

Mgr. Roman Dubnička

Autoreferát dizertačnej práce

**KLASIFIKAČNÝ SYSTÉM PRE VÝPOČET A MERANIE
FOTOMETRICKÝCH PARAMETROV OSVETLENIA POZEMNÝCH KOMUNIKÁCIÍ
V PODMIENKACH MEZOPICKÉHO VIDENIA**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore 5.2.30 Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 22.02.2018

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Mgr. Roman Dubnička

Autoreferát dizertačnej práce

**KLASIFIKAČNÝ SYSTÉM PRE VÝPOČET A MERANIE
FOTOMETRICKÝCH PARAMETROV OSVETLENIA POZEMNÝCH KOMUNIKÁCIÍ
V PODMIENKACH MEZOPICKÉHO VIDENIA**

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 22.02.2018

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia.

Na: Ústav elektrenergetiky a aplikovanej elektrotechniky
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave

Predkladateľ: **Mgr. Roman Dubnička**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Školiteľ: **doc. Ing. Dionýz Gašparovský, PhD.**
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

Oponenti: **doc. Ing. Stanislav Darula, Csc.**
Slovenská akadémia vied
Ústav stavebníctva a architektúry
Dúbravská cesta 9
845 03 Bratislava 45

doc. Ing. Tomáš Novák, PhD.
Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky
17. listopadu 15
Ostrava – Poruba
Česká republika

Autoreferát bol rozoslaný:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:

Na Fakulta elektrotechniky a informatiky
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Ilkovičova 3, miestnosť: C-417

.....
Dekan FEI
prof. Dr. Miloš Oravec

Obsah

Úvod.....	5
Ciele dizertačnej práce.....	6
1 Súčasný stav riešenej problematiky	7
1.1 Adaptačný jas.....	7
1.2 Medzinárodný systém pre mezopickú fotometriu CIE	7
1.3 Súčasný problémy riešené v mezopickovej fotometrii.....	9
2 Meranie a vyhodnotenie jasových máp osvetlenia pozemných komunikácií s ohľadom na rozloženie jasů v zornom poli pozorovateľa.....	10
3 Klasifikačný systém pre štandardné jasové mapy	12
3.1 Modelové situácie svetelných scén na pozemných komunikáciách.....	12
3.2 Adaptačné jasy pre triedy komunikácií pre motorové vozidlá M	13
4 Výpočet mezopických fotometrických parametrov verejného osvetlenia	15
4.1 Krivky svetivosti svetidiel v podmienkach mezopickovej fotometrie.....	15
4.2 Výpočty mezopických fotometrických parametrov verejného osvetlenia vybraných modelových situácií	15
5 Teoretický návrh meracieho systému na meranie fotometrických parametrov osvetlenia pozemných komunikácií.....	17
5.1 Návrh meracieho systému pomocou integrálnych fotometrov	17
5.2 Návrh meracieho systému pomocou spektorrádiometrov	18
5.2.1 Kalibrácia CCD spektorrádiometrov pre merací systém	18
5.2.2 Merací systém za použitia CCD spektorrádiometra pre meranie jasů	19
5.2.3 Merací systém za použitia CCD spektorrádiometra pre meranie intenzity osvetlenia	19
6 Prínos práce a výsledky.....	20
6.1 Použitelnosť výsledkov a prínosy.....	20
6.2 Odporúčania pre ďalšiu prácu.....	21
Záver.....	22
Literatúra	23
Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce	24

Úvod

Práca sa zaoberá problematikou fotometrie mezopického videnia a jeho aplikáciou na výpočet a meranie fotometrických parametrov za podmienok tohto videnia s pomocou vytvorenia klasifikačného systému, ktorý je vytvorený na základe meraní jasových máp a ich analýzou osvetlenia vo vonkajšom prostredí s ohľadom na vizuálne pole pozorovateľa. Zrakový vnem pre človeka znamená príjem viac ako 80 % informácií, ktoré prostredníctvom zraku spracováva. Optické žiarenie, ktoré v ľudskom oku je schopné vyvolať zrakový vnem sa nazýva svetlo a je ohraničené vlnovými dĺžkami v rozsahu od 360 nm do 830 nm v závislosti od pozorovateľa. Svetlo po dopade na detekčnú plochu nazývanú ako sieťnica je spracovávané receptormi, ktoré sú na neho citlivé.

V poslednom čase vyvstáva problematika merania v mezopickkej časti videnia, kde problematika nie je triviálna pomocou určenia exaktných funkcií pomernej účinnosti ľudského popísaných pri dvoch hraničných prípadoch videnia, ktorými sú fotopické (denné) a skotopické (videnie), kedy aktivita buď čapíkov alebo tyčiniek je rozhodujúca pri úvahe objektívnosti fotometrických meraniach. Naopak pri mezopickom videní je nutné uvažovať s aktivitou oboch typov týchto svetlocitlivých buniek v ľudskom oku, čo v značnej miere popisuje princíp fotometrie v mezopickkej oblasti sťažuje popisovanie jednou funkciou pomernou účinnosťou ľudského oka. S ohľadom na tento problém takisto pri meraniach je nutné uvažovať s konvolúciou dvoch funkcií pri meraniach v mezopickkej fotometrii.

Táto práca sa zaoberá problematikou merania za podmienok mezopického videnia ako aj riešením tejto problematiky v meracom procese a implementáciou odvodených matematických modelov z teórie do praxe merania popisovaním spolu s reálnym návrhom meracieho systému pre mezopickú fotometriu. Táto oblasť fotometrie je v súčasnosti predmetom mnohých vedeckých prác po celom svete a jej využitie v praxi je nutná tak pri výpočtoch ako aj pri praktických meraniach fotometrických veličín v oblasti svetelnej techniky, kde podmienky mezopického videnia je nutné uvážiť, čo je potrebné tak pri výpočte fotometrických veličín alebo merania s úvahou mezopickkej fotometrie.

Ciele dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je výskum v oblasti fotometrie mezopického videnia, ktoré sú využiteľné najmä vo svetelnej technike, kde podmienky takého videnia môžu byť uvažované. V praxi je najrozšírenejšie využitie pri svetelnotechnických výpočtoch fotometrických parametrov vo vonkajšom osvetlení.

Tézy dizertačnej práce

1. Meranie a vyhodnotenie jasových máp z osvetlenia pozemných komunikácií s ohľadom na rozloženie jasů v zornom poli pozorovateľa
2. Vytvorenie klasifikačného systému pre štandardné jasové mapy vyjadrujúce rôzne modelové situácie v osvetlení pozemných komunikácií
3. Výpočet fotometrických parametrov osvetlenia pozemných komunikácií v podmienkach mezopického videnia pre známe úrovne adaptačného jasů v štandardných modelových situáciách
4. Teoretický návrh meracieho systému na meranie fotometrických parametrov osvetlenia pozemných komunikácií v podmienkach mezopického videnia s metrologickou nadväznosťou na jednotky SI

1 Súčasný stav riešenej problematiky

1.1 Adaptačný jas

Pri prechode z svetelne tmavšieho prostredia do prostredia svetlejšieho sa musí zrakový systém prispôbiť novým svetelným pomerom. Všeobecne sa dá adaptácia zraku na svetelné pomery definovať ako proces pri ktorom sa stav zrakového systému upravuje v závislosti od meniaceho sa svetelného podnetu v čase, ktorý môže mať rôznu úroveň jasu, spektrálne zloženie ako aj rôzne vyžarovanie do priestorového uhla [1]. Adaptácia môže nastať pre dva hraničné prípady. V tomto prípade potom hovoríme buď o adaptácii zraku na svetlo pre fotopické (denné) videnie, ak je jas väčší ako 5 cd.m^{-2} , alebo naopak o adaptácii zraku na tmu pre skotopické (nočné) videnie, ak je úroveň jasu menšia ako $0,005 \text{ cd.m}^{-2}$.

Medzi fotopickým a skotopickým videním sú čapíky a tyčinky aktívne a súčasne sa podieľajú na videní. Tento stav nazývame mezopickým videním v oblasti úrovne jasov medzi $0,005 \text{ cd.m}^{-2}$ a 5 cd.m^{-2} . V tejto oblasti sa adaptácia zraku mení dynamicky a súčasne pre iný adaptačný stav na svetelné podmienky prislúcha iná pomerná spektrálna odozva oka.

