

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

Ústav letadlové techniky

Simulátor slunečního záření

**Jiří Teichman
2017**

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Čenský, Ph.D.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se v první části zabývá radiometrií a slunečním zářením v atmosféře. Je zde vysvětlen vliv atmosféry a pozice Slunce na intenzitu a spektrum záření dopadající na povrch Země a dále je proveden rozbor slunečního záření v různých nadmořských výškách. Druhá část práce se pak věnuje návrhu a konstrukci simulátoru slunečního záření pomocí LED a experimentálnímu ověření jeho funkčnosti.

Abstract

This bachelor thesis is in its first part about radiometry and solar radiation in atmosphere. Influence of atmosphere and Sun position on solar radiation intensity are described in this part as well as analysis of solar radiation in different altitudes. The second part is about design and construction of LED based solar simulator and experimental validation of its design.

Klíčová slova

simulátor slunečního záření, solární simulátor, LED, radiometrie, spektrometrie, sluneční záření v atmosféře, vzduchová masa

Keywords

solar radiation simulator, solar simulator, LED, radiometry, spectrometry, solar radiation in atmosphere, air mass

Citace

TEICHMAN, J. *Simulátor slunečního záření*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tomáš Čenský, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Čenského, Ph.D.

Poděkování

Děkuji Ing. Tomáši Čenskému, Ph.D. za vedení bakalářské práce, za jeho ochotu vždy pomoci a za poskytnuté odborné rady. Dále děkuji Ing. Šárce Němcové, Ph.D. za čas věnovaný konzultacím o radiometrii, za zapůjčení měřiče optického výkonu a za umožnění vstupu do Laboratoře optiky Ústavu přístrojové a řídicí techniky. Mé díky patří také RNDr. Zdeňku Kohoutovi, Ph.D. za zprovoznění a zapůjčení spektrometru a za umožnění měření v laboratoři Ústavu fyziky. V neposlední řadě pak děkuji Ing. Karlu Barákovi za umožnění vzniku tohoto projektu.

Obsah

1	Úvod	4
2	Radiometrie a radiometrické veličiny	5
3	Sluneční záření v atmosféře	5
3.1	Přímé, difúzní a globální záření	5
3.2	Vzduchová masa a koeficient vzduchové masy.....	6
3.3	Závislost slunečního záření na nadmořské výšce	7
4	Požadavky na výkon solárního simulátoru	11
4.1	Základní definice a pojmy	11
4.2	Výkonové a spektrální požadavky.....	12
4.3	Klasifikace solárních simulátorů.....	14
5	Návrh solárního simulátoru	15
5.1	Výběr LED.....	15
5.2	Určení počtu, rozmístění a vzdálenosti LED od testovací roviny.....	16
5.3	Návrh zdroje a chlazení	22
6	Výsledky	23
6.1	Zahřívací čas.....	23
6.2	Závislost výkonu LED na střídě PWM	24
6.3	Spektra jednotlivých LED	25
6.4	Korekce spektrální citlivosti fotodiody.....	26
6.5	Optimální vzdálenost testovací roviny	27
6.6	Neuniformita záření a spektrální shoda	28
6.7	Časová nestabilita.....	34
6.8	Klasifikace solárního simulátoru.....	34
7	Závěr	35

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	plocha	(m^2)
a	diagonální rozměr homogenně ozářené oblasti	(cm)
C	korekční konstanta fotodiody	(1)
C_φ	podíl zářivého toku vyzařovaného do úhlu poloviční divergence	(1)
h	nadmořská výška	(km)
I	elektrický proud	(A)
I_0	intenzita záření dopadající na povrch Země	$(W \cdot m^{-2})$
I_e	intenzita záření	$(W \cdot m^{-2})$
L	délka přímé optické cesty skrz atmosféru Země	(m)
l	vzdálenost roviny diod od testovací roviny	(cm)
L_0	vzdálenosti povrchu Země od vnějšího okraje atmosféry	(m)
M	molární hmotnost	$(kg \cdot mol^{-1})$
n	počet LED	(1)
R_E	poloměr Země	(km)
Q_e	zářivá energie	(J)
t	čas	(s)
U	elektrické napětí	(V)
x	horizontální (vertikální) vzdálenost jednotlivých diod	(cm)
y_{atm}	efektivní výška atmosféry	(km)
z	zenitový úhel	$(^\circ)$
η	účinnost přeměny elektrického příkonu na optický výkon	(1)
λ	vlnová délka	(nm)
Φ_e	zářivý tok	(W)
φ	úhel poloviční divergence	$(^\circ)$
AM	koeficient vzduchové masy	
ASTM	American Society for Testing and Materials	
LED	elektroluminiscenční dioda (Light-Emitting Diode)	
MPP	maximální výkonový bod solárního článku	
PWM	pulzně-šířková modulace (Pulse-Width Modulation)	

1 Úvod

Simulátor slunečního záření (solární simulátor) je zařízení schopné napodobit přirozené sluneční záření v laboratorních podmínkách. Tato zařízení se používají pro testování různých materiálů a přístrojů, ale nejčastěji pro zjišťování výkonů solárních článků.

V současnosti se pro solární simulátory používá celá řada zdrojů záření, nejčastěji různé žárovky a výbojky, které dosahují dobré shody se slunečním zářením, ale mají řadu nevýhod. Jsou to především nízká účinnost, zahřívání, nízká životnost, časová nestabilita, obtížná regulace a vysoká cena. S vývojem v oblasti LED a zvyšováním jejich výkonů se v poslední době začíná experimentovat s těmito diodami jako se zdroji záření. LED však mají relativně úzký rozsah vyzařovaných vlnových délek a také nižší výkon. Avšak diody s různou vyzařovanou vlnovou délkou lze uspořádat do polí a vytvořit tak zdroj záření s potřebným spektrálním rozsahem a výkonem.

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí solárního simulátoru určeného pro testování solárních článků realizovaného pomocí vysoce výkonných LED.

2 Radiometrie a radiometrické veličiny

Pro popis solárního simulátoru a jeho výkonu byly v této práci použity radiometrické veličiny.

Radiometrie je část optiky, která zkoumá elektromagnetické záření a zabývá se určováním jeho energetických a výkonových vlastností. Na rozdíl od fotometrie, která studuje pouze záření viditelné, se radiometrie zabývá zářením jako energií.

Radiometrickou veličinou charakterizující energii elektromagnetického záření je zářivá energie Q_e . Je to množství energie, které do svého okolí vyzařuje zdroj záření, její jednotkou je Joule (J).

Výkon přenášený zářením je zářivý tok Φ_e (1). Ten je určen zářivou energií procházející sledovanou plochou za čas, jeho jednotkou je Watt (W).

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (1)$$

Plošná hustota zářivého toku se nazývá intenzita záření I_e (2), je definována jako zářivý tok prostupující elementární plochou a její jednotkou je Watt na metr čtvereční ($W \cdot m^{-2}$).

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (2)$$

Tab. 1 — Přehled některých radiometrických veličin.

veličina	symbol	jednotka
zářivá energie	Q_e	J
zářivý tok	Φ_e	W
intenzita záření	I_e	$W \cdot m^{-2}$

3 Sluneční záření v atmosféře

Sluneční záření je elektromagnetické záření vydávané Sluncem, skládá se z ultrafialové, viditelné a infračervené složky. Spektrum slunečního záření se velmi podobá záření absolutně černého tělesa o teplotě 5 800 K.

3.1 Přímé, difúzní a globální záření

Globální (celkové) záření, které dopadá na horizontální povrch (rovnoběžný s povrchem Země) je tvořeno dvěma složkami – zářením přímým a difúzním. Přímé sluneční záření tvoří většinu energie globálního záření dopadajícího na povrch Země [1]. Záření difúzní vzniká rozptylem přímého slunečního záření atmosférickými částicemi. Na rovině nakloněné vůči zemskému povrchu se pak projevuje ještě záření odražené od země. Globální záření je tedy obecně tvořeno třemi složkami (3). [2]

$$I_e \text{ globální} = I_e \text{ přímé} + I_e \text{ difúzní} + I_e \text{ odražené} \quad (3)$$

3.2 Vzduchová masa a koeficient vzduchové masy

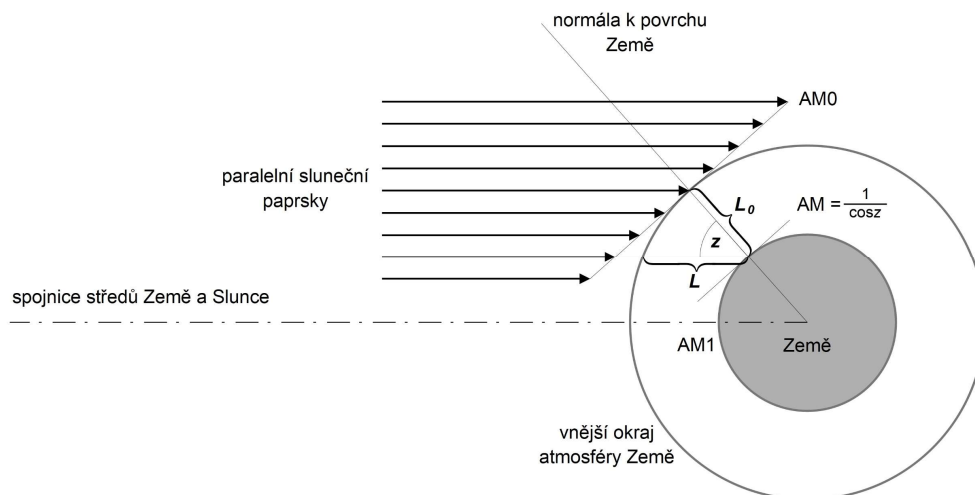
Jak záření prochází atmosférou, jsou některé vlnové délky tlumeny rozptylem a absorpcí. Pro popis slunečního záření po průchodu atmosférou byl zaveden pojem vzduchová masa. Se zvětšující se vzdáleností, kterou musí sluneční záření v atmosféře urazit, roste vzduchová masa a tedy i tlumení. To je důvod, proč se Slunce jeví méně jasné blízko horizontu než vysoko na obloze. Vzduchová masa je také ovlivněna nadmořskou výškou. Nejvyšší intenzita slunečního záření je na vnějším okraji atmosféry, kde záření není tlumeno vůbec. Se snižující se nadmořskou výškou pak roste vzduchová masa a tedy i tlumení slunečního záření.

3.2.1 Koeficient vzduchové masy

Koeficient vzduchové masy (relativní vzduchová masa) AM charakterizuje spektrum a intenzitu slunečního záření po průchodu atmosférou a je definován jako poměr délky přímé optické cesty skrz atmosféru Země L a vertikální vzdálenosti (ve směru zenitu) od povrchu Země k vnějšímu okraji atmosféry L_0 , což je při zanedbání zakřivení Země rovno převrácené hodnotě kosinu zenitového úhlu z (4).

$$AM = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos z} \quad (4)$$

Koeficient vzduchové masy závisí na výšce Slunce a mění se tedy s denní dobou, ročním obdobím a zeměpisnou šířkou. Čím větší je zenitový úhel, tím větší je AM . Záření mimo atmosféru Země je označováno jako AM_0 . Definice koeficientu vzduchové masy je znázorněna na Obr. 1.



Obr. 1 — Koeficient vzduchové masy pro zenitový úhel 0° , pro obecný zenitový úhel z a pro sluneční záření mimo atmosféru.

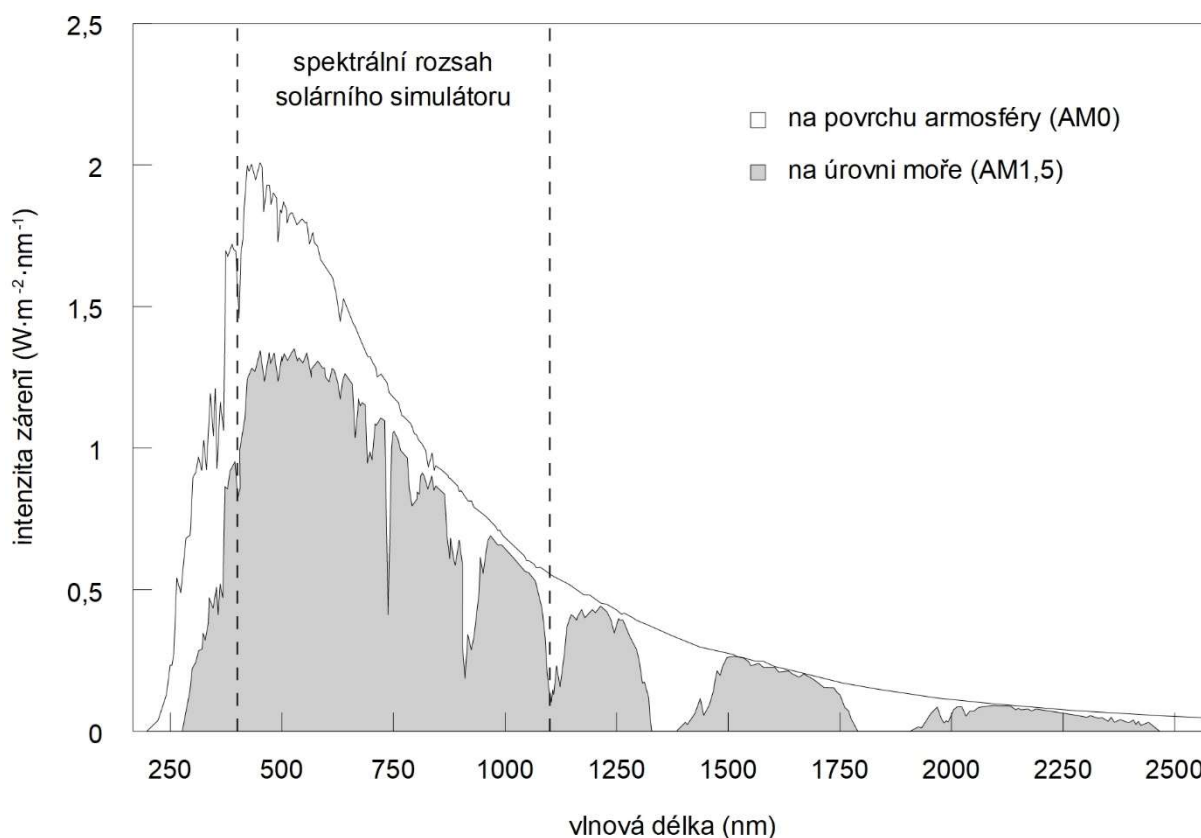
Intenzitu záření lze na základě znalosti koeficientu vzduchové masy určit dle vztahu (5).

$$I_e = 1,1 \cdot I_0 \cdot 0,7^{AM^{0,678}} \quad (5)$$

Kde $I_0 = 1\,353 \text{ W} \cdot \text{m}^2$ je intenzita záření dopadající na povrch atmosféry a AM je koeficient vzduchové masy ze vztahu (4) [3].

3.2.2 Spektrum AM1,5

Pro účely testování solárních systémů bylo organizací American Society for Testing and Materials (ASTM) stanoveno referenční spektrum slunečního záření AM1,5 [1], které je zobrazeno na Obr. 2.



Obr. 2 — Referenční spektrum globálního slunečního záření ASTM G-173-03 [1]. Na obrázku je spektrum slunečního záření dopadajícího na povrch atmosféry Země a na povrch Země v úrovni moře. Při průchodu atmosférou jsou některé vlnové délky pohlcovány atmosférickými plyny.

Hodnota AM1,5 odpovídá zenitovému úhlu $48,2^\circ$. Tato hodnota byla zvolena pro standardizační účely a je založena na intenzitě záření ve Spojených Státech [1].

3.3 Závislost slunečního záření na nadmořské výšce

Jelikož je solární simulátor prezentovaný v této práci určen pro testování solárních článků umístěných na letadlech, bylo třeba určit spektrum a intenzitu záření v různých nadmořských výškách, pro možnost přenastavení simulátoru na jiné podmínky.

První možností, jak zjistit vlastnosti slunečního záření v různých nadmořských výškách, je použít empirický vztah pro výpočet intenzity záření v dané nadmořské výšce (6):

$$I_e(h) = 1,353 \cdot [(1 - 0,14h) \cdot 0,7^{AM^{0,678}} + 0,14h] \quad (6)$$

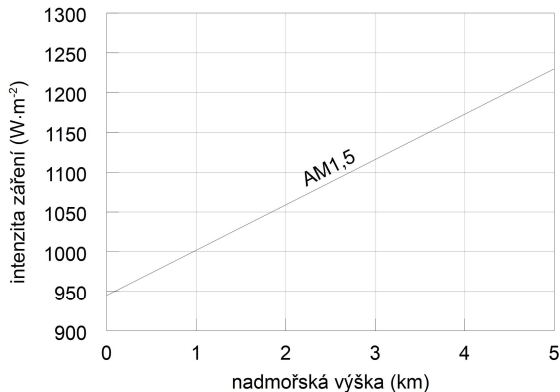
kde I_e je intenzita záření v dané výšce v $kW \cdot m^{-2}$, h je nadmořská výška v kilometrech a AM je koeficient vzduchové masy na úrovni moře podle vztahu (4).

