tabulového skla, propouští téměř všechno tepelné záření ze slunce a to nejen přímé, nýbrž i difúzní (největší složka) a odražené. Navíc je odolné proti mechanickému poškození při instalacích nebo povětrnostním vlivům. Energetický zisk dnes vyráběných špičkových slunečních kolektorů přesahuje v našich podmínkách 500 kWh za rok na 1m². [6]



Obrázek 4 Sluneční kolektorový systém pro ohřev vody

Solární fotovoltaické panely

V dnešní době se staly nejčastějším systémem pro využívání sluneční energie. Jedná se o spojení křemíkových článků a vytvoření jednoho panelu. Počet článků použitých pro panel je závislý na požadovaném výkonu. Solární články, popř. panely, využívají pro přeměnu sluneční energie na elektrickou fotovoltaický jev. Účinnost solárního panelu je dána použitým druhem článků. Účinnost se pohybuje od 8% do 21%.



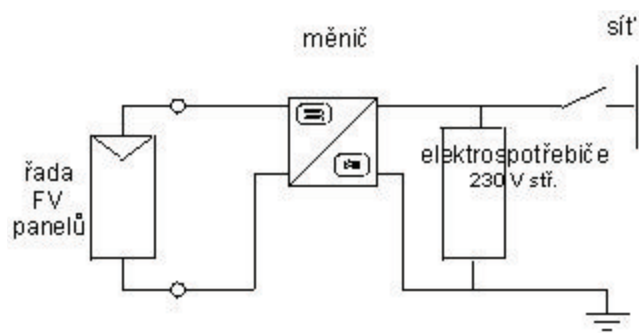
Obrázek 5 Ukázka postupu při výrobě solárních panelů [7]

Účinnost solárních článků nebo panelů lze ještě zvýšit pomocí koncentrátorových systémů, kdy můžeme pomocí systémů čoček, zrcadel a systému sledování sluneční dráhy zvýšit účinnost pro speciální články až k 43,5% při 421 násobném zvětšení. Tyto koncentrátorové systémy jsou ale z důvodu vysokých pořizovacích nákladů v našich podmínkách nevyužitelné. Jsou vhodné spíše do oblastí s vyšším dopadajícím zářením na metr čtvereční.

Systémy sestavené ze solárních panelů dělíme zpravidla na dvě hlavní skupiny podle dodávané energie. Tuto energii je možné dodávat přímo do sítě, mluvíme tedy o GRID ON systémech, nebo ukládat do akumulátorů a využít jí v případě potřeby, pak tedy mluvíme o systémech GRID OFF.

GRID – ON systémy

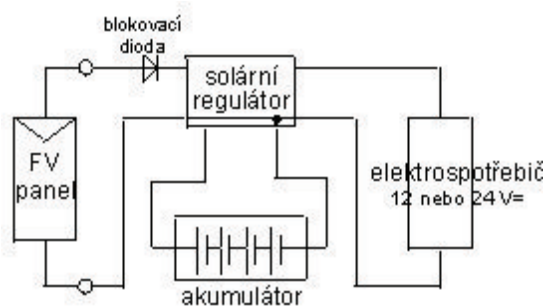
Jedná se o systémy pro výrobu elektrické energie napojené přes střídače na elektrickou síť. Jedná se o chytrou instalaci, která v případě potřeby přepne spotřebič na vlastní vyrobenou energii za předpokladu dostatečného osvětlení solárními panely. V případě přebytku elektrické energie je dodávána do elektrické sítě. [9]



Obrázek 6 Schéma napájecího systému GRID ON [9]

GRID – OFF systémy

Jak název napovídá, jedná se o přesně opačný systém než je GRID ON. Jde o izolované systémy s nezávislostí na okolní elektrické síti. Je zvolen dostatečný počet solárních panelů dobíjejících akumulátory v době slunečního svitu. Elektrická energie je v době tmy, kdy solární panely nevyrobí elektrickou energii, dodávána z nabitých akumulátorů. Tyto systémy jsou předurčeny především do oblastí s omezenou nebo žádnou elektrickou sítí. [9]



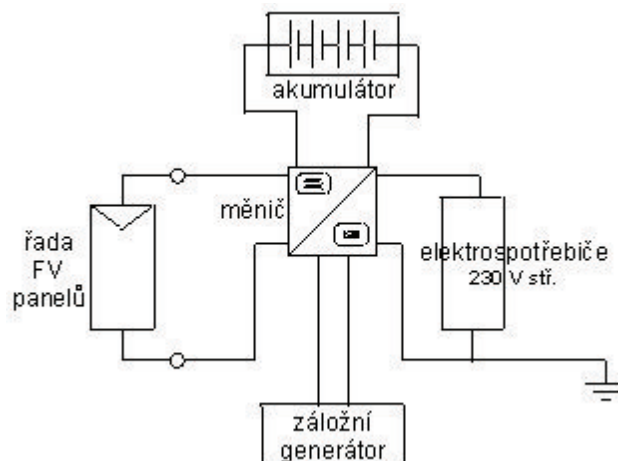
Obrázek 7 Schéma izolovaného systému GRID OFF [9]

Systém GRID OFF schematicky uveden na obrázku č. 7 je pro spotřebiče 12 V nebo 24 V. Toto ale není podmínkou, a v případě nutnosti použití spotřebičů s jinými napájecími hladinami lze přidat střídač. [9]

Hybridní systémy

Hybridní systémy jsou kombinacemi systémů GRID ON a OFF. Lze říci, že využívají všech pozitiv a snaží se vyvarovat negativ. Tyto systémy jsou použity v aplikacích, kde je nutné dodávat elektrickou energii v častých intervalech a s vysokými výkony. Hlavním požadavkem většinou bývá i celoroční provoz těchto systémů. Solární

panely v kombinaci s nabitými bateriemi nejsou zpravidla schopny dodat dostatečný výkon, je tedy ještě přidáván generátor, který má za úkol kompenzovat tyto špičky. Generátor je většinou nějaká elektrocentrála nebo dieselaagregát. [9]



Obrázek 8 Schéma hybridního solárního systému [9]

Druhy solárních panelů

Pro montáže v našich zeměpisných podmínkách se používají hlavně křemíkové panely. Je nutné vybrat i správný panel a to s pomocí následujících faktorů:

- Podle technologické účinnosti panelu - pravidlem bývá, že s rostoucí účinností stoupá i pořizovací cena.
- Podle intenzity dopadajícího světla - výběr je prováděn v závislosti na lokalitě.
- Dispozice řešení – je potřeba znát, na kterou světovou stranu bude panel orientován, jakou je možno využít plochu atd. [8]

Monokrystalické křemíkové panely

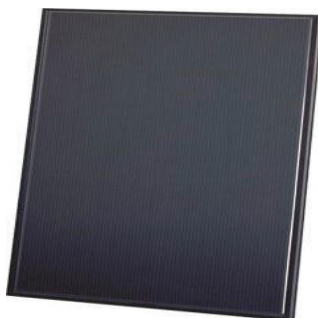
Jedná se o panely s jednou z nejvyšších stabilit po dobu používání. Zpravidla se uvádí, že po 10-ti leté instalaci se výkon panelu pohybuje na 90% svého původního výkonu a 80% po 25 letech. Výkon panelu je závislý na jeho velikosti. Pro omezení výkonových ztrát u těchto panelů je nutná orientace na JIH a musí být nezastíněny. V opačném případě dochází k prudkému poklesu jejich výkonu. Tyto panely dosahují účinnosti kolem 20%. Jedná se o nejčastěji používané solární panely na tuzemských solárních elektrárnách. [8]



Obrázek 9 Monokrystalický fotovoltaický panel [8]

Amorfní křemíkový panel a jiné tenkovrstvé panely

Životnost u těchto panelů se pohybuje kolem 20 let. Po deseti letech se jejich výkon z původního výkonu sníží na 80%. Panely dosahují přibližně 2,5 krát nižšího výkonu na m^2 než klasické krystalické panely (jedná se o polykrystalické a monokrystalické panely). Hlavní výhodou tohoto druhu solárních panelů je, že dokáží využívat v rozumné míře i difúzní záření. Tyto panely jsou vhodné především pro malé solární elektrárny s omezenou plochou a slabší intenzitou osvětlení. Jsou cenově dostupnější než klasické monokrystalické a polykrystalické panely. Účinnost u těchto panelů je uváděna okolo 7-11% při ideálním osvětlení. [8]



Obrázek 10 Amorfní fotovoltaický panel [8]

Solární fotovoltaické fólie jsou hydroizolační a fotovoltaický systém pro ploché střechy, který plní funkci hydroizolační povlakové vrstvy a současně funguje prostřednictvím integrovaných solárních článků jako výkonný generátor elektrického proudu. Základem systému jsou pásy hydroizolační fólie o tloušťce 2,8-3,5 mm, na jejichž horním povrchu jsou integrovány tenkovrstvé flexibilní fotovoltaické články na bázi amorfního křemíku. [8]

Amorfní křemíkové články jsou spojovány do modulových systémů, kde počet článků závisí na potřebné délce základní fólie. Pro lepší manipulaci se standardně dodává na modul 11 až 22 článků a výsledná délka se pohybuje od 3,5 až po 6 m. Šířky role jsou závislé na použitých řadách modulů. [8]

Výhodou tohoto systému je nízká zátěž pro instalovanou plochu, která se pohybuje kolem $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Oproti klasickým panelovým solárním systémům jde tedy o poloviční zátěž. Nevýhodou těchto systémů je jejich slabý výkon. Jelikož se jedná o amorfnní články, tak na stejné ploše by krystalické panely měly výkon vyšší přibližně o 150 – 200%. [8]



Obrázek 11 Ukázka použití solární fólie s amorfnními články. [8]

Polykrystalické křemíkové panely

Polykrystalické panely jsou jedny s nejtálejší časovou stabilitou. Po 12 letech provozování by neměla výkonost panelů klesat pod 90% a pod 80% po 25 letech. Standardně by panely měly být schopny vydržet 30-35 let. Tento druh panelů je vhodný jak na střešní instalace, tak i na rozlehlější pozemky. Pro dosažení podobného výkonu jako u monokrystalických panelů je nutné zvětšit příjmovou plochu. Účinnost u těchto panelů se pohybuje od 14 do 16%. Orientace může být i na jinou standardně uváděnou světovou stranu, než je jih. Polykrystalické panely dokáží přeměňovat i difúzní složku z dopadajícího záření. [8]



Obrázek 12 Polykrystalický fotovoltaický panel [8]

Trubicové fotovoltaické systémy

Trubicové panely jsou v termických solárních systémech používány již delší dobu. Využití výhod trubicového systému ve fotovoltaice je však relativní novinkou. Tento panel využívá tenkovrstvou technologii trubicových článků. Systém je tvořen dvojicí sousedních trubic. Vnější transparentní skleněná trubice kryje tenkovrstvé amorfnní fotovoltaické články, které jsou navinuté na vnitřní trubici. Dopadající sluneční záření je vnější trubicí lámáno a koncentrováno na povrch FV článku. Paprsky, které prošly prostorem mezi trubicemi, se odrážejí od reflexního podkladu (albedo 91%) a dopadají zpět na citlivý povrch. [8]

Výhodou trubicového panelu trubicového systému je, že efektivně využívá všechny složky slunečního záření - přímý osvit, difuzní i odražené světlo. Výkon tohoto systému je o 20% vyšší než u klasického uspořádání. Tento systém zatěžuje nosný substrát (střechu nebo jiné nosné médium) přibližně $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ [8]



Obrázek 13 Trubicový solární systém [8]

Mezi trubicemi může volně proudit vzduch, vítr nemá šanci panel nadzvednout. Jednotlivé panely se volně kladou na střechu, složité kotvení do střešní konstrukce je zbytečné. Odpadá nutnost montážních otvorů, čímž se eliminuje nebezpečí narušení hydroizolace střechy. [8]

Solární tepelné elektrárny

Jedná se o obdobu kolektorových systémů s přidáním koncentrátorových systémů. Tyto systémy soustředí sluneční energii pomocí takzvaného sběrače, předávajícího energii absorberu měnícímu energii záření na teplo. Toto teplo je předáváno teplotonosné kapalině až do vysokých teplot, kapalina dále putuje do teplotního výměníku s úkolem, předat tepelnou energii vodě a ta se následně mění na páry nutné k roztáčení parního generátoru. A konečně vzniká elektrická energie. Princip tohoto systému je obdobný jako u tepelné elektrárny, s rozdílem produkovaných odpadních zplodin a vyhřívacího média. Do těchto elektráren neproudí obrovské množství paliva denně, ale je zde využívána všudypřítomná sluneční energie. [9]