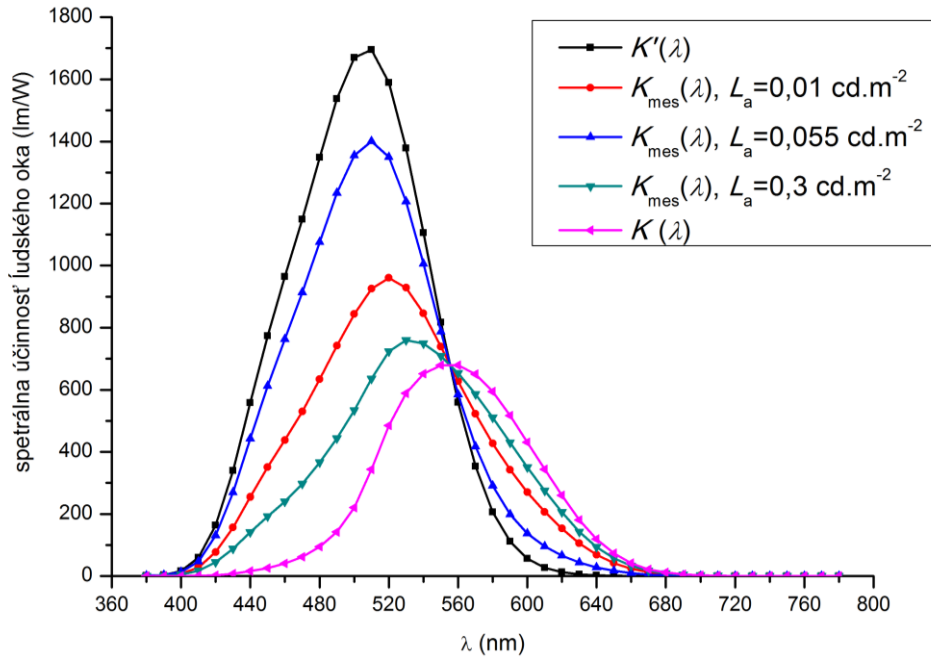
Mierou jasnosti za podmienok ustáleného zrakového procesu najmä pri neobmedzenom čase pôsobenia svetelného podnetu na oko je jas. Ďalším aspektom, ktorý významne vplýva na adaptačný proces zraku je zorné pole pozorovateľa. Zorné pole je množina všetkých bodov, ktoré môže pozorovateľ postrehnúť upreným pohľadom bez pohybu oka a bez pohybu hlavy. Keďže zrak je zabezpečený dvoma orgánmi tak pri zornom poli rozlišujeme monokulárne a binokulárne zorné pole [2].

Plocha z ktorej sa adaptačný jas určuje je tak pre denné ako aj nočné videnie exaktne definovaná [2]. Špeciálny stav, kedy sa podieľajú na videní súčasne čapíky a tyčinky nastáva za podmienok mezopického videnia. Pre tento prípad zorný uhol nie je presne definovaný, pretože so zmenou úrovne jasu pozorovanej osvetlenej scény sa mení aj pomerná spektrálna účinnosť oka [3]. Navyše zorné pole, ktoré by definovalo plochu v zornom poli pozorovateľa, z ktorej by sa určil adaptačný stav nie je pre každú situáciu rovnaký. Ohľadne tejto problematiky ako určiť adaptačný jas za podmienok mezopického videnia.

1.2 Medzinárodný systém pre mezopickú fotometriu CIE

Na základe nových poznatkov a úvah pre mezopickú fotometriu založenú na zrakovom výkone pozorovateľa, bolo možné v roku 2010 v rámci medzinárodnej komisie CIE pracovnej skupiny technickej komisie TC 1-58 vytvoriť dlho očakávaný medzinárodný jednotný systém pre mezopickú fotometriu definujúci pomernú spektrálnu účinnosť ľudského oka (obr. 1.1) v určenom rozmedzí úrovni jasov vnímaných pozorovateľom [4].

Tento jednotný systém, ktorý na základe vedeckých poznatkov o zrakovom výkone pozorovateľa pre mezopickú fotometriu je založený na systéme hodnotenia MES2 s názvom ako Prechodný hodnotiaci systém pre mezopickú fotometriu s hornou hranicou jasu 5 cd.m^{-2} od ktorej vyššie začína fotopická oblasť videnia a dolnou hranicou jasu $0,005 \text{ cd.m}^{-2}$ od ktorej nižšie začína oblasť videnia skotopická.



Obr. 1.1 Tvar funkcie $V_{\text{mes}}(\lambda)$ pre rôzne úrovne adaptačného jasu

Na základe matematickom modeli dedfinovanom vzťahmi (1.1) a (1.2) sa dá určiť potom mezopický jas v definovanom zornom poli a určenom adptačnom jase.

$$M(m) \cdot V_{\text{mes}}(\lambda) = m \cdot V(\lambda) + (1 - m) \cdot V'(\lambda)$$

$$L_{\text{mes}} = \frac{683}{V(\lambda_0)} \cdot \int L_e(\lambda) \cdot V_{\text{mes}}(\lambda) d\lambda \quad (1.1)$$

kde, $M(m)$ je funkcia ktorá normuje funkciu $V_{\text{mes}}(\lambda)$ pri vlnovej dĺžke, kde nadobúda maximum, takže nadobúda hodnoty od 0 po 1 v celom spektre viditeľnej oblasti, L_{mes} je mezopický jas, $V_{\text{mes}}(\lambda_0)$ je hodnota funkcie $V_{\text{mes}}(\lambda)$ pri vlnovej dĺžke 555 nm a $L_e(\lambda)$ je spektrálna žiara v jednotkách $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$.

$$m_0 = 0,5$$

$$L_{\text{mes},n} = \frac{m_{(n-1)} L_p + (1 - m_{(n-1)}) L_s V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) V'(\lambda_0)} \quad (1.2)$$

$$m_n = a + b \cdot \log_{10}(L_{\text{mes},n}) \quad \text{pre} \quad 0 \leq m \leq 1$$

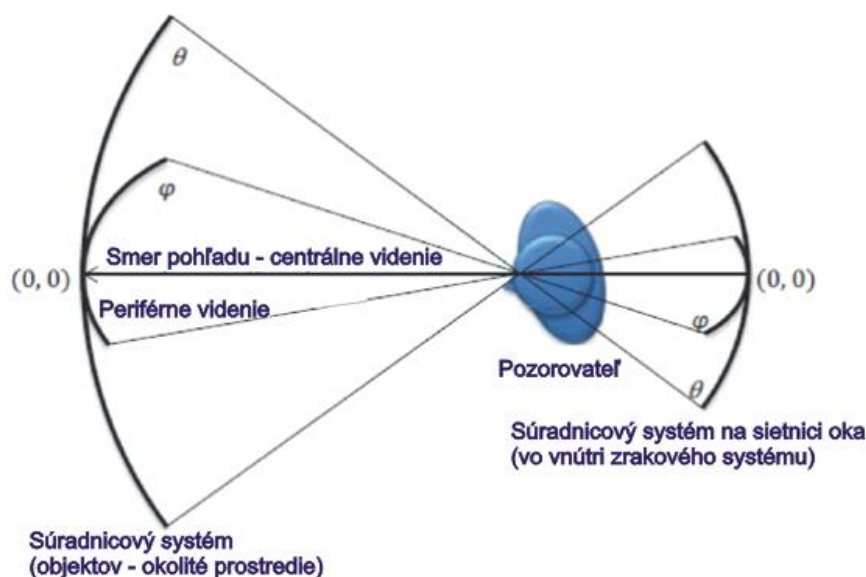
Ak $L_{\text{mes}} \leq 0,005 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ potom $m = 0$. V opačnom hraničnom prípade ak $L_{\text{mes}} \geq 5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ potom nadobúda hodnotu $m = 1$. Určenie koeficientu m a mezopického jasu L_{mes} môže byť následne počítaný s pomocou iteračného procesu nasledovne, kde L_p je fotopický jas, L_s je skotopický jas a $V'(\lambda)$ je hodnota pomernej spektrálnej účinnosti pri vlnovej dĺžke $\lambda_0 = 555 \text{ nm}$, a, b sú parametre s hodnotami $a = 0,7670$ a $b = 0,3334$ [4]. Na základe niekoľkých iterácií je určený koeficient m a následne použitý na výpočet mezopického jasu.

