

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Anton Rusnák

Autoreferát dizertačnej práce

**Meranie a hodnotenie spektrálnych charakteristík slnečného
žiarenia**

na získanie akademického titulu **Philosophiae Doctor, PhD.**

v doktorandskom študijnom programe **5.2.30 – Elektroenergetika**

Bratislava, 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej technickej univerzity v Bratislave

Predkladateľ: Ing. Anton Rusnák

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Školiteľ: prof. Ing. Alfonz Smola, PhD.

Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Oponenti:

Prof. Ing. Karel Sokanský, PhD.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
17. listopadu 15, A 448
708 33 Ostrava – Poruba,
Česká republika

Doc. Ing. Stanislav Darula, PhD.

Slovenská akadémia vied
Ústav stavebníctva a architektúry
Dúbravská cesta 9
845 03 Bratislava 45

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná : o hodine
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce vo vednom odbore 5.2.30
Elektroenergetika vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie zo
dňa na Fakulte elektrotechniky a informatiky Slovenskej
technickej univerzity v Bratislave.

.....
Dekan FEI
Prof. RNDr. Gabriel Juhás, PhD.

Obsah

Úvod

1	Slnčné žiarenie a oblohový typ	5
1.1	Oblohový typ.....	5
2	Metodika merania a hodnotenia spektrálnych charakteristík oblohového typu	5
2.1	Parametre merania a postupnosť	6
3	Zariadenie na meranie oblohových typov podľa ISO 15469:2004 / CIE S 011:2003	7
4	Spektrálne charakteristiky oblohových typov	8
5	Kolorimetria oblohových typov	9
5.1	Náhradná teplota chromatickosti oblohového typu na základe klasifikačného kritéria Lz / Dv	10
5.2	Spektrálne pásma indikatrixovej a gradačnej funkcie oblohového typu	10
5.3	Trichromatické súradnice oblohových typov	11
5.4	Náhradná teplota chromatickosti elementov oblohových typov	11
5.5	Vzťah distribúcie jasů a teploty chromatickosti oblohových typov	12
5.6	Krivka denného svetla na základe kolorimetrických parametrov oblohových typov ...	13
5.7	Matematický model kolorimetrie denného svetla	14
6	Aplikačné využitie spektrálnych zložení oblohových typov	15
6.1	Difúzne vlastnosti oblohových typov pre naklonené roviny	15
6.2	Jednoduchý model spektrálneho zloženia vo vnútorných priestoroch	16
	Prínos práce a výsledky	17
	Aplikovateľnosť výsledkov	17
	Odporúčania pre ďalší výskum	18
	Zoznam literatúry	19
	Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce	20

Ciele dizertačnej práce

Práca sa zaoberá problematikou merania spektrálnych charakteristík slnečného žiarenia a ich hodnotenia. Téma je sústredená najmä na problematiku difúzneho svetla slnečného žiarenia. Predmetom výskumu sú kolorimetrické vlastnosti jednotlivých oblohových typov, s prihliadnutím na doteraz vykonané experimentálne práce v danej oblasti. Vykonalie analýzy meracích postupov v kombinácií s rôznymi meracími zariadeniami má priniesť nové možnosti v oblasti hodnotenia slnečného žiarenia. Riešenie práce má analyzovať príspevok k aplikáciám vyžadujúcim slnečné žiarenie. Práca má priniesť a systematizovať riešenie merania kolorimetrie oblohových typov a ich hodnotenia, aj v možnej súvislosti na meranie jasú oblohových typov.

Hlavným cieľom dizertačnej práce je výskum spektrálneho zloženia pre jasové rozloženie oblohových typov, ktoré sú využiteľné v mnohých odvetviach – kolorimetrii denného svetla, v aplikáciách využívajúcich slnečné žiarenie, v stavebníctve, v architektúre a vo svete.

Ciele práce sú:

- špecifikácia a analýza kolorimetrických parametrov vo vzťahu na jasové distribúcie oblohových typov,
- výber parametrov, ktoré majú vplyv na kolorimetrické vyjadrenie oblohového typu,
- vykonanie experimentálnych meraní, následná analýza zložiek elementov a zostrojenie funkčných závislostí,
- návrh riešenia pre stanovenie vplyvu parametrov na vzájomný vzťah kolorimetrie a jasovej distribúcie oblohy,
- návrh riešenia pre stanovenie spektrálnych charakteristík oblohových typov,
- návrh algoritmu pre vyjadrenie kolorimetrických parametrov v závislosti na type oblohy.

Úvod

Práca sa zaoberá meraním a hodnotením spektrálneho zloženia slnečného žiarenia. Emitované slnečné žiarenie prechodom atmosférou mení svoje spektrálne zloženie, ktoré má vplyv na fotometrické ako aj kolorimetrické parametre.

V svetelnej technike sa stretávajú dva pohľady na slnečné žiarenie, a to: z hľadiska spektra slnečného žiarenia využitého v kolorimetrii prostredníctvom definovaných zdrojov denného svetla CIE. Druhý pohľad je z hľadiska jasú hemisféry oblohy, ktorý je variabilne rozložený na povrchu hemisféry. Tieto dva pohľady na slnečné žiarenie prepojením môžu vyriešiť niekoľko aktuálnych tém napr. fyziologické pôsobenie združeného svetla na človeka, spektrálnu simuláciu denného svetla v exteriéri a interiéri a iné. Spektrálne slnečné žiarenie emitované hemisférou je využité v nespočetnom množstve odborov. Pričom v svetelnej technike tvoria zdroje denného svetla základný stavebný kameň v kolorimetrii.

Súčasný model oblôh uvádza pätnásť typov oblôh pre rozloženie jasú na hemisfére. Zavedením súčasného matematického modelu oblohových typov sa výskum v tejto oblasti utlmil vzhľadom na náročnosť určovania oblohových typov. Oblasť charakteristiky spektrálneho zloženia a z nich vyplývajúcich parametrov pre rozloženie jasú oblôh na hemisfére zostala nepreskúmaná. Práca rozširuje poznatky oblohových typov na spektrálnu úroveň. Rozšírením o tieto vedomosti sa aktivuje výskum v oblasti denného svetla a jeho pôsobenia.

Práca má za úlohu poukázať aj na aplikačné využitie a samotným cieľom práce je stanovenie charakteristiky spektrálneho zloženia pre jednotlivé oblohové typy a nadviazanie týchto charakteristík jednotlivých oblohových typov na model kolorimetrie zdrojov denného svetla.

1 Slnečné žiarenie a oblohový typ

Slnko predstavuje prírodný primárny svetelný zdroj. Slnko emituje elektromagnetické žiarenie v celom spektrálnom pásme definovaným Planckovým zákonom pre model čierneho telesa s teplotou 5800 K. Z Wienovho posuvného zákona potom možno nájsť najintenzívnejšie vyžarovanie slnečného žiarenia, ktoré je pri vlnovej dĺžke 501 nm, čo je blízke maximu spektrálnej citlivosti ľudského oka. Je to dôsledok spektrálneho zloženia slnečnej žiarenia, ktoré obsahuje všetky vlnové dĺžky a vnemu, ktorý vyvolá toto žiarenie v ľudskom oku. Spektrum je rozklad žiarenia podľa vlnových dĺžok alebo frekvencií. Slnečné žiarenie predstavuje spojité absorpčné spektrum.

Existujú tri mechanizmy, ktoré menia slnečné žiarenie počas prechodu atmosférou: absorpcia, rozptyl a odraz.

Prestup alebo absorpciu svetla atmosférou je možné popísať Beer – Lambertovým - Bouguerovým zákonom o pohltení energie svetla pri prechode prostredím [1].

Absorpcia slnečného žiarenia atmosférickými plynmi sa deje v úzkom spektrálnom selektívnom pásme a nie rovnako v celom spektrálnom pásme slnečného žiarenia. Pri prechode slnečného žiarenia atmosférou dochádza k rozptylu do rôznych smerov v dôsledku prítomnosti častíc s rôznou veľkosťou.

Referenčné spektrum slnečného žiarenia je využívané v mnohých oblastiach vedy a praxe a je ťažké odlišiť všetky potreby. Súčasné extraterestriálne referenčné spektrum je založené na Guymardovej solárnej konštante, na základe ktorej sú normalizované dva typy spektier slnečného žiarenia: pre priame slnečné žiarenie a pre žiarenie na 37° naklonenej roviny [2]. Slúžia na testovanie fotovoltických systémov, ale aj na výpočet spektrálnych vlastností žiarenia pri prechode sklenenými plochami do budov a pod.

Modely spektrálnych charakteristík majú veľký význam pre porovnanie spektrálnej presnosti prístroja alebo je pomocou nich možné rozšíriť spektrum merania vyplnením chýbajúcich pásiem.

1.1 Oblohový typ

Oblohovým typom rozumieme rozloženie jasov oblohových elementov so zadanými vlastnosťami pri rôznych podmienkach polohy slnka, oblakov, atmosférickom obsahu zákalu, rôznych častíc v atmosfére atď. Oblohový typ je definovaný iba pre rozloženie jasov na hemisfére.