Teplo se ze slunečního záření získává v zásadě dvěma metodami. První je založena na pohlcování záření černou absorpční plochou solárního kolektoru a uplatňuje se hlavně při ohřívání vody nebo vzduchu. Výkon těchto topných systémů a výsledná teplota vody či vzduchu dosahuje nanejvýš 200 °C. Druhý způsob spočívá v soustředění (koncentraci) paprsků z velké plochy do plošky co nejmenší. Využívá se odrazu světla od vhodně tvarovaných a orientovaných zrcadel. Základním prvkem slunečních elektráren jsou fokusační sběrače nebo heliostaty. [9]

Hlavním nedostatkem je konstantní výkon, který u těchto typů elektráren nelze s přehledem zajistit. Nelze s jistotou zajistit přímé sluneční světlo po celý den nebo za daný časový úsek. Tepelné elektrárny na klasická tuhá paliva mohou teoreticky dodávat elektrickou energii po celý den, za předpokladu dostatečného přísunu paliva. Solární tepelné elektrárny bohužel tuto vlastnost nemají a jsou omezeny denní svítivostí. [9]

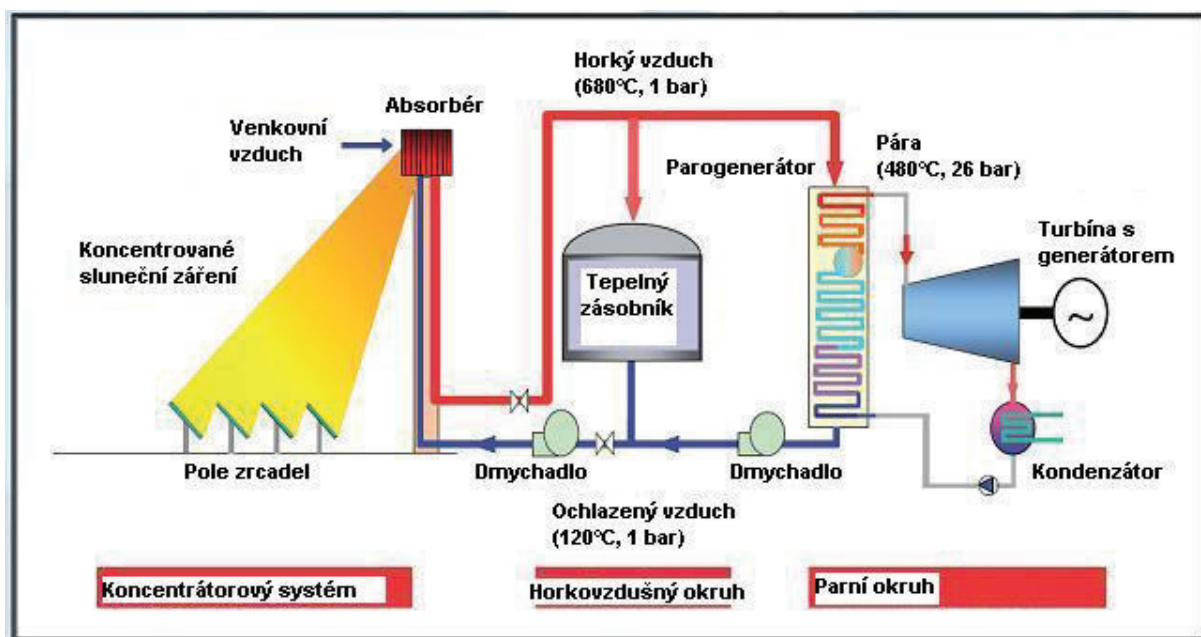
Primárním teplotonosným médiem je vzduch, který je nasáván z venkovního prostředí skrz absorber dovnitř věže. Vlastní absorber je sestaven z modulů vyrobených z porézního keramického materiálu. V absorberu se vzduch zahřívá na teplotu přibližně 680°C a následně vstupuje do tepelného výměníku vzduch-voda (parogenerátoru), ve kterém se vyrábí pára s parametry 480°C, 26 bar. Sekundární (parní) okruh je obdobný jako u standardních parních elektráren. [9]

Největší sluneční elektrárna se systémem žlabových sběračů je vybudována v Mojavské poušti v Kalifornii. Jedná se o skupinu sedmi elektráren SEGS III - IX, které byly postupně budovány od roku 1985. Je zde rozmístěno 400 000 zrcadel na ploše 400 hektarů. Celkový výkon elektráren je 325 MW. Při zatažené obloze a v noci se vyrábí pára pro pohon turbín spalováním zemního plynu. Tato elektrárna je tedy kombinací různých médií pro získání co největší účinnosti a ekologie. [9]

Svou konstrukcí jsou osamoceným druhem věžové sluneční elektrárny. Jedná se o věžovou konstrukci na jejímž vrcholu je umístěn kulatý absorbér a pomocí heliostatů umístěných kolem věže je koncentrována sluneční energie do jednoho místa. Jedná se o součet dopadajícího záření z velké plochy na koncentrované místo. [9]

U solárních tepelných elektráren se můžeme setkat s různými fokusačními sběrači nebo heliostaty. Dělení fokusačních sběračů je podle jejich tvaru. Nejčastěji tedy rozlišujeme:

- Žlabové sběrače
- Diskové sběrače
- Heliostaty

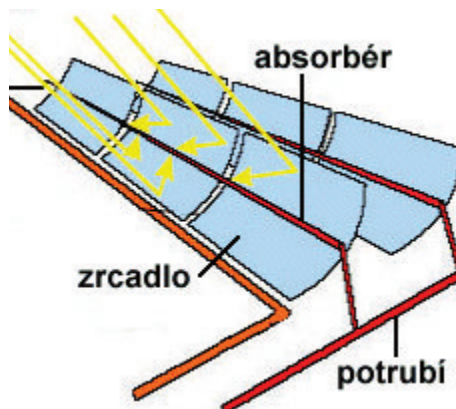


Obrázek 14 Zjednodušené schéma tepelné solární elektrárny [9]

Žlabový sběrač

Jedná se o často používaný sběrač pro solární tepelné elektrárny velkých rozloh. Jde o sběrač žlabového typu s tmavě zbarveným absorbérem. Trubice s teplonosnou kapalinou je upevněna tak, aby procházela ohnisky jednotlivých úseků parabolického žlabu. Kapalina procházející trubicí se zpravidla ohřívá na teplotu několika set stupňů Celsia. Pokud se soustavy spojí do větších soustav, navyšuje se výkon. U těchto systémů

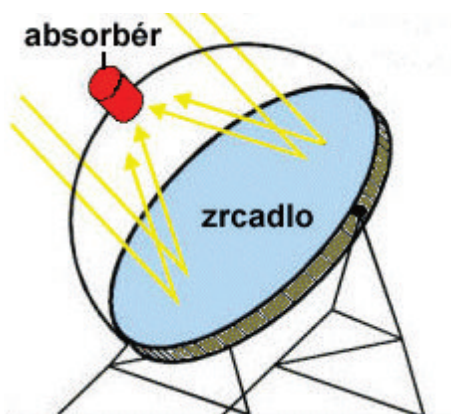
je také velmi vhodné používat sluneční trackery. Jedná se o systémy sledující denní pohyb slunce po obloze a natáčející žlabové sběrače pro dosažení co nejlepšího příjmu slunečních paprsků. [9]



Obrázek 15 Nákres žlabového sběrače pro solární tepelné elektrárny[9]

Diskové sběrače

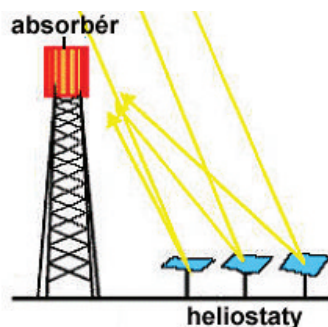
Jsou vhodné pro menší solární tepelné elektrárny nebo pro aplikace omezené rozlohou. U těchto omezení je vhodné pro navýšení výkonu použití koncentrátorových systému. Jedná se o soustavu čoček zesilující sluneční záření a koncentrující ho do menších bodů. Sluneční paprsky se opět soustřeďují do ohniska, kde je umístěný absorbér. Zahřátá kapalina v absorbéru se potrubím odvádí do místa dalšího využití. Má-li mít parabolické zrcadlo velký průměr, sestavuje se z většího počtu vhodně sestavených menších zrcadel. U těchto systémů se také využívá tracker pro sledování denního pohybu slunce. [9]



Obrázek 16 Ilustrace diskového sběrače[9]

Heliostaty

Jedná se o soustavu zrcadel vhodně rozmístěných kolem koncentrátorového bodu s úkolem sledovat a odrážet sluneční záření do přesně určených míst (sběračů). Tyto systémy se používají v případech, kdy je nutné koncentrovat sluneční energii z větší plochy na malé sběrače. [9]



Obrázek 17 Ilustrativní zobrazení systému s heliostaty[9]

Závěr kapitoly

V této kapitole byly představeny jednotlivé možnosti jak využít sluneční energii a to dvěma hlavními způsoby. Jedná se o tepelnou energii, kterou lze využívat k vytápění nebo sběru tepla pro přeměnu na elektrickou energii, a přeměnu pomocí fotovoltaického jevu. Obě dvě možnosti využívání sluneční energie přispívají ke snížení emisí produkovaných ostatními zdroji elektrické energie. Jedná se hlavně o uhelné elektrárny a podobně. Jako každý možný zdroj i získávání energie ze slunce sebou přináší své výhody a nevýhody. [9]

Výhody solárních systémů:

- u solárních panelů není nutná další obsluha
- nevyčerpatelný zdroj (za lidský život)
- vysoká životnost
- minimální provozní náklady
- minimální produkce emisí (jen při výrobě)
- úspora fosilních paliv
- poměrně dlouhá životnost

Nevýhody solárních systémů:

- dosud velké prvotní náklady na pořízení těchto systémů
- proměnný denní výkon
- velké výkonnostní výkyvy během roku
- v důsledku nerovnoměrného rozmístění solárního záření je zapotřebí také výběr vhodné lokality
- nízká energetická hustota – nutnost využití velké plochy

Normy pro testování solárních článků a panelů

Pro testování solárních článků a panelů jsou jasně definovaná pravidla, která přímo určují jednotlivé postupy a zařízení pro testování a zkoumání jejich vlastností. Tato kapitola se bude snažit představit hlavně normu IEC 60904, určující podmínky pro testování slunečními simulátory nebo pomocí slunce.

Hlavní pozornost bude věnována normě IEC 60904 – 9, zabývající se jasnou definicí tříd solárních simulátorů. Stanovuje jejich vlastnosti pro různé třídy a přesně definuje potřebné vlastnosti pro dané třídy.

Norma IEC 60904

Hlavním cílem této normy je popis postupů pro měření Volt – Ampérových charakteristik fotovoltaických zařízení pomocí přírodního slunečního zdroje nebo pomocí simulátoru slunečního záření. Tyto postupy lze použít jak pro testování jednotlivých článků tak i panelů (plošných modulů). Hlavním cílem této normy je určit základní požadavky pro prováděné měření Volt – Ampérových charakteristik fotovoltaických součástí, definovat jednotlivé postupy pro různé měřicí techniky v praxi a ukázat metody pro minimalizaci nejistot. [10]

Hlavním cílem této normy je definice podmínek a parametrů, při kterých by mělo probíhat měření. Z těchto parametrů je potřeba uvést hlavně:

- Teplota – při měření by teplota článku, panelu a prostředí měla odpovídat 25°C. Tuto teplotu je potřeba dodržet. Články a panely by před měřením měli být dostatečnou dobu aklimatizovány v měřicí místnosti (udržované na 25°C). Teplota by měla být měřena pomocí přístroje s přesností $\pm 1^\circ\text{C}$.
- Přístroj pro získání Volt – Ampérové charakteristiky by měl pracovat s přesností $\pm 0,2\%$.
- Měření by mělo být v ideálním případě prováděno 4-vodičovým připojením pro solární články a dvouvodičovým pro solární panely (4-vodičové kontaktování by v případě solárních panelů nebylo asi proveditelné).
- Měření zkratového proudu by mělo probíhat při nulovém napětí a se sériovým externím odporem.
- Teplota a intenzita ozáření by měly být pravidelně kontrolovány na referenčním vzorku. [10]

Měření s pomocí přirozeného osvětlení

Kromě obecných požadavků souvisejících s výše uvedenými podmínkami, existuje pár odchylek, které jsou přímo určeny pro měření pomocí přirozeného slunečního osvětlení. Jedná se zejména o tyto: [10]

Musí být dostupné

- Teplotní měřicí zařízení pro měření teploty zkoumaného vzorku.
- Dvouosý polohovací systém pro natáčení zkoumaného vzorku s přesností $\pm 5^\circ$.
- Spektroradiometr pro měření spektrální intenzity slunečního záření v rozsahu spektrální citlivosti zkoumaného vzorku.
- Referenční Volt – Ampérová charakteristika zkoumaného vzorku při jasně definovaném osvětlení. [10]

Měření s pomocí simulovaného osvětlení

Simulátory slunečního záření mají jasně definované spektrální a výkonnostní vlastnosti v normě IEC 60904 – 9. Tato norma přímo určuje vlastnosti a zařazení slunečních simulátorů do jednotlivých tříd podle jejich výkonnostních charakteristik. Norma IEC 60904 určuje jen základní podmínky pro prováděné měření. Jedná se zejména o: [10]

- Dostupnost referenčního VA zařízení, které je přizpůsobeno testovacímu zařízení v celém rozsahu (jde o velikost testovaného prostoru, možnosti nastavení testované plochy, měření teploty, atd.).
- Dostupnost měřicího zařízení, měřící teplotu u zkoumaného vzorku.
- Senzor kontrolující intenzitu ozáření a spektrální složení testovaného vzorku. [10]

Rozpis tříd slunečních simulátorů

- Třída A - jedná se o přístroje blížíící se svými vlastnostmi k referenčním vzorkům (s ohledem na rozměry a elektrické vlastnosti). Při testování referenčního a testovaného zařízení se musí dbát na stejné vlastnosti při průběhu měření.
- Třída B – v této třídě je povolena mírná nejednotnost rozložené intenzity ozáření. Z aktivní ozářené oblasti se stanovuje efektivní ozáření.