1.3 Súčasné problémy riešené v mezopickej fotometrii

Práve určenie adaptačného jasu rozhoduje o správnom použití konkrétnej pomernej spektrálnej účinnosti ľudského oka, ktorá má byť následne uvažovaná pri svetelnotechnických výpočtoch fotometrických parametrov ako aj má slúžiť pre správny návrh meracieho systému mezopickej fotometrie. Základnými zrakovými úlohami sú založené na troch základných otázkach, a to [4] [5]:

- Môže byť objekt v zornom poli pozorovateľa jasne rozpoznaný ?
- Ako rýchlo môže pozorovateľ objekt rozpoznať ?
- Aký objekt je v zornom poli pozorovateľa ?

Na základe výskumu pohybu oka pozorovateľa s uvážením ďalších aspektov zrakového výkonu pozorovateľa bol nedávno predložený návrh jednotného systému pre určenie adaptačného jasu [6]. Pre proces videnia ako aj polohy objektov v zornom poli pozorovateľa je nutné zaviesť vhodný súradnicový systém, ktorý popisuje polohu objektov v zornom poli pozorovateľa spolu so smerom pohľadu spojenú so súradnicami dopadajúcich lúčov zo zorného poľa na sieťnicu oka pozorovateľa (obr. 1.2).



Obr. 1.2 Súradnicový systém zrakového systému pozorovateľa [6]

Potom výpočet adaptačného jasu prebieha v štyroch krokoch. Prvým krokom je určenie efektívnej hodnoty jasu $L_{\text{eff}}(\theta, \varphi)$ pozorovanej scény pre každý bod definovanej rozložením jasov v zornom poli pozorovateľa, a to konvolúciou funkcií LD a SLE čím je zahrnutý aj vplyv periférneho videnia. Na základe vykonaných konvolúcií sa potom dá pre výpočtovú plochu AOM určiť hodnotu adaptačného jasu na základe vzťahu (1.3) [6].

$$P_{\text{AOM}}(\theta, \varphi) = \iint \frac{L_a(\theta, \varphi) \cdot P_{\text{AOM}}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi}{P_{\text{AOM}}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi} \quad (1.3)$$

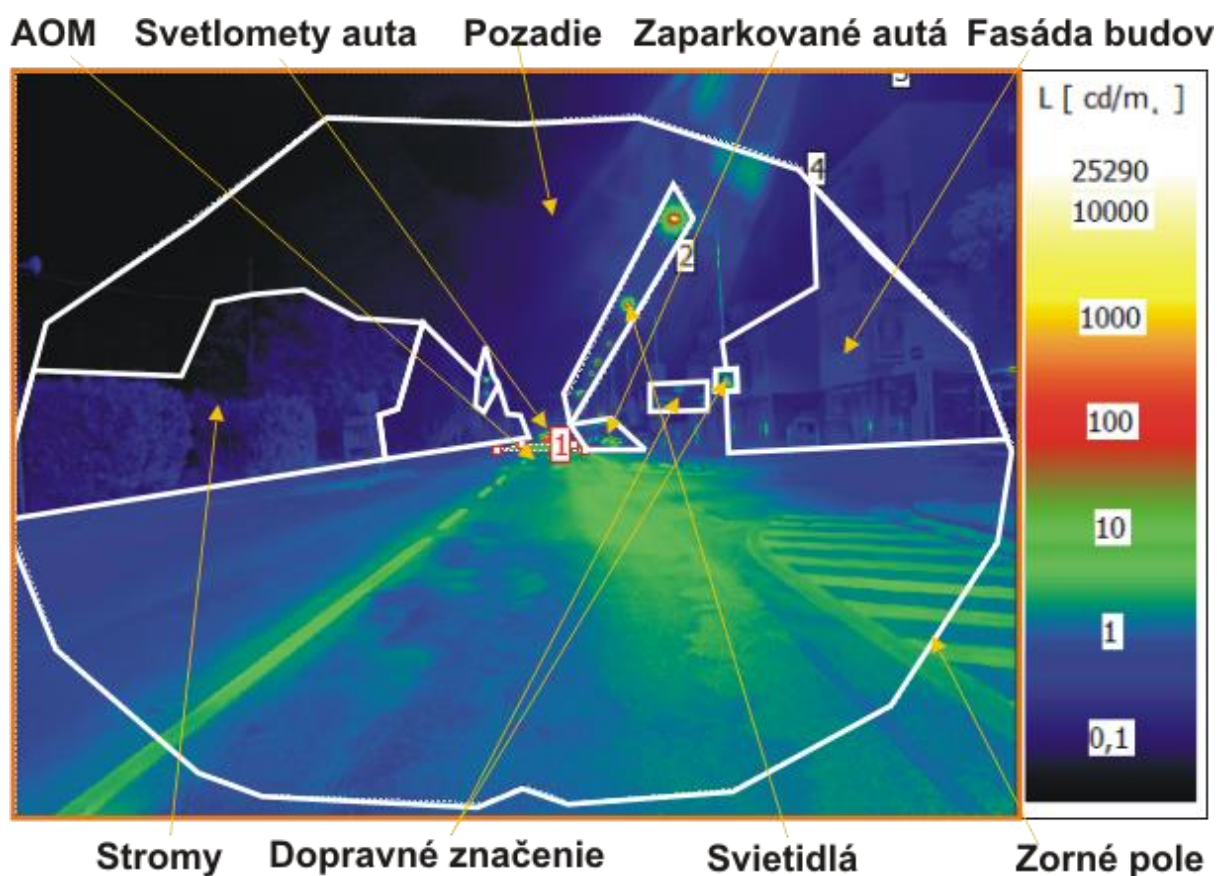
Pri návrhu klasifikačného systému bola vykonaná analýza jasových máp, kde potom bola urobená ich klasifikácia na základe zatriedenia jasových máp s ohľadom na jasové pomery objektov resp. plôch vo svetelnej scéne pre konkrétnu situáciu inštalácie verejného osvetlenia.

Vhodnou kombináciou týchto aspektov bol v rámci dizertačnej práce vytvorený klasifikačný systém rôznych situácií rôznych svetelných scén, kde jasové mapy boli merané z pohľadu vodiča, pričom na základe vyhodnotenia jasových máp potom klasifikácia bola robená s ohľadom na jasové pomery konkrétnej svetelnej scény ovplyvňované jasnými objektmi a polohou objektov v zornom poli pozorovateľa, na základe ktorej bude možné potom určiť adaptačný jas.

2 Meranie a vyhodnotenie jasových máp osvetlenia pozemných komunikácií s ohľadom na rozloženie jasů v zornom poli pozorovateľa

Celkom 82 situácií bolo zmeraných v reálnych podmienkach inštalácie verejného osvetlenia a následne vyhodnotené jasové pomery v zornom poli vodiča v súlade s geometriou popísanou na výpočet fotometrických parametrov verejného osvetlenia pre triedy M v súlade s časťou súboru noriem STN EN 13201-3 [9] a STN EN 13201-4. Merania jasových máp z pohľadu vodiča motorového vozidla v reálnych podmienkach inštalácie verejného osvetlenia poskytovali podklad na výpočet adaptačného jasů pre konkrétnu situáciu s prítomnosťou rôznych svetelných zdrojov v zornom poli pozorovateľa, ktoré prispievali do výpočtu adaptačného jasů na základe modelu [6], kde výsledok sa potom dá použiť pre určenie pomernej spektrálnej účinnosti ľudského oka pre tento stav videnia kedy sa dá adaptácia zrakového systému pozorovateľa uvažovať v podmienkach mezopickej fotometrie.

Pri meraní boli zachytené najbežnejšie situácie, ktoré sa v praxi verejného osvetlenia vyskytujú najčastejšie. Namerané jasové mapy boli pri vyhodnotení následne rozdelené do častí s ohľadom na zorné pole pozorovateľa (obr. 2.1), kde boli identifikované jednotlivé oblasti jasovej mapy pre konkrétnu svetelnú scénu poukazujúc na rôzne vizuálne podmienky pre uvažovaného pozorovateľa s ohľadom na jas foveálnej oblasti sietnice oka ako zároveň aj poukázaním na jas pozadia, ktorý môže významnou mierou vplývať na adaptáciu zraku pozorovateľa v istých prípadoch kvôli osvetleniu častí sietnice oka jasnými objektmi v zornom poli pozorovateľa, ktorá sa podieľa na periférnom videní.