Druhou možností, jak aproximovat sluneční spektrum a intenzitu záření v různých nadmořských výškách, je změnit koeficient vzduchové masy. Ačkoliv je tento koeficient funkcí pouze zenitového úhlu a je tedy nezávislý na nadmořské výšce, lze určit ekvivalentní koeficient pro určitou nadmořskou výšku pomocí empirického vztahu (7):

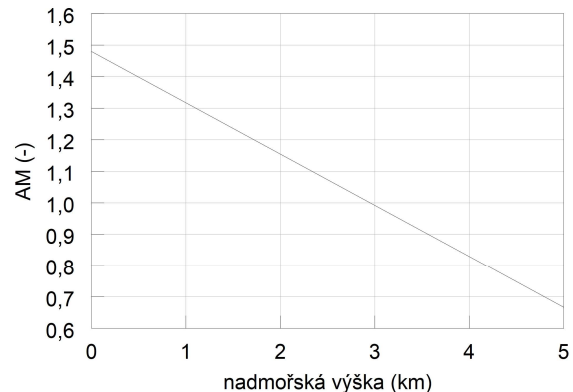
$$AM = \sqrt{(r+c)^2 \cos^2 z + (2r+1+c)(1-c)} - (r+c) \cos z \quad (7)$$

kde $r = R_E/y_{atm}$, $c = h/y_{atm}$, h je nadmořská výška v kilometrech, $R_E = 6\,371\text{ km}$ je poloměr Země a $y_{atm} \approx 9\text{ km}$ je efektivní výška atmosféry. Vztahy (6) a (7) platí pouze pro několik kilometrů nad mořem (podle vztahu (6) je intenzita záření pro AM0 dosažena už při 6 km n. m. a podle vztahu (7) je AM0 dosaženo v 9 km n. m.). [4]

Na Obr. 3 je graf závislosti intenzity záření na nadmořské výšce podle vztahu (6) pro AM1,5. Intenzita záření $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, na kterou je dimenzován solární simulátor je překonána přibližně v jednom kilometru nad mořem. Nicméně, solární panely vykazují téměř lineární závislost výstupního výkonu na intenzitě dopadajícího záření [5, 6], a proto lze výkon solárního článku změřeného při známé intenzitě záření pouze vynásobit poměrem mezi očekávanou intenzitou záření v dané nadmořské výšce a intenzitou vyzařování solárního simulátoru. Tento výpočet lze provést při zanedbání změny spektra a změny napětí na maximálním výkonovém bodě¹. Závislost koeficientu AM na nadmořské výšce podle vztahu (7) je na Obr. 4. Hodnoty AM lze pak přepočítat na intenzitu záření podle vztahu (5).



Obr. 3 — Závislost intenzity záření na nadmořské výšce podle vztahu (6) pro AM1,5.

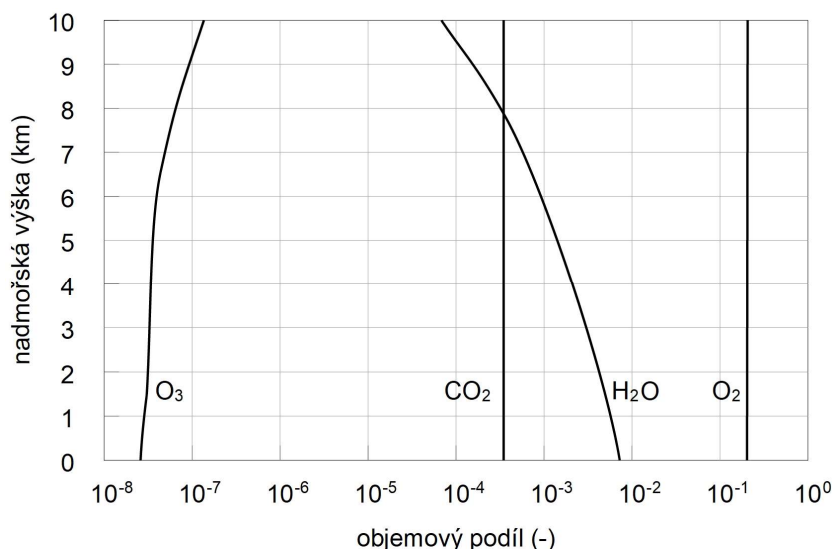


Obr. 4 — Závislost koeficientu vzduchové masy AM na nadmořské výšce podle vztahu (7).

Pro přesnější určení výkonu solárního článku v různých nadmořských výškách je kromě znalosti intenzity záření v této výšce třeba znát i spektrum záření, které je ovlivněno koncentrací různých složek v atmosféře. Spektrální oblast, ve které jsou solární články citlivé, a pro kterou je navrhován solární simulátor (400–1 100 nm) je nejvíce ovlivněna kyslíkem, ozonem a vodní párou.

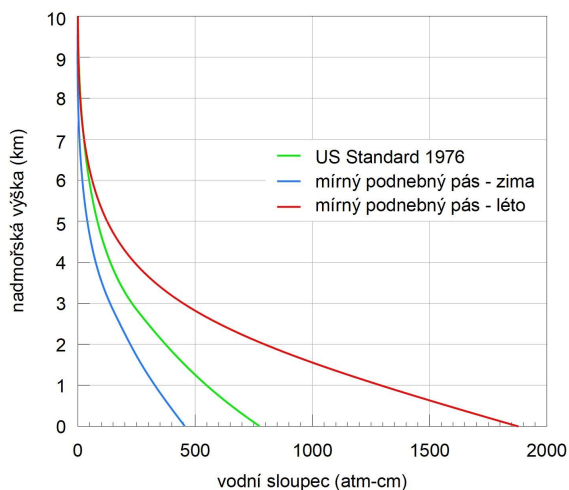
¹ Maximální výkon solárního článku je dán součinem napětí a proudu na maximálním výkonovém bodě (MPP). Tento proud je přímo úměrný intenzitě záření a není tedy třeba znát jeho charakteristiku. Maximální napětí se sice se zvyšující se intenzitou zvyšuje lineárně, ale ne přímo úměrně [6]. Pro přesnější určení maximálního výkonu je tedy třeba znát maximální napětí při minimálně dvou hodnotách intenzity záření. Z těchto hodnot lze sestavit charakteristiku napětí na maximálním výkonovém bodě, a tedy spočítat maximální výkon pro libovolnou intenzitu záření.

Zatímco obsah kyslíku se s nadmořskou výškou nemění, závislost obsahu ozonu a vodní páry je výškově značně proměnná. Obsahy vybraných složek atmosféry jsou na Obr. 5.

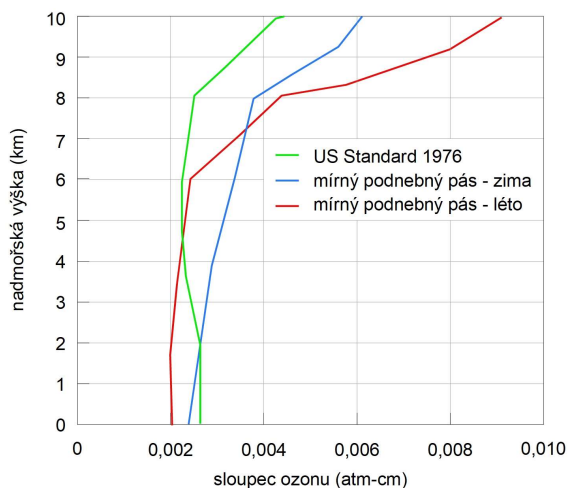


Obr. 5 — Závislost objemového podílu vybraných složek atmosféry na nadmořské výšce [7]. Zobrazené složky mohou ovlivňovat Sluncem vyzařované spektrum v rozsahu, ve kterém je solární článek citlivý. Znatelný je především pokles objemového podílu molekul vody, které absorbují infračervené záření.

Pro účely této práce byl proveden výškový rozbor atmosféry z hlediska intenzity záření v jednotlivých vlnových délkách pomocí softwaru *MODTRAN* (*MODerate resolution atmospheric TRANsmission*) do nadmořské výšky 10 km. Do této nadmořské výšky dochází k největším změnám v koncentraci molekul vody a ozonu [7]. Zatímco obsah vodní páry s nadmořskou výškou klesá a v 10 km n. m. je skoro nulový, obsah ozonu je do přibližně 8 km n. m. konstantní a poté se začne prudce zvyšovat, až dosáhne svého maxima v ozonové vrstvě ve výšce 20–30 km n. m. Modely *MODTRANu* pro obsah vodní páry a ozonu v atmosféře do 10 km n. m. jsou na Obr. 6, respektive Obr. 7.



Obr. 6 — Množství vody v atmosféře vyjádřené jako vodní sloupec² v závislosti na nadmořské výšce.



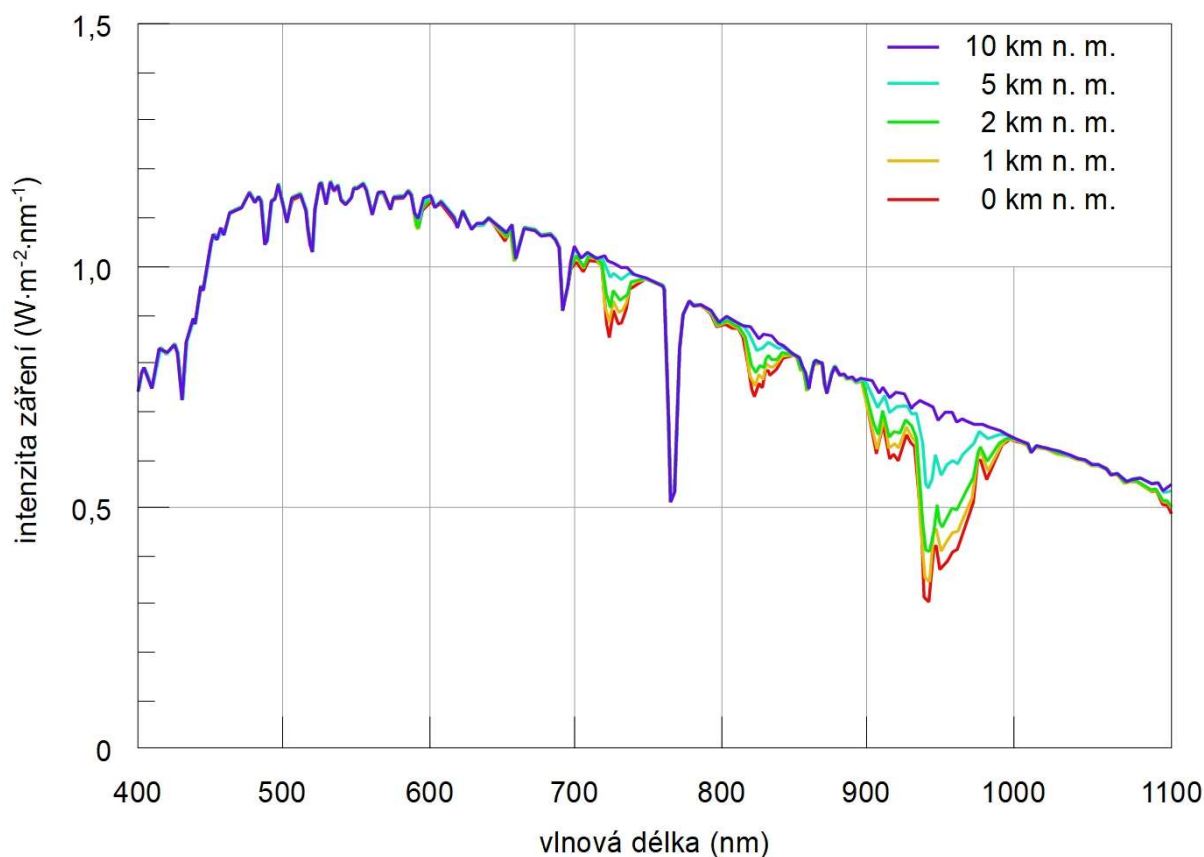
Obr. 7 — Množství ozonu v atmosféře vyjádřené jako sloupec ozonu v závislosti na nadmořské výšce.

Jelikož je koncentrace ozonu v ozonové vrstvě mnohem větší³ než ve výšce do 10 km n. m, je většina energie absorpčního spektra ozonu v dolních 10 km atmosféry již pohlcena. To znamená, že molekuly ozonu ve výšce do 10 km n. m. ovlivní spektrum už jenom minimálně. Navíc, ozon pohlcuje především záření o vlnových délkách kratších než 400 nm, na které nejsou solární články citlivé [5].

Spektra přímého slunečního záření pro nadmořské výšky 0, 1, 2, 5 a 10 km jsou na Obr. 8.

² Při standardní teplotě a tlaku (273,15 K, 10^5 Pa) platí pro nekondenzující plyny (vodní pára je v tomto případě považována za nekondenzující plyn) $1 \text{ atm-cm} = M/22,4 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, kde M je molární hmotnost. Pro M gramů plynu pak platí $1 \text{ atm-cm} = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ molekul} \cdot \text{cm}^{-2}$. Pro vodu tedy platí $1 \text{ atm-cm} = 8,04 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ a pro ozon $1 \text{ atm-cm} = 21,43 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$. [8]

³ Podle modelu koncentrace ozonu softwaru *MODTRAN* v rozmezí 0–42 km n. m. se v dolních 10 km atmosféry nachází pouze 5 % obsahu ozonu.



Obr. 8 — Model spektra přímého slunečního záření vygenerovaný softwarem *MODTRAN* pro různé nadmořské výšky.⁴ V intervalu vlnových délek 900–1 000 nm je vidět znatelný nárůst intenzity záření s rostoucí nadmořskou výškou. To je způsobeno snižující se koncentrací molekul vody v atmosféře se zvyšující se nadmořskou výškou.

Integrací spekter z Obr. 8 byl dále zjištěn procentuální nárůst intenzit záření se zvyšující se nadmořskou výškou. Nárůst intenzity přímého slunečního záření oproti intenzitě záření na povrchu Země je 0,43 % pro 1 km n. m., 1,26 % pro 2 km n. m., 2,71 % pro 5 km n. m. a 3,75 % pro 10 km n. m.

4 Požadavky na výkon solárního simulátoru

4.1 Základní definice a pojmy

4.1.1 Solární simulátor

Solární simulátor je zařízení určené pro simulování sluneční intenzity záření a slunečního spektra. Solární simulátor může být použit pro dva rozdílné účely:

- a) Měření voltampérové charakteristiky solárních systémů

⁴ Nastavení programu *MODTRAN*: model atmosféry US Standard 1976, vodní sloupec 1 762, 1 259, 819, 237, 0 atm-cm (podle nadmořské výšky), sloupec ozonu 0,3436, 0,3441, 0,3429, 0,3388, 0,3267 atm-cm (podle nadmořské výšky), CO₂ 400 ppmv, CO 0,15 ppmv, CH₄ 1,8 ppmv, aerosol model *Rural*, viditelnost 23 km.

- b) Měření vystavení slunečnímu záření

Solární simulátor je obvykle tvořen třemi komponentami⁵:

- a) Zdrojem záření a napájecím zdrojem
- b) Optikou a filtry pro modifikaci výstupního záření pro dosažení požadovaných parametrů
- c) Ovládacími prvky

Solární simulátory se dále rozlišují podle jejich operačního módu během testovacího cyklu na tyto tři typy:

- a) Kontinuální
- b) Jednopulzový
- c) Vícepulzový

Na kontinuálním simulátoru probíhá měření za konstantní intenzity záření, zatímco pulzní solární simulátory fungují na principu záblesků, během nichž se změní buď jeden bod voltampérové charakteristiky, nebo charakteristika celá. [9]

Tato práce se zabývá návrhem kontinuálního solárního simulátoru pro měření voltampérové charakteristiky, proto se další části této kapitoly soustředí pouze na požadavky pro tento druh solárního simulátoru.

4.1.2 Testovací rovina a oblast určená pro testování

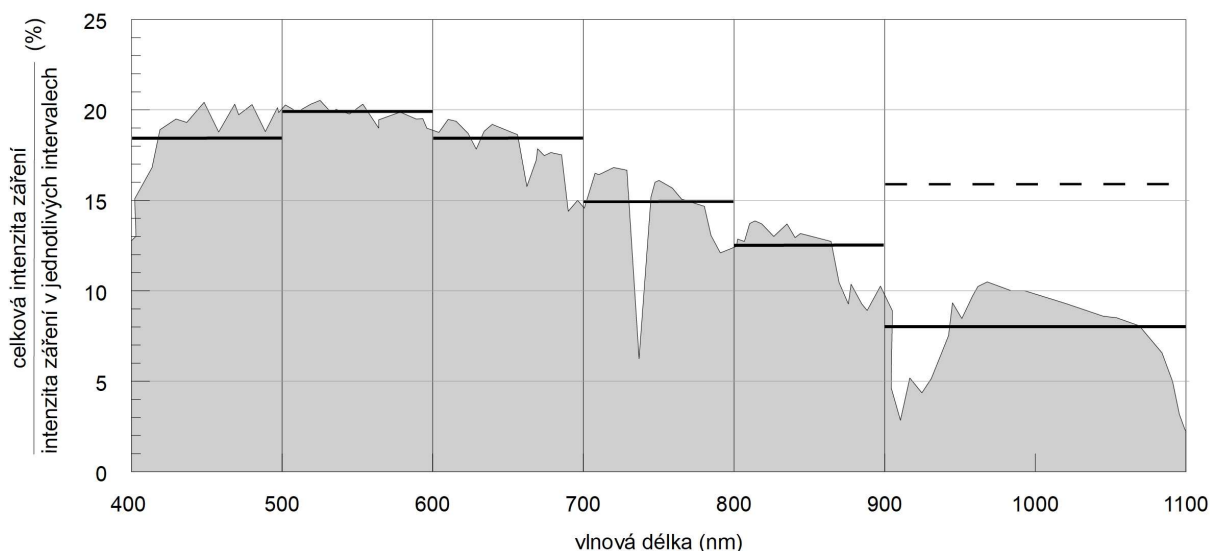
Testovací rovina je rovina určená pro umístění testovaného zařízení v definované vzdálenosti od zdroje záření, kde je dosažena požadovaná intenzita záření. Oblast určená pro testování je pak definovaná jako oblast na testovací rovině, kde je dosažena požadovaná uniformita záření. Pro tuto oblast může být specifikována její geometrie. [9]

4.2 Výkonové a spektrální požadavky

4.2.1 Spektrální rozsah a spektrální shoda

Referenční spektrální rozložení slunečního záření pro solární simulátory je globální spektrum AM1,5. Toto spektrum je však pro solární simulátory omezeno rozsahem vlnových délek 400–1100 nm, který je rozdělen na šest intervalů, ve kterých je stanovena procentuální intenzita záření z celkové intenzity záření mezi 400–1100 nm (Obr. 9).

⁵ Součástí solárního simulátoru může být i zařízení pro sběr a zpracování měřených dat. Požadavky na měření voltampérové charakteristiky nejsou v normě [1] specifikovány a nejsou předmětem této práce.



Obr. 9 — Aproximace spektra AM1,5 v rozsahu vlnových délek 400–1 100 nm pro účely standardizace solárních simulátorů. Vodorovné čáry označují hodnoty dané normou [9]. Čárkovaná čára v intervalu 900–1 100 nm označuje hodnotu podle normy, interval vlnových délek je ale dvojnásobný, takže je hodnota zobrazená v grafu poloviční.