- Třída C – průměrné efektivní ozáření nemusí být zcela jednotné v celé aktivní oblasti. Jedná se o „nejhorší“ přípustnou testovací třídu. [10]

Tyto třídy se přidělují podle vlastností jednotlivých slunečních simulátorů. Obecně platí, že pokud se sluneční simulátor nedostane svými parametry pro třídu C, tak potom není považován za solární simulátor. Minimální požadavky pro simulátor solárního záření pro testování fotovoltaických součástek je třída CCC. Význam jednotlivých znaků je uveden níže v tabulce. Přesné spektrální vlastnosti solárních simulátorů budou uvedeny v kapitole Norma IEC 60904-9. Jednotlivé parametry by měly být průběžně kontrolovány pro zachování klasifikace. U některých solárních simulátorů je možné, setkat se s proměnlivými parametry v závislosti na provozu. [10]

Norma IEC 60904-9

Tato část normy IEC 60904-9 definuje klasifikaci solárních simulátorů pro měření fotovoltaických součástek. Jak je uvedeno výše, solární simulátory jsou klasifikovány do tříd A, B nebo C. Pomocí tohoto popisu normy by mělo být možné získat základní znalosti pro určení třídy simulátoru. Norma dále stanovuje podmínky pro určení třídy podle časové nestability a nerovnoměrnosti ozáření. [11]

Tato norma definuje, jak lze využít solární simulátory, a to pro dvě aplikace:

- Měření Volt – Ampérové charakteristiky.
- Ozařování zkoumaného objektu.

Solární simulátory se zpravidla skládají ze třech částí: světelný zdroj (lampa, výbojka nebo jiné médium), napájecí systém pro světelný zdroj a optické zařízení popř. filtry pro rovnoměrný rozptyl záření.

V této normě je dále definováno spektrální složení záření, určeného pro solární simulátory. Norma se omezuje na vlnové délky mající významný vliv na provoz fotovoltaických součástek. Jde tedy o definici v rozsahu 400 – 1100 nm. V tomto spektru je přesně definováno 6 procentuálních podílů jednotlivých vlnových délek určených pro testovací spektrum. Toto definované spektrum je nastaveno tak, aby se co nejvíce přibližovalo spektru definovaného podle AM 1,5 uvedeného na obrázku č. 2 v první kapitole této práce. [11]

pořadí složky	Rozsah vlnové délky použité složky	procentuální podíl z celkového spektra (%)
1	400 - 500	18,4
2	500 - 600	19,9
3	600 - 700	18,4
4	700 - 800	14,9
5	800 - 900	12,5
6	900 - 1100	15,9

Tabulka 2 Rozsah vlnových délek a jejich podíl na celkovém spektru dle IEC 60904-9 [11]

Při měření je nutné stanovit i nerovnoměrnost ozáření. Toto měření je prováděno pomocí spektrometru při předem stanoveném počtu měření a náhodně vybraných bodech na zkoumaném vzorku. Výpočet se provádí pomocí vztahu: [11]

$$\text{nerovnoměrnost ozáření} = \frac{(\text{maximální ozáření prostoru} - \text{minimální ozáření prostoru})}{(\text{maximální ozáření prostoru} + \text{minimální ozáření prostoru})} * 100\%$$

(1)

Vztah pro stanovení nerovnoměrnosti ozáření na zkoumaném objektu. [11]

Podobně jako je určována nerovnoměrnost ozáření je nutné stanovit i časovou stabilitu světelného simulátoru. Tato stabilita se dělí na dvě hlavní skupiny: na krátkodobou a dlouhodobou nestabilitu.

- A) Krátkodobá nestabilita se týká stability odebíraných parametrů (záření, proudu a napětí) během měření Volt – Ampérové charakteristiky. Většinou se tato krátkodobá nestabilita určuje z nejhorších naměřených parametrů vztahujících se k měření.
- B) Dlouhodobá časová nestabilita je určována z celého měření pro klasické simulace. Jedná se o zkoušky ozařované oblasti delšího trvání. V případě, že se simulátor používá na trvalé zkoušky, postupuje se podobně jako u stanovování nerovnoměrnosti ozáření.

Jak bylo zmíněno výše, simulátory slunečního záření jsou hodnoceny podle 3 hlavních parametrů, což jsou spektrální shoda, prostorová nerovnoměrnost a časová nestabilita. Parametry pro určení třídy solárních simulátorů je nutné získat z příslušných měření. Naměřené parametry je nutné porovnat s tabulkou č. 3 a získáme tříčlenné hodnocení solárního simulátoru. [11]

Klasifikační třída	Spektrální shoda pro všechny intervaly (%)	Nerovnoměrnost ozáření (%)	Časová nestabilita	
			Krátkodobá nestabilita ozařované oblasti (%)	Dlouhodobá nestabilita ozařované oblasti (%)
A	0,75 - 1,25	2	0,5	2
B	0,5 - 2,0	5	2	5
C	0,4 - 2,0	10	10	10

Tabulka 3 Tabulka parametrů pro určení tříd solárních simulátorů [11]

V technické normě IEC 60904 – 9 je dále uvedena tabulka se vzorovým výpočtem třídy simulátoru. Z této tabulky je patrné, že určení výsledné třídy pro jednotlivé parametry je prováděno dle nejhoršího zkoumaného vzorku. V praxi to tedy znamená, že pokud procentuální složení testovaného spektra od 400 do 500 nm bude ve třídě C, není možné již tuto třídu zvýšit a celý simulátor po spektrální stránce spadá do třídy C. [11]

Zdroje světla

V 17. století ukázal I. Newton, že bílé sluneční světlo je možné skleněným hranolem rozložit na světelné spektrum. Bílé světlo se tedy ve skutečnosti skládá z mnoha různobarevných světél. Jejich barvy je možno rozdělit do šesti základních skupin: fialová, modrá, zelená, žlutá, oranžová a červená.

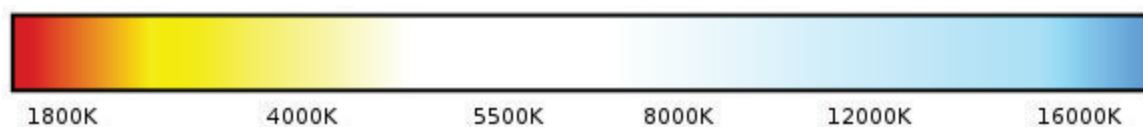
Spektrum se v přírodě dá nejčastěji pozorovat ve formě duhy. Tyto barvy souvisí s vlnovou délkou světla, tak jak je uvedeno v první kapitole této práce.

Zdroje světla můžeme rozdělovat podle různých hledisek, k těm nejběžnějším patřily a patří hlavně:

- Slunce: zdrojem energie jsou termojaderné reakce v jeho nitru, kde dosahuje teplota přibližně 14 milionů °C! Také jiné hvězdy na obloze jsou zdrojem světla a tepla, ale protože jsou od nás vzdáleny mnohem více než Slunce, jeví se nám jen jako nepatrné zářící body.
- Otevřený oheň: světlo a teplo vzniká hořením, tj. oxidací hořlavých látek. Lidé získali první oheň zřejmě při úderu blesku a po dlouhou dobu (až do vynálezu žárovky) byla svítidla s otevřeným ohněm jedinými umělými zdroji světla. Byly to např. louče, svíčky, olejové, petrolejové nebo plynové lampy.
- Žárovky: teprve s rozvojem elektrotechniky se podařilo vytvořit zcela nový zdroj světla. V žárovce elektrický proud rozžhává tenké kovové vlákno, které se rozzáří. Na světlo se přemění jen několik procent dodávané energie, zbytek jsou tepelné ztráty. Žárovku vynalezl roku 1879 T. A. Edison.
- Zářivky a výbojky: průchodem elektrického proudu zředěnými plyny vzniká světlo různých barev. Tyto zdroje mají několikrát větší účinnost než žárovka a používají se k osvětlování čím dál častěji. Výbojka je také jednou ze základních částí některých typů laserů.
- Luminiscenční diody: jsou to miniaturní polovodičové zdroje světla, které známe častěji pod zkratkou LED (Light Emitting Diode). Jsou to ta blikající červená, zelená nebo žlutá světélka na většině elektronických přístrojů. Dříve se tyto zdroje světla používaly hlavně jako signalizační kontrolky. Dnes zaznamenávají vývoj a začínají se používat i v hlavní osvětlovací technice. Je to dáno vývojem vysoce svítivých LED diod.
- Laser: všechny dříve uvedené zdroje vydávají „obyčejné“ světlo, které je nekoherentní a je směsí světél různých vlnových délek. Světlo laseru má vlastnosti v mnohém zcela odlišné - je koherentní, monochromatické a směrové. Žádný jiný zdroj světla těchto vlastností nevyzařuje. [12]

Dalším významným parametrem pro zdroje světla je index podání barev. Tímto indexem se hodnotí věrnost barevného vjemu, vznikající osvětlením ze světelného zdroje v porovnání s tím, jaký barevný vjem by vznikl ve světle retenčního ideálního zdroje. Hodnota tohoto indexu nabývá hodnot od 0 do 100. Kde nulová hodnota udává, že při tomto indexu není možné rozpoznat barvy. Naopak hodnota blízká 100 je světelný zdroj umožňující přirozené podání barev. [9]

Teplota chromatičnosti – charakterizuje spektrum bílého světla. Světlo určité teploty chromatičnosti má barvu tepelného záření vydávaného černým tělesem zahřátým na tuto teplotu. Teplota chromatičnosti se měří v Kelvinech. [9]



Obrázek 18 Teplota chromatičnosti[9]

Příklady barevných teplot různých světelných zdrojů:

- 1200 K: svíčka
- 2800 K: žárovka, slunce při východu a západu
- 3000 K: studiové osvětlení
- 4000 K: teple bílá
- 5000 K: obvyklé denní světlo, zářivky
- 5500 K: fotografické blesky, výbojky;
- 6000 K: jasné polední světlo
- 6500 K: standardizované denní světlo
- 7000 K: lehce zamračená obloha
- 8000 K: oblačno, mlhavo (mraky zabarvují světlo do modra)
- 10 000 K: silně zamračená obloha nebo jen modré nebe bez Slunce [9]

Vybrané zdroje světla

V této části jsou představeny základní parametry vybraných zdrojů světla, které byly proměřeny spektrometrem VS 140.