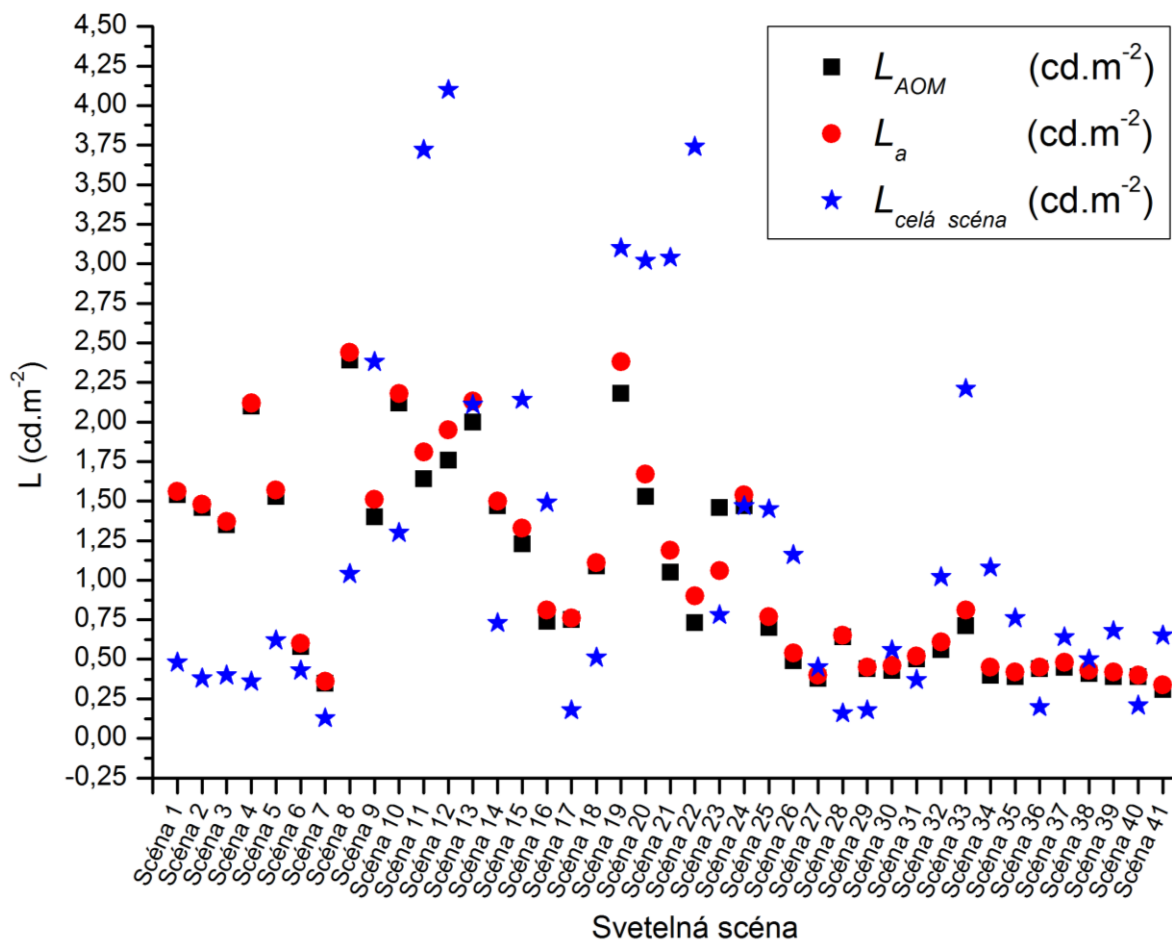
Obr. 2.1 Analýza jasovej mapy svetelnej scény z terénneho merania

Mieru dopadajúceho svetla na periférnu časť sietnice sa dá kvantitatívne vyjadriť závojovým jasom, ktorého metóda výpočtu je popísaná viacerými modelmi v podmienkach verejného osvetlenia [6]. Preto pre úroveň adaptačného jasů platí nasledovný vzťah [7]

$$L_a = L_{local} + L_{veil} \quad (2.1)$$

Kde L_a v cd.m^{-2} je výsledný adaptačný jas určený pre adaptačné pole vyjadreného ako súčet L_{local} v cd.m^{-2} jasu centrálného (foveálneho) videnia a L_{veil} cd.m^{-2} v závojového jasu periférneho videnia pozorovateľa [6].

Pri vyhodnotení jasových máp boli vypočítané jasy oblastí plochy merania (AOM), celej plochy scény zodpovedajúcej zornému poľu pozorovateľa a následne adaptačné jasy na základe matematického modelu [6] pre každú svetelnú scénu. Výsledky výpočtov ako aj zodpovedajúce jasy pre každú relevantnú oblasť zorného poľa sú znázornené na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Vypočítané hodnoty adaptačného jasu a jasy vybraných oblastí svetelných scén č.1 až č.41

Tým sa dajú svetelné scény usporiadať do konkrétnych situácií, s ktorými sa dá stretnúť pri reálnych inštaláciách osvetľovacích sústav verejného osvetlenia na pozemných komunikáciách z pohľadu vodiča motorového vozidla. Z výsledkov je možné ešte pozorovať, že predpoklad rovnosti hodnoty adaptačného jasu, ktorý zodpovedá úrovni jasu priamo osvetľovanej plochy, ktorá je predmetom výpočtu alebo merania (AOM), v niektorých prípadoch môže viesť ku chybnému určeniu pomernej spektrálnej účinnosti oka pozorovateľa v podmienkach mezopického videnia. Najmä pre svetelné zdroje, ktoré majú S/P pomer väčší ako 1 tým môžu byť hodnoty vypočítaných mezopických fotometrických veličín nadhodnotené.

3 Klasifikačný systém pre štandardné jasové mapy

Analýzou svetelných scén z reálnych meraní rôznych inštalácií verejného osvetlenia popísaných v predchádzajúcej časti sa dá vidieť istý systematický efekt úrovne adaptačného jasu od rozloženia jasov v zornom poli pozorovateľa, ktoré je nutné uvážiť pre aplikáciu v mezopickej fotometrii [10].

3.1 Modelové situácie svetelných scén na pozemných komunikáciách

Na základe toho je možné svetelné scény štandardizovať a usporiadať do konkrétnych modelových situácií. Rozloženie objektov vo svetelnej scéne sa dá vhodne označiť s ohľadom na typ objektu a jeho polohou v zornom poli pozorovateľa (tab. 3.1) [11].

Tab. 3.1 Označenie objektov vo svetelnej scéne

Objekt	Poloha objektu vo svetelnej scéne
L: Osvetľovacia sústava VO	0: Nie je prítomný
T: Stromy pozdĺž komunikácie	1: Na strane stožiarov osvetľovacej sústavy
B: Fasády budov	2: Na oboch stranách pozdĺž komunikácie
S: Okná obchodov	3: Oproti osvetľovacej sústavy
C: Zaparkované autá	4: Strana umiestnenia objektu nie je relevantná

Kombináciou označenia objektu s jeho polohou sa potom dá vytvoriť tabuľkový systém modelových situácií rozloženia jasov v zornom poli pozorovateľa. Vykonané merania v rámci dizertačnej práce tvorili podklad pre vytvorenie takéhoto systému (tab. 3.2).

Tab. 3.2 Modelové situácie svetelných scén vo verejnom osvetlení vozovky

Situácia svetelnej scény	Prítomnosť a poloha objektov vo svetelnej scéne	Popis modelovej situácie
RS00	L0	Vozovky bez verejného osvetlenia hlavné cesty
RS01	L1-T1	Vozovky v predmestskom prostredí
RS02	L1-B1-C3	Vozovky v obytných zónach
RS03	L1-T3	Vozovky v predmestskom prostredí
RS04	L1-B3	Vozovky v obytných zónach
RS05	L1-T2	Vozovky v predmestskom prostredí
RS06	L1-B2	Vozovky v obytných zónach a centrách miest
RS07	L1-S2	Vozovky v centrách miest
RS08	L1-T1-B3	Vozovky v obytných zónach
RS09	L1-T3-B1	Vozovky v obytných zónach
RS10	L2-T2	Hlavné vozovky v predmestskom prostredí
RS11	L2-B2	Hlavné vozovky v mestách