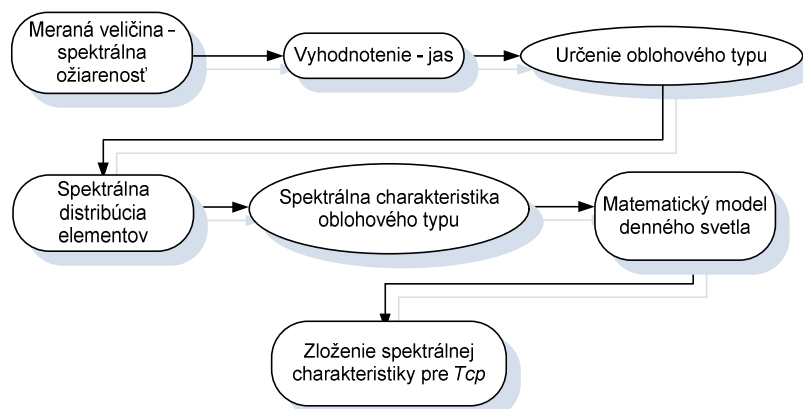
V súčasnosti je platný štandard ISO 15469:2004 / CIE S 011 / E:2003 [3], ktorým boli zavedené normalizované oblohové typy pre výpočet rôznych relatívnych rozložení oblohových jasov. Celkový počet oblohových typov podľa ISO štandardu je pätnásť.

2 Metodika merania a hodnotenia spektrálnych charakteristík oblohového typu

Pre meranie spektrálnych charakteristík je nutné použiť spektrorádiometer, ktorého snímacia schopnosť spektrálnych veličín je minimálne v rozmedzí viditeľnej časti spektra, t.j. 380 nm až 780 nm. Meranie UV a IR spektrálneho pásma je žiaduce v závislosti od oblasti aplikácie využitia spektrálnych charakteristík. Vstupným údajom pri meraní je hustota spektrálnej ožiarenosti $E_{e,\lambda}$ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$) snímača. Pre každý element oblohovej hemisféry je možné určiť ožiarenosť E_e ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) pre vybrané spektrálne pásmo a bude platiť

$$E_e = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{e,\lambda}(\lambda_i) \Delta\lambda \quad (2.1)$$

Ožiarenosť vyjadruje veľkosť dopadajúceho žiarivého toku na plochu snímača. Postupnosť merania, spracovania a vyhodnotenia meraných dát je zobrazená na obr. 2.1. Meraniami získané dáta sú spracované indikatrixovou a gradačnou funkciou pre vyjadrenie oblohového typu. Analýzou elementov oblohového typu je stanovená spektrálna distribúcia, ktorá je verifikovaná matematickou metódou pre zloženie spektrálnej charakteristiky denného svetla.



Obr. 2.1 Meranie spektrálnych charakteristík typických oblohových typov.

2.1 Parametre merania a postupnosť

Spektrálna žiarivosť elementu na hemisfére I_e je daná

$$I_e(\lambda) = \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\omega} \quad (2.2)$$

kde $\Phi_e(\lambda)$ ($\text{W}\cdot\text{sr}^{-1}$) je elementárny spektrálny žiarivý tok a uhol $d\omega$ (sr) je priestorový uhol. Odvođením pre elementárnu spektrálnu ožiarenosť $E_e(\lambda)$ platí

$$dE_e(\lambda) = \frac{dI_e(\lambda)}{r^2} = \frac{L_e(\lambda)E_e(\lambda)dA\cos\theta}{r^2} = L_e(\lambda)d\omega \quad (2.3)$$

kde $L_e(\lambda)$ je spektrálna žiara a priestorový uhol nahrádza parameter vzdialenosti r medzi snímačom a snímaným elementom hemisféry. Integráciou $L_e(\lambda)$ pre hemisféru, na ploche A v smere žiarenia $a^2\sin\theta d\theta d\varphi$, bude pre celkovú spektrálnu intenzitu ožiarenia $E_e(\lambda)$ platiť

$$E_e(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L_e(\lambda)\cos\theta\sin\theta d\theta d\varphi \quad (2.4)$$

Určením elementov na spektrálnej úrovni je možná analýza jednotlivých oblohových typov. Do výpočtu reálneho systému oblohového typu vstupujú parametre času a dátumu merania, deklinácie a polohy slnka na hemisfére. Merané spektrálne charakteristiky oblohových typov sa spracujú pre jednotlivé oblohové typy na základe experimentálneho vzťahu pre spektrálne charakteristiky denného svetla. Určenie ožiarenosti na horizontálnej rovine pre jasové distribúcie oblohových typov je možné vzťahom, ktorý bol rozšírený na spektrálne vyjadrenie [4]

$$E_e(\lambda) = \sum_{i=1}^{145} \pi \cdot \frac{E_{ei}(\lambda)}{\omega} \cdot (\cos^2\gamma_{up} - \cos^2\gamma_{down}) \quad (2.5)$$

Vzťah predstavuje globálnu spektrálnu ožiarenosť na horizontálnej rovine na základe rozloženia elementov na hemisfére a zahŕňa aj veľkosť hodnoty elementov. Uhly γ_{up} , γ_{down} reprezentujú almukantarát prislúchajúceho elementu, $E_{ei}(\lambda)$ predstavuje spektrálnu ožiarenosť elementu. Vzťah (2.5) sa rozširuje pre rozsah vlnových dĺžok 300 nm až 830 nm. Vzťah bol dokázaný pre kvantitatívny parameter osvetlenosti, a je predpoklad, že bude rovnako platiť pre spektrálnu ožiarenosť.

Trichromatické súradnice sú určené zo zložiek a trichromatických členiteľov s prislúchajúcou energiou jednotlivých elementov. Náhradná teplota chromatickosti globálnej spektrálnej distribúcie oblohového typu sa určí Robertsonovou metódou [5]. Stanovenie výpočtovej metódy je založené na analýze hlavných komponentov (PCA – Principal

component analysis) [6][7]. Metóda využije zložené spektrálne charakteristiky reprezentatívnych oblohových typov a vytvorí spektrálne komponenty denného svetla $S_0(\lambda)$ až $S_2(\lambda)$. Takto získané spektrálne zloženie má predpoklady platnosti na intervale 300 nm až 800 nm pre zvolený krok v nanometroch a platí

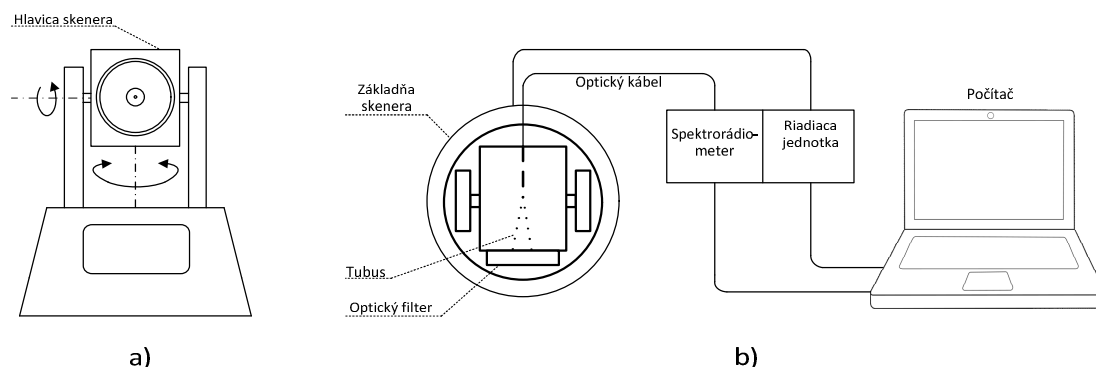
$$S(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (2.6)$$

Skalárne multiplikátory M_1 a M_2 sú určené z nameraných hodnôt ožiareností. Náhradnú teplotu chromatickosti z farebných súradníc x, y sa odporúča vypočítať z trichromatických členiteľov $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$, ktorého výsledkom je výpočet komponentov trichromatických zložiek a platí

$$X = K_m \int S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda = X_0 + M_1 X_1 + M_2 X_2 \quad (2.7)$$

3 Zariadenie na meranie oblohových typov podľa ISO 15469:2004 / CIE S 011:2003

Navrhnutý a skonštruovaný skener na základe rozloženia jasov elementov je zložený z trojdimenzionálneho rotačného systému, CCD spektorradiometra, optického tubusu, optických filtrov a počítača. Skener sa skladá z rotačného systému s dvojicou krokových motorov riadených DMX signálom, prvý je umiestnený v základni skenera a druhý v rotujúcej hlavici. Presnosť motorov je $0,3^\circ$ počas 500 hodín používania. Krokové motory zabezpečujú pohyb po almukantarátoch a azimutoch. Základňa skenera umožňuje rotáciu okolo osi z. Hlavica sa pohybuje v osiach x a y, obr. 3.1 a). Hlavica je osadená optickým systémom zloženým z dvojice optických filtrov v závislosti na veľkosti vstupného žiarenia, tubusom a optickým káblom spektorradiometra. Filtre osadené na tubuse zabraňujú presýteniu CCD čipu snímaným žiarením. Boli použité šedé filtre s integrálnou priepustnosťou 13,82 % a 31,42 %, kde pri vyhodnotení sa aplikovala spektrálna priestupnosť. Tubus s presnými rozmermi je umiestnený za filtermi a je vybavený clonami proti vnútorným viacnásobným odrazom, pričom zorný uhol snímača predstavuje 11° . Žiarenie dopadajúce na snímač je prenášané optickým vláknom do spektorradiometra Ocean Optics USB2000, 3.1 b). Spektorradiometer má snímaciu schopnosť od 175 nm do 850 nm, s krokom $\sim 0,4$ nm. Rozmery samotnej základne prístroja sú 17,5 x 16,6 x 22,7 cm. Pre ovládanie skenera a synchronizáciu merania spektorradiometrom bolo vyvinuté softvérové rozhranie, ktorého výsledkom sú spektrálne ožiarenosti jednotlivých elementov.



Obr. 3.1 a) Náčrt pohybu hlavy skenera. b) Schématické zapojenie oblohového skenera.