Procentuální rozložení intenzity záření do intervalů vlnových délek je definován v Tab. 2.

Tab. 2 — Rozložení výkonu záření solárního simulátoru do intervalů vlnových délek podle normy [9].

rozsah vlnových délek (nm)	podíl k celkové intenzity záření mezi 400–1 100 nm (%)
400–500	18,4
500–600	19,9
600–700	18,4
700–800	14,9
800–900	12,5
900–1 100	15,9

Spektrální shoda solárního simulátoru je definována jako odchylka intenzity záření simulátoru od hodnot v Tab. 2, pro rozsah vlnových délek λ_1 – λ_2 a určí se podle vztahu (8).

$$\text{spektrální shoda}_{\lambda_1-\lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_e d\lambda}{\int_{400}^{1100} I_e d\lambda} \cdot 100 \% \quad (8)$$

I_e spektra λ_1 – λ_2 v % podle Tab. 2

Tímto způsobem by měl být vyhodnocen každý ze šesti intervalů vlnových délek mezi 400–1 100 nm. [9]

4.2.2 Intenzita záření

Standardní testovací podmínky požadují hodnotu intenzity záření $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ na úrovni testovací roviny. Vyšší i nižší hodnoty jsou však podle normy [9] přípustné.

Neuniformita intenzity záření závisí na konstrukci solárního simulátoru. Může být ovlivněna odrazy v testovacím prostoru nebo umístěním zdroje (zdrojů) záření. Pro určení neuniformity intenzity záření musí být oblast určená

pro testování rozdělena na minimálně 64 stejně velkých ploch. Pro solární simulátory s oblastí určenou pro testování menší než 25 600 cm² pak platí, že maximální velikost detektoru intenzity záření musí být stejná nebo menší než plocha oblasti pro testování vydělená 64. Pozice měření by měly být rozloženy stejnoměrně po celé oblasti určené pro testování. Neuniformita intenzity záření se pak vypočítá podle vztahu (9). [9]

$$\text{neuniformita} = \frac{I_{\text{emax}} - I_{\text{emin}}}{I_{\text{emax}} + I_{\text{emin}}} \cdot 100 \% \quad (9)$$

Kde I_{emax} a I_{emin} je nejvyšší, respektive nejnižší hodnota intenzity záření zjištěná v oblasti určené pro testování.

4.2.3 Časová nestabilita intenzity záření

Časová nestabilita intenzity záření se skládá z krátkodobé a dlouhodobé časové nestability. Celkem může nastat pět případů pro vyhodnocení časové nestability závislých na typu solárního simulátoru. Pro kontinuální solární simulátor bez integrovaného měření intenzity záření určený k měření voltampérové charakteristiky platí:

a) Krátkodobá časová nestabilita

Intenzita záření se měří kontinuálně po dobu nutnou k měření voltampérové charakteristiky. Zjistí se minimální a maximální hodnota intenzity záření během tohoto časového úseku.

b) Dlouhodobá časová nestabilita

Neurčuje se.

Časová nestabilita se z naměřených hodnot určí podle vztahu (10). [9]

$$\text{časová nestabilita} = \frac{I_{\text{emax}} - I_{\text{emin}}}{I_{\text{emax}} + I_{\text{emin}}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

Kde I_{emax} a I_{emin} je nejvyšší, respektive nejnižší hodnota intenzity záření zjištěná za daný časový úsek.

4.3 Klasifikace solárních simulátorů

Solární simulátory jsou klasifikovány do tří tříd (A, B a C) v každé ze tří kategorií: spektrální shoda, neuniformita intenzity záření a časová nestabilita. Solární simulátor obdrží třípísmenné hodnocení v každé z těchto tří kategorií (pro spektrální shodu se pro výsledné hodnocení bere nejhorší případ). Hodnoty odchylek v jednotlivých kategoriích pro klasifikaci jsou v Tab. 3

Tab. 3 — Definice tříd solárních simulátorů podle normy [9].

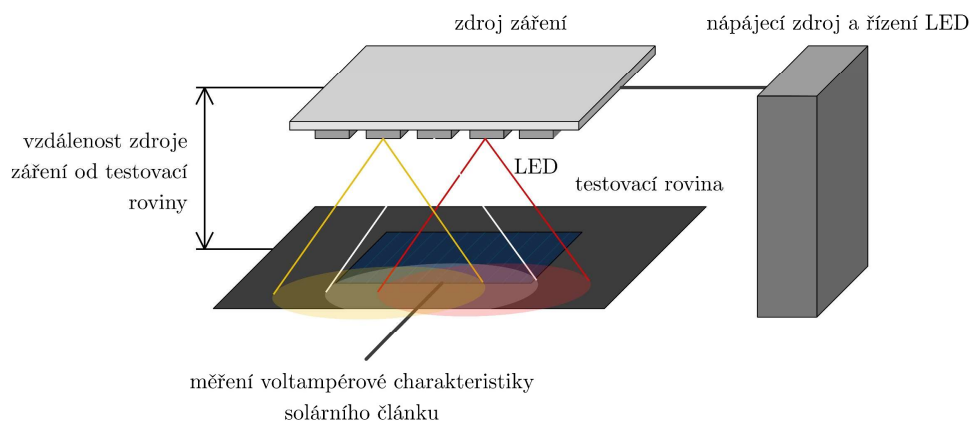
klasifikace	spektrální shoda	neuniformita	časová nestabilita	
			krátkodobá nestabilita	dlouhodobá nestabilita
A	0,75–1,25	2 %	0,5 %	2 %
B	0,6–1,4	5 %	2 %	5 %
C	0,4–2,0	10 %	10 %	10 %

5 Návrh solárního simulátoru

Jako zdroj záření pro solární simulátor byly zvoleny vysoce výkonné LED. Tyto diody jsou relativně levné a dostupné, neprodukují tolik tepla jako ostatní zdroje záření, jsou stabilnější, mají delší životnost a jejich výkon je snadno říditelný. Jelikož mají LED relativně malý rozsah vyzařovaných vlnových délek (většinou nižší než 100 nm), nelze pomocí jednoho druhu diod napodobit spektrum slunečního záření. LED jsou však dostatečně malé a různé druhy diod lze tedy uspořádat do pole a vytvořit tak plošný zdroj záření. Z jejich relativně úzkého spektra vyplývá výhoda možnosti regulace výkonu v jednotlivých částech spektra, to umožňuje nastavit simulátor na rozdílné stavy atmosféry.

Cílem tohoto experimentu je sestavit solární simulátor s minimálním počtem druhů diod a s minimálním celkovým počtem diod v poli bez použití optiky a to tak, aby vyhovoval normě [9] a dosahoval intenzity záření $1\,000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Při návrhu solárního simulátoru bylo zohledněno, že bude primárně určen pro testování solárních článků *Sunpower C60*. Proto nebyly při návrhu uvažovány vlnové délky na krajích spektra AM1,5, na které není článek citlivý. To však neporušuje požadavky na solární simulátory [9].



Obr. 10 — Schéma solárního simulátoru realizovaného pomocí LED.

5.1 Výběr LED

Výběr LED pro solární simulátor byl založen na následujících předpokladech. LED vyzařují v úzkém pásmu vlnových délek a jedním druhem diod nelze pokrýt celé spektrum požadované v normě [9]. Je tedy zapotřebí, aby v každém ze šesti intervalů vlnových délek specifikovaných v Tab. 2 vyzařovala alespoň jedna dioda. Jedinou výjimkou jsou intervaly 400–500 nm a 500–600 nm, které lze pokrýt bílou diodou. To sice znemožní nezávislou regulaci těchto dvou intervalů vlnových délek, ale na druhou stranu zjednoduší a zlevní konstrukci simulátoru. Zde byly také zohledněny výsledky práce [9]. Solární simulátor prezentovaný v této práci byl realizován pomocí 6 druhů LED uspořádaných do pole o 25 diodách. Z výsledků práce [9] je zřejmé, že diody o nejkratší vlnové délce nedosahovaly dostatečného výkonu, a proto byly v této práci nahrazeny diodami bílými.

Dalšími zvažovanými parametry byl výkon diod a jejich velikost. S rostoucím výkonem diod rostou i jejich rozměry. LED o vyšším výkonu musí být tedy umístěny ve větší vzdálenosti od sebe, čímž klesá celková intenzita záření simulátoru.

Pro solární simulátor bylo zvoleno pět typů LED. Vybrány byly diody s příkony 5–10 W všechny o stejných rozměrech 20 x 20 mm. Pro pokrytí spektra v intervalech 400–500 nm a 500–600 nm byly zvoleny diody *cool white* s příkonem 10 W, pro interval 600–700 nm byly vybrány diody *650–660 nm* s příkonem 7 W, pro 700–800 nm diody *730–740 nm* o příkonu 6 W a pro intervaly 800–900 nm a 900–1 100 nm diody *840–850 nm* a diody *940–950 nm* s příkony 5 W.

5.2 Určení počtu, rozmístění a vzdálenosti LED od testovací roviny

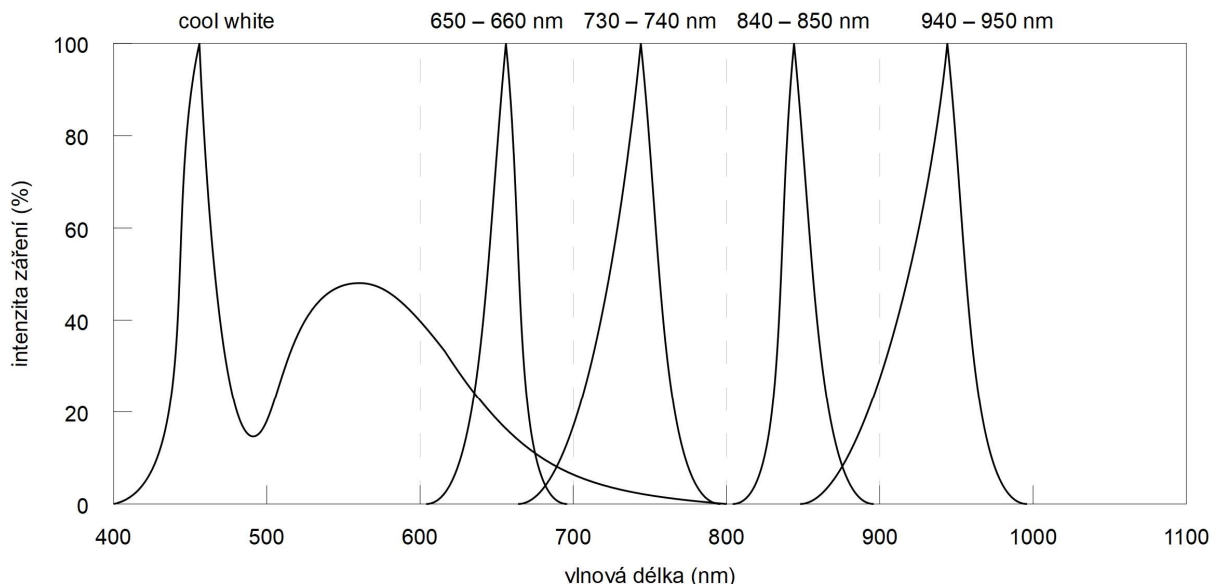
5.2.1 Určení počtu LED

Při návrhu solárního simulátoru byly

Rozložení výkonů jednotlivých LED do spektrálních intervalů určených normou [9] bylo určeno integrací vyzařovaných spekter v mezích stanovených touto normou podle vztahu (11).

$$I_{e\ LEDi\ \lambda_1-\lambda_2} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{e\ LEDi} d\lambda}{\int_{400}^{1100} I_{e\ LEDi} d\lambda} \quad (11)$$

Jelikož prodejce LED neposkytl v datových listech informace o spektru diod, byla integrace provedena podle datových listů podobných diod s čipem stejného výrobce. Předpokládaná spektra LED jsou na Obr. 11.



Obr. 11 — Předpokládaná vyzařovaná spektra použitých LED využitá pro určení celkových výkonů simulátoru v jednotlivých spektrech.

Řešením soustavy rovnic (12) byla určena požadovaná intenzita záření jednotlivých druhů diod v % (13).

$$\begin{pmatrix} 76 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22 & 100 & 5 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 95 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 90 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_{e \text{ cool white}} \\ I_{e \text{ 650-660 nm}} \\ I_{e \text{ 730-740 nm}} \\ I_{e \text{ 840-850 nm}} \\ I_{e \text{ 940-950 nm}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 38,3 \\ 18,4 \\ 14,9 \\ 12,5 \\ 15,9 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} I_{e \text{ cool white}} \\ I_{e \text{ 650-660 nm}} \\ I_{e \text{ 730-740 nm}} \\ I_{e \text{ 840-850 nm}} \\ I_{e \text{ 940-950 nm}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 50,4 \\ 6,6 \\ 14,6 \\ 10,7 \\ 17,7 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Kde v matici soustavy je procentuální rozložení výkonů LED v jednotlivých spektrech a ve vektoru pravých stran požadovaná procentuální intenzita záření v těchto spektrech.

Ze znalosti požadované intenzity záření jednotlivých LED a celkového počtu diod byl určen teoretický počet LED potřebný k dosažení dané intenzity záření. Výsledný počet LED je pak zaokrouhlení teoretického počtu LED na celé číslo. Potřebný procentuální výkon byl stanoven z výsledného počtu LED a jejich požadované intenzity záření. Jelikož byly počty diod *cool white* a *940-950 nm* zaokrouhleny dolů, jejich výsledný výkon překračoval 100 %. Proto byly všechny výkony poměrně sníženy tak, aby maximální výkon dosahoval u všech skupin LED maximálně 100 %. Návrh počtu diod shrnuje Tab. 4.

Tab. 4 — Výpočet potřebných počtů jednotlivých LED a jejich výkonů.

rozsah vlnových délek (nm)	požadovaná intenzita záření v daném rozsahu (%)	pravděpodobné rozložení výkonu LED do jednotlivých spekter (%)				
		<i>cool white</i>	<i>650-660 nm</i>	<i>730-740 nm</i>	<i>840-850 nm</i>	<i>940-950 nm</i>
400-600	38,3	76	–	–	–	–
600-700	18,4	22	100	5	–	–
700-800	14,9	2	–	95	–	–
800-900	12,5	–	–	–	100	10
900-1 100	15,9	–	–	–	–	90
požadovaná intenzita záření (%)		50,4	6,6	14,6	10,7	17,7
teoretický počet LED		12,6	1,65	3,65	2,675	4,425
výsledný počet LED		12	2	4	3	4
potřebný výkon (%)		105	82,5	91,25	89,167	110,625
skutečný výkon (%)		94,915	74,576	82,486	80,603	100

LED, vybrané pro konstrukci solárního simulátoru, jejich počty a napájecí parametry, jsou v Tab. 5.

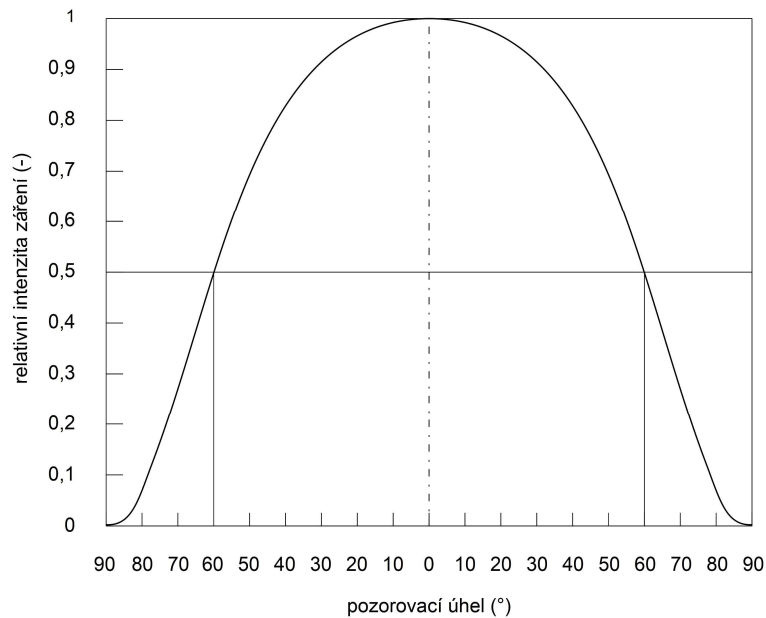
Tab. 5 — Použité LED a jejich napájecí parametry.

LED	počet	napětí (V)	proud (A)
<i>cool white</i>	12	9-11	1
<i>650-660 nm</i>	2	6-7	1
<i>730-740 nm</i>	4	4,5-6	1
<i>840-850 nm</i>	3	4-5	1
<i>940-950 nm</i>	4	4-5	1

5.2.2 Rozmístění LED a vzdálenost od testovací roviny

Rozmístění LED na chladiči a jejich vzdálenost od testovací roviny ovlivňuje dva základní parametry solárního simulátoru – velikost spektrálně homogenně ozářené oblasti a intenzitu záření v této oblasti. Se zvětšující se vzdáleností diod mezi sebou klesá obsah homogenně ozářené oblasti a intenzita záření, ale zvětšuje se celková ozářená oblast. Se zvětšující se vzdáleností diod od testovací roviny obsah homogenně ozářené oblasti naopak roste, ale klesá v ní intenzita záření.