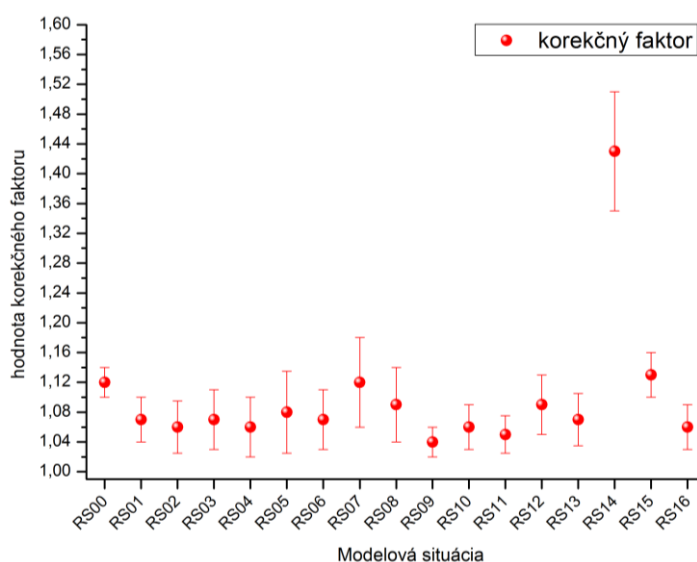
Situácia svetelnej scény	Prítomnosť a poloha objektov vo svetelnej scéne	Popis modelovej situácie
RS12	L2-S2	Široké hlavné vozovky v centrách miest
RS13	L2-T4-B4	Hlavné vozovky v mestách
RS14	L4-B2	Úzke vozovky v historických centrách miest
RS15	L4-S2	Úzke vozovky v nákupných zónach miest
RS16	L1-T1-C2	Vozovky v obytných zónach a v mestách

Namerané svetelné scény spolu s jasovými mapami boli následne predmetom analýzy jasových pomerov v zornom poli pozorovateľa pri ich vyhodnocovaní.

3.2 Adaptačné jasy pre triedy komunikácií pre motorové vozidlá M

Pri návrhu osvetľovacej sústavy verejného osvetlenia v štádiu návrhu je potrebné vykonať výpočty fotometrických parametrov, ktorý sa vykonáva podľa normy STN EN 13201-3 [9]. Predpoklady niektorých doposiaľ vykonaných prác sú založené na rovnosti adaptačného jasu s jasom plochy, ktorá je predmetom výpočtu (AOM). Tento stav adaptácie zraku je však platný pre foveálnu oblasť, kde osvetlenie periférnej časti sietnice oka nie je braná do úvahy.

Hodnoty adaptačné pre jednotlivé svetelné scény úzko súvisia, čo bolo potvrdené aj najnovšími poznatkami z teoretického určenia adaptačného jasu pri modelových situáciách veľmi jasných objektov v zornom poli pozorovateľa [12]. Pre každú modelovú situáciu boli vyhodnotené korekčné činitele, ktoré použiť pre korekciu jasov osvetľovanej plochy AOM stanovených tried pozemných komunikácií pre motorové vozidlá M v súlade s normou STN EN 13201-2 [8], ktoré vidieť na obr. 3.1 pre jednotlivé modelovej situácie RS ako aritmetický priemer pre každú modelovú situáciu s vyjadrením smerodajnej odchýlky.



Obr. 3.1 Korekčné faktory pre stanovenie parametra m osvetľovanej oblasti AOM

Ak tieto hodnoty korekčných faktorov použijeme pre korigovanie úrovňami jasov, ktoré sú uvedené v norme STN EN 13201-2 pre jednotlivé triedy M ako úrovne jasov pre výpočtovú plochu AOM, potom na základe uvažovaného modelu dostaneme hodnoty adaptačných jasov pre jednotlivé

triedy M (tab. 3.3) [9], ktoré sa dajú použiť pre stanovenie pomernej spektrálnej účinnosti oka pozorovateľa v podmienkach mezopického videnia pre konkrétnu situáciu.

Tab. 3.3 Hodnoty adaptačných jasov pre modelové situácie pre triedy M

Situácia svetelnej scény	Kombinácia objektov vo svetelnej scéne	Adaptačný jas pre triedy M pre motorové vozidlá L_a (cd.m ⁻²)					
		M1	M2	M3	M4	M5	M6
RS00	L0	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
RS01	L1-T1	2,13	1,60	1,07	0,80	0,53	0,32
RS02	L1-B1-C3	2,13	1,60	1,06	0,80	0,53	0,32
RS03	L1-T3	2,14	1,60	1,07	0,80	0,53	0,32
RS04	L1-B3	2,11	1,59	1,06	0,79	0,53	0,32
RS05	L1-T2	2,16	1,62	1,08	0,81	0,54	0,32
RS06	L1-B2	2,14	1,60	1,07	0,80	0,53	0,32
RS07	L1-S2	2,24	1,68	1,12	0,84	0,56	0,34
RS08	L1-T1-B3	2,19	1,64	1,09	0,82	0,55	0,33
RS09	L1-T3-B1	2,09	1,57	1,04	0,78	0,52	0,31
RS10	L2-T2	2,12	1,59	1,06	0,79	0,53	0,32
RS11	L2-B2	2,11	1,58	1,05	0,79	0,53	0,32
RS12	L2-S2	2,18	1,64	1,09	0,82	0,55	0,33
RS13	L2-T4-B4	2,14	1,60	1,07	0,80	0,53	0,32
RS14	L4-B2	2,86	2,15	1,43	1,07	0,72	0,43
RS15	L4-S2	2,26	1,70	1,13	0,85	0,57	0,34
RS16	L1-T1-C2	2,13	1,60	1,06	0,80	0,53	0,32

Tým projektanti, ktorí sa návrhom osvetľovacích sústav verejného osvetlenia zaoberajú môžu použiť tieto hodnoty tak, aby fotometrické parametre zodpovedali stavu vizuálnych podmienok, a tým výpočet fotometrických mezopických veličín pre príslušné triedy pozemných komunikácií pre triedy M alebo príslušných ekvivalentných tried stanovených touto normou.

Pre modelovú situáciu RS00 boli priamo vypočítané hodnoty adaptačného jasov z meraní jasových máp pre tieto situácie za úvahy halogénových stretávacích svetlometov automobilu, s ktorým terénne meranie bolo vykonané. Pre iný typ svetlometov môže táto hodnota byť odlišná. Ostatné hodnoty adaptačných jasov boli odvodené z hodnôt úrovni jasov pre výpočtovú plochu stanovenú v súlade s normou STN EN 13201-3. Vypočítané hodnoty adaptačných jasov sa dajú použiť do modelu odporúčaného systému pre mezopickú fotometriu na základe zrakového výkonu CIE 191:2010 pre stanovenie koeficientu m , na základe ktorého sa dá určiť pomernú spektrálnu účinnosť oka pozorovateľa na výpočet už spomínaných relevantných mezopických fotometrických veličín akými sú vo verejnom osvetlení jas alebo intenzita osvetlenia.

4 Výpočet mezopických fotometrických parametrov verejného osvetlenia

4.1 Krivky svietivosti svietidiel v podmienkach mezopickej fotometrie

Priestorové vyžarovacie charakteristiky svietidiel sa vyjadrujú s pomocou kriviek svietivosti, kde sa dá vidieť do akého smeru je usmerňovaný svetelný tok zo svetelných zdrojov inštalovaných vo svietidle, ktoré sa definujú vo výmenných fotometrických súboroch pre roviny C [13], kde sú dané svietivosti v smeroch definovaných dvojicou uhlov (C, γ) , kde v súčasnosti sa vo výmenných súboroch udávajú pre fotopického pozorovateľa. To je možné s pomocou použitia vzťahu (4.1), ktorý sa dá na výpočet mezopickej svietivosti vyjadriť v nasledovnom tvare

$$I_{\text{mes}} = \frac{K_m}{V_0(555)} \cdot \int_{380}^{780} I_e(\lambda) \cdot V_{\text{mes}}(\lambda) d\lambda \quad (4.1)$$

Ak nanormujeme všetky hodnoty krivky svietivosti vybraného svietidla pre fotopického pozorovateľa hodnotou jedného uhla vyžarovania napr. pre uhol $I_{\text{fot}}(0,0)$ tak normovaním pre vybraný uhol sa dá vyjadriť relatívnu krivku svietivosti ľubovoľného svietidla kde všetky hodnoty svietivosti budú vzťahované k tomuto referenčnému smeru, potom pre tento uhol stačí vypočítať zo známych hodnôt spektrálnych žiarivostí hodnotu mezopickej svietivosti $I_{\text{mes}}(0,0)$ za definovaných vizuálnych pomerov použitím. Ak touto vypočítanou hodnotou pre násobíme späť relatívnu krivku svietivosti pre všetky uhly vyžarovania pre mezopického pozorovateľa pre známy stav adaptácie zrakového systému vyjadrenú úrovňou adaptačného jasu L_a , ktorá je vyjadrená nasledovným vzťahom

$$I_{\text{mes}}(\gamma, C) = \frac{I_{\text{fot}}(\gamma, C)}{I_{\text{fot}}(0,0)} \cdot I_{\text{mes}}(0,0) \quad (4.2)$$

Následne tieto absolútne hodnoty mezopických svietivostí sa dá vyjadriť prostredníctvom relatívnej fotometrie kedy jednotlivé svietivosti budú vzťahované k svetelnému zdroju s mezopickým svetelným tokom 1000 lm, kde tieto hodnoty ak sa zapíšu vo vhodnej forme do zvoleného fotometrického súboru napr. ldt, následne sa dá vykonať výpočty mezopických fotometrických parametrov vo verejnom osvetlení. Spektrálne hodnoty žiarivostí $I_e(\lambda)$ sa dá v praxi zmerať s pomocou spektorradiometrov.