Dvojica zmeraných zenitných jasov má za úlohu sledovať dynamiku oblohového systému. Pri vyhodnotení meraných dát a zistení značeného rozdielu hodnoty jasov v elemente zenitu je oblohový typ vylúčený z hodnotenia aj v závislosti na očakávanom oblohovom type. Parameter zenitného jasov je dôležitý pre oblohové typy III.2 až IV.3, ktorými sú oblačné situácie, pri ktorých bola stanovená maximálna možná zmena zenitného jasov o 50 %. Pre zostávajúce typy obláh bola zvolená maximálna prípustná zmena parametra zenitného jasov o 20 % [8]. Prístroj sa testoval meraniami v rôznorodých teplotných podmienkach a bol

kalibrovaný štandardizovanými metódami [9][10][11][12].

4 Spektrálne charakteristiky oblohových typov

Spektrálne charakteristiky štandardných oblôh, ktoré sú predmetom normy ISO 15469:2004 / CIE S 011 / E:2003 v súčasnosti nie sú definované. Definované spektrálne charakteristiky denného svetla matematickým modelom CIE sú štandardizované v kolorimetrii. Predpokladá sa previazanie niektorých typov oblôh s ISO 15469:2004 / CIE S 011 / E:2003. V súčasnosti známe prepojenie noriem predstavuje rovnomerne zamračená obloha, ktorej označenie v kolorimetrii je D65 a pre jasové rozloženie je označenie I.1. Rovnomerne zamračená obloha má povahu tzv. priemerného denného svetla, kedy priame žiarenie je potlačené, a prevláda difúzne žiarenie celej hemisféry. Farebná škála typu oblohy I.1 zodpovedá práve zdroju denného svetla D65. Oblohové typy doteraz neboli parametrizované z pohľadu spektrálnych vlastností.

Výsledkom určenia oblohového typu štandardizovaným spôsobom je rozloženie spektrálnej žiari elementov na oblohovej hemisfére. Spracovaním vzťahom (2.5) pre spektrálne ožiarenosti je získaná konečná horizontálna ožiarenosť pre meraný oblohový typ. Výpočet zaručuje prejav veľkosti hodnoty spektra do výsledného tvaru spektrálneho zloženia. Merané spektrálne zloženia sú normované na vlnovej dĺžke 560 nm. Tvar spektrálneho zloženia meraného spektrom s vysokým rozlíšením je nespojitý. Dostatočnú presnosť výsledných kriviek je možné interpolovať metódou kubických splajnov. Uvádzané oblohové typy sú vybrané na základe najvyššej miery tesnosti R^2 s definovanými oblohovými typmi. Výber oblôh na základe distribúcie jasov zohľadňuje aj homogenitu hemisféry, t.j. rozloženie jasov pozdĺž solárneho meridiánu pre ľavú a pravú stranu musí byť približne rovnaké, tak aby indikatrixová a gradačná funkcia dosahovali porovnateľné priebehy.

Oblohové typy I.1 až III.1 sú charakteristické pre oblohové typy bez priameho slnečného žiarenia. Vyhodnotená data indikujú prevládanie vlnových dĺžok v oblasti 300 až 500 nm.

Oblohové typy III.2 až IV.3 reprezentujú situácie s rôznym pokrytím oblakov rôzneho druhu, pričom slnečné svetlo môže byť rôzne zoslabované. Túto skupinu je z hľadiska spektrálnej charakteristiky ťažko vyhodnotiť. Vlastnosti hemisféry spoločne s dynamickými zmenami oblohových typov v nej vytvárajú rôzne variácie spektier. Priebehy naznačujú veľkú premenlivosť možných spektier tejto skupiny oblôh. Pre komplexnejšie vyhodnotenie tejto skupiny oblôh, by boli potrebné stovky meraní, čo vyžaduje vytvoriť podmienky pre dlhodobý systematický výskum.

Oblohové typy IV.4 až VI.6 sú v maximálnej možnej miere ovplyvnené priamym slnečným žiarením. Veľkosť hodnoty slnečného žiarenia sa prejavuje v spektrálnych pásmach 500 nm a vyššie a prichádza k navýšeniu spektrálnych hodnôt v IR oblasti.

Všeobecné delenie typov oblôh na základe pozorovaní spektrálneho zloženia je popísané v tab. 4.1. Spektrálne zloženie je určené podielom difúznej a priamej zložky slnečného žiarenia, pričom môžu nastať špecifické spektrá, ktoré všeobecnému rozdeleniu podľa tab. 4.1, nemusia vyhovovať.

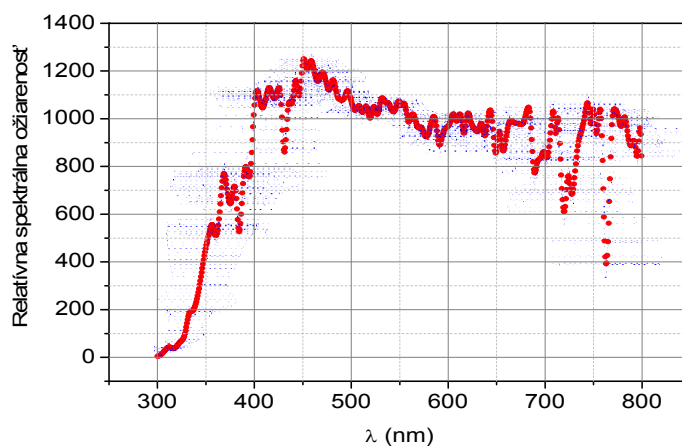
Časová rôznorodosť pri uskutočnených meraniach z pohľadu jasovej variácie oblohového typu sa značne prejavuje v indikatrixových a gradačných funkciách. Zavedenie predpokladu minimálnej výšky Slnka na hemisfére $\gamma_s \geq 6^\circ$, túto chybu čiastočne odstraňuje. Priemerné spektrálne zloženie oblohových typov je určené aritmetickým priemerom hodnôt spektrálnej ožiarenosti prislúchajúcim vlnovým dĺžkam. Závislosť je interpretovaná na obr. 4.1. Priemerná spektrálna distribúcia hodnotených oblohových typov má charakteristický tvar, ktorý v oblasti vlnových dĺžok 400 nm až 500 nm má zvýšenú hodnotu spektra, čo je prejavom priameho slnečného žiarenia. Tento tvar spektrálnej charakteristiky je typický pre globálne vyjadrenie, kde sa uplatňujú všetky elementy hemisféry svojou hodnotou energie žiarenia. Meraný oblohový typ je charakterizovaný gradačnými a indikatrixovými koeficientmi, ktoré sú priradené jednotlivým typom oblôh. Tvar spektrálnej charakteristiky s rozlíšiteľnosťou 1 nm sa využíva iba v náročných aplikáciách. Štandardný interval kroku udávania spektrálnej krivky je 5 nm, tento krok zabezpečuje postačujúcu presnosť. Spektrálne

charakteristiky zložením zo 145 elementárnych plôch nadobúdajú spektrálne pásma, ktorých tvar nie je v zhode s predpokladanými spektrálnymi zloženiami rôznych predpisov a noriem.

Tab. 4.1 Pozorované spektrálne zloženia oblohových typov.

Typ oblohy	Rozsah vlnových dĺžok (nm)	Popis
I.1 – III.1	300 - 500	Oblohy s prevažujúcou časťou v oblasti 300 až 500 nm, ktorá je dôsledkom difúzneho rozloženia slnečného žiarenia na hemisfére. Obloha je biela až sivá.
III.2 – IV.3	a) 300 – 500 b) 500 – 800	Oblohy s variabilným spektrom. a) Ak je odfiltrované priame žiarenie prevláda difúzna časť. b) Ak je Slnko len sčasti odfiltrované môže prevážiť priame slnečné žiarenie. Obloha je modrá s bielymi až sivými oblakmi.
IV.4 – VI.6	300 – 800	Oblohy, ktoré sú závislé na jase oblasti Slnka, štandardne má spektrum vyrovnané hodnoty vlnových dĺžok. V prípade nízkeho jasu oblasti Slnka, sa prejaví difúzne žiarenie a prevláda oblasť 300 – 500 nm, ktoré spôsobuje modrá časť oblohy.

Hodnota analyzovaných elementov sa prejavuje v týchto atypických spektrálnych pásmach spektrálneho zloženia, čo je dôsledkom skladania 145 spektier do výsledného spektrálneho zloženia.



Obr. 4.1 Priemerná krivka spektrálneho zloženia oblohových typov.

Indikatrixová a gradačná funkcia pri hodnotení oblohového typu predstavujú kvalitatívny kontrolný systém. Funkcie sú jasne matematicky formulované, tak že dostatočne prezentujú oblohový typ. Celkovo je možné týmito funkciami opísať prakticky nespočetné množstvo oblôh. Norma ISO 15469:2004 / CIE S 011 / E:2003 poskytuje parametre pre 36 typov oblôh. Kombináciou indikatrixovej a gradačnej funkcie uvedených v norme, môžeme získať oblohový typ, ktorý nie je normatívne zavedený. Predmetom výskumu sú len štandardizované oblohové typy.

5 Kolorimetria oblohových typov

Súčasný model kolorimetrie [13] využíva modely spektrálneho zloženia zdrojov A, B, C, D a E. Zdroje D reprezentujú denné svetlo, ktoré vyjadruje globálnu spektrálnu distribúciu slnečného žiarenia a oblohovej hemisféry. Spektrálne distribúcie oblohových typov môžu

zahŕňať aj priame žiarenie. Spektrálne distribúcie pre zdroje denného svetla sú dnes reprezentované zamračenou, priemernou a jasnou oblohou. Tieto tri štandardné oblohy sú zahrnuté aj v jasových distribúciách hemisfér, zostávajúce oblohy doteraz neboli parametrizované z pohľadu kolorimetrických vlastností.