OSRAM FQ 54W/840

Jedná se o klasickou zářivku určenou pro vnitřní instalace. Výkon u této zářivky je stanoven na 54,1 W s životností přibližně 16 000 hodin. Další parametry jsou uvedeny níže. [13]

- Světelný tok při 25 °C 4450 lm
- Jmenovitý index podání barev (Ra) >= 80
- Jmenovitý světelný tok 4450 lm
- Světelný tok 4450 lm

- Barva světla 840
- Jmenovité 4000K barevné teploty
- Index podání barev Ra 80 ... 89[13]

PHILIPS MHN-TD

Jedná se o kompaktní halogenidové výbojky s dvojitou baňkou (hořák z křemenného skla). Tyto výbojky je nutné používat ve svítidle s krytem z tvrzeného skla, který chrání před případným roztrháním výbojové trubice. Výhodou těchto výbojek je, že obsahují UV blok pro snížení škodlivosti a rizika blednutí. [9]

Vlastnosti:

- výbojová trubice z křemenného skla obsahuje rtuť pod vysokým tlakem a směs halogenidů dysprosia, holmia a thulia (typy MHN-TD) nebo jodid cínu (typy MHW-TD) se sodíkem a thaliem přidanými pro upravení barvy a stabilizaci oblouku
- dvoupatkové výbojky zakryté v trubkovité, čiré, vakuované baňce z křemenného skla s UV-blokem
- poloha svícení vodorovně $\pm 45^\circ$ [9]

nejčastěji se používají:

vnitřní použití: akcentové osvětlení, všeobecné osvětlování (např. v obchodech a nákupních střediscích), nasvícování shora i zdola, nasvícování stěn, např. v obchodech a nákupních střediscích

vnější použití: reflektorové osvětlení monumentů, fasád a billboardů [9]



Obrázek 19 Výbojka Philips MHN - TD[9]

Philips MasterColour CDM-TD

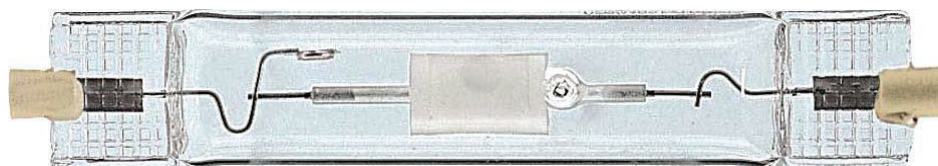
Kompaktní výbojky se stabilní barvou světla po celou dobu životnosti a třpytivým světlem. Musejí být použity v zapojení s elektronickým předřadníkem nebo tlumivkou a zapalovačem. Je nutné je používat v uzavřených svítidlech s krytem z tvrzeného skla. [9]

Vlastnosti:

- třpytivé bílé světlo, vynikající barevné podání
- přímá náhrada pro klasické halogenidové výbojky s hořákem z křemičitého skla (MHN/W-TD), při snížení provozních nákladů a vylepšení kvality světla
- poloha svícení vodorovně $\pm 45^\circ$ [9]

Výhody:

- stabilní barevný dojem po celou dobu životnosti
- vysoká účinnost výbojky vede k nižším provozním nákladům
- dlouhá životnost ve srovnání s běžnými a halogenovými žárovkami ale také s konvenčními MHN/W-TD výbojkami
- všechny typy mají UV-blok pro nižší riziko blednutí
- dobrá volba pro životní prostředí díky vysoké energetické účinnosti a dlouhé životnosti [9]



Obrázek 20 Halogenová výbojka Philips MasterColor CDM-TD [9]

PHILIPS SPOTONE 30

PHILIPS E27/60W Spotone NR63 je žárovka vhodná zvláště pro prostorově omezené aplikace a pro malá svítidla s určeným směrem světla - pod určitým úhlem vyzařování. Vhodná pro použití v osvětlených výkladních skříních, osvětlení v obchodech, hotelích, restauracích ale i v domácnosti. [14]

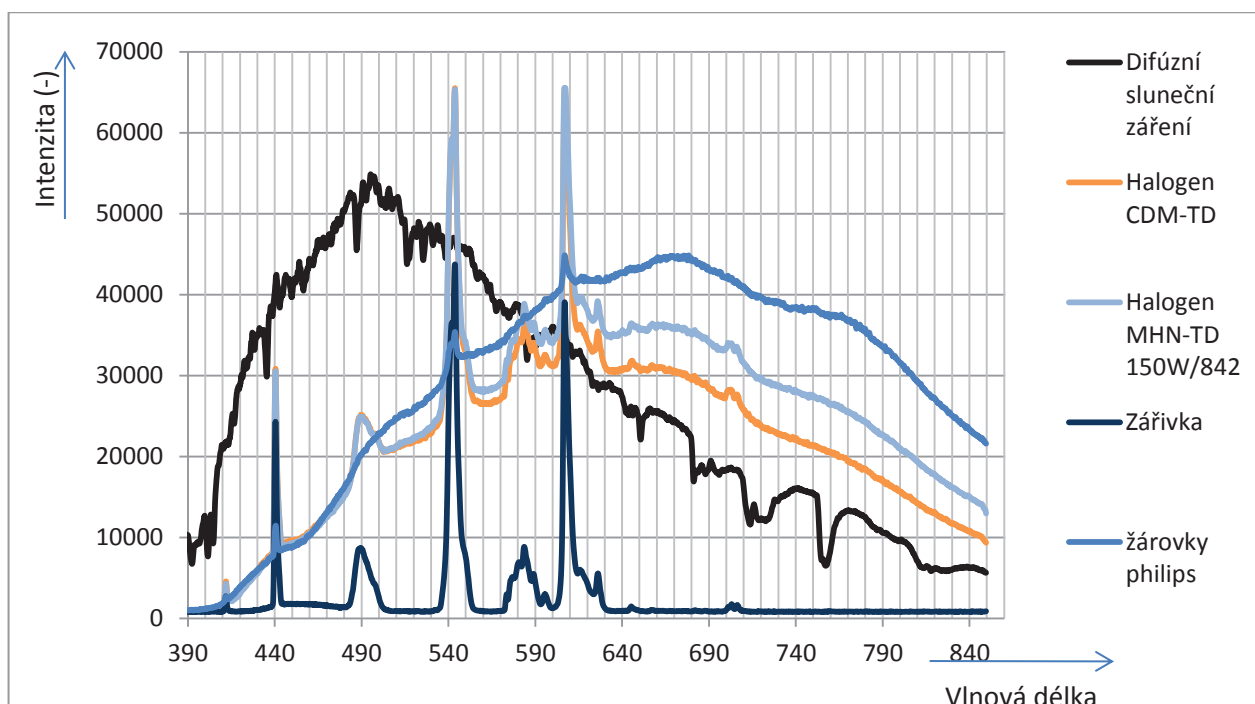
Parametry

- Baňka: matná
- Příkon: 60W
- Napětí: 230V
- Patice: E27
- Úhel vyzařování: 30 stupňů [14]

V rámci měření bylo změřeno i difúzní světlo. Technický popis difúzního světla je uveden v první kapitole. V plánu bylo i měření přímého slunečního záření, to se ale v době, kdy probíhalo měření, nepodařilo realizovat pro nepříznivé povětrnostní podmínky.

Měření vybraných zdrojů světla

V rámci této diplomové práce byly změřeny vybrané sluneční simulátory pomocí spektrometru VS 140. Výsledná charakteristika je uvedena v obrázku č. 21. Tyto charakteristiky byly měřeny v co nejpodobnější vzdálenosti tak, aby se zachovaly podobné podmínky měření. Měření bylo realizováno pomocí bílé plochy, na kterou byl nasměrován spektrometr. Vzdálenost mezi měřicí plochou a zdrojem záření byla 60 cm. Při bližší vzdálenosti byla vyzařovaná intenzita mimo měřicí rozsah spektrometru VS 140.



Obrázek 21 Grafické závislosti měřených solárních simulátorů

$$\delta = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{Intenzita_2 - Intenzita_1} \quad (2)$$

$$S_{cel} = \sum_{k=xy}^{\delta} |\delta| \quad (3)$$

Aby bylo možné porovnat jednotlivé naměřené závislosti je nutné spočítat celkovou plochu grafické závislosti. To je provedeno pomocí vztahů (2) a (3). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Svítlidlo	Vlnová délka	400-900 nm	400-500 nm	500-600 nm	600-700 nm	700-800 nm	800- 900 nm
PHILIPS SPOTEN 30	Vypočítaná plocha	36374,73	6879,09	8750,14	9462,47	7962,75	3320,29
	Procentuální podíl (%)		18,91	24,06	26,01	21,89	9,13
	Hodnocení dle normy IEC 60904-9		A	A	C	C	B
Zářivka OSRAM FQ 54	Vypočítaná plocha	54050,96	12782,93	21757,44	16951,86	1931,17	627,56
	Procentuální podíl (%)		23,65	40,25	31,36	3,57	1,16
	Hodnocení dle normy IEC 60904-9		B	X	C	X	X
HALOGEN MHM-TD 150W	Vypočítaná plocha	66430,04	15190,99	22724,43	19001,26	6919,68	2593,67
	Procentuální podíl (%)		22,87	34,21	28,60	10,42	3,90
	Hodnocení dle normy IEC 60904-9		A	C	C	B	X
Halogen CDM - TD 500 W	Vypočítaná plocha	67365,74	15521,89	22899,29	20102,09	6411,69	2430,78
	Procentuální podíl (%)		23,04	33,99	29,84	9,52	3,61
	Hodnocení dle normy IEC 60904-9		B	C	C	B	X
Difúzní záření	Vypočítaná plocha	70363,03	28585,30	18095,76	12083,06	9414,18	2184,73
	Procentuální podíl (%)		40,63	25,72	17,17	13,38	3,10
	Hodnocení dle normy IEC 60904-9		X	B	A	A	X

Tabulka 4 Vyhodnocení parametrů podle normy IEC 60904-9

Vyhodnocení naměřených hodnot

Podle vyhodnocených parametrů můžeme říci, že pro měření solárních článků a panelů lze využít pouze solární simulátor s žárovkou PHILIPS SPOTEN 30. Ten se jako jediný svým spektrem dostal na poslední vyhovující třídu C. Políčka označená písmeny X jsou nevyhovující neshody s žádnou třídou dle IEC 60904-9.

Praktická část

Část první měření diod pro stanovení vlnové délky

V rámci realizace praktické části bylo zapotřebí vytvořit návrh pro konečnou realizaci solárního simulátoru, který by bylo v budoucnu možno použít k testování solárních článků.

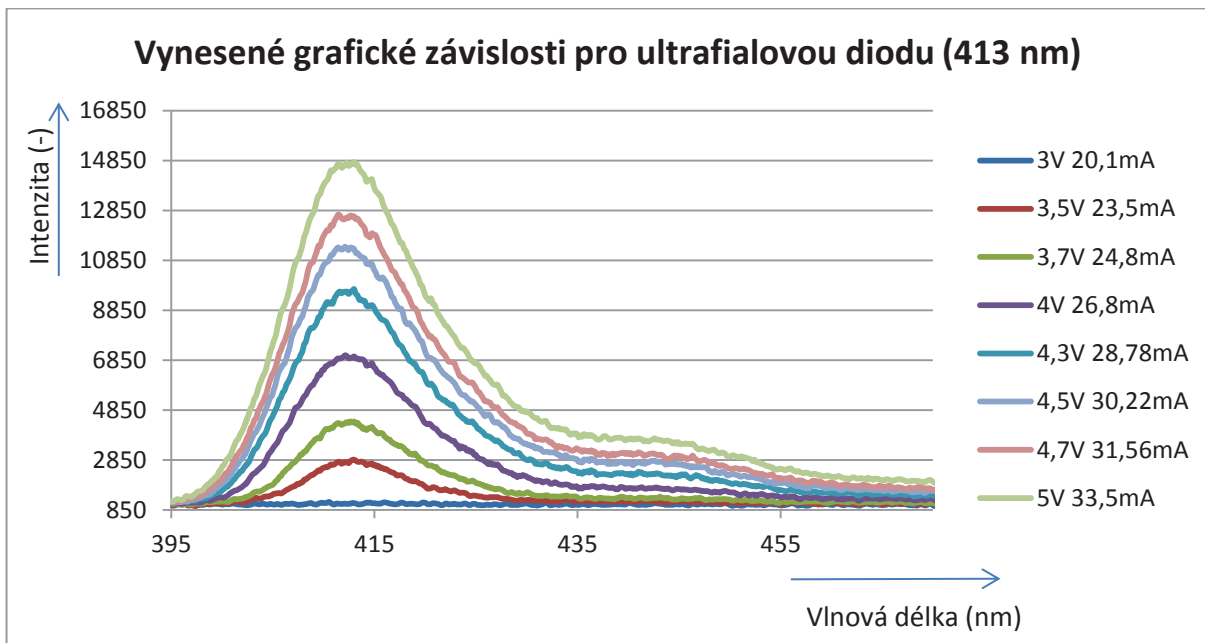
Solární simulátor v této diplomové práci bude realizován pomocí vysoce svítivých LED diod. Tyto LED diody byly vybrány podle dominantní vlnové délky, kterou podle datových listů (datasheetů) vyzařují. Tato dominantní vyzařovaná vlnová délka měla být co nejvíce shodná s vlnovým rozložením podle normy IEC 60904-9.