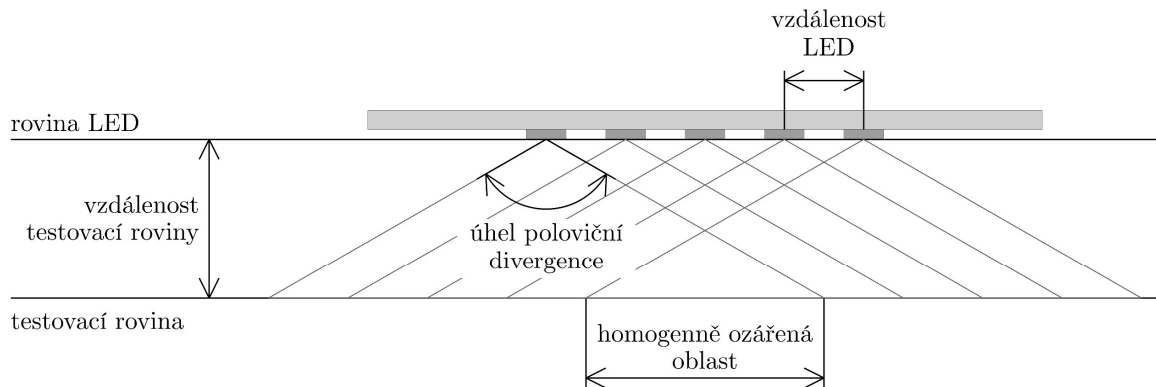
Jelikož LED vyzařují do celého poloprostoru, budou oblasti ozářené diodou nekonečně velké, proto pro zjednodušení výpočtů se bude dále uvažovat pouze zářivá energie diody přenášená v oblasti omezené úhlem poloviční divergence φ .⁶ V tomto úhlu je zářivý tok diody poloviční oproti maximálnímu zářivému toku diody. Za předpokladu úhlového rozložení zářivého toku podle Obr. 12 lze integrací křivky relativního zářivého toku a relativního zářivého toku v rozmezí úhlu poloviční divergence zjistit podíl těchto dvou zářivých toků C_φ . Zářivý tok diody v kuželu omezeném úhlem poloviční divergence pak bude celkový zářivý tok vynásobený podílem C_φ .



Obr. 12 — Relativní intenzita záření LED v závislosti na pozorovacím úhlu [11]. Graf byl upraven, aby úhel poloviční divergence byl 120° , což odpovídá použitým diodám.

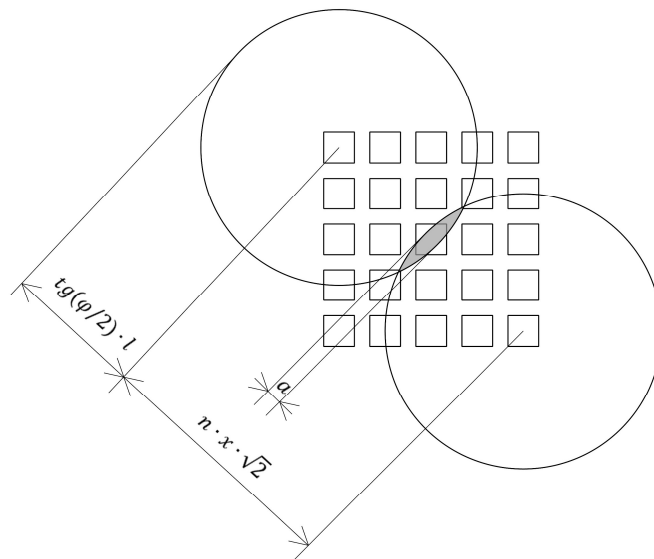
Optimální spektrum bude dosaženo tam, kde dochází k průniku kuželových oblastí s vrcholovým úhlem φ , kam se šíří většina záření, všech diod (Obr. 13).

⁶ V oblasti omezené úhlem poloviční divergence je přenášena většina energie vyzařovaná diodou.



Obr. 13 — Schéma oblastí, kam se šíří většina energie LED, tato oblast je v trojrozměrném prostoru kužel. V místě, kde dochází k průniku těchto kuželů, bude dosaženo nejvyšší intenzity záření a nejlepší spektrální homogenity.

Tuto oblast lze určit na základě úhlu poloviční divergence diod φ , vzdáleností jednotlivých LED a jejich výšky nad testovací rovinou. V této oblasti lze také očekávat nejvyšší intenzitu záření. Vztah pro výpočet oblasti s homogenním spektrem byl odvozen z předpokladu, že pokud se protnou vyzařované kužely diagonálně umístěných diod na kraji chladiče, tedy diod s největší vzdáleností, vyzařované kužely ostatních diod budou protnuté (Obr. 14).



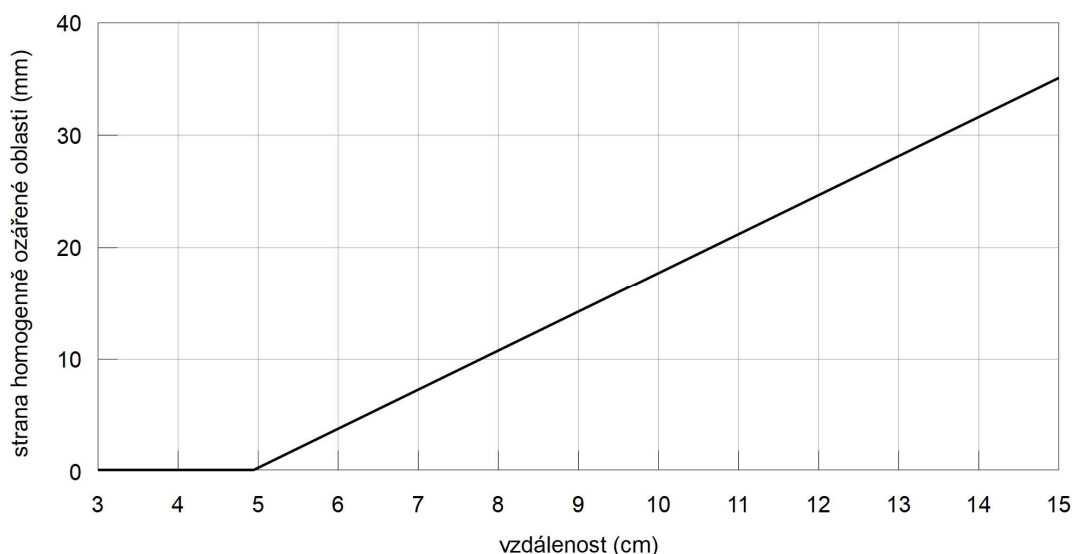
Obr. 14 — Oblasti ozařované diagonálně nejvzdálenějšími diodami.

Diagonální rozměr této oblasti je pro pravoúhlé čtvercové uspořádání diod určen vztahem (14), pokud je jeho hodnota nezáporná. Pro záporné hodnoty je velikost oblasti nulová.

$$a(l) = 2 \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) l - n \cdot x \cdot \sqrt{2} \quad (14)$$

Kde $\operatorname{tg}(\varphi/2) \cdot l$ je poloměr ozářené oblasti jedné diody ve vzdálenosti l od testovací roviny a $n \cdot x \cdot \sqrt{2}$ je diagonální vzdálenost rohových diod, kde n je počet diod v řadě (sloupci) a x je horizontální (vertikální) vzdálenost

jednotlivých diod. Závislost velikosti homogenně ozářené oblasti na vzdálenosti od testovací roviny je na Obr. 15.



Obr. 15 — Závislost velikosti homogenně ozářené oblasti na vzdálenosti diod od testovací roviny, pro 30mm vzdálenost mezi diodami.

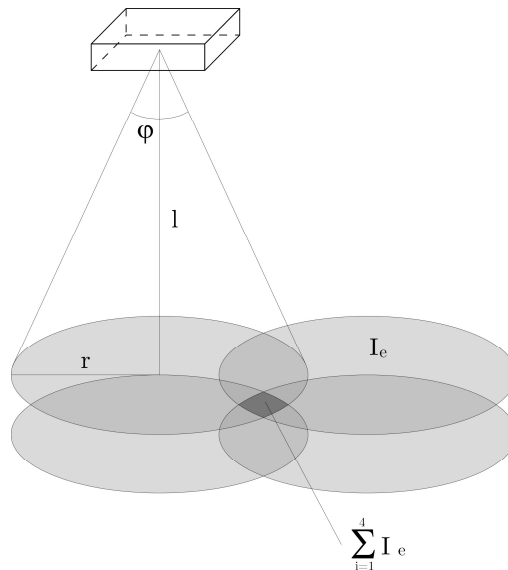
Pro zjištění intenzity záření v homogenně ozářené oblasti bylo vycházeno ze vztahu (2). Pro zjednodušení bude uvažována pouze průměrná intenzita záření dopadajícího na oblast určenou pro testování o dané ploše A . Vztah (2) je tedy možné psát bez derivací (15).

$$I_e = \frac{\Phi_e}{A} \quad (15)$$

Kde zářivý tok jedné diody je dán součinem napětí U a proudu I procházejícího diodou vynásobeným účinností η diody a podílem zářivých toků C_φ a plocha A je dána velikostí oblasti ozářené diodou. Jelikož dioda vyzařuje rovinně symetricky, je ozářená plocha kolmá na osu vyzařovaného kužele kruh o poloměru $r = \operatorname{tg}(\varphi/2) \cdot l$, kde l je vzdálenost testovací roviny od diody. Obsah ozářené plochy je pak πr^2 . V místě, kde se ozářené plochy diod překrývají, je celkový zářivý tok dán součtem zářivých toků n diod. Po dosazení do vztahu (15) byl získán výsledný vztah pro intenzitu záření na testovací rovině v závislosti na vzdálenosti diod l od testovací roviny (16):

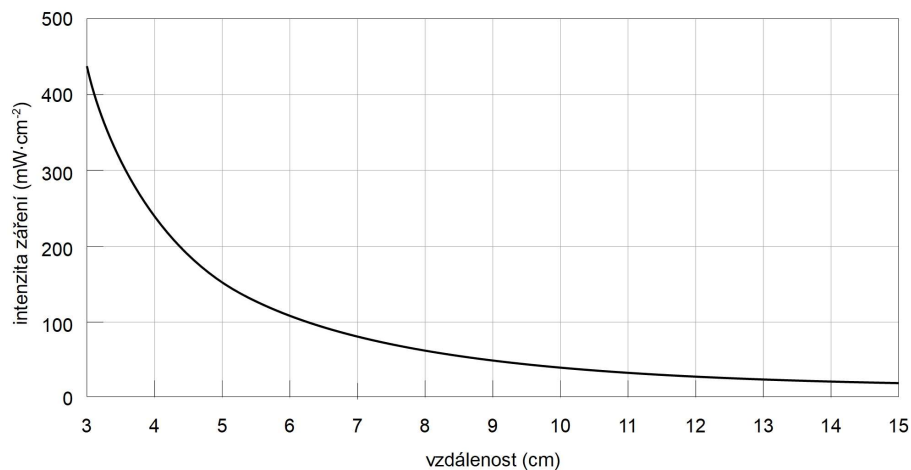
$$I_e(h) = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot U_i \cdot \eta_i \cdot C_\varphi}{\pi \cdot \left(\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right) l\right)^2} \quad (16)$$

Výpočet pro 4 diody je znázorněn na Obr. 16.



Obr. 16 — Výpočet celkové intenzity pro 4 diody.

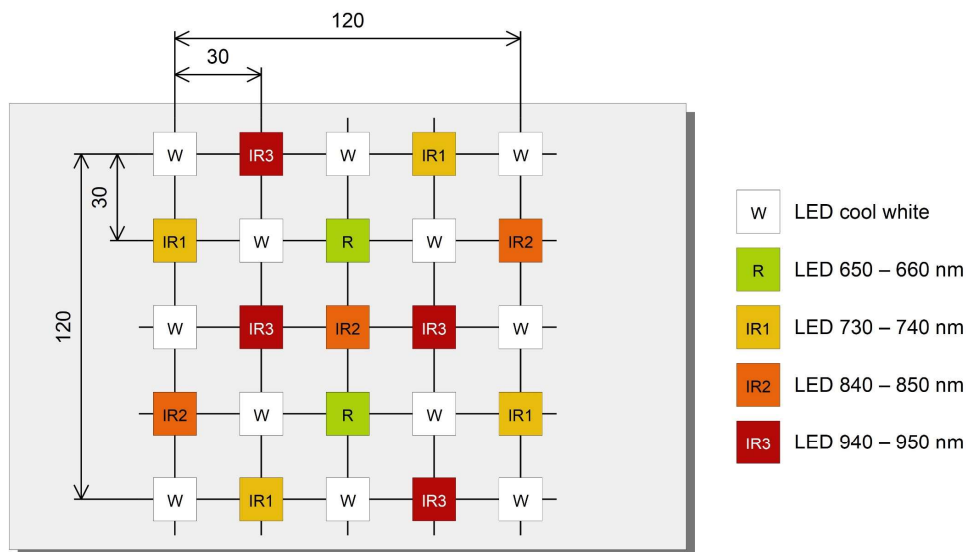
Po dosazení parametrů vybraných diod do vztahu (16) byla získána závislost intenzity záření na vzdálenosti diod od testovací roviny. Tato závislost je graficky znázorněna na Obr. 17. Účinnost diod η byla zvolena 25 % na základě výsledků práce [12], podíl zářivých toků C_φ byl určen z Obr. 12 jako 0,9.



Obr. 17 — Předpokládaná závislost intenzity záření solárního simulátoru na vzdálenosti od zdroje záření při účinnosti LED 30 %. Požadovaná intenzita záření je $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro dosažení optimálních parametrů simulátoru je nejlepší, aby vzdálenosti LED mezi sebou byly minimální a vzdálenost diod od testovací roviny co nejvyšší, ale taková, kde je ještě dosažena požadovaná intenzita záření. Vzdálenost diod mezi sebou je dána jejich geometrií a geometrií chladiče. Konstrukčně nejnižší možná dosažitelná vzdálenost diod je 30 mm. Nejvyšší vzdálenost diod od testovací roviny, kde je ještě dosažena intenzita záření $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, je přibližně 6,5 cm.

Rozmístění jednotlivých diod na chladiči bylo zvoleno tak, aby jejich uspořádání bylo středově symetrické a aby byly diody o stejném vyzařovaném spektru rozmístěny v podobné vzdálenosti od sebe a pokud možno po celé ploše chladiče. Výsledné uspořádání diod je na Obr. 18.



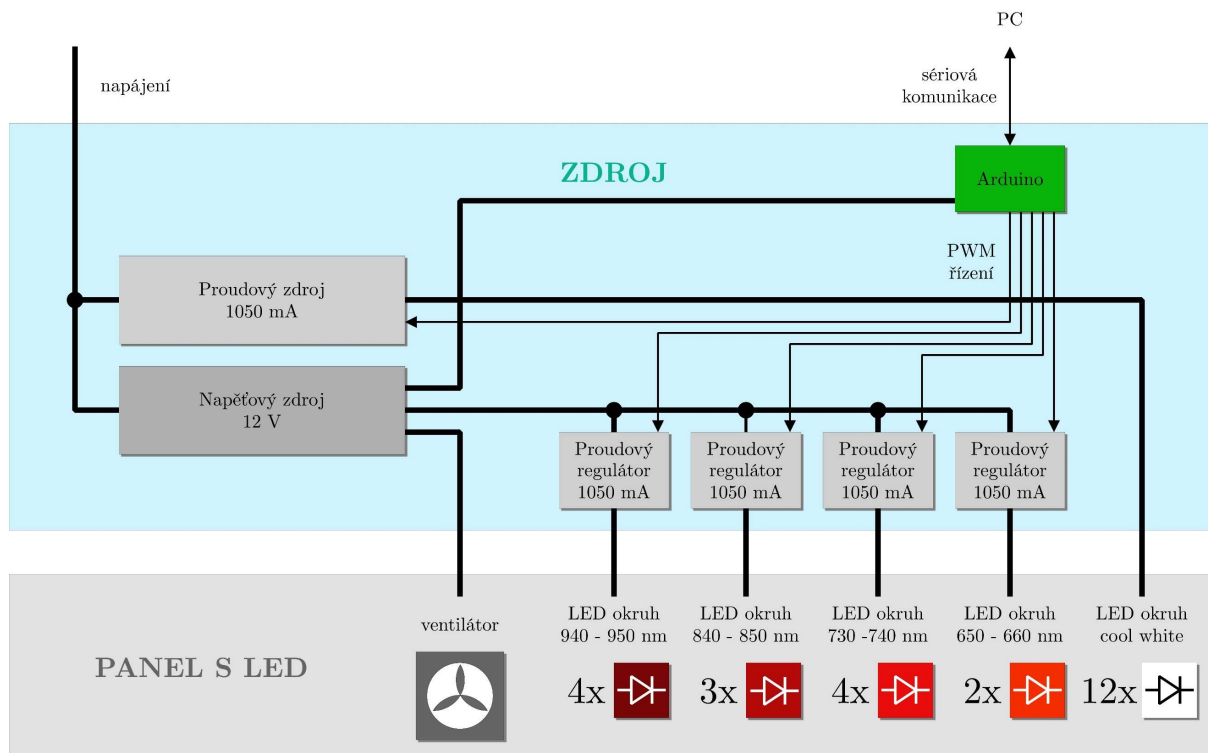
Obr. 18 — Rozmístění LED na chladiči. Vzdálenost středů jednotlivých diod je 30 mm a celková velikost pole 120 x 120 mm. Diody byly uspořádány tak, aby výkon v jednotlivých vlnových délkách byly na co největší ploše co nejvíce homogenní.

5.3 Návrh zdroje a chlazení

5.3.1 Zdroj

Základním požadavkem na zdroj solárního simulátoru byla možnost nezávislého řízení výkonů jednotlivých typů diod. Pro řízení výkonů diod byla zvolena metoda pulzně šířkové modulace (PWM), použité zdroje tedy musí tento princip řízení podporovat.

Jednotlivé typy LED byly sériově spojeny a napojeny na zdroje. Pro napájení skupiny diod *cool white* byl zvolen zdroj konstantního proudu 1,05 A *MEAN WELL ELG-150-C1050B*, jehož výkon lze řídit pomocí PWM. Pro napájení ostatních okruhů diod, ventilátoru a *Arduina* byl zvolen zdroj konstantního napětí 12 V *MEAN WELL HLG-240H-12A*. Před jednotlivé okruhy diod 650–660 nm, 730–740 nm, 840–850 nm a 940–950 nm byly předřazeny proudové regulátory na proud 1,05 A *MEAN WELL LDH-45A-1050W* říditelné pomocí PWM (Obr. 19).



Obr. 19 — Blokové schéma solárního simulátoru. Pět nezávislých okruhů s LED je napájeno pomocí samostatných proudových zdrojů. Intenzita vyzařování diod v jednotlivých okruzích je řízena *Arduinem* pomocí PWM.