5.1 Náhradná teplota chromatickosti oblohového typu na základe klasifikačného kritéria L_z / D_v

Ak sa zavedie predpoklad, že matematický model CIE zdrojov denného svetla platí na oblohové typy, potom výpočtom určené náhradné teploty chromatickosti T_{cp} sú platné. Ukazuje sa, že pätnásť typov oblôh je možné sústrediť do troch základných skupín: zamračené oblohy, jasné oblohy a oblohy s výskytom oblakov.

Skupiny oblohových typov sa môžu v určitých prípadoch zastrešiť jednou hodnotou náhradnej teploty chromatickosti. Skupina oblôh pokrytých oblakmi je v tomto prípade navrhnutá ako skupina odpovedajúca zdroju denného svetla D50, pričom pri reálnych meraniach, môžu byť hodnoty T_{cp} v rozsahu D50 až D75, teda môžu pokryť celú kolorimetrickú škálu. Využitie matematického aparátu modelu CIE je možné pre okamžitú ideálnu interpretáciu spektrálnej charakteristiky typu oblohy na základe klasifikačného kritéria L_z / D_v .

5.2 Spektrálne pásma indikatrixovej a gradačnej funkcie oblohového typu

Úpravou vzťahu [3] je možné pre spektroradiometrické meranie vyjadriť vzťah rozptylovej funkcie $f(\chi)$, potom platí

$$f(\chi, \lambda) = 1 + c(\lambda) \left[\exp(d(\lambda)\chi) - \exp\left(d(\lambda)\frac{\pi}{2}\right) \right] + e(\lambda) \cdot \cos^2\chi \quad (5.1)$$

Analogicky vzťah gradačnej funkcie s koeficientami a , b možno vyjadriť ako spektrálne závislú funkciu

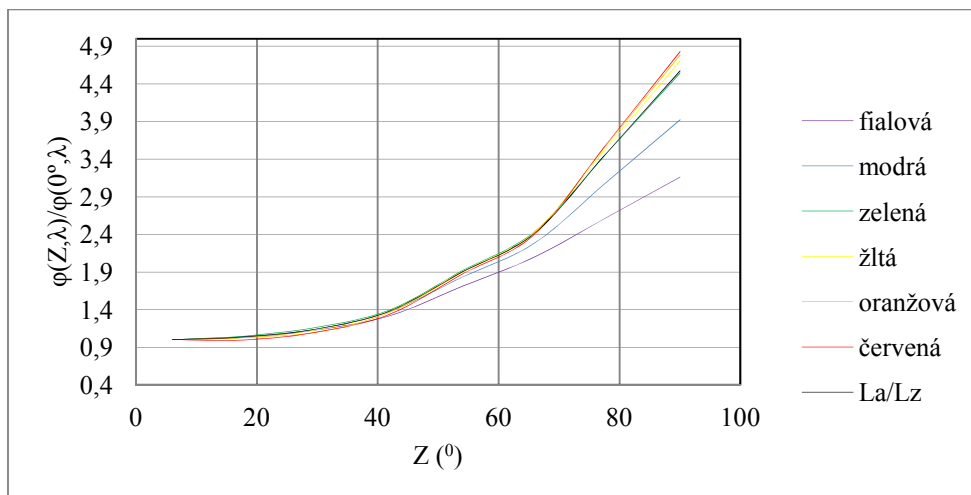
$$\varphi(Z, \lambda) = 1 + a(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{b(\lambda)}{\cos Z}\right) \quad (5.2)$$

Koeficienty $a(\lambda)$, $b(\lambda)$, $c(\lambda)$, $d(\lambda)$, $e(\lambda)$ sa stávajú spektrálne závislé pre vybraný interval vlnových dĺžok. Spektrálne gradačné a indikatrixové funkcie pre konkrétny interval vlnových dĺžok sú určované od zenitného uhla a slnečného almukantarátu. Pomer L_a / L_z je štandardným vyjadrením priebehu jasov gradačnej a indikatrixovej funkcie oblohového typu. Uvedená funkcia L_a / L_z indikuje matematický výpočet oblohového typu na základe ISO štandardu ako je to zobrazené na vybraných priebehoch obr. 5.1 a obr. 5.2. Originálne krivky pomeru jasov elementu a elementu zenitu L_a / L_z sú definované vo fotometrických veličinách, preto daná krivka sa vždy priradila do priemernej funkcie všetkých spektrálne vyjadrených indikatrixových, príp. gradačných priebehov. Spektrálny rozklad indikatrixovej a gradačnej funkcie neboli pre súčasne platné oblohové typy doposiaľ skúmané.

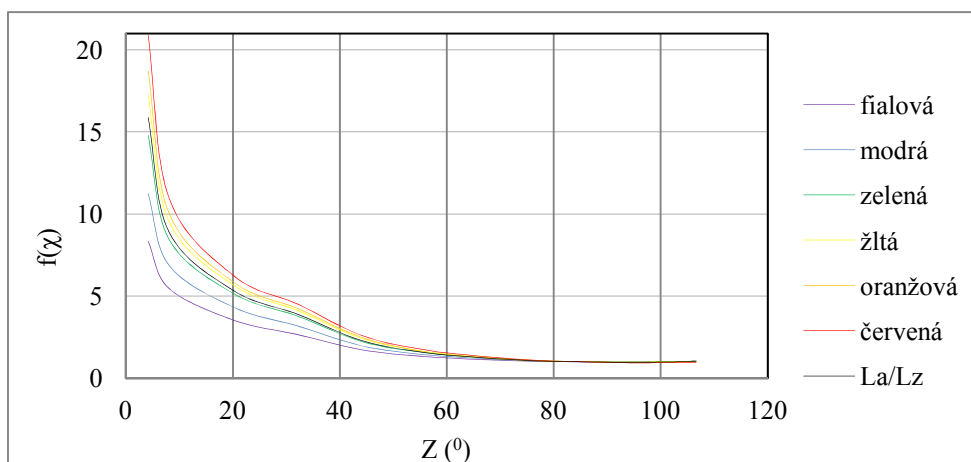
Funkcia gradácie spektrálnych intervalov skúmaných vlnových dĺžok, obr. 5.1 je kolmo rozložená na solárny meridián. Dochádza k opačnému prípadu ako v prípade spektrálnych funkcií indikatrixy. V mieste zenitného uhla 90° sú spektrálne krivky intervalov jednotné a s rastúcou vzdialenosťou od zenitu k horizontu dochádza k rozchodu kriviek jednotlivých intervalov vlnových dĺžok. Špecifickým prípadom je obloha, ktorá ak je zamračená, tak Slnko nemá absolútne žiadny vplyv na vyžiarené spektrálne zloženie difúznej oblohy. Difúzna obloha sa správa ako rovnomerne žiariaci objekt s určitou gradáciou jasov na hemisfére. Rozchod kriviek spektrálnych intervalov gradačnej funkcie je minimálny a v určitých gradačných stupňoch dosahuje modrý a fialový interval spektra gradačnej funkcie vyššiu žiarivú energiu ako energia zostávajúcej časti spektra.

Prítomnosť priameho slnečného žiarenia má dopad na určenie spektrálnej funkcie indikatrixy a gradácie, pričom sa prejavuje hlavne pri vlnových dĺžkach vyšších ako 500 nm. Zamračená obloha má rozptyl spektrálnych pásiem pri rôznych χ a Z minimálny. Rozdelenie vlnových

dĺžok na jednotlivé spektrálne pásma farieb naznačuje rôznu povahu vyžarovania danej skupiny oblôh, obr. 5.1 a obr. 5.2. So získaným dostatočne reprezentatívnym súborom dát by sa dali parametrizovať rozdiely energetických pásiem časti viditeľného spektra.



Obr. 5.1 Spektrálna gradačná funkcia slnečnej oblohy, 04.04.2012.



Obr. 5.2 Spektrálna indikatrixová funkcia slnečnej oblohy, 04.04.2012.

5.3 Trichromatické súradnice oblohových typov

V prípade meraných oblôh I.1 až VI.6 bola nameraná celá škála farieb. Majoritná časť meraných elementov leží alebo obklopuje krivku denného svetla podľa dokumentu CIE [13]. Snímaním v elementoch celej hemisféry sa môže študovať a zistiť podstata vyžarovania hemisféry v jej jednotlivých častiach.

Spektrálnym meraním difúzneho systému oblohového žiarenia hemisféry v kombinácii s priamym žiarením dochádza k meraniu rôznych variácií trichromatických súradníc. Tieto variácie sú vytvárané javmi refrakcie, lomu svetla a prechodu svetla atmosférou na oblohu. Farebné súradnice denného svetla zloženého z meraní rozloženia jasov oblohových typov spĺňajú podmienky definície pre denné svetlo. Zloženie oblohových typov bola uskutočnené pre 89 oblôh, pričom každý oblohový typ sa skladá zo 145 elementov.

5.4 Náhradná teplota chromatickosti elementov oblohových typov

Rozloženie jasov oblohových typov elementárnym vyjadrením pre zamračené oblohy vykazujú hodnoty náhradnej teploty chromatickosti nad 150 MK^{-1} . Početnosť výskytu náhradnej teploty chromatickosti v elementoch je prezentovaná majoritnými hladinami

chromatickosti v rozmedzí 5000 K - 6000 K, alebo $160 \text{ MK}^{-1} - 200 \text{ MK}^{-1}$.

Prechod od situácii bez priameho slnečného žiarenia k slnečným situáciám, t.j. s priamym slnečným žiarením je reprezentovaný zmenou náhradnej teploty chromatickosti od 250 MK^{-1} k hodnotám 50 MK^{-1} , čo predstavuje rozsah 4000 K až 20000 K. Hodnota náhradnej teploty chromatickosti pri oblohovom type je priamo závislá na jase oblohy.