V první fázi experimentu proběhl výběr malých sérií LED diod s vyhovující vlnovou délkou pro experiment. Jednotlivé diody byly pomocí kontaktního pole, trimru, napájecího zdroje a spektrometru VS140 proměřeny od nejnižšího vyzařovaného spektra až po maxima uváděná podle katalogových listů. Výstupem provedených měření byly získány grafické závislosti intenzity na vlnové délce. Na získaných závislostech je možné pozorovat dominantní vyzařované spektrum a u některých diod i vedlejší vyzařované spektrum. Toto vedlejší spektrum není ale až tak výrazné a pro další fáze experimentu jej můžeme zanedbat. Naším cílem tedy bylo získat u vybraných LED diod detailní přehled o vyzařované vlnové délce a najít součástky, vhodné pro konstrukci finálního simulátoru.

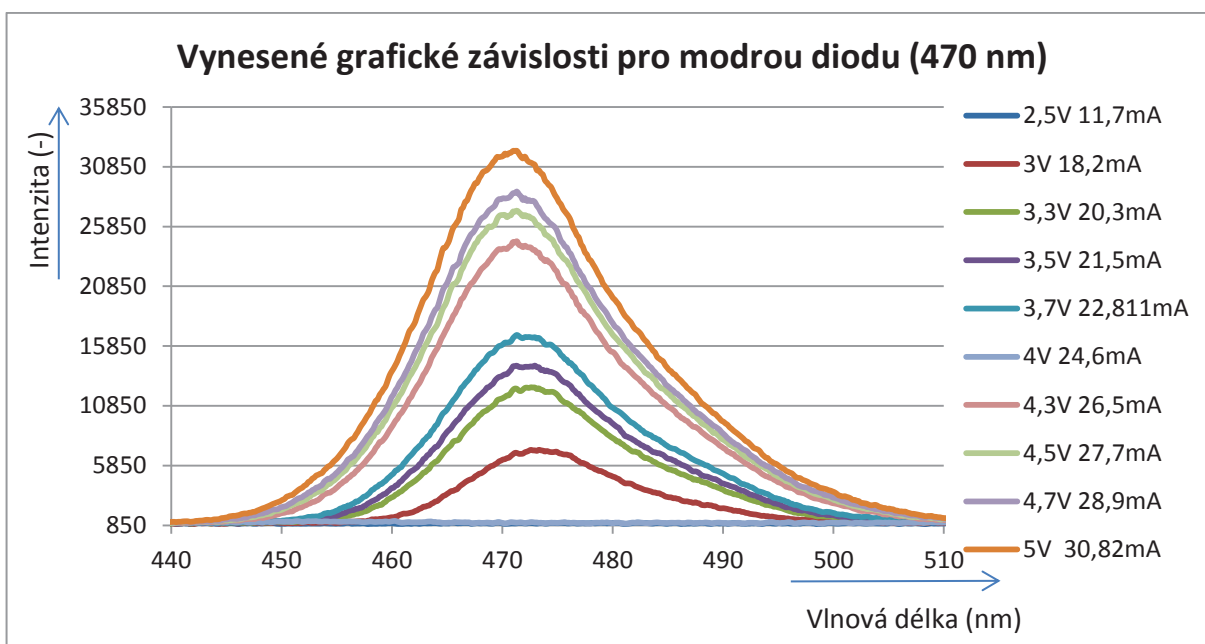
Měřené pořadí	Dominantní barva	Vlnová délka (nm)
1	UV	413
2	modrá	470
3	modrozelená	510
4	červenooranžová	590
5	žlutá	595
6	oranžová	610
7	červená	660
8	IR850	850
9	IR950	950
10	bílá	550-610

Tabulka 5 Přehled proměřovaných diod

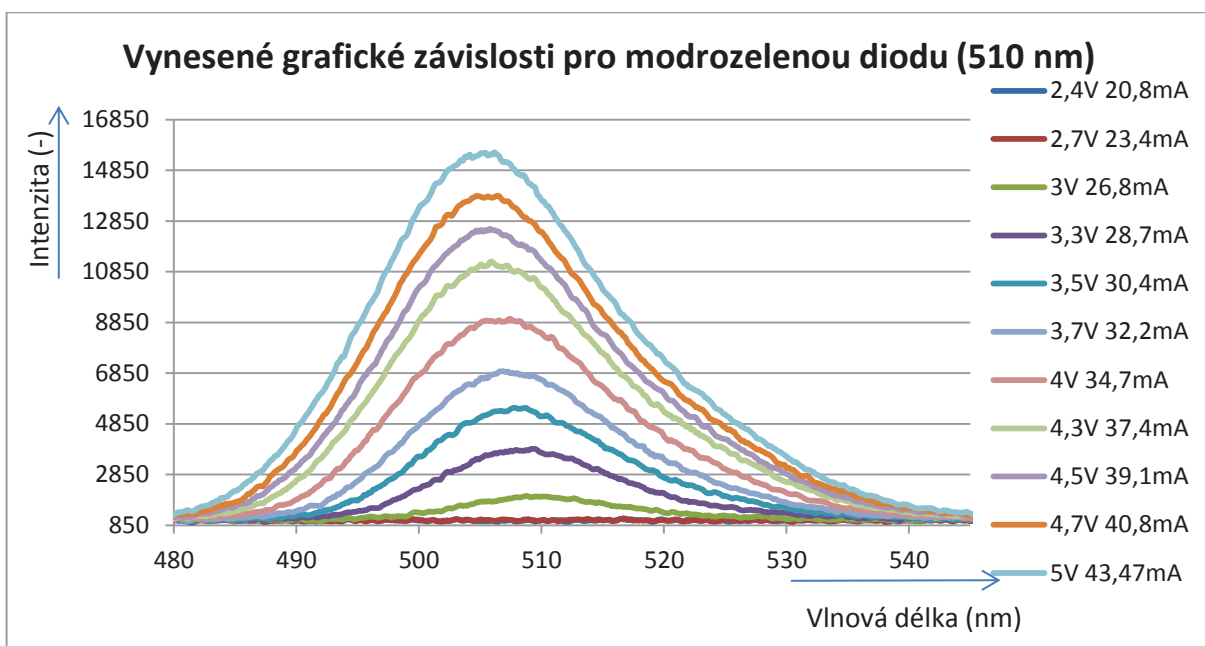
Jednotlivé naměřené vlnové délky jsou uvedeny v obrázcích č. 22 - 33.



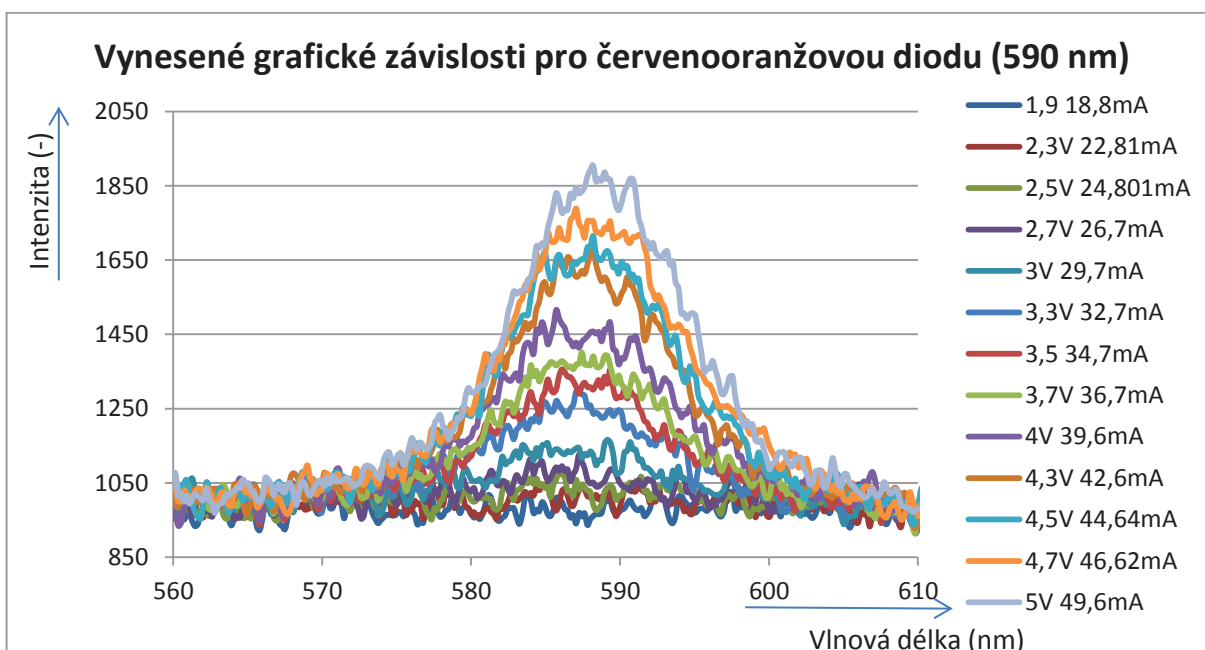
Obrázek 22 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro ultrafialovou diodu s dominantní vlnovou délkou 413 nm



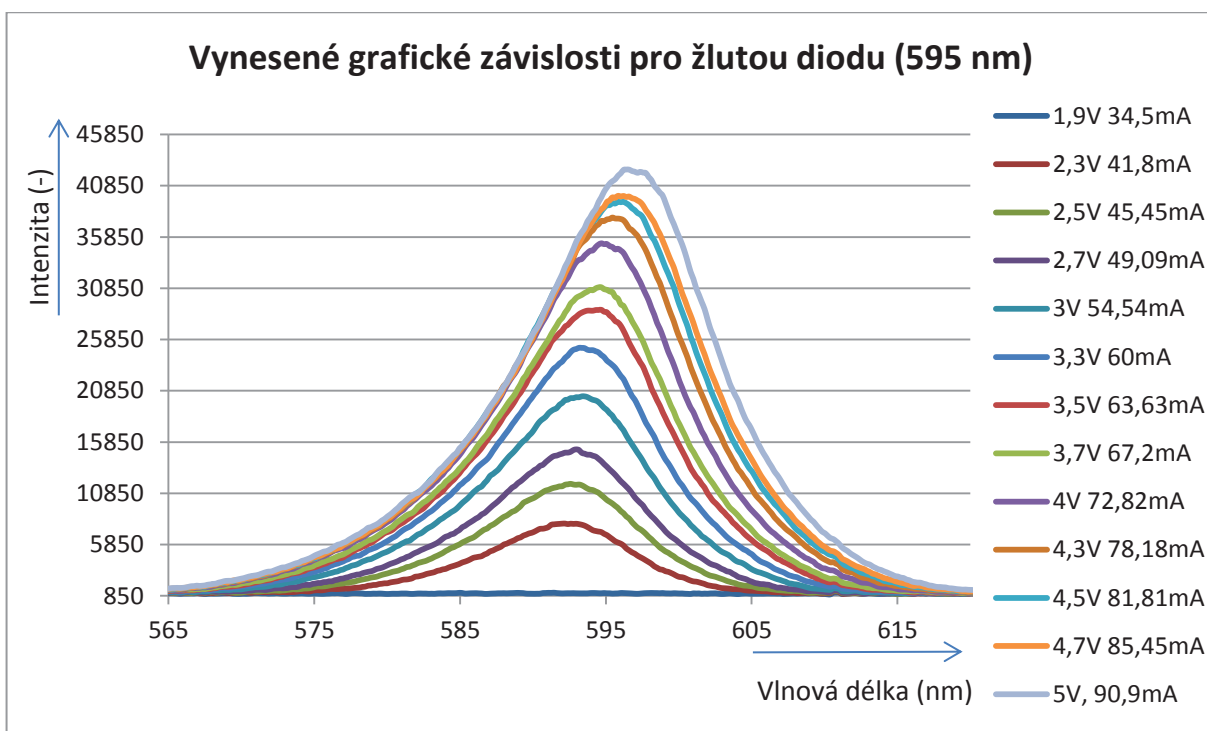
Obrázek 23 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro modrou diodu s dominantní vlnovou délkou 470 nm