4.2 Výpočty mezopických fotometrických parametrov verejného osvetlenia vybraných modelových situácií

Výpočty sa v dnešnej dobe vykonávajú pomocou výpočtovej techniky špecializovanými softvérmí na výpočet parametrov verejného osvetlenia [14]. V týchto programoch sa na výpočet používajú práve výmenné fotometrické súbory.

V práci na základe matematických vzťahov (4.1) až (4.2) zadefinovaných v predchádzajúcej časti boli vypočítané mezopické krivky svietivosti vybraného LED svietidla, ktoré boli uložené vo formáte LDT výmenného fotometrického súboru a následne boli urobené výpočty parametrov verejného osvetlenia pre vybrané modelové situácie na pozemných komunikáciách na základe vytvoreného klasifikačného systému pre triedy M pre motorové vozidlá (tab. 4.1).

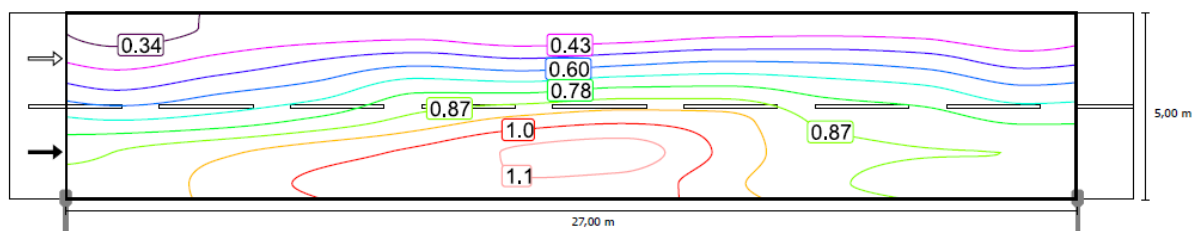
Tab. 4.1 Modelové situácie na výpočet fotometrických parametrov verejného osvetlenia

Modelová situácia RS	Svietidlo	Adaptačný jas L_a cd.m ⁻²	Parameter m	Trieda komunikácie
RS07	LED 25W	0,34	0,630	M6, P4
RS14	LED 25W	0,72	0,733	M5, C5
RS08	LED 25W	1,09	0,790	M4, C4

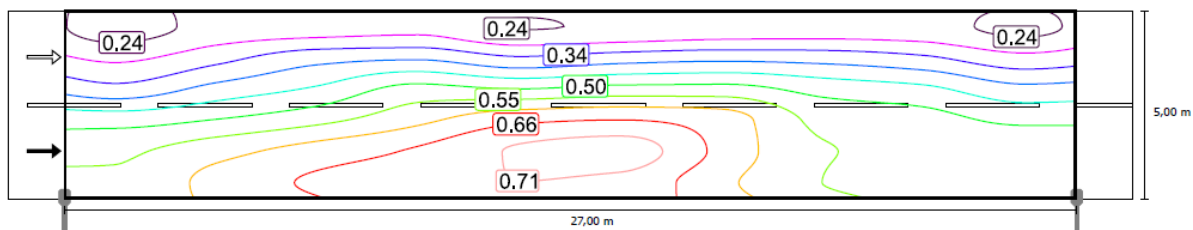
Použitím výpočtového programu DIALUX EVO, ktorý umožňuje výpočet fotometrických parametrov pre verejné osvetlenie v súlade s najnovšími normami pre verejné osvetlenie z roku 2016 [8] [9]. Príklad výpočtu pre modelovú situáciu RS08 predstavujú svetelnotechnické výpočty aké sa vykonávajú v štádiu návrhu nových osvetľovacích sústav verejného osvetlenia pre fotopického pozorovateľa (označenie I_{fot}) a mezopického pozorovateľa (označenie I_{mes}), ktorých výsledky sú uvedené v tab. 4.2 s rozložením jasov a intenzít osvetlenia z výstupu výpočtového programu na obr. 4.1 až obr. 4.2.

Tab. 4.2 Výsledky výpočtu fotometrických parametrov pre modelovú situáciu RS08

Situácia/Parametre		L_{mes}	U_0	U_1	$f_{\text{TI}}(\%)$	R_{EI}		$E_m(\text{lx})$	$E_{\text{min}}(\text{lx})$
RS08 - M4	I_{mes}	0,78	0,45	0,72	5	0,4			
RS08 - M4	I_{fot}	0,47	0,45	0,72	5	0,4			
RS08 - C4	I_{mes}							13,57	0,46
RS08 - C4	I_{fot}							8,28	0,46



Obr. 4.1 Rozloženie jasov jazdných pruhov komunikácie pre modelový prípad RS08 (mezopická krivka svietivosti) – trieda M4



Obr. 4.2 Rozloženie osvetleností jazdných pruhov komunikácie pre modelový prípad RS08 (mezopická krivka svietivosti) – trieda C4

Z výsledkov svetelnotechnických výpočtov sa dajú vidieť rozdiely medzi mezopickými a fotopickými hodnotami jednotlivých parametrov verejného osvetlenia pre modelové situácie. Pri úvahe, že jednotky ostávajú zachované v súlade so sústavou SI, zrakový výkon za podmienok mezopického videnia pozorovateľa je väčší, preto pri dnešných výpočtoch ak sa uvažuje fotopické videnie pozorovateľa aby sa dosiahli požadované parametre jednotlivých tried osvetlenia pozemných komunikácií je nutné, aby sa použili svietidlá s vyšším fotopickým svetelným tokom, čo predstavuje vyššie náklady pre realizáciu osvetľovacej sústavy verejného osvetlenia v porovnaní ak by boli uvažované podmienky mezopického videnia pre pozorovateľa s ohľadom na jeho adaptáciu zrakového systému v reálnych podmienkach inštalácie osvetľovacej sústavy verejného osvetlenia.

Tento predpoklad platí pre svetelné zdroje, ktoré majú S/P pomer vyšší ako 1, čo v dnešnej dobe predstavujú nové technológie vo svetelnej technike v oblasti LED svetelných zdrojov. Svetidlá s prevažujúcim spektrálnym zložením v modrej oblasti viditeľného spektra majú z hľadiska zrakového výkonu väčšiu účinnosť na podmienky videnia pozorovateľa.

5 Teoretický návrh meracieho systému na meranie fotometrických parametrov osvetlenia pozemných komunikácií

V tejto časti je popísaný teoretický návrh pre meranie fotometrických parametrov osvetlenia pozemných komunikácií pre motorové vozidlá pri úvahe mezopických podmienkach videnia.

5.1 Návrh meracieho systému pomocou integrálnych fotometrov

Integrálne fotometre sú meradlá, ktoré majú fotometrickú hlavicu prispôbenú na funkciu fotopického $V(\lambda)$ alebo skotopického pozorovateľa $V'(\lambda)$ pomocou optických filtrov. Vhodným vymedzením priestorového uhla definujú zorný uhol fotometra za použitia optických častí je možné za použitím integrálnych fotometrov skonštruovať meradlá pre meranie jasů.