5.5 Vzťah distribúcie jasu a teploty chromatickosti oblohových typov

Pri študovaní vzťahu reprezentatívnych veličín jasu L a náhradnej teploty chromatickosti T_{cp} možno vychádzať z odporúčaní kolorimetrie a oblohových typov [14]. Pre komplexný popis oblohových typov možno použiť alometrickú funkciu

$$T_{cp} = p \cdot L^q \quad (5.3)$$

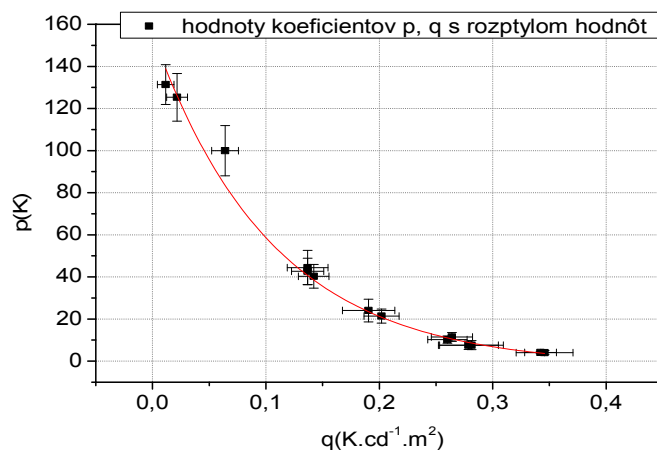
Jej úpravou dostaneme výsledný tvar

$$\ln T_{cp} = q \cdot \ln L + \ln p \quad (5.4)$$

kde p (K), q ($\text{K} \cdot \text{cd}^{-1} \cdot \text{m}^2$) sú koeficienty charakterizujúce náhradnú teplotu chromatickosti T_{cp} (K) oblohy a jasu L ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$). Zistilo sa, že medzi koeficientami p a q existuje exponenciálna závislosť ako je dokázané, obr. 5.3 [15]. Túto závislosť je možné opísať rovnicou

$$p = p_0 + p_{str} \cdot e^{-\frac{q}{t}} \quad (5.5)$$

kde po aproximácii hodnôt koeficientov p , q je hodnota determinácie $R^2 = 98,871 \%$.



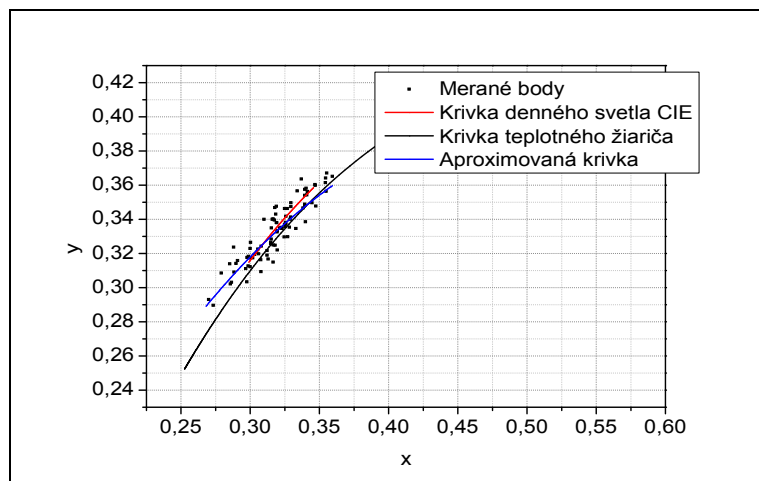
Obr. 5.3 Exponenciálna závislosť koeficientov p , q .

Parameter p_{str} predstavuje strednú hodnotu náhradnej teploty chromatickosti, pričom jeho hodnota sa môže v závislosti od lokality merania a stavu atmosféry pre oblohové typy líšiť. Tvar krivky by sa od lokality meniť nemal, a merania vykonané v iných lokalitách by mali spresniť hranice rozptylu hodnôt. Fyzikálny základ krivky, obr. 5.3, je v absorpcii svetla, ktorej tvar je exponenciálny pri prechode atmosférou definovanou podľa [1]. Priamy vzťah medzi koeficientmi p a q znázorňuje závislosť oblohových typov nadobúdajúcich vyššie hodnoty chromatickosti pri situáciách s priamym slnečným žiarením.

5.6 Krivka denného svetla na základe kolorimetrických parametrov oblohových typov

Oblohové typy rozloženia jasov sú nepriamo prepojené s definovanou kolorimetriou denného svetla. Zo súčasného štandardu rozloženia jasov oblohových typov sa neoverovali hodnoty funkcie denného svetla.

Uvedené dáta sú spracované dvoma spôsobmi: zložením spektrálnych ožiareností do výslednej celkovej ožiarenosti a pre elementárne vyjadrenie všetkých testovaných oblohových typov.



Obr. 5.4 Krivka denného svetla oblohových typov

Publikované analýzy od rôznych autorov preukázali nedokonalosť matematickej metódy vyjadrenia krivky denného svetla podľa CIE, nakoľko táto tvorí dokonalú paralelu s krivkou plankovského žiariča. V reálnom prostredí a pri reálnych meraniach slnečného žiarenia – globálneho, difúzneho, priameho sa farebné súradnice nemusia vždy nachádzať na krivke denného svetla. Pôvodné experimentálne merania pre vyjadrenie krivky denného svetla autori urobili merania rôznymi spôsobmi: meraním priameho slnečného žiarenia, meraním difúzných častí hemisféry a meraním difúzneho oblohového svetla. Týmito spôsobmi boli zachytené možné stavy denného svetla a tie boli následne analyzované metódou hlavných komponentov (PCA). Riešením 89 oblohových typov sa získala kvadratická rovnica s tvarom

$$y = 2.166x - 2.220x^2 - 0,132 \quad (5.6)$$

s $R^2 = 76,78$ %. Zistená krivka zo súboru meraných dát má iný tvar ako ideálna krivka denného svetla, obr. 5.4. Uvedené merané oblohy predstavujú reálne svetelné stavy hemisféry a neobsahujú idealizované parametre, ktoré by výsledné hodnoty mohli skresliť.

Matematický zápis polynomiálnej rovnice, ktorá popisuje všetky elementy hemisféry je vyjadrená

$$y = 2,401x - 2.576x^2 - 0,166 \quad (5.7)$$

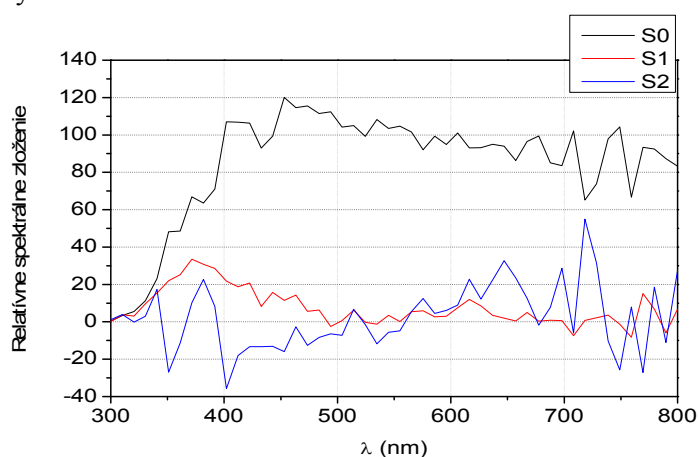
a zachytáva 12 905 elementov s $R^2 = 86,56$ %. Elementárny popis hemisféry vystihuje diverzitu farby na hemisfére z pohľadu kolorimetrie. Porovnaním oboch rovníc denného svetla sa potvrdzuje, že stavy v atmosfére sú variabilné a predikcia opisom jednej rovnice predstavuje idealizovanú predstavu o dennom svetle v diagrame farebných súradníc.

Z výsledkov sa identifikovali tri oblasti výskytu meraných bodov. V poli farebných súradníc $x \leq 0,28$ a $y \leq 0,31$ predstavujú merané body zreteľné denné priebehy, ktoré splývajú do druhej oblasti výskytu bodov. Druhá oblasť sleduje trend krivky denného svetla. Tretia oblasť meraných bodov je charakterizovaná intervalom $0,33 \leq x \leq 0,36$ a $0,28 \leq y \leq 0,35$ tvorená meraniami mimo rozsah krivky denného svetla. V diagrame farebných súradníc táto oblasť prislúcha prechodu žltej farby na červenú.

5.7 Matematický model kolorimetrie denného svetla

Matematický model denného svetla, ktorého základom je náhradná teplota chromatickosti využíva metódu analýzy hlavných komponentov (PCA). Pri verifikácii tohto modelu sa použilo štrnásť reprezentatívnych spektrálnych oblohových typov, ktoré boli zmerané a u ktorých bolo vyhodnotené rozloženie oblohových jasov. Vzťah pre spektrálne zloženie denného svetla z teploty chromatickosti nebol overený pre oblohové typy.

Vyjadrené rovnice spĺňajú pôvodné kritéria autorov pre určenie spektrálneho zloženia denného svetla a to dosiahnuť tvar krivky denného svetla, obr. 5.5, ktorá svojim opisom zachytí maximálne množstvo variácií meraných dát. Rovnica je matematicky formulovaná tak, aby sa dosadením farebných súradníc x, y spektrálne zloženie denného svetla menilo v idealizovanej predstave, t.j. prichádzalo k preskupovaniu spektrálnych pásiem na základe dosadenej teploty chromatickosti vo vzťahu.



Obr. 5.5 Modelované komponenty denného svetla S_0 , S_1 a S_2 .