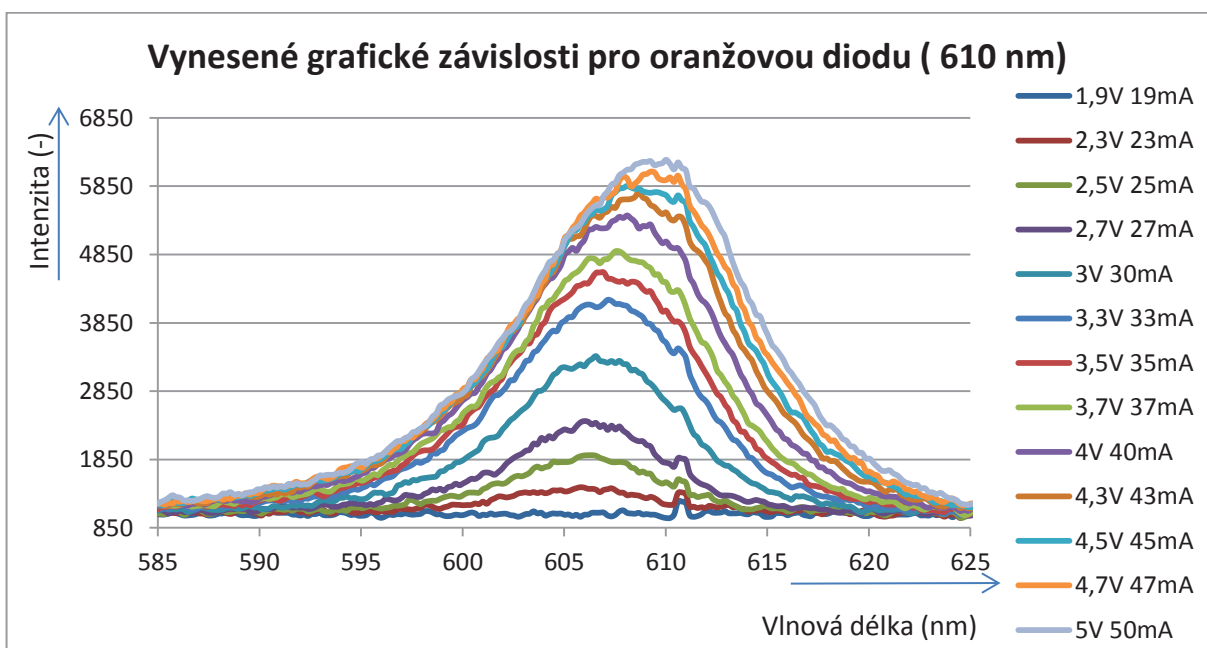
Obrázek 24 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro modrozelenou diodu s dominantní vlnovou délkou 510 nm



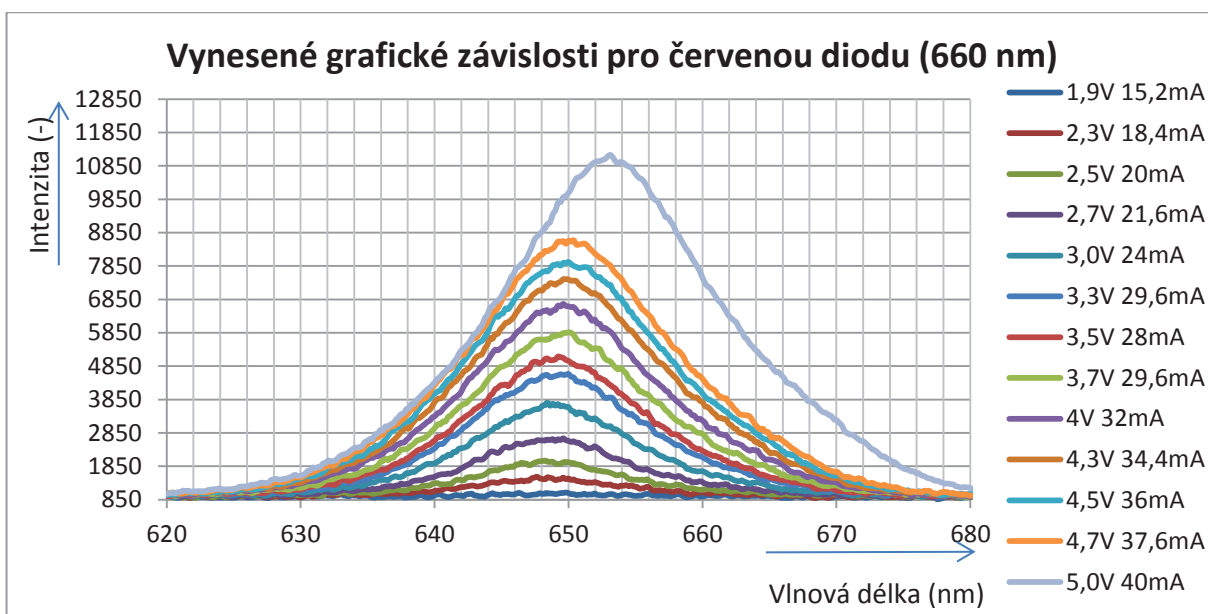
Obrázek 25 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro červenooranžovou diodu s dominantní vlnovou délkou 590 nm



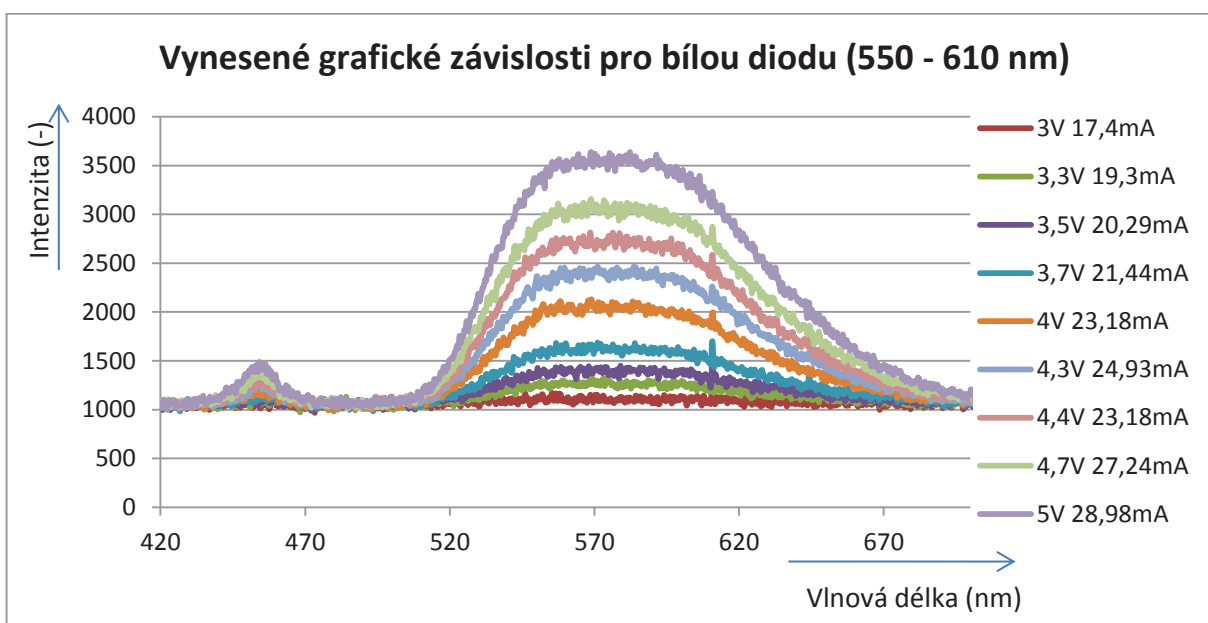
Obrázek 26 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro žlutou diodu s dominantní vlnovou délkou 595 nm



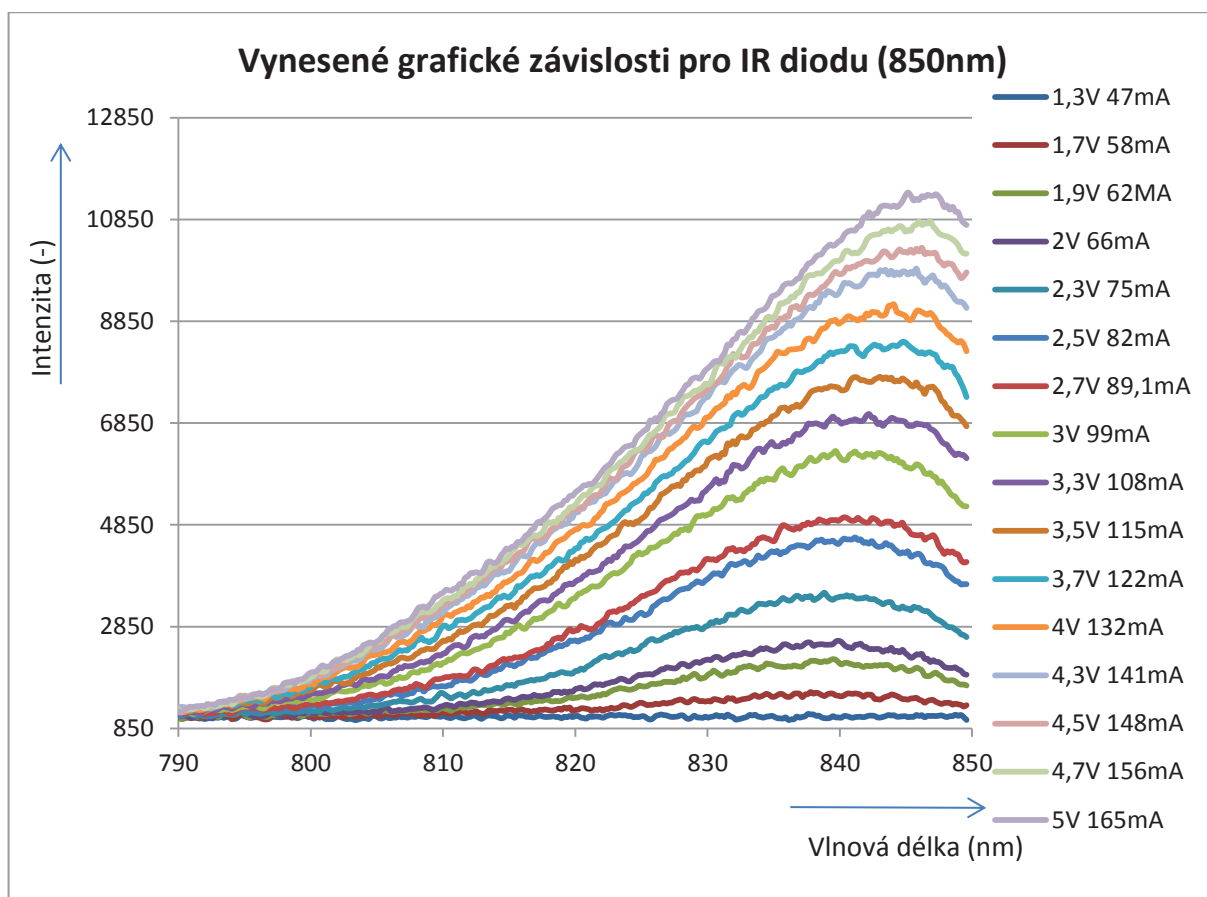
Obrázek 27 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro oranžovou diodu s dominantní vlnovou délkou 610 nm



Obrázek 28 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro červenou diodu s dominantní vlnovou délkou 660 nm



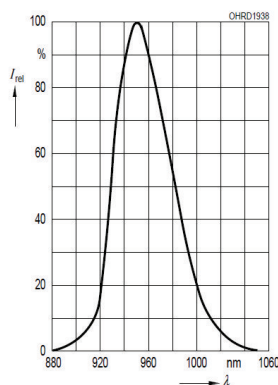
Obrázek 29 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro bílou diodu s dominantní vlnovou délkou 550 - 610 nm



Obrázek 30 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro infračervenou diodu s dominantní vlnovou délkou 850 nm

Z naměřených hodnot jednotlivých LED diod byly sestaveny grafické závislosti vlnové délky na intenzitě. Hlavním kritériem pro výběr LED diod pro solární simulátor byla dostatečná intenzita a vhodná vlnová délka změřená pomocí spektrometru VS 140.