Pri podmienkach mezopického videnia z modelu pre odporúčaný systém pre mezopickú fotometriu v súlade s dokumentom CIE 191:2010 je potrebné merať tak skotopický ako aj fotopický jas vymedzenej časti zorného poľa pozorovateľa, ktorú nazývame adaptačným poľom. Na základe toho je potom možné určiť mezopický jas popr. intenzitu osvetlenia v súlade so vzťahom definovaným medzi jasom a intenzitou osvetlenia difúzny povrch

$$L = \frac{E}{\Omega} = k \cdot \frac{E \cdot r^2}{A} \quad (5.1)$$

kde E je meraná intenzita osvetlenia v lx fotometrickou hlavicom meracieho systému, Ω priestorový uhol v sr vymedzená geometriou meracieho systémom vymedzený clonami a plochou A , ktorej jas je predmetom merania a k je geometrický korekčný faktor. Týmto spôsobom sa dá navrhnuť merací systém za použitia kombinácie dvoch integrálnych fotometrov, kde by bolo možné merať tak fotopický ako aj skotopický jas a dosadením do známych vzťahov pre mezopickú fotometriu založenú na zrakovom výkone tak určiť mezopický jas meranej oblasti, ktorú predstavuje plocha AOM vo verejnom osvetlení.

Pre metrologické charakteristiky jednotlivých fotometrov je potrebné určiť svetelné odozvy v jednotkách napr. A/lx pre tieto integrálne fotometre definované vzťahmi pre fotopické a skotopické podmienky videnia. Výsledné vzťahy pre svetelné odozvy fotometrov po uvážení všetkých reálnych vplyvov sa dá vyjadriť pre fotopické a skotopické videnie nasledovne

$$s_v = \frac{\pi \cdot d_{\text{fot}}^2}{4} \cdot \frac{y_{\text{fot}}(555) \cdot R_{\text{QED}}(555)}{c_{\Delta\lambda} \cdot c_T \cdot y_{\text{QED}}(555) \cdot K_M} \cdot (1 + \delta c_{\text{LIN}} + \delta c_{\text{UV}} + \delta c_{\text{IR}} + \delta c_{\text{FATIGUE}}) \quad (5.2)$$

$$s'_v = \frac{\pi \cdot d'_{\text{fot}}^2}{4} \cdot \frac{y'_{\text{fot}}(507) \cdot R_{\text{QED}}(507)}{c_{\Delta\lambda} \cdot c_T \cdot y_{\text{QED}}(507) \cdot K_M} \cdot (1 + \delta' c_{\text{LIN}} + \delta' c_{\text{UV}} + \delta' c_{\text{IR}} + \delta' c_{\text{FATIGUE}})$$

kde δc_{LIN} , $\delta' c_{\text{LIN}}$ sú korekčné faktory zapríčinené nelinearitou fotometrickej hlavice δc_{UV} , $\delta' c_{\text{UV}}$, δc_{IR} a $\delta' c_{\text{IR}}$ sú korekčné faktory spôsobené spektrálnou odozvou v ultrafialovej a infračervenej oblasti fotometrov, $\delta c_{\text{FATIGUE}}$, $\delta' c_{\text{FATIGUE}}$ sú korekčné faktory zapríčinené únavou fotodiody fotometrických hlavíc fotometrov a d_{fot} , d'_{fot} sú priemery vstupných apertúr fotometrov.

Svetelné odozvy fotometrických hlavíc sa dá prakticky realizovať na komparačnom zariadení v rádiometrickom laboratóriu, kde pri kalibrácii je potrebné zmerať absolútnu odozvu v jednotkách A/W oboch fotometrických hlavíc voči absolútnemu rádiometru QED s vhodne zvoleným krokom vlnovej dĺžky spolu s určením absolútnej odozvy fotometrov pri vlnových dĺžkach 555 nm pre fotopické a 507 nm pre skotopické videnie, pričom ako zdroj spektrálneho optického žiarenia by bol použitý vhodný monochromátor. Takto určené svetelné odozvy integrálnych fotometrov sú zabezpečené kalibráciou s nadväznosťou na základné fyzikálne jednotky SI sústavy. Určením tzv. aktivity sa dá vyjadriť mieru

chyby, ktorú sa dá následne použiť pre korekciu nameraných hodnôt fotometrických veličín danú matematickým vzťahom

$$a(Z) = \frac{\int S(\lambda)_Z \cdot r_{\text{fot}}(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda)_Z d\lambda} \cdot \frac{\int S(\lambda)_N d\lambda}{\int S(\lambda)_N \cdot r_{\text{fot}}(\lambda) d\lambda} \quad (5.3)$$

kde $S(\lambda)_Z$ je spektrálne zloženie meraného svetelného zdroja a $S(\lambda)_N$ je spektrálne zloženie zdroja, ktoré bolo uvažované pri kalibrácii, pričom hodnota aktivity sa dá použiť ako korekčný faktor, ktorým je potrebné vynásobiť výsledky merania meraných veličín.

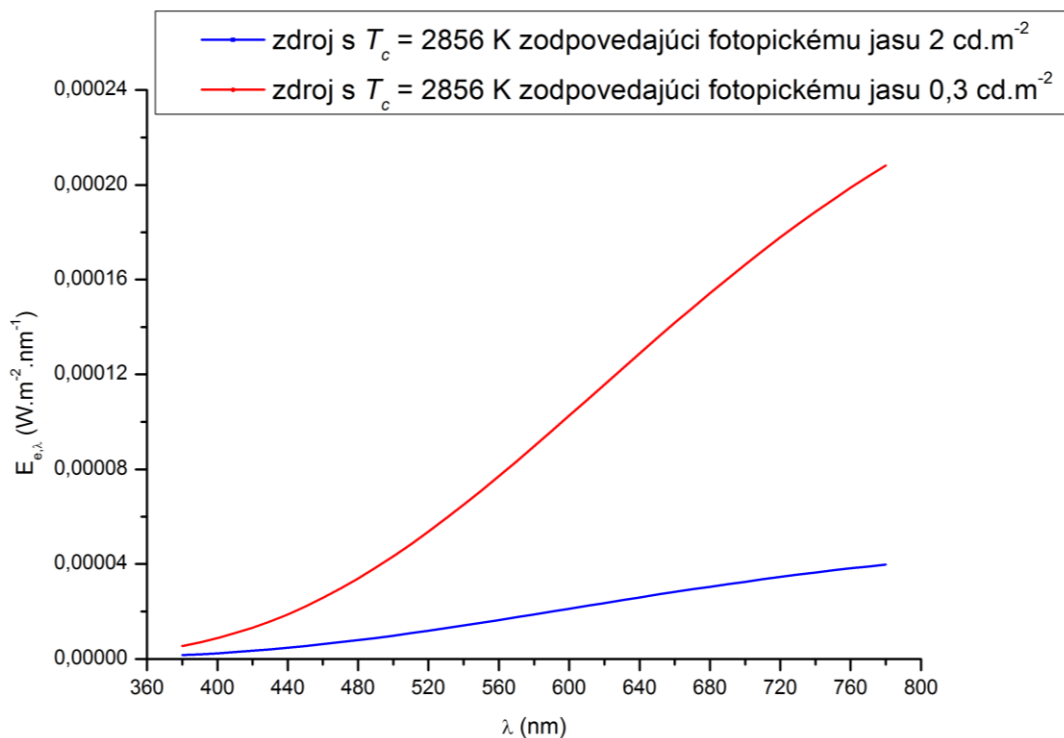
5.2 Návrh meracieho systému pomocou spektorradiometrov

S pomocou spektorradiometrov sa dajú merať priamo spektrálne žiarivé veličiny s pomocou ručných spektorradiometrov, ktoré sú ľahko prenositeľné a vieme s pomocou týchto zariadení získať informáciu navyše aj o spektrálnom zložení objektu merania v reálnom čase pre celú viditeľnú oblasť, čím sa dá určiť napr. S/P pomer meraných svetelných zdrojov.

Použitím CCD spektorradiometrov s optickým vláknom sa dá jednoducho konštruovať merací systém, ktorý sa dá použiť na meranie mezopických fotometrických veličín akými sú v oblasti merania pozemných komunikácií jas a intenzita osvetlenia.