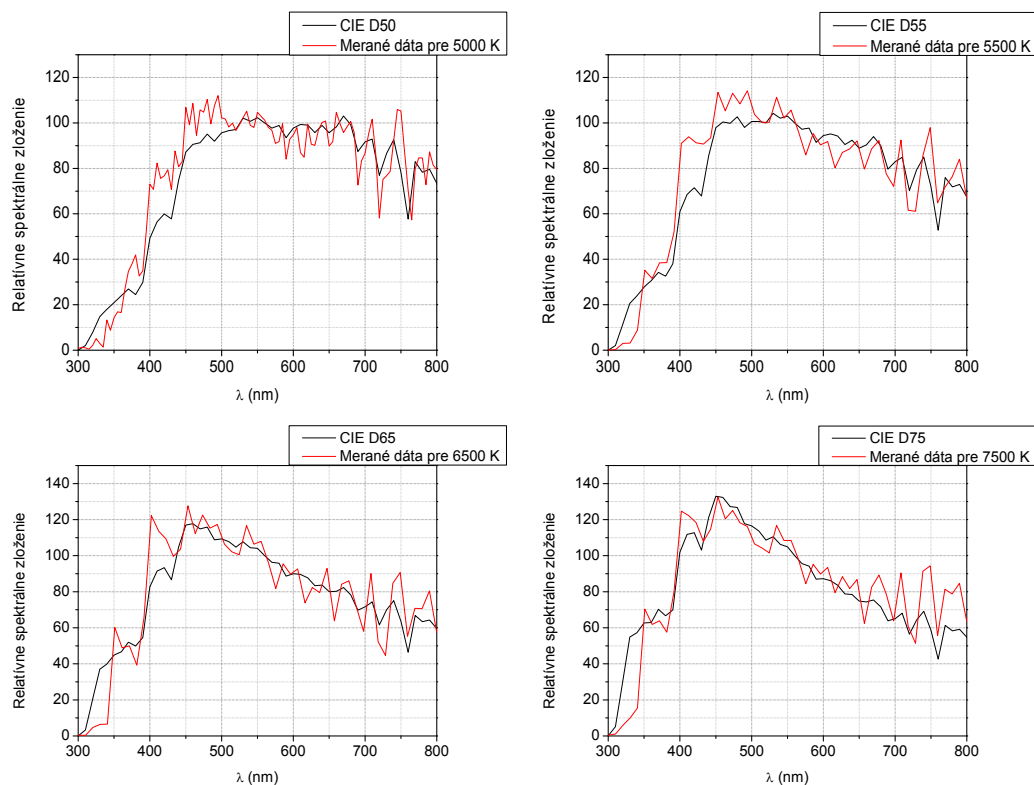
Komponent denného svetla S_0 predstavuje priemernú hodnotu spektrálneho zloženia určenú priemerom hodnôt spektrálneho priebehu pri všetkých vlnových dĺžkach. S_1 a S_2 sú práve komponenty, ktorých úlohou je pri zložení denného svetla, metódou PCA, určiť povahu spektrálneho zloženia.

Matematický model CIE je postavený na normalizácii na vlnovej dĺžke 560 nm [16]. Pre hodnoty náhradnej teploty chromatickosti nižších ako 6 000 K má prevládajúcu časť v oblasti vyšších vlnových dĺžok viac ako 560 nm. Pre hodnoty náhradnej teploty chromatickosti 6 000 K a viac, prevláda časť spektrálnych hodnôt pri vlnových dĺžkach nižších ako 560 nm. Prichádza k preskupovaniu energie žiarenia spektrálneho priebehu do UV, príp. IR oblasti vlnových dĺžok. Priebeh komponentu S_2 predstavuje nespojitú krivku danú snímaním spektrálnych charakteristík s vysokou rozlíšiteľnosťou pri meraní.

Matematický model CIE denného svetla je reverzným vzťahom, ktorý na základe náhradnej teploty chromatickosti umožňuje určiť farebné súradnice a spektrálnu krivku denného svetla.

Spektrálne charakteristiky denného svetla zdrojov CIE D50, D55, D65 a D75 sú interpolované s krokom 5 nm. Matematický model CIE pre zdroje denného svetla obsahuje idealizované priebehy spektra, ktoré ukazujú iba najzákladnejšie absorpčné pásma v atmosfére [17]. Rozdiel medzi modelom a reálnymi krivkami v rozsahu vlnových dĺžok 300 až 330 nm je spôsobený doplnením dát pôvodnými autormi z meraní v UV oblasti.

Verifikovaním priebehov pre štandardizované zdroje denného svetla podľa CIE: D50, D55, D65 a D75, sa preukázala použiteľnosť meraných spektrálnych priebehov v kolorimetrii denného svetla, obr. 5.6. Spektrálne priebehy sú výsledkom reprezentatívnych meraných oblohových typov podľa ISO 15469:2004 / CIE S 011 / E:2003, ktorých výsledkom je vytvorená kolorimetrická sada oblohových typov.



Obr. 5.6 Verifikácia meraného súboru dát.

6 Aplikačné využitie spektrálnych zložení oblohových typov

V práci popisované meranie a hodnotenie spektrálnych charakteristík štandardných oblôh vychádza zo skúmania rozloženia a vlastností oblohových elementov. V tejto kapitole je uvedených niekoľko praktických príkladov využitia výsledkov dizertačnej práce, ako využitie pre naklonené roviny pre oblasť fotovoltaických panelov, pre energetickú bilanciu budov, a výskum v oblasti spektrálnej povahy svetelného prostredia vo vnútorných priestoroch budov za použitia osvetlenia denného svetla.

6.1 Difúzne vlastnosti oblohových typov pre naklonené roviny

Meraním spektrálnych charakteristík oblohových typov je možné súborom dát vyhodnotiť radiometrické veličiny pre daný stav oblohy. Systém štandardných oblôh je využiteľný pre hodnotenie ožiarenosti a osvetlenosti na horizontálnej, vertikálnej a naklonenej rovine [18][19]. Výhodou oblohových typov je práca s okamžitou hodnotou osvetlenosti, príp. ožiarenosti, oproti štandardným priemerným hodinovým a týždenným priebehom získaných zo štatistických dát. Difúzne žiarenie je v oblasti fotovoltaických aplikácií dôležitým energetickým faktorom, keďže priame slnečné žiarenie nie je vždy prítomné. Model CIE všeobecných štandardných oblôh umožňuje vypočítať homogénne rozloženie jasov. Pri vyhodnotení oblohového typu v reálnych podmienkach treba počítať s nehomogenitou na obidvoch poloviciach hemisféry. Gradačná a indikatrixová funkcia v tomto prípade nie sú symetrické pozdĺž slnečného meridiánu. Reálnejšie podmienky je možné modelovať rozdelením hemisféry na polovice, kde každá bude mať vlastnú gradačnú $\varphi_1(Z, \lambda)$, $\varphi_2(Z, \lambda)$, a indikatrixovú funkciu $f_1(\chi, \lambda) / f_1(Z_S, \lambda)$, $f_2(\chi, \lambda) / f_2(Z_S, \lambda)$. Platí [20]

$$D_e = \int_0^{\pi/2} \left(\int_{\alpha_S}^{\alpha_S+\pi} L_{e,1}(\alpha, Z) d\alpha + \int_{\alpha_S}^{\alpha_S-\pi} L_{e,2}(\alpha, Z) d\alpha \right) \cos Z \sin Z dZ \quad (6.1)$$

Vo fotovoltaických aplikáciách sa navrhujú naklonené plochy smerujúce spravidla na juh. Difúzna časť ožiarenosti na naklonenej rovine s uhlom sklonu i , pričom Z_1 a Z_2 sú zenitné uhly dvoch vybraných svetelných lúčov, je možné vyjadriť nasledovne

$$D_e = \int_0^{\pi/2} \left(\int_{\pi/2}^{\alpha_S} L_{e,1}(\alpha, Z) d\alpha + \int_{\alpha_S}^{3\pi/2} L_{e,2}(\alpha, Z) d\alpha \right) \cos k \sin Z dZ \\ + \int_0^{\frac{\pi}{2}-i} \left(\int_{3\pi/2}^{\alpha_S+\pi} L_{e,2}(\alpha, Z) d\alpha + \int_{\alpha_S+\pi}^{\pi/2} L_{e,1}(\alpha, Z) d\alpha \right) \cos k \sin Z dZ \quad (6.2)$$

Zvyšovaním uhla dopadu na rovinu difúzna ožiarenosť klesá v prípade zamračenej oblohy, v dôsledku znižovania viditeľnej časti hemisféry, ktorá ožaruje rovinu. Pri čiastočne oblačných situáciách, kedy je Slnko tienené oblakom nenastáva značný nárast ožiarenosti ako pri zamračených. Ak nastane situácia na hemisfére so zvýšeným jasom v mieste Slnka, dochádza k rapidnému nárastu ožiarenosti pri prechode cez uhly pozície Slnka. V prípade jasných oblôh difúzne ožiarenosti sú závislé od pozície Slnka. Pričom smerom k zenitu hodnoty ožiarenosti klesajú.

6.2 Jednoduchý model spektrálneho zloženia vo vnútorných priestoroch

V minulosti bol navrhnutý zjednodušený matematický model, ktorý uvádza riešenie výpočtu denného svetla z oblohových typov, vzťah (6.3) [21][22], zahŕňa dve zložky a to oblohovú a interiérovú. Oblohová zložka v tomto vzťahu je selektívne reprezentovaná ako priama zložka a interiérová zložka je určená odrazivosťami plôch dopadu svetla cez prestupovú plochu do interiéru, okrem priamych lúčov. Výpočet je rozšírený na spektrálny prenos energie v pásme vlnových dĺžok 380 až 780 nm. Model šírenia spektrálneho zloženia v interiéri má potom tvar

$$E_i(\lambda) A_i = \sum_{f=1}^m \tau(\lambda) L(\lambda) (\alpha, \varphi) A_o^2 \cos(\theta_i) \cdot \cos(\theta_f) + \sum_{j=1}^{m+n} E_j(\lambda) \rho_j(\lambda) A_j^2 \cos(\theta_i) \cdot \cos(\theta_f) \quad (6.3)$$

kde $E_i(\lambda)$ predstavuje váženú spektrálnu osvetlenosť na ploche A_i . Prvou časťou rovnice sa modeluje zložka denného svetla vstupujúca do interiéru, druhou časťou sa počíta príspevok odrazeného svetla od plôch, povrchov a zasklenia okna. Pre priestup svetla okenným systémom sa volí pre jednoduchosť výpočtu difúzny prestup.