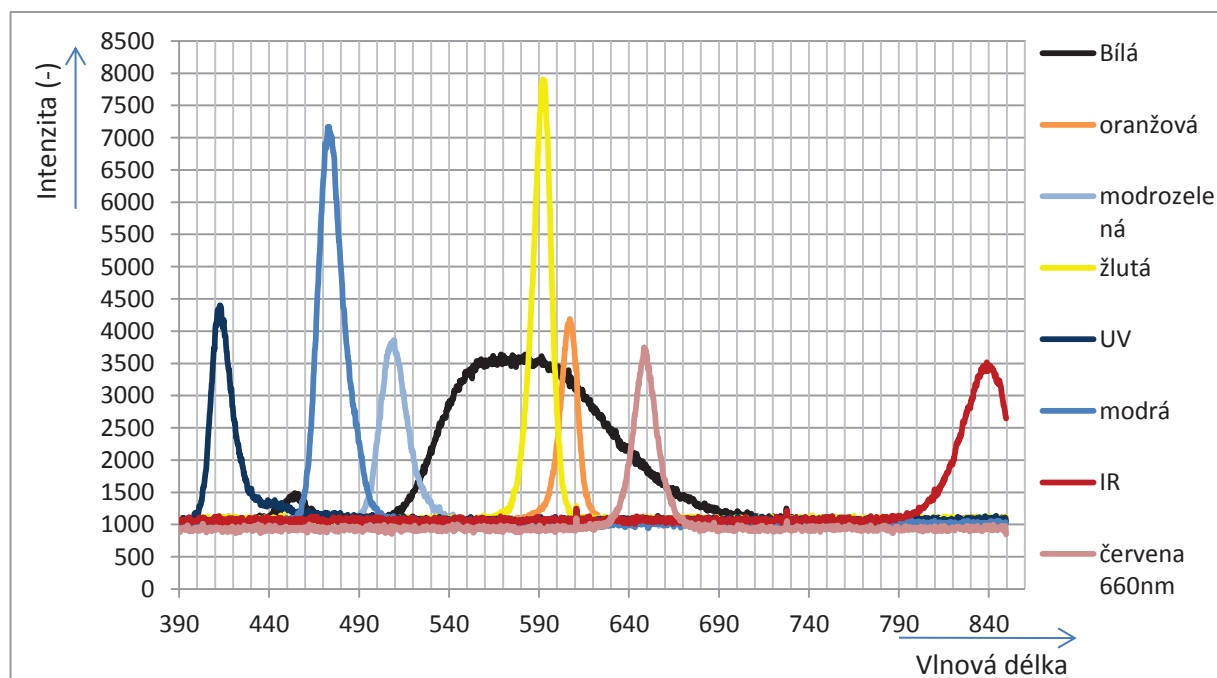
Spektrometrem VS 140 bohužel nebylo možné proměřit charakteristiku infračervené diody s vlnovou délkou 950nm. Tato vlnová délka byla mimo měřicí rozsah, a proto je přiložen výřez její charakteristiky z katalogového listu.



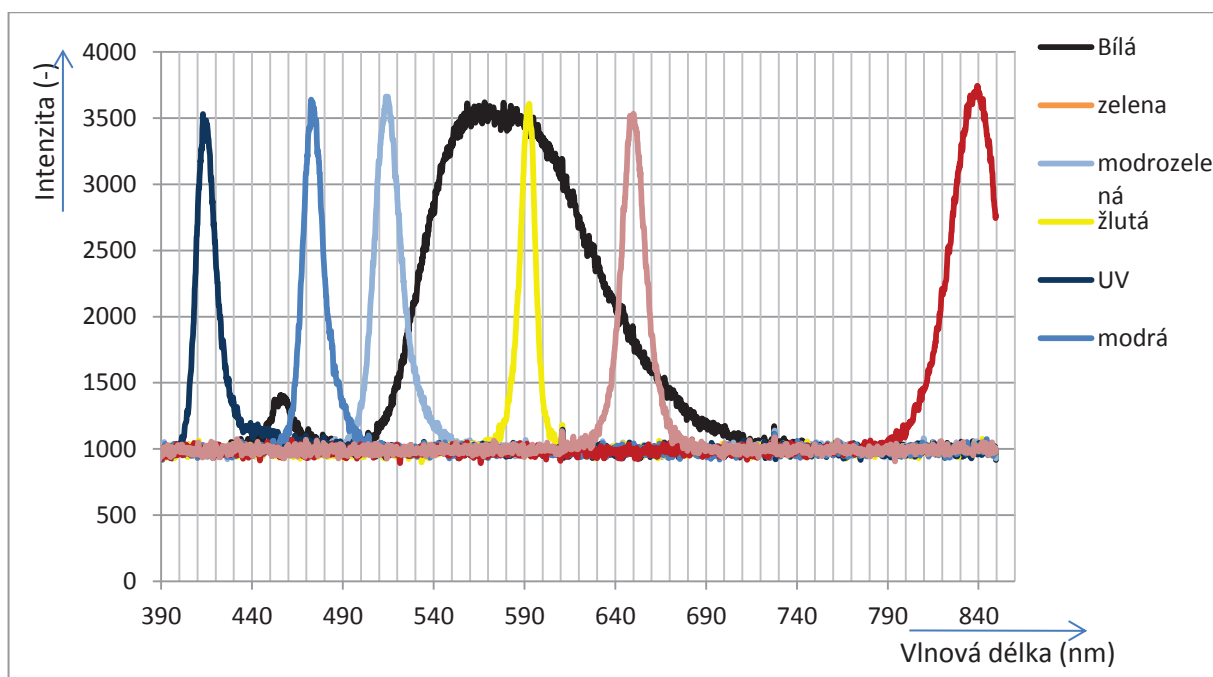
Obrázek 31 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro infračervenou diodu s dominantní vlnovou délkou 950 nm

Pro sestavení celkového spektra byly vybrány charakteristiky s intenzitou blíží se hodnotě 3500. Na této hladině byla sestavena grafická závislost (obrázek č. 27) se změřenými vlnovými délkami. Po tomto měření byla upravena intenzita měřených LED diod na stejnou hladinu intenzity, tato závislost je uvedena v obrázku č. 28.

Při hledání součástek pro návrh solárního simulátoru se nepodařilo nalézt LED diodu s vlnovou délkou pro pokrytí mezery ve spektru od 690 do 820 nm. Tuto část spektra se v rámci experimentu nepodařilo pokrýt a nebylo tedy možné toto spektrum nijak porovnávat.



Obrázek 32 Grafická závislost vybraných diod určených pro solární simulátor



Obrázek 33 Grafická závislost vybraných diod s intenzitou 3500

Návrh a konstrukce solárního simulátoru

Návrhu solárního simulátoru složeného LED diod předcházel výběr jednotlivých komponent. Tyto komponenty byly vybírány na základě dostupných informací a hlavním kritériem výběru byla dominantní vlnová délka s intenzitou vyzářeného světla.

Konstrukce slunečního simulátoru v rámci experimentu byla provedena v omezené velikosti, a to z důvodu jeho velké finanční nákladnosti. Bylo tedy upuštěno od velkého simulátoru s rozměry 10 x 10 cm a byl zvolen menší simulátor s velikostí 3 x 4 cm. Tato plocha je složena ze 48 vysoce svítivých LED diod s obsahem 8 různých vlnových délek (barev).

Použité barvy a jejich vlnové délky pro konstrukci solárního simulátoru

Použité LED diody byly vybrány na základě provedeného měření pomocí spektrometru VS 140 a vyhodnoceny pomocí grafických závislostí uvedených na obrázcích č. 22 - 33. Tabulka č. 6 ukazuje barevné rozmístění použitých diod. Je tedy patrné, že se jedná o pravidelné rozmístění a jde tedy o 6 modulů. Každý modul je sestaven z 8 LED diod. Jednotlivé druhy diod jsou paralelně pospojovány a jejich napájení je zajišťováno pomocí výstupních svorkovnic.

UV	modrá	modro zelená	bílá	UV	modrá	modro zelená	bílá
žlutá	červen á	IR 850	IR950	žlutá	červen á	IR 850	IR950
UV	modrá	modro zelená	bílá	UV	modrá	modro zelená	bílá
žlutá	červen á	IR 850	IR950	žlutá	červen á	IR 850	IR950
UV	modrá	modro zelená	bílá	UV	modrá	modro zelená	bílá
žlutá	červen á	IR 850	IR950	žlutá	červen á	IR 850	IR950

Tabulka 6 Grafické rozložení použitých barev pro solární simulátor

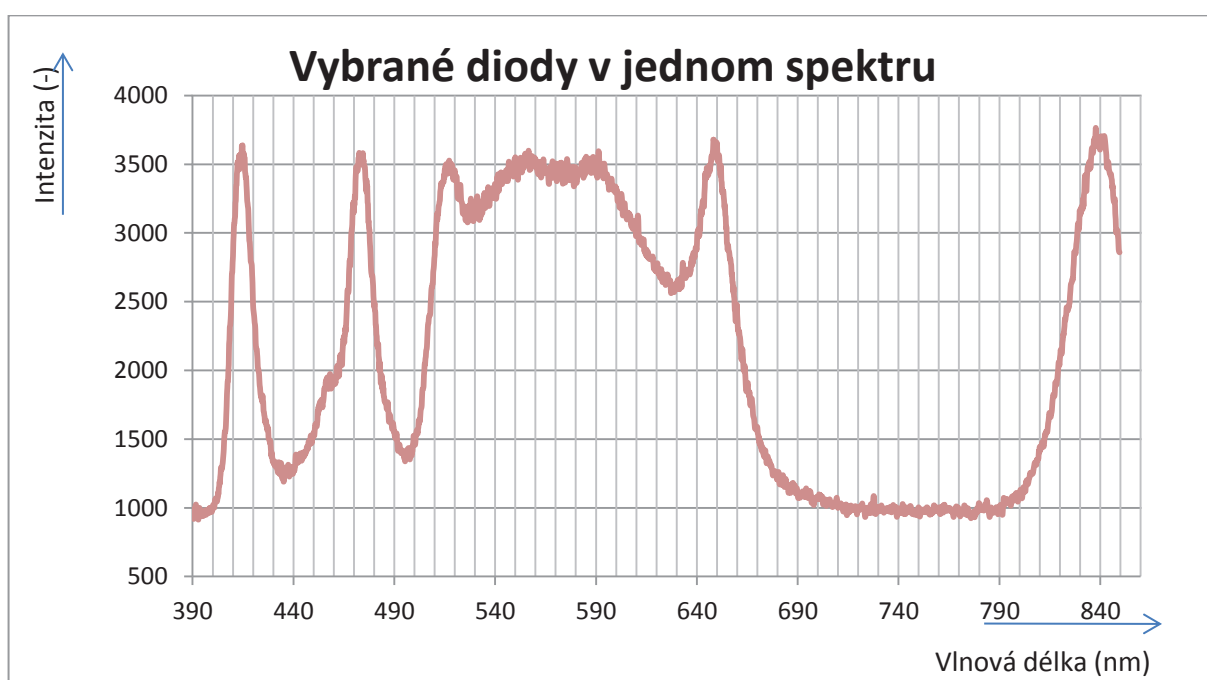
Na obrázcích 34 a 35 je pohled na navrhnutý simulátor. Jeho konstrukce je složená z nastavitelných odporů, patič pro diody a LED diody.



Obrázek 34 pohled na přední stranu navrhnutého slunečního simulátoru



Obrázek 35 boční pohled na navrhnutý sluneční simulátor

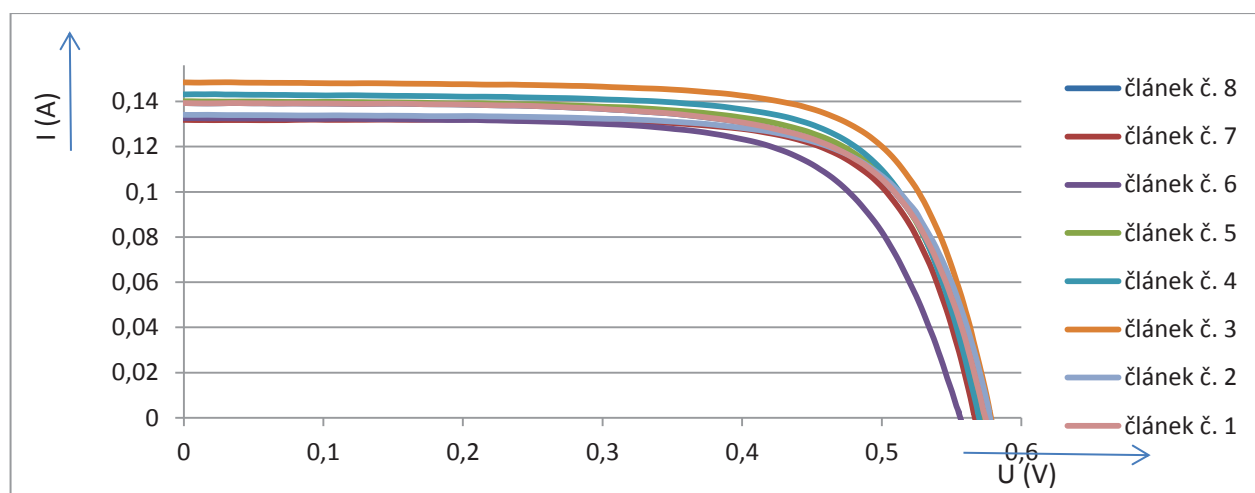


Obrázek 36 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro vybrané diody pro solární simulátor