5.3.2 Chlazení

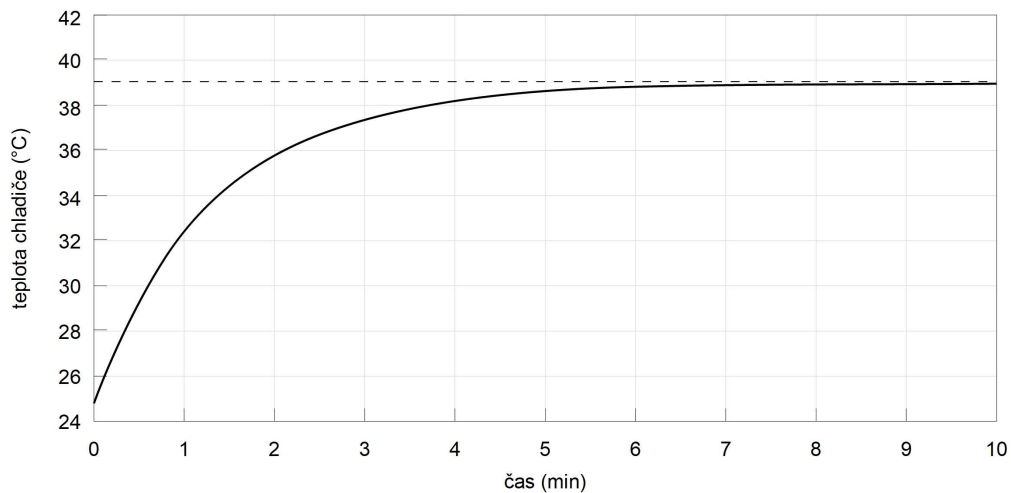
Aby byla zajištěna delší životnost diod a pro udržení jejich výkonů jak z krátkodobého, tak dlouhodobého hlediska, byly diody na své spodní straně natřeny teplovodivou pastou a přišroubovány k hliníkovému chladiči. Na chladič byl připevněn ventilátor pro nucený odvod tepla. Tento ventilátor je napájen přímo z napěťového zdroje (Obr. 19).

6 Výsledky

6.1 Zahřívací čas

Jelikož je výkon a vyzařované spektrum LED závislé na teplotě [13], bylo potřeba určit dobu, za kterou se teplota diod ustálí, aby byla výkonová a spektrální měření relevantní. Pro měření byl zvolen bod přibližně uprostřed chladiče ze strany, kde jsou umístěny diody.

Měření bylo provedeno teploměrem *Greisinger GMH 3530* s platinovým teplotním čidlem Pt100. Čidlo teploměru bylo natřeno teplovodivou pastou, aby byl zajištěn lepší přestup tepla. Závislost teploty chladiče na čase po zapnutí simulátoru je na Obr. 20.

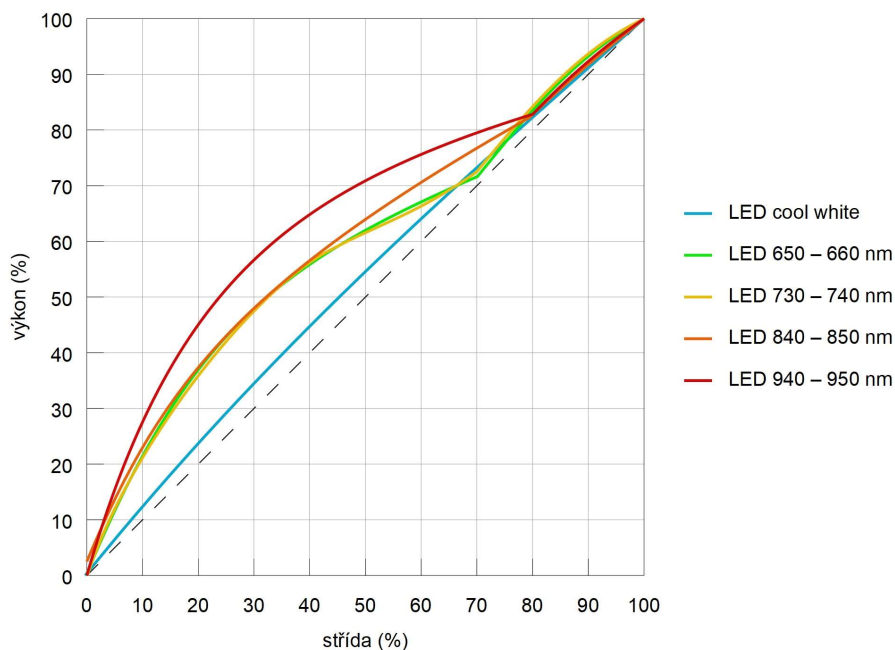


Obr. 20 — Závislost teploty chladiče na čase po zapnutí všech diod na maximální výkon se zapnutým ventilátorem.

Měření bylo zahájeno z počáteční teploty chladiče 24,8 °C. Teplota se ustálila na 39,0 °C po 7 minutách. Pokud je teplota chladiče konstantní, lze předpokládat, že i teploty LED jsou konstantní. Po této době bude výkon a vyzařované spektrum diod konstantní za předpokladu stálé okolní teploty.

6.2 Závislost výkonu LED na střídě PWM

Pro ověření funkce PWM řízení výkonu diod, bylo provedeno měření závislosti intenzity záření na střídě řídicích pulzů. Měření zářivého toku bylo provedeno měřičem optického výkonu *Thorlabs S120B* s fotodiodovým detektorem, jako ampérmetr byl použit *Thorlabs PM100*. Závislost výkonu jednotlivých okruhů LED na střídě je na Obr. 21.



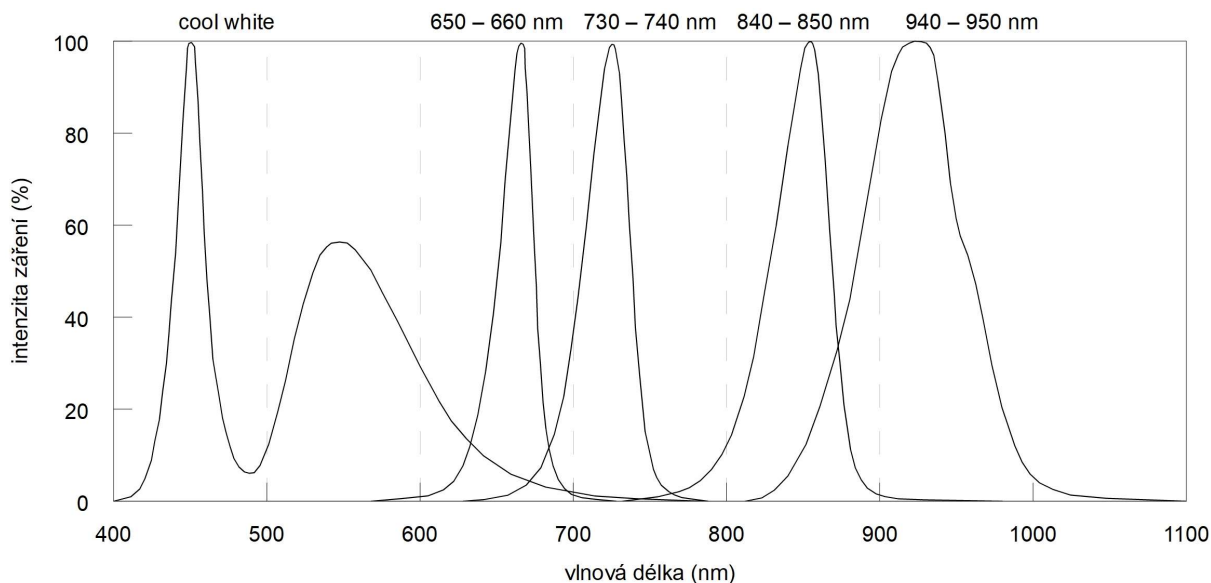
Obr. 21 — Závislost výkonu jednotlivých okruhů LED na střídě. Osa prvního kvadrantu je znázorněna čárkovanou čarou.

Z výsledků měření je patrné, že žádný z proudových zdrojů, nevykazuje lineární závislost efektivního výstupního proudu na střídě řídicího pulzu. Lineární závislosti se nejvíce přibližuje proudový zdroj použitý pro napájení diod *cool white*, zatímco proudové regulátory použité pro ostatní okruhy diod vykazují značně nelineární charakteristiky.

Pro další měření a kalibraci simulátoru je zapotřebí znát vztah mezi nastavenou střídou pulzů a výkonem diod. Proto byly změřené hodnoty závislosti výkonu na střídě aproximovány pro každý okruh diod pomocí spline křivek, ze kterých byla vytvořena tabulka závislosti výkonů jednotlivých okruhů LED na střídě řídicího signálu (viz Příloha č. 1 *Závislost výkonů LED na střídě PWM*).

6.3 Spektra jednotlivých LED

Vyzařovaná spektra jednotlivých LED byla změřena, aby bylo zjištěno, jak dobře odpovídají požadovaným výkonům v šesti intervalech vlnových délek stanovených normou [9]. Na Obr. 22 jsou spektra vyzařovaná jednotlivými diodami změřená pomocí *Spektrofotometru LASP 2-VIS-NIR*.

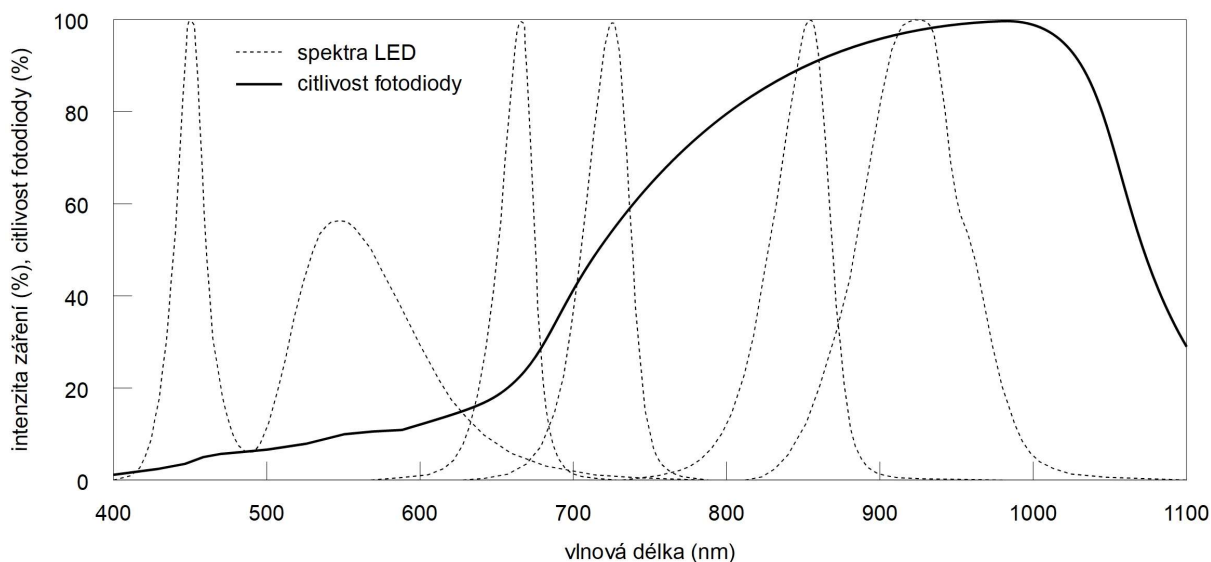


Obr. 22 — Spektrum vyzařovaných vlnových délek použitých LED. Hodnoty intenzity záření jsou u jednotlivých diod vztaženy k jejich maximální hodnotě – z obrázku nelze porovnat výkony různých typů diod.

6.4 Korekce spektrální citlivosti fotodiody

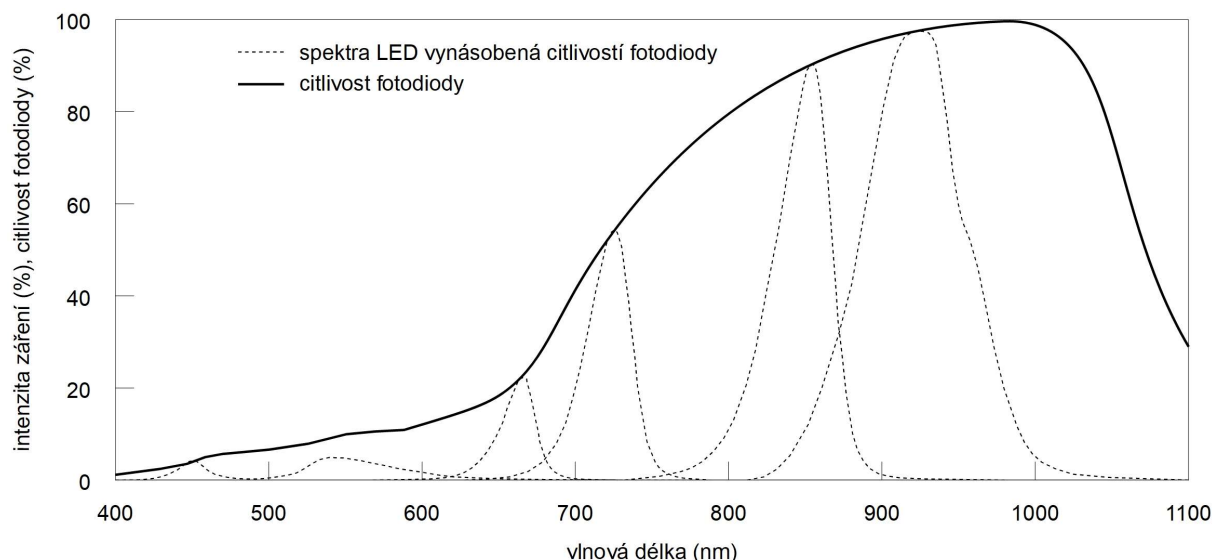
Měření intenzity záření budou prováděna pomocí měřiče optického výkonu *Thorlabs S120B*. Jelikož detektor tohoto přístroje je fotodioda, která vykazuje rozdílnou citlivost na různé vlnové délky, byl proveden výpočet korekčních konstant pro všechny typy LED, aby bylo možné určit absolutní hodnoty intenzity záření.

Spektra jednotlivých diod a křivka statických citlivostí fotodiodového detektoru, známá z kalibračního listu byla relativizována, aby její maximální hodnoty dosahovaly 100 % (Obr. 23).



Obr. 23 — Spektra jednotlivých LED a křivka relativních statických citlivostí fotodiody.

Násobením spekter jednotlivých LED s křivkou statických citlivostí fotodiody byla získána spektra diod tak, jak je detekuje měřič optického výkonu (Obr. 24).



Obr. 24 — Spektra jednotlivých LED vynásobená křivkou statických citlivostí fotodiody. Integrál spektrální křivky LED vynásobené křivkou statických citlivostí fotodiody je hodnota měřená měřičem optického výkonu.

Integrálem spektrální křivky je zářivý tok (nebo intenzita záření, pokud je vztažen na jednotkovou plochu). Porovnáním integrálů spekter jednotlivých LED před a po vynásobení získáme porovnání skutečného zářivého toku a zářivého toku měřeného měřičem optického výkonu. Poměrem těchto integrálů je korekční konstanta (17).

$$C_i = \frac{\int_{400}^{1100} \Phi_i(\lambda) d\lambda}{\int_{400}^{1100} \Phi_i(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda} \quad (17)$$

Kde C_i je korekční konstanta pro i -tou diodu, $\Phi_i(\lambda)$ je zářivý tok i -té diody v závislosti na vlnové délce a $S(\lambda)$ je křivka statických citlivostí fotodiody. Výsledná hodnota zářivého toku (intenzity záření) se pak určí podle vztahu (18).

$$\Phi_i \text{ skutečná} = \Phi_i \text{ změřená} \cdot C_i \quad (18)$$

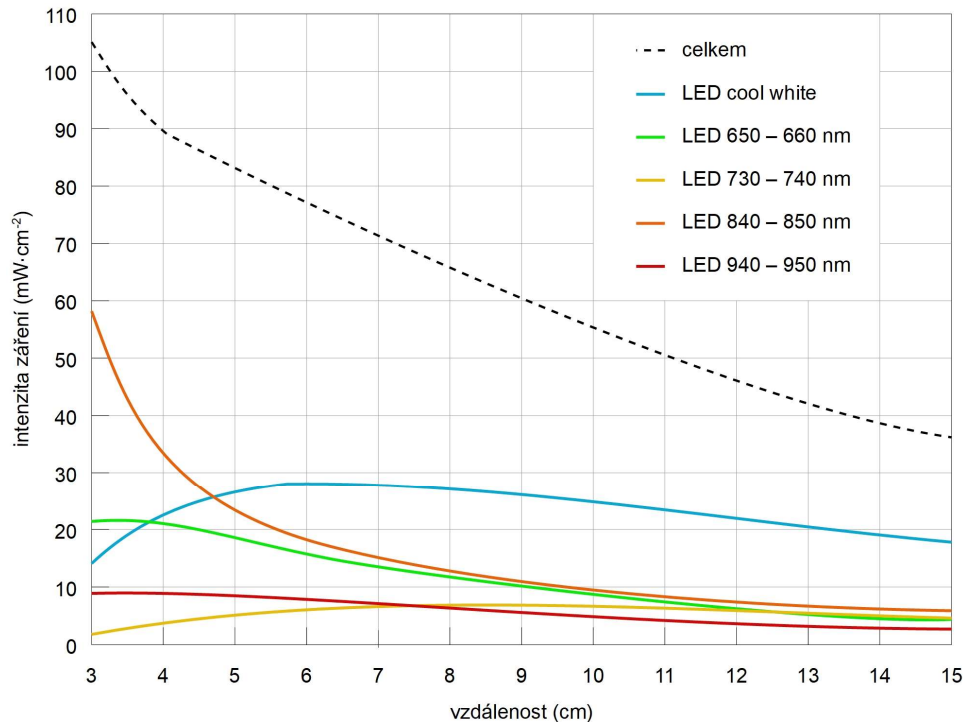
Po aplikování vztahu (17) na všechny LED bylo získáno pět korekčních konstant pro jednotlivé diody. Zářivý tok (intenzita záření) jednotlivých diod se pak určí podle vztahů (19).

$$\begin{aligned} \Phi_{cool\ white\ skutečná} &= \Phi_{cool\ white\ změřená} \cdot 11,53538 \\ \Phi_{650-660\ skutečná} &= \Phi_{650-660\ změřená} \cdot 4,59075 \\ \Phi_{730-740\ skutečná} &= \Phi_{730-7\ změřená} \cdot 1,97011 \\ \Phi_{840-850\ skutečná} &= \Phi_{840-8\ změřená} \cdot 1,12058 \\ \Phi_{940-950\ skutečná} &= \Phi_{940-950\ změřená} \cdot 1,03297 \end{aligned} \quad (19)$$

6.5 Optimální vzdálenost testovací roviny

Pro určení optimální vzdálenosti testovací roviny od roviny LED bylo provedeno měření závislosti intenzity záření na vzdálenosti od roviny LED přibližně uprostřed solárního simulátoru zvlášť pro všech pět okruhů diod. Výsledky

měření jsou shrnuty na Obr. 25. Pro měření byl použit měřič optického výkonu *Thorlabs S120B* s měřicím rozsahem vlnových délek 400–1100 nm a maximálním přípustným zářivým tokem 50 mW. Jako ampérmetr byl použit *Thorlabs PM100*. Aby nebyl překročen měřicí rozsah přístroje, byly diody při měření spuštěny na 10% výkon. Získané hodnoty intenzity záření byly poté přepočteny na 100% výkon pomocí tabulky v Příloze č. 1 a korigovány vzhledem k vyzařovaným vlnovým délkám pomocí vztahů (19).