Oblohová zložka je tvorená jasmí elementov oblohy, pričom element oblohy je považovaný za homogénny bodový zdroj žiarenia, ktorý v prislúchajúcom priestorovom uhle dopadá na hodnotenú plochu. Oblohové svetlo prechádza okenným systémom so známym spektrálnym činiteľom priepustnosti svetla, ktorého časť plochy A_f je práve vymedzená priestorovým uhlom elementu. Súčtom elementárných hodnôt vznikne celkové oblohové žiarenie. Elementy, ktoré prispievajú do oblohovej zložky sú ohraničené obvodom okenného otvoru. Elementy nachádzajúce sa mimo priestorového uhla okna sa zanedbávajú. Nepriama zložka sa určuje z príspevku dopadajúcich svetelných lúčov do hodnoteného priestoru. Elementy, ktorých uhol dopadu na hodnotenú rovinu je približne 180° , sa môžu zanedbať. Výpočet nepriamej zložky zohľadňuje plochy, na ktoré dopadá oblohové svetlo a ktoré elementy sú schopné osvetliť a tým ovplyvniť výslednú úroveň osvetlenosti na uvažovanej ploche. Element pre nepriamu zložku je považovaný za lambertovský zdroj žiarenia. V závislosti od presnosti výpočtu sa volí počet spektrálnych odrazov od povrchov hodnoteného priestoru. Ožiarené plochy jednotlivými oblohovými elementmi sa považujú rovnako za lambertovské zdroje žiarenia na celej ploche.

Model je možné využívať pre výpočet osvetlenosti horizontálnych, vertikálnych a naklonených rovín v interiéri s porovnateľnými výsledkami ako v komerčných softvéroch.

Záver

Práca sa zameriava na jeden z najzákladnejších prirodzených svetelných zdrojov, slnečné žiarenie. V práci sú zhrnuté teoretické poznatky o slnečnom žiarení, spektrálnej charakteristike, modeloch slnečného žiarenia a oblohových typoch.

Hlavnou podstatou práce bolo vytvorenie metodického postupu na základe súčasných poznatkov pre vyjadrenie spektrálnej charakteristiky z oblohového typu vyjadreného za pomoci elementov na hemisfére. Výberom reprezentatívnych rekonštruovaných oblohových typov boli prezentované spektrálne charakteristiky. Z výsledkov meraní boli vyjadrené hlavné kolorimetrické parametre – náhradná teplota chromatickosti a farebné súradnice.

Sledované kolorimetrické parametre boli porovnané s rovnicou denného svetla pre rekonštruované spektrálne zloženie ako globálne, tak i elementárne. V súvislosti so škálou jasového rozloženia na hemisfére, je zavedený matematický opis vzťahu jas a náhradnej teploty chromatickosti.

Uvedené sú spektrálne závislosti indikatrixových a gradačných funkcií, ktorými sú určované oblohové typy. Spektrálne rozložené distribúcie naznačujú závislosť obsahu jednotlivých spektrálnych intervalov od typu oblohy a prítomnosti slnka.

Merania s vysokým rozlíšením vlnových dĺžok sú schopné odstrániť nedostatky nepresnosti súčasného matematického modelu, ktorý je interpolovaný pre väčší interval vlnových dĺžok.

Hodnotením sa preukázalo, že idealizácia vlnových dĺžok je pre vyjadrenia s vysokým rozlíšením najväčším nedostatkom. Amplitúdový rozptyl hodnôt pri vlnových dĺžkach spektrálnych komponentov denného svetla je nespojitý a dochádza k ovplyvňovaniu multiplikátorov denného svetla. Nežiaduci výsledok sa dostaví vo forme funkcie samotného spektrálneho zloženia pri určení z reverzného vzťahu náhradnej teploty chromatickosti.

Oblohové typy sa využívajú najmä pri práci s denným svetlom, ale ich aplikačné využitie je vo väčšej oblasti rôznych technických smerov.

Prínos práce a výsledky

Práca prezentuje nové poznatky a vedomosti z oblasti merania a hodnotenia spektrálnych charakteristík slnečného žiarenia a kolorimetrie denného svetla. Prínosy autora dizertačnej práce spočívajú:

- vo vytvorení algoritmu merania a hodnotenia spektrálneho zloženia ISO 15469:2004 / CIE S 011 / E:2003 všeobecných štandardných oblôh zohľadňujúci základy teórie oblohových typov a kolorimetrie, algoritmus špecifikuje spôsob zloženia spektrálnej charakteristiky z dát jasového rozloženia oblohových typov,
- vo vyjadrení meraním zistených a matematicky odvodených spektrálnych charakteristík a kolorimetrických vlastností štrnástich oblôh, overením odvodených spektrálnych charakteristík oblôh pomocou kolorimetrického modelu CIE,
- v stanovení matematickej funkcie, na základe pozorovaní, medzi fotometrickou veličinou jasom a kolorimetrickou veličinou náhradnou teplotou chromatickosti na hemisfére v závislosti od typu,
- v návrhu, zostrojení a otestovaní prototypu automatizovaného mobilného oblohového spektrálneho skenera s prijateľnou presnosťou merania.

Aplikovateľnosť výsledkov

Výsledky práce rozširujú pôsobnosť využitia oblohových typov. Výsledky a zistenia môžu byť premietnuté do nasledujúcich oblastí:

- spektrálny popis oblohových typov môže slúžiť pre rozvoj výskumu v oblasti zdrojov denného svetla a má predpoklady tvoriť podklad pri návrhu osvetľovacích sústav využívajúceho simulácie denného svetla, napr. biodynamického osvetlenia, podklady pre ďalšie práce, napr. kvalitu pracovného prostredia pri rôznych podmienkach typov oblôh,

- oblasť výskumu fyziologického vplyvu združeného osvetlenia na človeka vo vnútorných priestoroch, výskum vplyvu zloženého spektrálneho zloženia od umelého a denného svetla v špecifických pracovných priestoroch s nedostatkom denného svetla by mohol dospieť k odporúčanému využitiu umelého osvetlenia vo vnútorných pracovných priestoroch,
- predikcia spektrálneho zloženia svetla vo vnútorných priestoroch pri návrhoch osvetľovacích otvorov pri stavbách určením z oblohových typov, výberom vhodného systému osvetľovacích otvorov, štruktúry materiálov v priestore sa umožní optimalizovať vnútorné prostredie pre denný pobyt obyvateľov,
- spektrálne oblohové charakteristiky je možné využiť pre hygienické merania denného svetla v pracovných priestoroch, požadovaného pre kolaudačné rozhodnutie stavieb, ako podklad pre korekciu snímačov osvetlenosti – luxmetrov, meranie denného svetla na pracovisku by sa vykonalo pri akomkoľvek oblohovom type, zmeraním L_z/D_v na začiatku a na konci merania možno na základe tejto práce s istou presnosťou získať typ oblohy, spektrálna korekcia by sa na základe typu oblohy aplikovala na konkrétne meranie,
- metodika snímania oblohovej žiari sa dá využiť v oblasti obnoviteľných zdrojov – fotovoltiky, hodnoty ožiarenosti získané z oblohových elementov určujú dopadajúcu žiarivú energiu pre naklonené roviny a tým môžu byť použité pre hodnotenie efektívnosti fotovoltických systémov, použitím aktívnych snímačov napríklad pri zamračených oblohách sa aktívne fotovoltické panely natočia v smere najvyššej intenzity žiarenia,
- príspevok k rozšíreniu vnímania kolorimetrických modelov denného svetla D, a ich prípadnej parametrizácii.
- poskytuje sa návod na tvorbu prenosného spektrálneho oblohového skenera, najväčšou výhodou skenera je jeho premiestniteľnosť a schopnosť začať vykonávať merania do 10 minút.

Odporúčania pre ďalší výskum

Výskum musí obsahovať väčší súbor meraných dát, ktorý bude možné s väčšou presnosťou parametrizovať s veľkou pravdepodobnosťou so skutočným stavom. Celkový počet hodnotených oblohových vzoriek v práci bol 89. Menšie množstvo meraní bolo spôsobené viacerými faktormi: ľudskou chybou pri meraní a vylúčením chybných dát, softvérovou chybou vyhodnotenia oblohových typov, hardvérovou chybou spôsobenou extrémnymi okolitými podmienkami najmä v zimných mesiacoch, časová náročnosť prípravy a merania, náročnosť vystihnúť relevantné svetelné podmienky pre meranie konkrétneho typu oblohy, vylúčením merania z dôvodu indikatricovej alebo gradačnej funkcie mimo rozsah štandardu ISO 15469:2004 / CIE S 011 / E:2003 štandard. Predpokladalo sa uskutočniť 150 meraní, z toho desať na jeden oblohový typ. Očakával sa minimálny výskyt troch reprezentatívnych oblohových typov. Počet uskutočnených meraní bol 138.