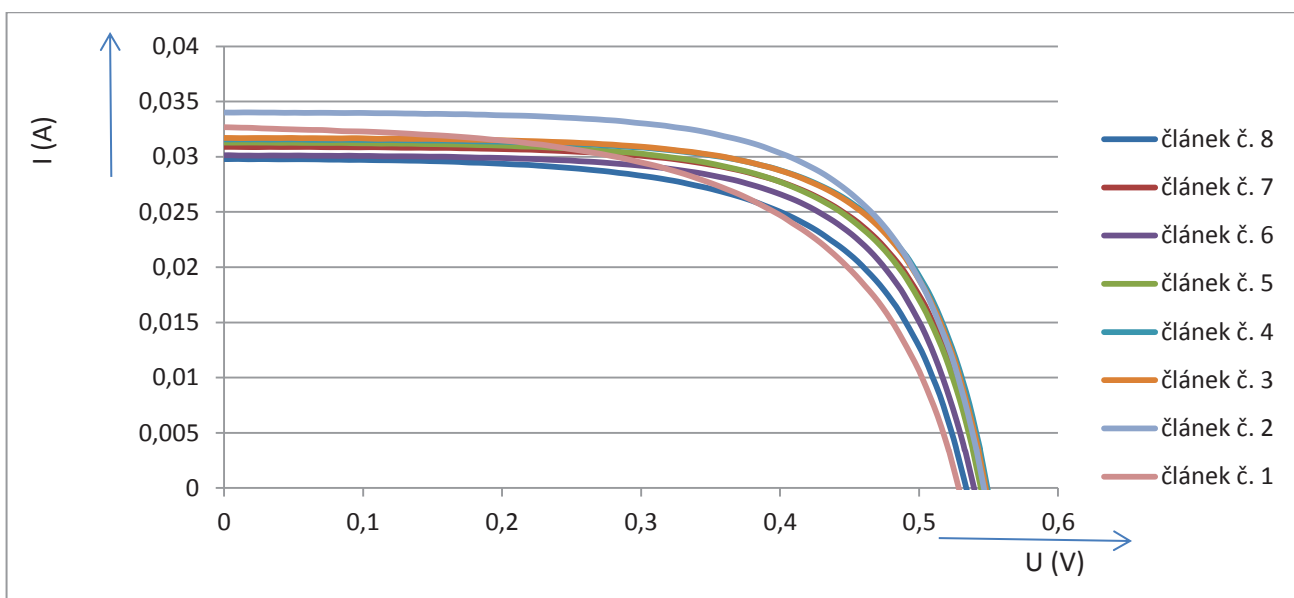
Svítlidlo	Vlnová délka	400-900 nm	400-500 nm	500-600 nm	600-700 nm	700-800 nm	800-900 nm
navrhnutý solární simulátor s maximální intenzitou	Vypočítaná plocha	41199,94	9609,62	9363,45	9281,29	8872,06	4073,52
	Procentuální podíl (%)		23,32	22,73	22,53	21,53	9,89
	Hodnocení dle normy IEC 60904-9		B	A	A	C	B
navrhnutý solární simulátor s maximální intenzitou 3500 (-)	Vypočítaná plocha	11312,85	3024,21	3072,06	2526,10	1368,84	1321,63
	Procentuální podíl (%)		26,73	27,16	22,33	12,10	11,68
	Hodnocení dle normy IEC 60904-9		C	B	A	B	B

Tabulka 7 vypočítaná plocha a porovnání s procentuálním rozložením pro dvě intenzity

Výsledné spektrum simulátoru pro obě dvě spektra odpovídá třídě simulátoru C. Jelikož nebyl dostupný filtr pro rozptyl světelného záření, nebylo tedy možné určit nerovnoměrnost osvitu ani časovou nestabilitu. Byla tedy určena pouze třída pro spektrum.



Obrázek 37 VA charakteristika s použitým LED diodovým slunečním simulátorem



Obrázek 38 VA charakteristika s použitým halogenidovým slunečním simulátorem

Výsledkem měření jsou sestavené Volt – Ampérové charakteristiky naměřených závislostí. Při porovnání obou charakteristik je patrné, že sestavený simulátor nemá tak vysoký výkon jako v případě halogenidového slunečního simulátoru.

Přístroje použité pro měření:

- Spektrometr VS140 ID VS140-UVVIS-CCD/0500044-1908 (SAP: 00000316259-0000)
- Světlovod pro spektrometr
- Multimetr digitální HC-UT70A (SAP: 001000186901-0000)
- Napájecí zdroj DIAMETRAL P130R51D (SAP: 001000166893-0000)
- Kontaktní pole
- PC s Windows XP, s programem HJYLyneerApp
- Dioda – žlutá (GME: 518-103) 595nm
- Dioda – modrozelená (GME 511-803) 510nm
- Dioda – bílá (GME: 511-871) 550-610nm
- Dioda – oranžová (GME 511-364) 610nm
- Dioda – UV (GME: 511-877) 413nm
- Dioda – infračervená (GME: 511-902) 850nm
- Dioda – infračervená (GME 520-048) 950nm
- Dioda – červenooranžová (GME: 511-368) 590nm
- Dioda – modrá (GME: 518-033) 470nm
- Dioda – červená (GME: 511-737) 660nm
- Trimry
- Pracoviště pro měření VA charakteristiky Solarlab IV tracer

Závěr

V práci jsou představeny základní pojmy týkající se slunečního záření a jeho možného využití u slunečních zdrojů energie. Je zde také zdůrazněno využití přímé a difúzní složky slunečního záření.

Další část práce je zaměřena na získání základních znalostí o solárních simulátorech v rámci normy IEC 60904 a IEC 60904-9. Tyto získané poznatky jsou využity pro měření simulátorů slunečního záření a jejich vyhodnocení pro odpovídající třídu záření.

Poslední část práce je věnována konstrukci slunečního simulátoru z vysoce svítivých LED diod. Tento výrobek byl zařazen do třídy C stanovující složení spektra. Toto zařazení je pouze orientační, jelikož použitým spektrometrem nebylo možné proměřit celé definované spektrum dle IEC 60904-9. Použitý spektrometr nedosahoval potřebného měřicího rozsahu. Jiný spektrometr bohužel nebylo možné použít.

Použitá literatura

- [1] THEMESSL, Armin a Werner WEISS. GRADA PUBLISHING. SOLÁRNÍ SYSTÉMY: NÁVRHY A STAVBA SVÉPOMOCÍ. První vydání. Praha: GRADA Publishing, 2005.
- [2] Free energy: Předpoklady pro využívání sluneční energie. Free energy: Předpoklady pro využívání sluneční energie [online]. 2005. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://free-energy.xf.cz/ekologie/solar-sys/1-2.htm>
- [3] MICRONIX. MICRONIX. Micronix: Solární systémy [online]. 2012. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.micronix.cz/solarix/zakladni-informace/solarni-panely>
- [4] ISOFENENERGY: Dodavatel fotovoltaických systémů. ISOFENENERGY: Dodavatel fotovoltaických systémů [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.isofenenergy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [5] Ulbrichová: Skripta. EKOL. SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ: lesnictví [online]. 2010. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://fle.czu.cz/~ulbrichova/Skripta_EKOL/lesazareni/slunecnizareni.htm
- [6] AE energie: Solární zařízení. AE ENERGIE. SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ: lesnictví [online]. 2010. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.ae-energie.cz/index.php/solarni-zarizeni.html>
- [7] Kapitola III: Fotovoltaika v dopravě (ČÁST 1): PROJEKTY. INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ. [online]. 2010. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://projekt150.ha-vel.cz/node/136>
- [8] SOLARION: Solar solution. SOLARION. Solární panely a fólie [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.solarion.cz/solarni-panely-a-folie.htm>
- [9] KALAS, L. Simulátor slunečního záření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 45 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [10] ČSN EN 60904-1. Fotovoltaické součástky: Část 1: Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik. Červen 2007.
- [11] ČSN EN 60904-2. Fotovoltaické součástky: Část 9: Požadavky na výkon solárního simulátoru. Červen 2008.

- [12] Zdroje světla: Světlo. ČEZ, a.s. Skupina ČEZ [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k21.htm>
- [13] Svetila: informace o svítidlech. SVETILA. [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.svetila.com/en/light-bulbs-lamps-66/fluorescent-lamps-99/t5-lumilux-fh-fq-113/t5-ho-fq-54w-840-fdh-g5-1142.html>
- [14] Zarivky: Svítidla. ZARIVKY.CZ. Svítidla [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://zarivky.cz/zbozi/produkt-703/philips-philips-spotone-30w-e14-230v-r39-reflektor.html>

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 Ukázka mapy s vyznačenou intenzitou záření pro jednotlivé oblasti. [2].....	7
Obrázek 2 Ukázka spekter AM [3]	8
Obrázek 3 Střední hodnoty energie globálního záření na území ČR (kWh/m ²) [4].....	9
Obrázek 4 Sluneční kolektorový systém pro ohřev vody	11
Obrázek 5 Ukázka postupu při výrobě solárních panelů [7]	12
Obrázek 6 Schéma napájecího systému GRID ON [9].....	13
Obrázek 7 Schéma izolovaného systému GRID OFF [9].....	13
Obrázek 8 Schéma hybridního solárního systému [9].....	14
Obrázek 9 Monokrystalický fotovoltaický panel [8].....	15
Obrázek 10 Amorfní fotovoltaický panel [8]	15
Obrázek 11 Ukázka použití solární fólie s amorfními články. [8].....	16
Obrázek 12 Polykrystalický fotovoltaický panel [8]	16
Obrázek 13 Trubicový solární systém [8].....	17
Obrázek 14 Zjednodušené schéma tepelné solární elektrárny [9]	19
Obrázek 15 Nákres žlabového sběrače pro solární tepelné elektrárny[9]	20
Obrázek 16 Ilustrace diskového sběrače[9]	20
Obrázek 17 Ilustrativní zobrazení systému s heliostaty[9].....	21
Obrázek 18 Teplota chromatičnosti[9]	29
Obrázek 19 Výbojka Philips MHN - TD[9]	30
Obrázek 20 Halogenová výbojka Philips MasterColor CDM-TD [9].....	31
Obrázek 21 Grafické závislosti měřených solárních simulátorů	33
Obrázek 22 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro ultrafialovou diodu s dominantní vlnovou délkou 413 nm	37
Obrázek 23 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro modrou diodu s dominantní vlnovou délkou 470 nm	37
Obrázek 24 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro modrozelenou diodu s dominantní vlnovou délkou 510 nm	38
Obrázek 25 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro červenooranžovou diodu s dominantní vlnovou délkou 590 nm	38
Obrázek 26 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro žlutou diodu s dominantní vlnovou délkou 595 nm	39
Obrázek 27 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro oranžovou diodu s dominantní vlnovou délkou 610 nm	39

Obrázek 28 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro červenou diodu s dominantní vlnovou délkou 660 nm	40
Obrázek 29 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro bílou diodu s dominantní vlnovou délkou 550 - 610 nm	40
Obrázek 30 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro infračervenou diodu s dominantní vlnovou délkou 850 nm	41
Obrázek 31 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro infračervenou diodu s dominantní vlnovou délkou 950 nm	42
Obrázek 32 Grafická závislost vybraných diod určených pro solární simulátor	42
Obrázek 33 Grafická závislost vybraných diod s intenzitou 3500	43
Obrázek 34 pohled na přední stranu navrhnutého slunečního simulátoru	44
Obrázek 35 boční pohled na navrhnutý sluneční simulátor	45
Obrázek 36 Grafická závislost vlnové délky na intenzitě pro vybrané diody pro solární simulátor	45
Obrázek 37 VA charakteristika s použitým LED diodovým slunečním simulátorem	46
Obrázek 38 VA charakteristika s použitým halogenidovým slunečním simulátorem	47
Tabulka 1 Rozpis vlnových délek viditelného spektra vnímaného lidským okem	10
Tabulka 2 Rozsah vlnových délek a jejich podíl na celkovém spektru dle IEC 60904-9 [11]	26
Tabulka 3 Tabulka parametrů pro určení tříd solárních simulátorů [11]	27
Tabulka 4 Vyhodnocení parametrů podle normy IEC 60904-9	35
Tabulka 5 Přehled proměřovaných diod	36
Tabulka 6 Grafické rozložení použitých barev pro solární simulátor	44
Tabulka 7 vypočítaná plocha a porovnání s procentuálním rozložením pro dvě intenzity	46

Seznam příloh

z důvodu velkého objemu dat jsou přílohy uloženy na CD, které je součástí této diplomové práce. CD obsahuje následující přílohy:

- datasheety k součástkám.rar
- manuál k spektrometru VS140.rar
- měření neděle final.rar
- měření ostatních zdrojů světla.rar
- měření VA charakteristiky Solarlab IV tracer.rar
- naměřené původní hodnoty.rar
- software k spektrometru VS140.rar