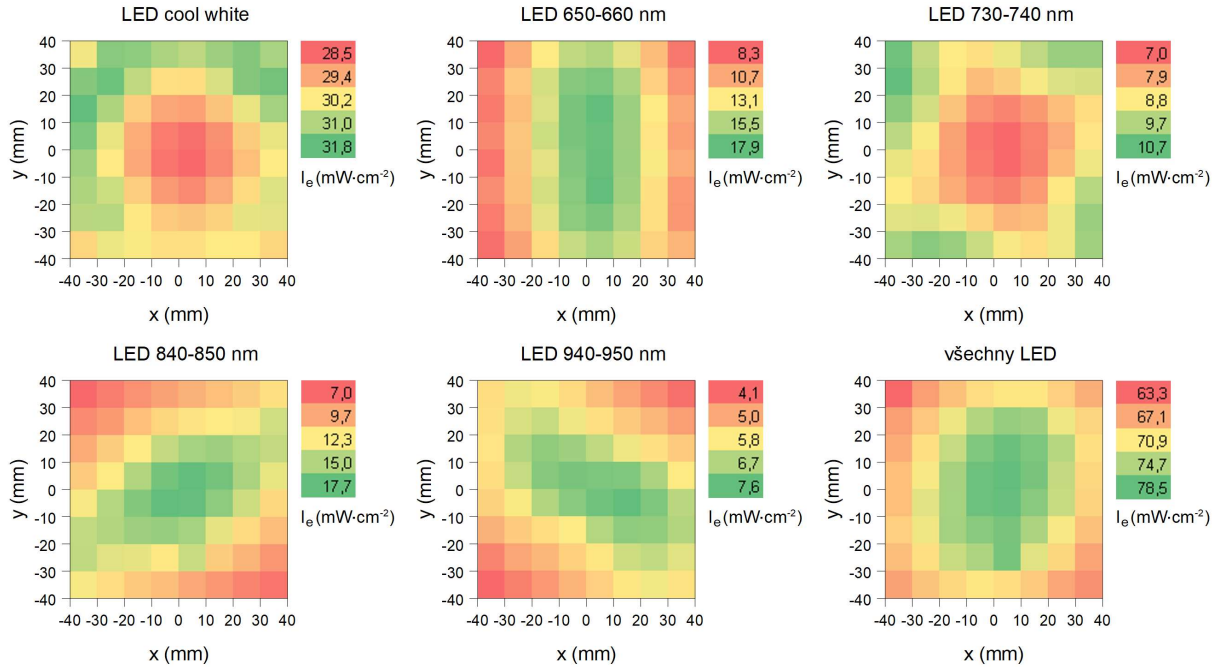
Obr. 25 — Závislost intenzity záření na vzdálenosti testovací roviny od roviny LED měřená uprostřed solárního simulátoru. U některých druhů diod intenzita záření začíná s velkým přiblížením k rovině diod klesat, to je způsobeno rozmístěním diod. Pokud je detektor měřiče optického výkonu příliš blízko rovině diod, dostane se mimo oblast, kam diody vyzařují většinu energie. Čárkovanou čarou je vyznačen součet intenzit záření všech diod. Požadovaná hodnota intenzity záření je $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Jak je vidět na Obr. 25, požadované intenzity záření $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ bylo dosaženo až 3 cm před rovinou diod. V této vzdálenosti však bude neuniformita příliš velká, a proto byla pro další testování a optimalizaci solárního simulátoru vybrána vzdálenost 6,5 cm od roviny LED jako kompromis mezi intenzitou záření a neuniformitou. V této vzdálenosti ještě nedochází k poklesu intenzity záření u žádné skupiny LED. Požadované intenzity záření sice není v této vzdálenosti dosaženo, ale to pro testování solárních článků není nutné (viz kap. 3.3 a 4.2.2).

6.6 Neuniformita záření a spektrální shoda

Pro měření neuniformity intenzity záření bylo zvoleno pole 8 x 8 bodů, aby celkový počet měřených bodů byl 64, jak stanovuje norma [9]. Vzdálenost mezi měřenými body byla 10 mm, celkově tedy bylo proměřeno pole 80 x 80 mm. Solární simulátor byl umístěn do vzdálenosti 6,5 cm od testovací roviny. Intenzita záření byla změřena měřičem optického výkonu *Thorlabs S120B* s ampérmetrem *Thorlabs PM100* a poté přepočtena pomocí vztahů (19). Testovací rovina byla během experimentu pokryta černým papírem, aby bylo zamezeno odrazům.

Jednotlivé okruhy diod byly spouštěny na maximální výkon a pro každý okruh zvlášť byla změřena intenzita záření v poli 80 x 80 mm. Intenzita záření všech LED byla určena součtem intenzit záření jednotlivých diod. Výsledky jsou na Obr. 26. Počátek souřadného systému pro měření byl zvolen ve středu LED umístěné na chladiči uprostřed. Podrobná data jsou v Příloze č. 2.



Obr. 26 — Intenzita záření na testovací rovině ve vzdálenosti 6,5 cm od roviny LED.

Z intenzity záření všech diod byla určena neuniformita podle vztahu (9). Pro čtvercovou oblast 40 x 40 mm je neuniformita nižší než 5 %, což odpovídá třídě B, pro pole 60 x 60 mm je nižší než 10 %, což odpovídá třídě C. Pro větší oblast již neuniformita překračuje hranici přípustnou pro solární simulátor. Maximální naměřená hodnota intenzity záření všech LED byla $78,5 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$, minimální $63,3 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ a průměrná $73,3 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

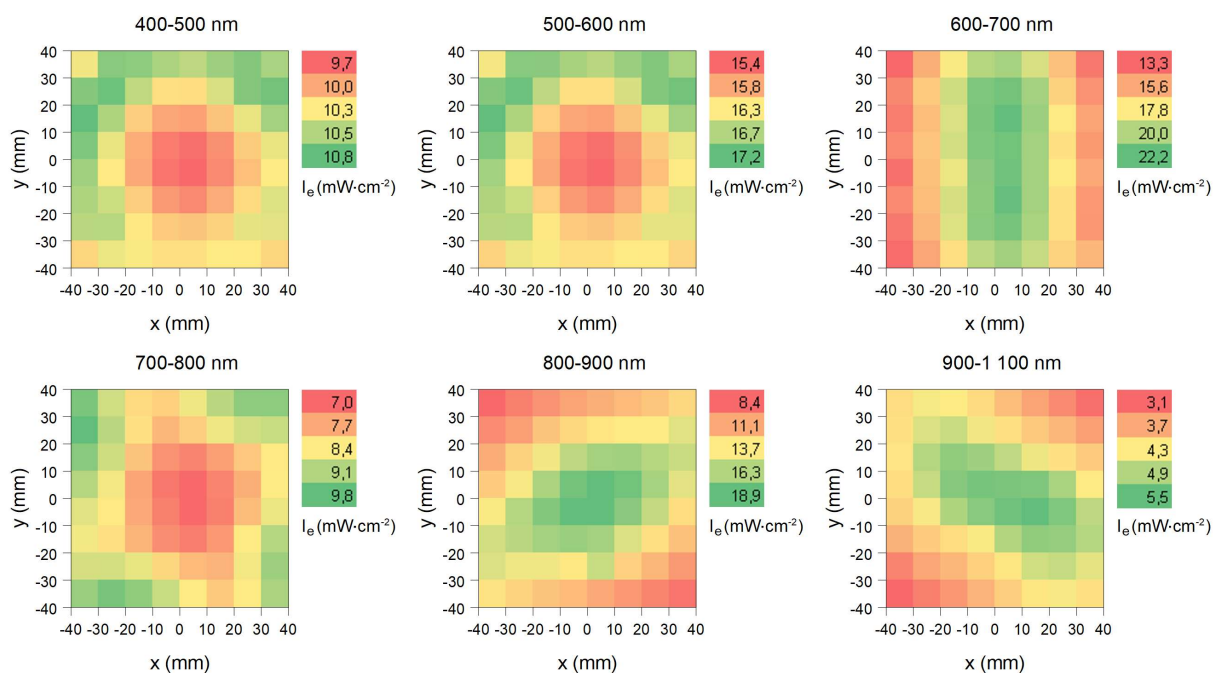
Ze známých vyzařovaných spekter diod byl vypočítán příspěvek výkonu každého typu LED do intervalů vlnových délek definovaných v Tab. 2 podle vztahu (11). Příspěvky výkonů jednotlivých diod jsou v Tab. 6.

Tab. 6 — Příspěvky výkonů jednotlivých diod do intervalů vlnových délek podle Tab. 2.

intervaly vlnových délk (nm)	příspěvky výkonů LED do intervalů vlnových délek (%)				
	<i>cool white</i>	<i>650-660 nm</i>	<i>730-740 nm</i>	<i>840-850 nm</i>	<i>940-950 nm</i>
400-500	34,01	–	–	–	–
500-600	53,83	0,22	–	–	–
600-700	11,79	99,61	13,22	–	–
700-800	0,36	0,17	86,78	4,33	–
800-900	–	–	–	95,40	27,27
900-1 100	–	–	–	0,27	72,71

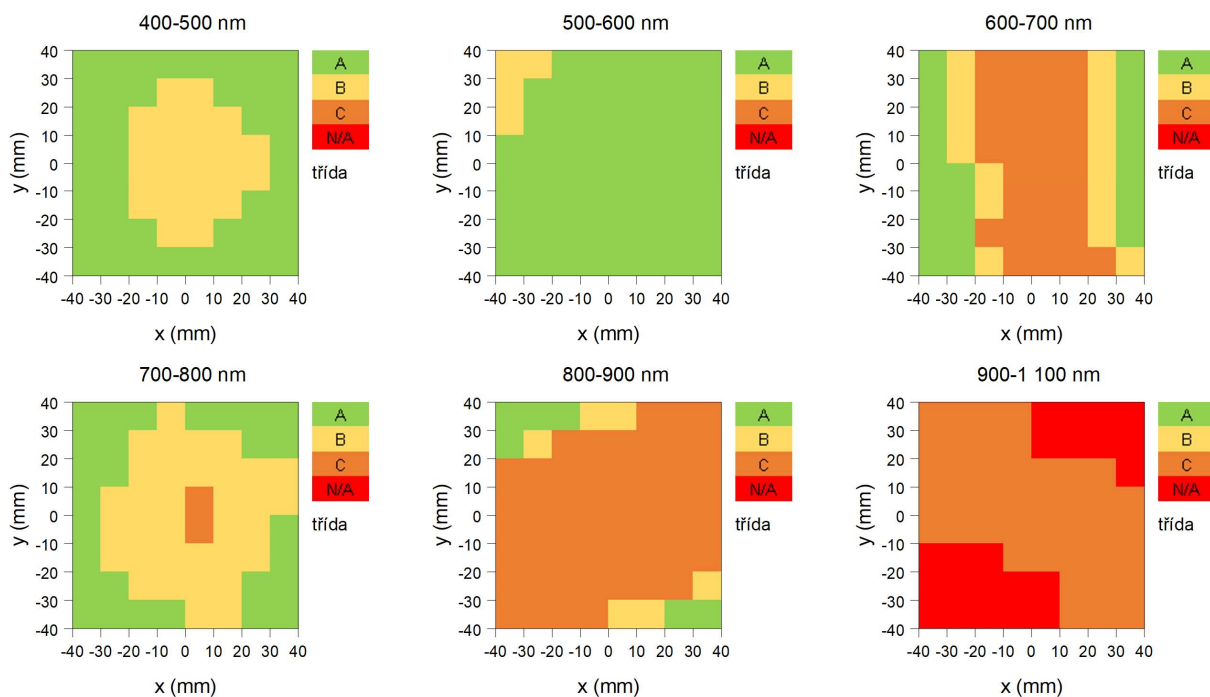
Změřené intenzity záření jednotlivých okruhů diod byly poté pomocí hodnot v Tab. 6 přepočteny na intenzitu záření v jednotlivých intervalech vlnových délek (Obr. 27) pomocí vztahu (20) pro každou změřenou oblast.

$$I_{e \lambda_1 - \lambda_2} = \sum_{i=1}^5 I_{e LED i} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{e LED i} d\lambda}{\int_{400}^{1100} I_{e LED i} d\lambda} \quad (20)$$



Obr. 27 — Příspěvek intenzity záření jednotlivých LED do intervalů vlnových délek podle Tab. 2.

Ze znalosti intenzit záření v každém ze šesti intervalů vlnových délek podle Tab. 2 byla určena spektrální shoda zvlášť pro každý změřený bod v oblasti 80 x 80 mm podle vztahu (8). Výsledek je na Obr. 28.



Obr. 28 — Spektrální shoda v jednotlivých bodech v testovací rovině.

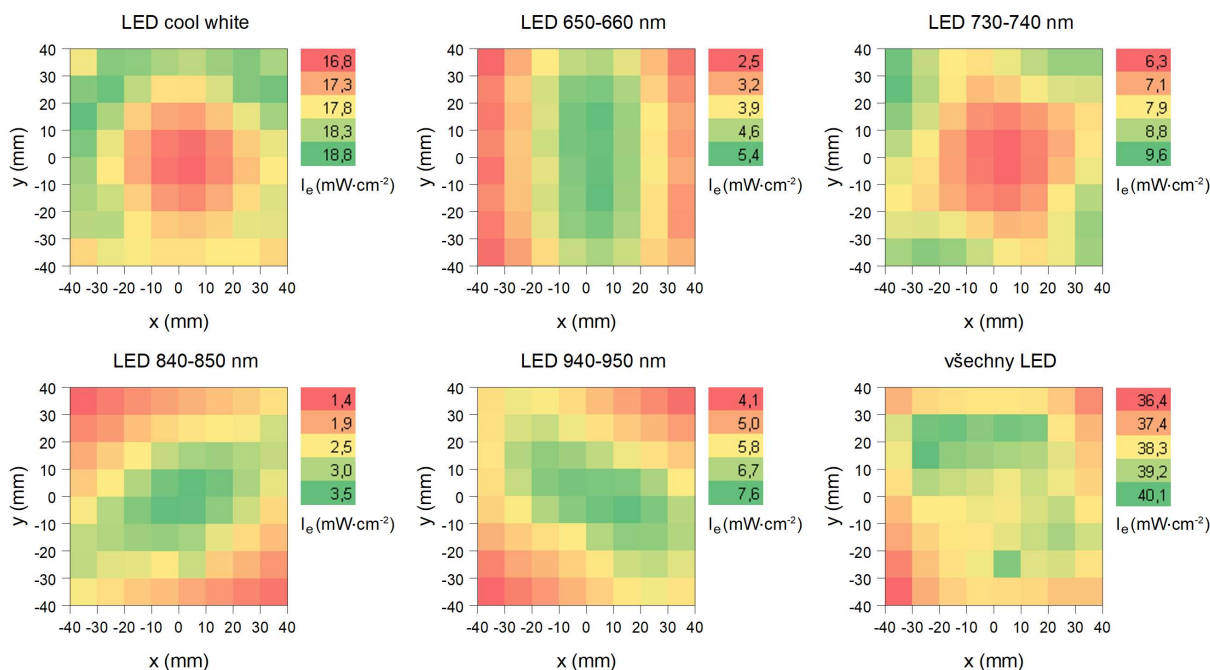
Podle normy [9] je spektrální shoda simulátoru taková, jako je nejhorší zjištěná spektrální shoda. Pro oblast 20 x 20 mm jsou spektrální shody všech bodů pro všechny rozsahy vlnových délek mezi 0,4–2. To odpovídá třídě C. Pro větší oblast jsou hodnoty spektrální shody v rozsahu vlnových délek 900–1100 nm na okrajích měřené oblasti mimo přípustný interval pro solární simulátor. To je způsobeno nízkým výkonem diod 940–950 nm.

Na základě změřených dat byla provedena kalibrace simulátoru. Výkony jednotlivých okruhů diod byly měněny a pro každé nastavení byla vypočítána neuniformita intenzity záření a spektrální shoda. Kalibrace byla prováděna heuristickou metodou. Nejdříve byl snížen výkon diod s nejvyšší dosaženou intenzitou záření, tak aby se intenzita záření diod s nižším než potřebným výkonem dostala do intervalu stanovených normou [9]. Optimální nastavení diod je v Tab. 7. Zde je vidět, že výkon diod 650–660 nm a 840–850 nm musel být snížen na 30 % resp. 20 %. To může být způsobeno částečně jejich umístěním, oba okruhy mají diody umístěné buď ve středu simulátoru, nebo blízko jeho středu. Dále je vidět, že výkon solárního simulátoru je omezen výkonem diod 940–950 nm, které při optimálním nastavení běží na 100% výkon.