Skúsenosti z merania ukazujú, že spektrometer použitý v oblohovom skeneri, musí byť schopný merať absolútne žiarivé veličiny s rozsahom vlnových dĺžok od UV-B až do IR spektrálnej oblasti a minimálne v spektrálnej oblasti VIS. Pre meranie spektrálnych charakteristík oblohových typov sa môže použiť systém bez rotácie snímača, ale za pomoci 145 snímačov, ktoré by zosníмали hemisféru v jednom okamihu a softvér by vyhodnotil oblohový typ v reálnom čase. Týmto by sa významne zmenšila chyba merania zapríčinená dynamickými zmenami pri meraní v reálnom čase. Meranie oblohových typov by bolo veľmi výhodné pre meracie stanice z dôvodu nahradenia komerčných zariadení za spektrálny skener, pretože toto zariadenie je schopné zmerať nasledovné veličiny: globálnu horizontálnu a vertikálnu osvetlenosť, ožiarenosť, zenitný jas a zloženie oblohovej žiary.

Zoznam literatúry

- [1] BASS M. et al.. *Handbook of optics Volume 5*. McGraw-Hill companies inc., 2010. 3 edition, 94-129. ISBN: 978-0-07-163314-7
- [2] ASTM, *Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface, Standard G173*. ASTM. Philadelphia, PA, 2003. DOI: 10.1520/G0173-03R12
- [3] ISO, *ISO 15469:2004, Spatial Distribution of Daylight – CIE standard general Sky, CIE S 011/E:2003*. Vienna: CIE, 2004. ISBN: 0580436101
- [4] UMEMIYA N. et al.. Estimation of horizontal illuminance by measured sky luminance distribution. In: *Building simulation 2005*. Ninth international IBPSA conference. Montreal: 2005, s. 1271.
- [5] ROBERTSON A. R.. Computation of correlated color temperature and distribution temperature. *Optical Society of America*. 1968, 58, 11, 1528–1534. ISSN:1084-7529.
- [6] SIMONS J. L.. Application of characteristic vector analysis to photographic and optical response data. *J.of the Optical Soc. of America*. 1963, 53, 968–974. ISSN:1084-7529.
- [7] RENCHER A. C.. Methods of multivariate analysis. USA, Wiley interscience, A John Wiley&Sons, inc. publication, 2002. 2 edition, s. 380-408. ISBN 0-471-41889-7.
- [8] YOUNES S., CLAYWELL R., MUNEEER T., Quality control of solar radiation data: Present satus and proposed new approaches, *Energy*, v.30 – 9, p. 1533 – 1549, 2005.
- [9] WMO, Guide to Meteorological instruments and methods of observation, seventh edition, 2008.
- [10] STN EN 13032-1, Light and lighting - Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires- part 1: Measur. and file for., ICS 17.180.20, p.24, 2005.
- [11] JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, first edition, p.10 – 27, 2008.
- [12] PISSULLA, D. et al.. Comparison of atmospheric spectral radiance measurements from five independently calibrated systems, *Photochem. Photobiol. Sci.*, 8, p. 516-527, ISSN 1474-9092, 2009.
- [13] CIE - Commission Internationale de L'eclairage, Colorimetry, 3rd edition, Cie015:2004, ISBN: 9783901906336. p.9 – 22, 2004.
- [14] CHAIN C., DUMORTIER D., FONTOYNONT M., A comprehensive model of luminance, correlated colour temperature and spectral distribution of skylight: Comparison with experimental data, Elsevier Sc. ltd., Solar energy, Vol.65, No.5, ISSN: 0038-092X, 2001.
- [15] RUSNÁK, A., DUBNIČKA, R., SMOLA, A.. Relation between the Luminance and Correlated Colour Temperature for Based on Luminance Distribution on Hemisphere. In: Svetlo - Light 2013: 20. Medz. Konf.. Podbanské, SR, 23.-25.10. 2013. BA: KONGRES Management s.r.o., 2013, s. 166-173. ISBN 978-80-89275-35-9
- [16] HENDERSON S., Daylight and its spectrum, Adam Hilger ltd., ISBN 85274 126 5, p.58-209, 1970.
- [17] JUDD D. et al., Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature, *Opt. Soc. am., Applied optics*, Vol. 54, No.8, ISSN:1084-7529, 1964.
- [18] LI, D.H.W, LAM J.C., Predicting solar irradiance on inclined surfaces using sky radiance data, *Energy conver. and manag.*, 45, 1771 – 1783, ISSN: 0196-8904, 2004.
- [19] LI, D.H.W, CHEUNG, G.H.W, Study of models for predicting the diffuse irradiance on inclined surfaces, *Applied energy* 81, 170-186, ISSN: 0306-2619, 2005.
- [20] KÓMAR, L., RUSNÁK, A., DUBNIČKA, R.. Anylysis of diffuse irradiance from two parts of sky vault divided by solar meridian using portable spectral sky-scanner. *Solar Energy*. 2013, 96. ISSN 0038-092X.
- [21] DE ROSSA A. et al., Calculating indoor natural illuminance in overcast sky conditions, *Applied Energy*, Elsevier, y.87, p.806-813, ISSN: 0306-2619, 2010.
- [22] FERRARO V., IGAWA N., MARINELLI V., INLUX-DBR-A calculation code to calculate indoor natural illuminance inside buildings under various sky conditions, *Energy*, Volume 35, issue 9, p. 3722-3730, ISSN: 0306-2619, 2010.

Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce

- [1] RUSNÁK, A., Analýza merania a hodnotenia kolorimetrie oblohových typov, . In LUMEN V4; 3. konferencie Vyšegrádských zemí pro osvětlení : Proceedings. Brno, ČR. 23- 25. 6. 2010. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita v Ostravě, 2010, ISBN 978-80-248-2247-1.
- [2] RUSNÁK, A., Measurement of the Colorimetric Parameters of Sky Types. In ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. Bratislava: STU v Bratislave, 2010, ISBN 978-80-227-3303-8.
- [3] KÓMAR, L., DARULA, S., RUSNÁK, A., Contribution to the Spectral Measurements of Daylight. In Solaris 2011 : Proceedings of the 5th International Conference on Solar Radiation and Daylighting. Brno, Czech Republic, 10 -11 August 2011. Brno: University of Technology, 2011, s. 143--148. ISBN 978-80-214-4306-8.
- [4] RUSNÁK, A., KRASŇAN, F., SMOLA, A., Daylight Spectrum in Interiors. In Světlo 2011. Light 2011. Ekologie - ekonomika - efektivita : 19.mezinárodní konference. Praha, 21.-23.9.2011. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2011, s. 12-15. ISBN 978-80-248-2480-2.
- [5] RUSNÁK, A., Exteriérové charakteristiky denného svetla. EE časopis pre elektrotechniku a energetiku Roč. 17, mimoriadne č. : ELOSYS, Trenčín, 11.-14.10.2011. s. 161-165. ISSN 1335-2547.
- [6] RUSNÁK, A., Modelling of Spectral Characteristics of Daylight. In ELITECH'11 : 13th Conference of Doctoral Students Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. Bratislava, Slovak Republic, 17 May, 2011. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2011, s. 1-6. ISBN 978-80-227-3500-1.
- [7] RUSNÁK, A., SMOLA, A., Spectrum of Daylight and Sky Type. In Lux Junior 2011. Tagungsband Proceedings : 10.Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs. Dörfeld bei Ilmenau, Germany, 23.-25.9.2011. Ilmenau: TU, 2011.
- [8] SMOLA, A., LIŠKA, M., KMENT, A., RUSNÁK, A., VIGLAŠ, D., Measurement of Sky Types. In LUMEN V4 : 4. konferencia Vyšehradských krajín pre osvetlenie. Bratislava, Slovensko, 26.-28. 9. 2012. Bratislava: KONGRES Management s.r.o., 2012, s. 271-278. ISBN 978-80-89275-32-8.
- [9] KÓMAR, L., RUSNÁK, A., Spectral Standard Sky Model for Photovoltaic Applications. In ISES - Europe Solar Conference : Proceedings; EUROSUN 2012, Opatija, Chorvátsko, 18-20 September 2012. Rijeka: Croatian Solar Energy Association, 2012, s. 216-221. ISBN 978-3-9814659-2-1.
- [10] KÓMAR, L., RUSNÁK, A., DUBNIČKA, R., Analysis of Diffuse Irradiance from Two Parts of Sky Vault Divided by Solar Meridian Using Portable Spectral Sky-Scanner. Solar Energy Vol. 96. s. 1-9. ISSN 0038-092X.
- [11] DUBNIČKA, R., RUSNÁK, A., PÍPA, M., Using of CCD Based Fibre Optic Spectroradiometers in Photometric Measurements under Different Conditions. In Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a New Century of Light" : Paris, France, April 15-16, 2013. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage, 2013, s. 611-615. ISBN 978-3-902842-44-2.
- [12] RUSNÁK, A., DUBNIČKA, R., KÓMAR, L., Measurement and Evaluation of Spectral Characteristics of Sky Types, Measurement and Evaluation of Spectral Characteristics of Sky Types. In Svetlo - Light 2013 : 20. medzinárodná konferencia. Podbanské, Slovakia, 23.-25.10. 2013. Bratislava: KONGRES Management s.r.o., 2013, s. 174-181. ISBN 978-80-89275-35-9.
- [13] RUSNÁK, A., DUBNIČKA, R., SMOLA, A., Relation between the Luminance and Correlated Colour Temperature for Based on Luminance Distribution on Hemisphere, Relation between the Luminance and Correlated Colour Temperature for Based on Luminance Distribution on Hemisphere. In Svetlo - Light 2013 : 20. medzinárodná konferencia. Podbanské, Slovakia, 23.-25.10. 2013. Bratislava: KONGRES Management s.r.o., 2013, s. 166-173. ISBN 978-80-89275-35-9.