Tab. 7 — Optimální nastavení diod pro vzdálenost testovací roviny 6,5 cm. Střída PWM byla určena podle Přílohy č. 1.

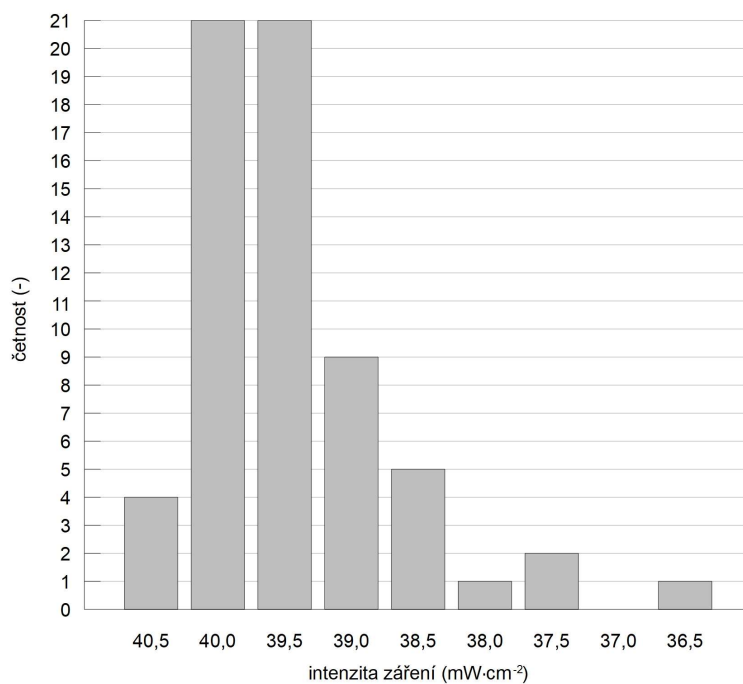
LED	výkon (%)	střída PWM (%)
cool white	59	63
650–660 nm	30	48
730–740 nm	90	94
840–850 nm	20	40
940–950 nm	100	100

Výsledná intenzita záření jednotlivých okruhů LED po kalibraci je na Obr. 29.



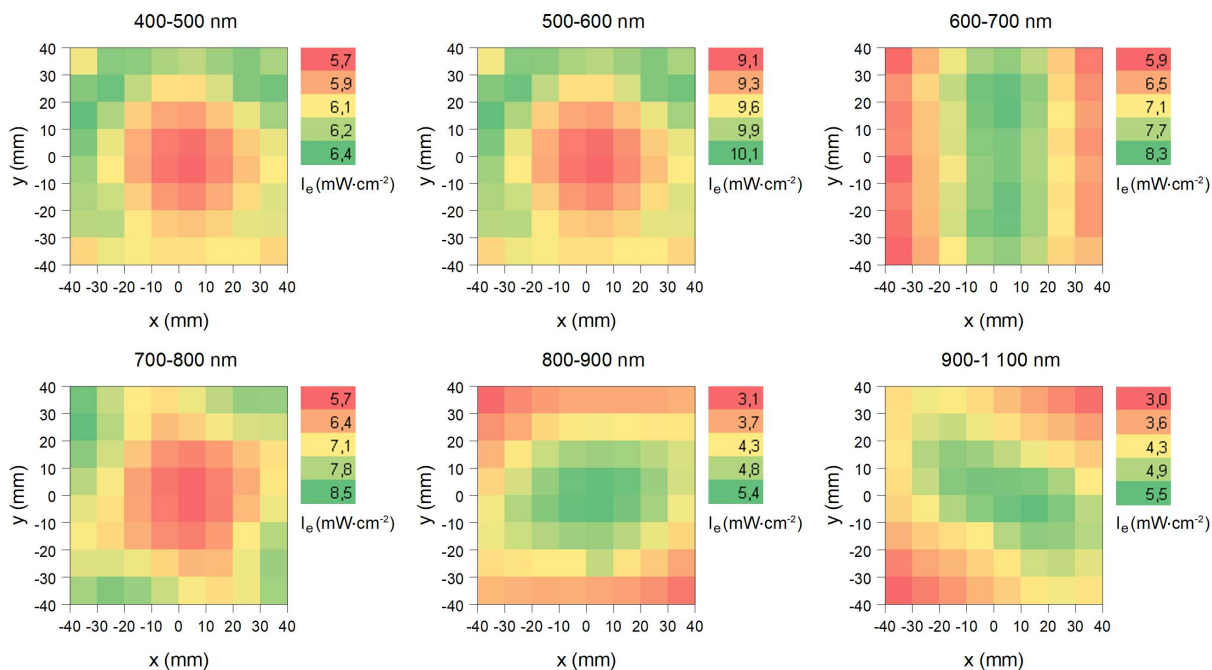
Obr. 29 — Intenzita záření na testovací rovině ve vzdálenosti 6,5 cm od roviny LED po kalibraci.

Pro čtvercovou oblast 40 x 40 mm je neuniformita nižší než 2 %, což odpovídá třídě A, pro pole 80 x 80 mm je nižší než 5 %, což odpovídá třídě B. Maximální hodnota intenzity záření po kalibraci je 40,1 mW·cm⁻², minimální hodnota je 36,4 mW·cm⁻² a průměrná 39,2 mW·cm⁻², což je 53% hodnota oproti maximálnímu výkonu solárního simulátoru. Četnost intenzit záření všech LED je na Obr. 30.



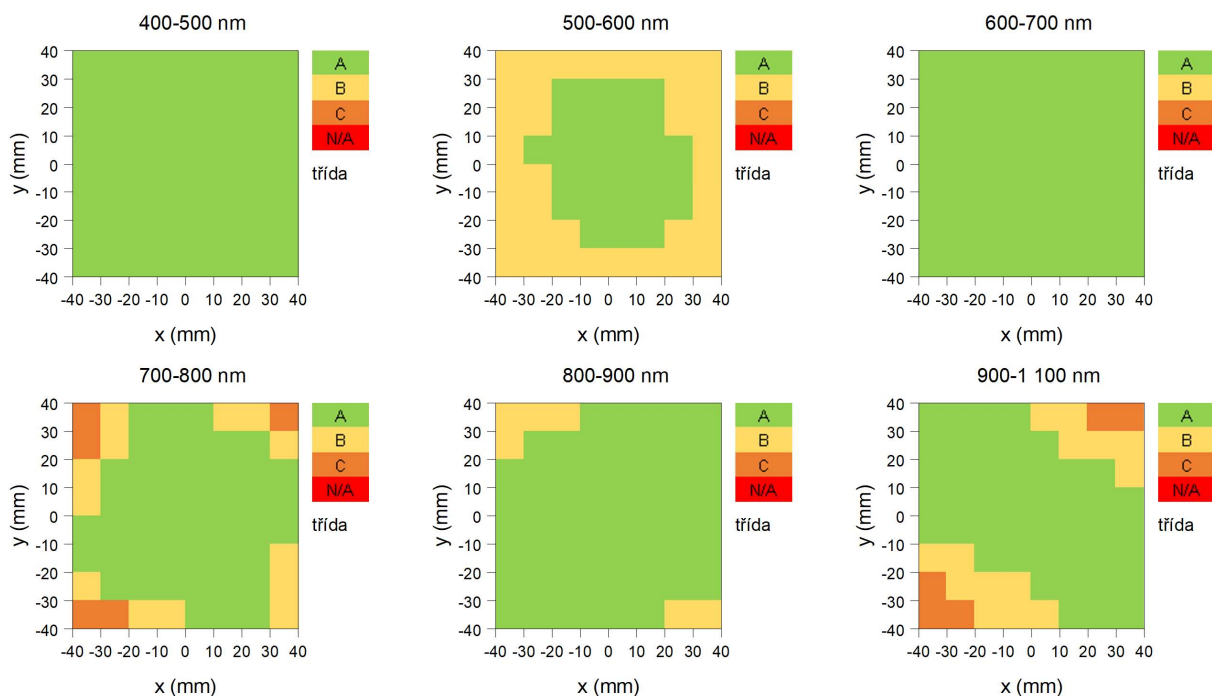
Obr. 30 — Četnost intenzit záření na měřené ploše 80 x 80 mm po kalibraci.

Příspěvek intenzity záření od LED do intervalů vlnových délek definovaných v Tab. 2. po kalibraci je na Obr. 31.



Obr. 31 — Příspěvek intenzity záření jednotlivých LED do intervalů vlnových délek podle Tab. 2 po kalibraci.

Dále byla vyhodnocena spektrální shoda pro všechny body po kalibraci. Výsledek je na Obr. 32.

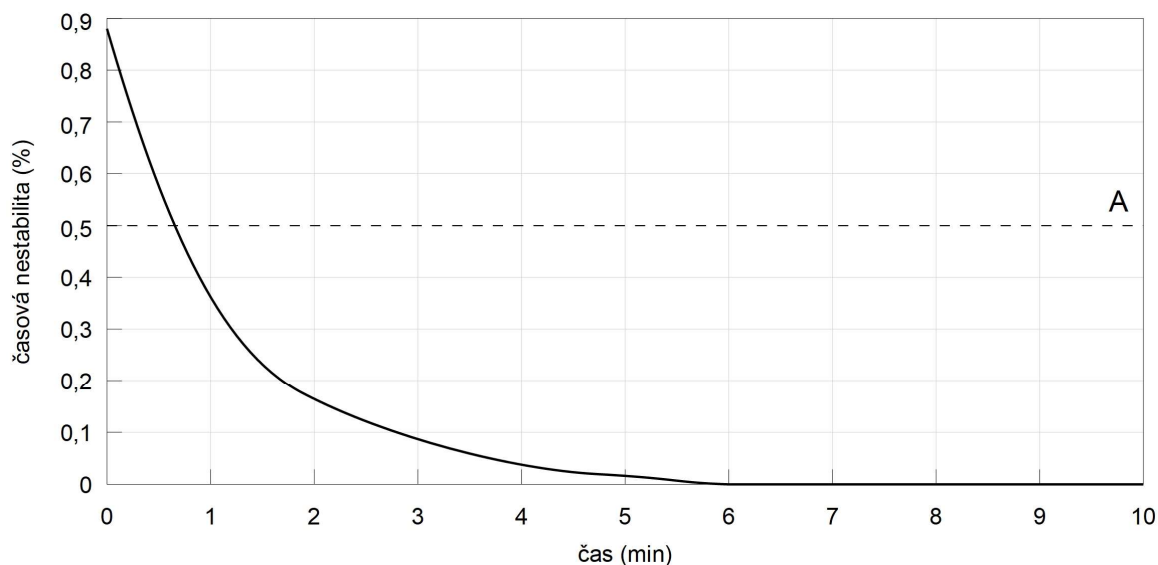


Obr. 32 — Spektrální shoda v jednotlivých bodech v testovací rovině po kalibraci simulátoru.

Pro oblast 40×40 mm je spektrální shoda všech bodů mezi 0,75–1,25 a tedy odpovídá třídě A. V oblasti 60×60 mm je dosaženo třídy B a v oblasti 80×80 mm (tedy v celé měřené oblasti) třídy C.

6.7 Časová nestabilita

Ačkoliv jsou LED velmi stabilní zdroje záření, jejich výkon je závislý na teplotě [9]. Změna intenzity záření v čase byla měřena měřičem optického výkonu *Thorlabs S120B*. Měření intenzity záření bylo zahájeno z počáteční teploty simulátoru, která byla stejná jako teplota okolí. Všechny okruhy diod byly spuštěny na maximální výkon a detektor měřiče optického výkonu byl umístěn přibližně doprostřed simulátoru do vzdálenosti 300 mm od roviny LED. Intenzita záření byla měřena 10 minut a časová nestabilita byla vyhodnocena podle vztahu (10) od každé počaté minuty do konce měření. Po 1 minutě byla časová nestabilita nižší než 0,5 %, což podle Tab. 3 odpovídá klasifikační třídě solárního simulátoru A. Po 6 minutách od spuštění již nebyla po dobu měření zaznamenána žádná změna intenzity záření a časová nestabilita tedy byla 0 %. Během celého měření nebyla zaznamenána časová nestabilita vyšší než 1 %, což by podle Tab. 3 odpovídalo třídě B. Průběh časové nestability v závislosti na čase je na Obr. 33.



Obr. 33 — Časová nestabilita v závislosti na čase od spuštění solárního simulátoru. V grafu je vyznačena hranice pro klasifikaci A.

6.8 Klasifikace solárního simulátoru

Na základě měření byla provedena klasifikace solárního simulátoru podle normy [9]. Výslednou klasifikaci solárního simulátoru po kalibraci shrnuje Tab. 8.

Tab. 8 — Výsledná klasifikace solárního simulátoru pro kalibraci. Průměrná intenzita záření neovlivňuje výslednou klasifikaci. Časová nestabilita je 0 % po 6 minutách od spuštění simulátoru a menší než 0,5 % po 1 minutě od spuštění (což odpovídá třídě A).

oblast pro testování (mm)	spektrální shoda	neuniformita	Krátkodobá časová nestabilita	průměrná intenzita záření ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	klasifikace
40 x 40	0,76–1,23	0,80 %	0 %	39,58	AAA
60 x 60	0,64–1,30	2,05 %	0 %	39,59	BBA
80 x 80	0,52–1,46	4,77 %	0 %	39,20	CBA

7 Závěr

Práce vysvětluje základní pojmy týkající se slunečního záření a vlivu atmosféry na jeho intenzitu a spektrum. Jsou představeny vztahy pro výpočet intenzity slunečního záření na základě polohy Slunce vůči Zemi nebo na základě nadmořské výšky. Dále je proveden výškový rozbor atmosféry z hlediska spektra slunečního záření pomocí softwaru *MODTRAN*.

Praktická část práce se zaměřuje na návrh a konstrukci solárního simulátoru pomocí vysoce výkonných LED. Simulátor sestavený v této práci dosáhl podle normy [9] třídy A pro spektrální shodu, neuniformitu a časovou nestabilitu pro oblast 4 x 4 cm a průměrné intenzity záření $40 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Tato oblast může být dále rozšířena na 8 x 8 cm při zachování intenzity, ale zhoršení třídy. Za cenu zhoršení třídy je také možné zvýšit intenzitu záření až na $79 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Byl splněn cíl dosažení třídy AAA na nezanedbatelné oblasti, avšak nebylo docíleno intenzity záření $100 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$. To bylo způsobeno tím, že na simulátoru nebyly použity původně zamýšlené 10W diody. Tyto diody nebyly v době konstrukce dostupné, a proto byly na všech okruzích kromě bílého použity diody o nižším výkonu.

Solární simulátor může být dále vylepšen přidáním reflektorů pro zvýšení intenzity záření a díky možnosti nezávisle řídit jednotlivé okruhy diod může být provedena kalibrace simulátoru pro různé stavy atmosféry nebo pro různé nadmořské výšky. Dále může být vylepšena konstrukce přidáním pohltivého materiálu mezi diody, aby se zabránilo odrazům od chladiče a zvýšila se opakovatelnost měření.

Literatura

- [1] Reference Solar Spectral Irradiance: Air Mass 1.5. National Renewable Energy Laboratory [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
- [2] QUASCHNING, V. The Sun as an Energy Resource. 2003.
- [3] KREIDER, J. Medium and High Temperature Solar Processes. Oxford: Elsevier, 1979. ISBN 0323141110.
- [4] LAUE, E. G. The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations. Solar Energy. 1970, (13), 43-57.
- [5] Sunpower. C60 SOLAR CELL MONO CRYSTALLINE SILICON. Document #001-66352. 2010.
- [6] MACHÁČEK, Z., V. BENDA a R. BAŘINKA. Parameters of photovoltaic cells in dependence on irradiance and temperature. Praha, 2007.
- [7] GENERALIC, E. *The change in the contents of air with altitude*. In: Periodni [online]. 2017 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.periodni.com/story_of_ozone_and_ozone_holes.html
- [8] LIANG, S. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. Hoboken: John Wiley, 2005. ISBN 9780471723714.
- [9] IEC 60904-9. Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements. 2007.
- [10] NOVIČKOVAS, A., A. BAGUCKIS, A. VAITKŪNAS, A. MEKYS a V. TAMOŠIŪNAS. *Investigation of Solar Simulator Based on High-Power Light-Emitting Diodes*. Lietuva, 2014.
- [11] MAHMOUD, K, S. PARK, S. PARK a D. LEE. Measurement of normalized spectral responsivity of digital imaging devices by using a LED-based tunable uniform source. Daejeon, 2013.
- [12] CHING, C, Z LEE, S LEE a M DEVARAJAN. Analysis on Optical Properties for Various Types of Light Emitting Diode. Kuala Lumpur, 2012.
- [13] Labsphere. The Radiometry of Light Emitting Diodes. [online]. [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <https://www.labsphere.com/site/assets/files/2570/the-radiometry-of-light-emitting-diodes-leds.pdf>

Závislost výkonů LED na střídě PWM

střída (%)	výkon LED (%)				
	<i>cool white</i>	<i>650-660 nm</i>	<i>730-740 nm</i>	<i>840-850 nm</i>	<i>940-950 nm</i>
0	0,00	0,00	0,00	4,43	0,05
1	1,24	2,33	2,28	6,67	3,70
2	2,47	4,61	4,51	8,86	7,15
3	3,69	6,84	6,69	11,00	10,42
4	4,91	9,02	8,82	13,09	13,51
5	6,13	11,15	10,91	15,14	16,43
6	7,34	13,24	12,95	17,14	19,19
7	8,54	15,28	14,94	19,09	21,80
8	9,74	17,26	16,89	20,98	24,27
9	10,93	19,20	18,79	22,83	26,60
10	12,11	21,08	20,63	24,63	28,80
11	13,29	22,91	22,44	26,38	30,88
12	14,46	24,70	24,19	28,07	32,84
13	15,62	26,42	25,90	29,71	34,71
14	16,77	28,10	27,56	31,30	36,48
15	17,92	29,72	29,17	32,83	38,16
16	19,05	31,29	30,73	34,31	39,77
17	20,18	32,81	32,25	35,73	41,30
18	21,29	34,27	33,72	37,09	42,77
19	22,40	35,68	35,14	38,40	44,18
20	23,50	37,03	36,51	39,66	45,55
21	24,58	38,32	37,83	40,85	46,88
22	25,66	39,57	39,11	41,99	48,17
23	26,73	40,76	40,34	43,08	49,42
24	27,79	41,91	41,53	44,13	50,63
25	28,85	43,02	42,68	45,14	51,80
26	29,91	44,10	43,79	46,11	52,94
27	30,97	45,14	44,87	47,06	54,03
28	32,02	46,15	45,91	47,97	55,08
29	33,08	47,14	46,91	48,87	56,10
30	34,15	48,11	47,88	49,75	57,07
31	35,21	49,06	48,83	50,62	58,00
32	36,29	49,99	49,74	51,48	58,89
33	37,36	50,90	50,62	52,33	59,75
34	38,43	51,79	51,48	53,16	60,57
35	39,50	52,65	52,31	53,98	61,36
36	40,56	53,48	53,11	54,79	62,13

střída (%)	výkon LED (%)				
	<i>cool white</i>	<i>650-660 nm</i>	<i>730-740 nm</i>	<i>840-850 nm</i>	<i>940-950 nm</i>
37	41,62	54,28	53,89	55,58	62,86
38	42,66	55,05	54,65	56,36	63,57
39	43,70	55,79	55,38	57,13	64,26
40	44,72	56,49	56,08	57,88	64,92
41	45,72	57,15	56,77	58,62	65,57
42	46,71	57,77	57,43	59,34	66,20
43	47,69	58,37	58,07	60,05	66,81
44	48,66	58,93	58,69	60,75	67,41
45	49,63	59,47	59,28	61,44	67,99
46	50,59	59,98	59,86	62,12	68,56
47	51,56	60,48	60,40	62,80	69,11
48	52,52	60,96	60,93	63,46	69,64
49	53,49	61,43	61,43	64,12	70,17
50	54,47	61,89	61,90	64,78	70,68
51	55,46	62,35	62,36	65,43	71,18
52	56,45	62,79	62,79	66,08	71,67
53	57,46	63,24	63,21	66,73	72,15
54	58,46	63,67	63,62	67,37	72,63
55	59,46	64,11	64,02	68,02	73,09
56	60,46	64,54	64,43	68,65	73,56
57	61,46	64,96	64,84	69,29	74,02
58	62,45	65,38	65,25	69,92	74,47
59	63,42	65,80	65,69	70,55	74,93
60	64,39	66,22	66,14	71,18	75,39
61	65,34	66,63	66,61	71,81	75,85
62	66,28	67,05	67,12	72,43	76,32
63	67,21	67,49	67,65	73,05	76,77
64	68,13	67,95	68,23	73,65	77,22
65	69,04	68,46	68,84	74,26	77,66
66	69,95	69,01	69,51	74,85	78,09
67	70,85	69,62	70,23	75,43	78,49
68	71,76	70,29	71,01	76,00	78,88
69	72,67	71,05	71,84	76,55	79,25
70	73,58	71,89	72,75	77,09	79,58
71	74,49	72,83	73,73	77,62	79,89
72	75,42	73,85	74,77	78,13	80,18
73	76,34	74,95	75,86	78,65	80,46
74	77,27	76,10	76,99	79,17	80,75
75	78,19	77,30	78,16	79,70	81,05
76	79,12	78,54	79,35	80,24	81,38
77	80,04	79,79	80,55	80,82	81,76
78	80,96	81,04	81,75	81,42	82,19

střída (%)	výkon LED (%)				
	<i>cool white</i>	<i>650-660 nm</i>	<i>730-740 nm</i>	<i>840-850 nm</i>	<i>940-950 nm</i>
79	81,86	82,29	82,95	82,07	82,68
80	82,76	83,51	84,13	82,76	83,25
81	83,65	84,71	85,28	83,50	83,90
82	84,54	85,86	86,40	84,29	84,63
83	85,41	86,99	87,50	85,12	85,44
84	86,28	88,07	88,56	85,99	86,30
85	87,14	89,12	89,59	86,89	87,21
86	87,99	90,13	90,58	87,81	88,16
87	88,84	91,10	91,54	88,75	89,13
88	89,69	92,04	92,46	89,71	90,13
89	90,54	92,93	93,34	90,66	91,14
90	91,38	93,78	94,18	91,63	92,15
91	92,23	94,60	94,98	92,58	93,14
92	93,07	95,37	95,73	93,53	94,12
93	93,92	96,10	96,44	94,45	95,06
94	94,77	96,79	97,10	95,36	95,97
95	95,63	97,43	97,71	96,24	96,82
96	96,49	98,04	98,28	97,08	97,62
97	97,35	98,60	98,79	97,89	98,34
98	98,23	99,11	99,25	98,64	98,99
99	99,11	99,58	99,65	99,35	99,54
100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Intenzita záření jednotlivých okruhů LED v poli 80 x 80 mm při 100% výkonu ve vzdálenosti 6,5 cm

Intenzita záření LED *cool white* ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)

poloha (mm)	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40
40	31,02	31,64	31,60	31,43	31,33	31,51	31,65	31,44
30	31,65	31,78	31,31	30,73	30,71	31,16	31,65	31,75
20	31,85	31,41	30,42	29,68	29,57	30,20	31,07	31,47
10	31,69	31,07	29,81	28,89	28,66	29,26	30,38	31,07
- 10	31,49	30,90	29,72	28,76	28,53	29,15	30,16	30,95
- 20	31,41	31,23	30,42	29,44	29,15	29,77	30,64	31,13
- 30	31,34	31,36	30,89	30,35	30,22	30,48	31,08	31,10
- 40	30,53	31,05	30,97	30,73	30,73	30,92	30,90	30,53

Intenzita záření LED *650–660 nm* ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)

poloha (mm)	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40
40	8,34	11,41	14,06	15,63	15,94	14,75	12,03	9,11
30	9,53	12,47	15,11	17,03	17,24	16,07	12,84	10,13
20	9,14	12,09	14,95	17,31	17,86	16,48	14,05	11,07
10	9,73	12,47	15,28	17,34	17,68	16,46	13,76	10,70
- 10	8,86	12,30	14,73	17,11	17,72	16,48	14,20	11,25
- 20	9,94	12,22	15,12	16,96	17,86	16,37	13,65	10,49
- 30	9,20	11,78	14,76	16,84	17,30	16,07	13,53	10,36
- 40	8,68	10,93	13,35	15,48	16,15	15,34	13,02	11,75

Intenzita záření LED 730–740 nm ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)

poloha (mm)	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40
40	10,47	9,31	8,46	8,32	8,72	9,37	9,90	9,87
30	10,67	9,48	8,39	7,94	8,11	8,56	8,96	9,03
20	10,09	9,08	8,00	7,46	7,32	7,55	7,96	8,29
10	9,41	8,52	7,63	7,15	6,99	7,27	7,73	8,36
- 10	8,75	8,27	7,62	7,20	6,99	7,25	7,89	8,67
- 20	8,48	8,19	7,76	7,38	7,25	7,57	8,41	9,47
- 30	8,86	8,90	8,64	8,18	7,85	7,92	8,67	9,88
- 40	9,70	10,14	9,88	9,21	8,54	8,29	8,68	9,79

Intenzita záření LED 840–850 nm ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$)

poloha (mm)	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40
40	6,98	8,24	9,34	10,42	11,30	12,09	12,89	14,10
30	8,99	9,97	12,11	13,33	14,16	14,60	14,79	15,56
20	10,94	12,90	14,60	15,78	16,35	16,50	16,11	15,79
10	12,76	14,55	16,14	17,34	17,69	17,37	16,27	15,06
- 10	14,74	16,08	17,04	17,69	17,64	16,82	15,59	13,59
- 20	15,81	16,13	16,55	16,66	16,36	15,08	13,65	12,01
- 30	15,84	15,22	15,09	14,45	15,69	12,90	11,45	9,71
- 40	14,76	13,74	12,69	12,01	10,78	9,75	8,65	7,69

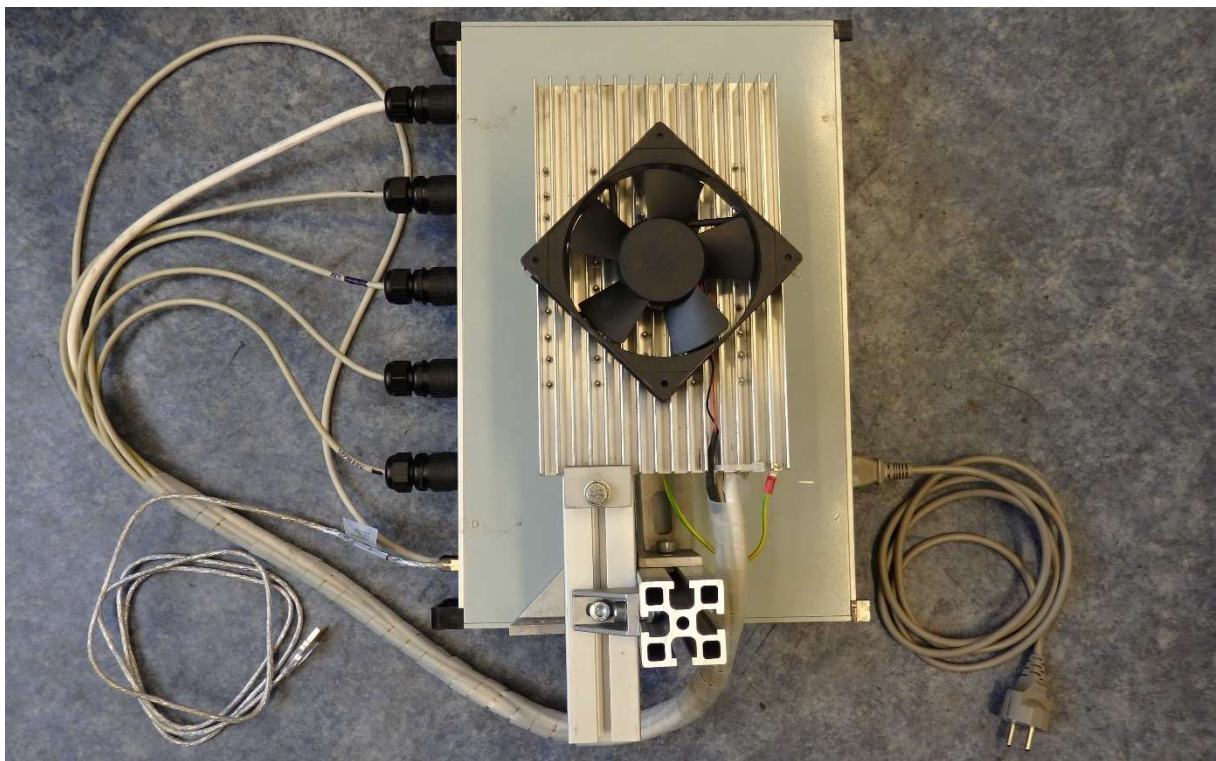
Intenzita záření LED 940–950 nm (mW·cm⁻²)

poloha (mm)	-40	-30	-20	-10	10	20	30	40
40	6,53	6,88	6,83	6,48	5,92	5,38	4,85	4,29
30	6,64	7,00	7,07	6,87	6,59	6,14	5,75	5,25
20	6,67	7,18	7,34	7,27	7,11	6,88	6,60	6,17
10	6,54	7,08	7,39	7,45	7,44	7,41	7,21	6,79
- 10	6,30	6,83	7,18	7,37	7,49	7,55	7,41	7,13
- 20	5,64	6,18	6,53	6,82	7,17	7,34	7,31	7,17
- 30	4,72	5,39	5,77	6,26	6,72	7,04	7,10	6,95
- 40	4,14	4,60	5,13	5,68	6,23	6,73	6,87	6,66

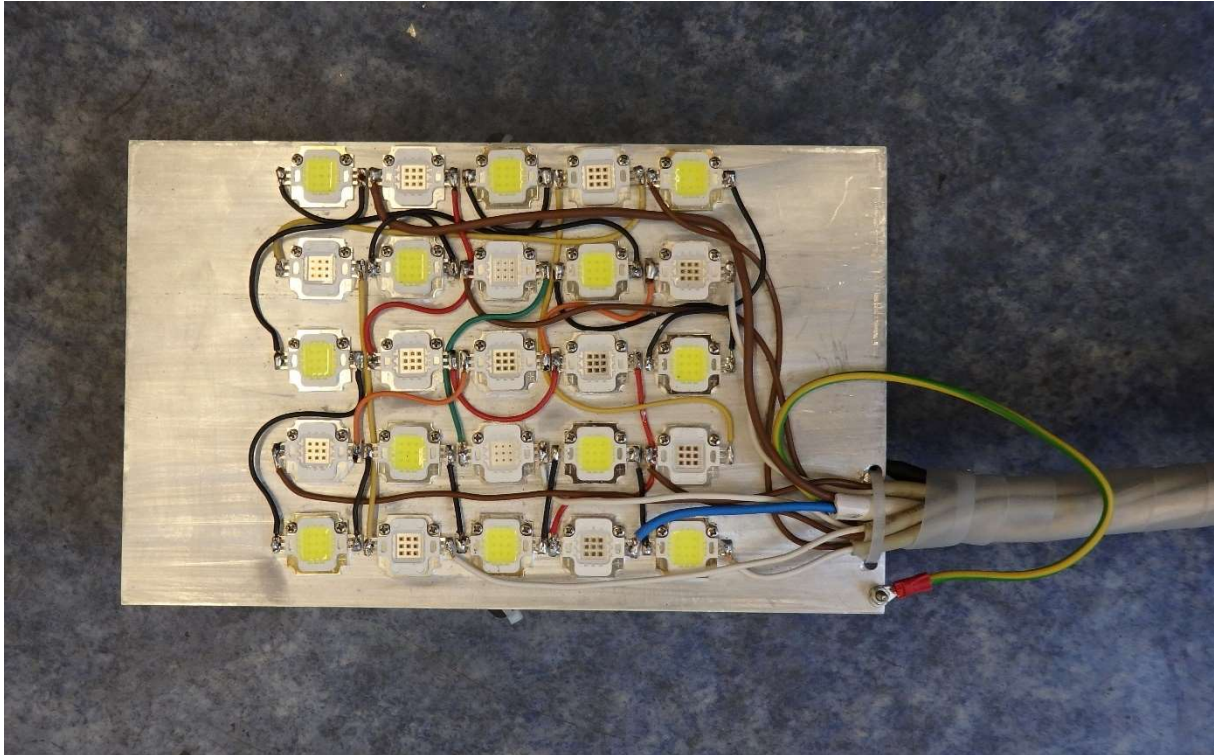
Fotodokumentace



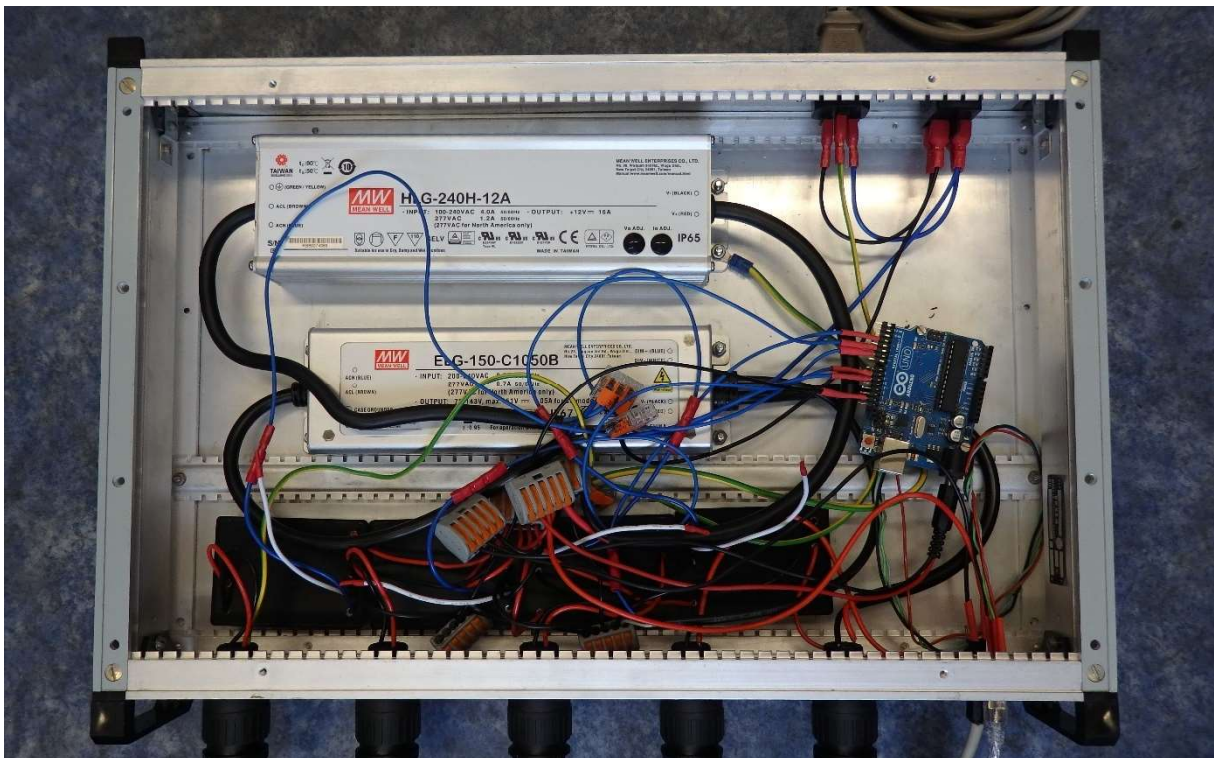
Obr. 1 — Solární simulátor tvořený v dolní části elektrickým zdrojem a v horní části zdrojem záření tvořeným skupinami LED nainstalovanými na hliníkový chladič s ventilátorem.



Obr. 2 — Solární simulátor shora. Vlevo jsou k elektrickému zdroji samostatně připojeny jednotlivé okruhy LED, ventilátor a USB kabel pro ovládání *Arduino*. Vpravo se nachází kabel pro připojení zdroje k elektrické síti.



Obr. 3 — LED sloužící jako zdroj záření připevněné k chladiči.



Obr. 4 — Elektrický zdroj solárního simulátoru.