5.2.1 Kalibrácia CCD spektorradiometrov pre merací systém

Pre mezopickú oblasť je dobré použiť vhodné zdroje optického žiarenia pre kalibráciu z dôvodu nízkej úrovne signálu, ktorú v podmienkach mezopickej fotometrie definuje rozsah jasov od $0,005 \text{ cd.m}^{-2}$ až $5,000 \text{ cd.m}^{-2}$, reprezentované žiarovkami s volfrámovým vláknom pre ich dobrú časovú stabilitu počas kalibrácie ako aj jednoduchým ovládaním ich intenzity svietiaceho elementu, ktorých spektrálne zloženie sa dá vyjadriť graficky, čo je znázornené na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Spektrálne zloženie zdrojov optického žiarenia pre mezopickú fotometriu

5.2.2 Merací systém za použitia CCD spektorradiometra pre meranie jasu

Optická časť spektorradiometra by mala pozostávať z clôn a ďalších prídavných optických častí, ktoré presne vymedzujú meranú oblasť. Pre meranie v terénnych podmienkach by bolo možné použiť modifikáciu na nedávno vyvinutého systému skenera pre meranie oblohových jasových pomerov v rámci dizertačnej práce [15] [16], kde pomocou riadenia krokových motorov protokolom DMX sa dá nastaviť pozíciu optického systému meracieho systému na meranú oblasť.

Použitím nasledovného matematického vzťahu medzi spektrálnou žiarou a intenzitou ožiarenia pri predpoklade, že vstupný otvor meracieho systému je rovnomerne osvetlený cez celú plochu

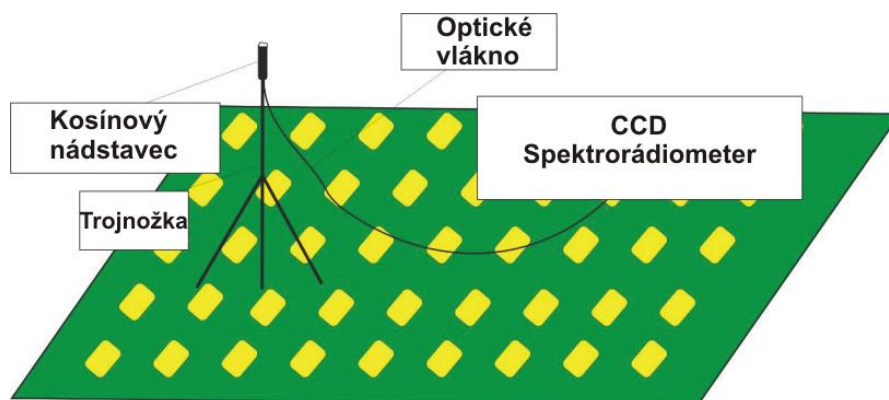
$$L_e(\lambda) = \frac{\rho(^{\circ}0/^{\circ}45, \lambda)}{\pi} \cdot \left(\frac{d_{\text{ref}}}{d}\right)^2 \cdot E_e(\lambda, d_{\text{ref}}) \quad (5.4)$$

kde ρ činiteľ odrazu bieleho normálu s difúznym povrchom, d je meraná vzdialenosť medzi referenčnou plochou bieleho normálu a zdrojom optického žiarenia, d_{ref} je referenčná vzdialenosť medzi svetelným zdrojom a bielym normálom a $E_e(\lambda, d_{\text{ref}})$ je spektrálna intenzita ožiarenia meraná spektorradiometrom pri vzdialenosti medzi bielym normálom a referenčnou rovinou etalónu spektrálnej intenzity ožiarenia [15] [16].

5.2.3 Merací systém za použitia CCD spektorradiometra pre meranie intenzity osvetlenia

Hodnoty úrovne určovania adaptačného jasu sa dá vypočítať pomerná spektrálna účinnosť oka pozorovateľa $V_{\text{mes}}(\lambda)$ pre tento stav adaptácie zraku, čím môže byť táto funkcia opäť použitá na výpočet mezopickkej intenzity osvetlenia, kde meraním pomocou kalibrovaného CCD maticového spektorradiometra pre spektrálnu intenzitu ožiarenia s vhodne zvoleným integračným časom pre úroveň mezopickkej fotometrie spolu s kosínovým nástavcom namontovaným na optické vlákno je možné merať rovinnú mezopickú osvetlenosť v zvolenej meracej sieti.

Sa potom dá merať mezopickú intenzitu osvetlenia v meranej oblasti AOM použitím známych vzťahov pre mezopické fotometrické veličiny a intenzitu ožiarenia meranú snímačom CCD maticového spektorradiometra (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Schéma merania rovinnnej mezopickkej intenzity osvetlenia pre AOM

6 Prínos práce a výsledky

Práca sa zaoberá problematikou fotometrie za podmienok mezopického videnia, kde spektrálna účinnosť ľudského oka závisí od stavu adaptácie zrakového systému pozorovateľa. Od tohto stavu závisí aj zrakový výkon, ktorý závisí od úrovne adaptačného jasú v podmienkach mezopického videnia. Jej použitie do praxe je najmä v oblasti výpočtu a merania mezopických fotometrických veličín na základe vytvoreného klasifikačného systému pre triedy pozemných komunikácií pre motorové vozidlá. Prezentované poznatky v práci

- Meranie a analýza jasových máp reálnych inštalácií verejného osvetlenia pre rôzne situácie na pozemných komunikáciách s ohľadom na zorné pole pozorovateľa, ktorým je vodič automobilu.
- Vytvorenie klasifikačného systému z vykonanej analýzy jasových máp z merania pre modelové situácie vo verejnom osvetlení so stanovením úrovne adaptačného jasú L_a pre triedy M v súlade s normou STN EN 13201-2.
- Výpočty mezopických parametrov verejného osvetlenia za použitia bežne používaných softvérov pre ich výpočet v praxi v súlade s teoretickými modelmi platnými vo fotometrii.
- Návrh meracích systémov pre meranie mezopických fotometrických parametrov

6.1 Použitelnosť výsledkov a prínosy

- Zonácia jasových máp z praktického merania jasných objektov v zornom poli pozorovateľa, ktoré majú vplyv na adaptáciu zrakového systému pozorovateľa za podmienok mezopického videnia. Čiastkové výsledky budú použité ako podklad pre tvorbu dokumentu pracovnej skupiny JTC-001 pri CIE.
- Stanovenie úrovne adaptačného jasú pre modelové situácie na pozemných komunikáciách L_a v súlade navrhnutého teoretického modelu [6] uvažujúc vplyv mimoosového (periférneho) videnia pozorovateľa kvantifikovaného závojom jasom pre vozovky motorových vozidiel.
- Využitie klasifikačného systému na základe známej hodnoty adaptačného jasú pre projektantov v praxi v štádiu svetelnotechnického návrhu použitím zodpovedajúcej pomernej spektrálnej účinnosti oka pozorovateľa pre konkrétny stav adaptácie za podmienok mezopického videnia.
- Postup pre vytvorenie mezopických výmenných fotometrických súborov pre svetelnotechnické výpočty mezopických parametrov verejného osvetlenia umožňuje v praxi využiteľnosť a modifikáciu už existujúcich výmenných súborov.
- Výsledky výpočtov na základe zrakového výkonu pre mezopickú oblasť pre svetelné zdroje s S/P pomerom väčším ako 1 naznačujú potencionálnu energeticky hospodárnejšie navrhovať osvetľovacie sústavy verejného osvetlenia
- Použité výsledky modelových situácií môžu slúžiť ako podklad pre nový prístup v normatívnych dokumentoch, ktoré pojednávajú o osvetlení pozemných komunikácií a ich implementácia výsledkov pri ich budúcich revíziách na úrovni európskej normalizačnej komisie CEN.
- Rozšírenie vnímania mezopických veličín podložené modelovými výpočtami ako aj ich použitie do praxe svetelnej techniky aj v iných oblastiach kde je možné uvažovať podmienky mezopického videnia.

- Teoretické návrhy meracích systémov pre meranie mezopických fotometrických parametrov vo verejnom osvetlení použitím integrálnej fotometrie alebo spektorradiometrické prostriedky. Možnosť konštrukcie reálnych meracích systémov s nadväznosťou na základnú sústavu fyzikálnych jednotiek SI.
- Opísanie postupov kalibrácie pre jednotlivé meracie systémy umožňuje pri ich konštrukcii charakterizovať ich metrologické vlastnosti pre presnejšie merania.
- Používanie meracích systémov na základe ich teoretického návrhu popísaného v práci pri verifikácii mezopických fotometrických parametrov osvetľovacích sústav verejného osvetlenia na základe ich svetelnotechnického návrhu.

6.2 Odporúčania pre ďalšiu prácu

Výskum by mal byť zameraný na prepojenie mezopickkej fotometrie na základe zrkovného výkonu a psychofyzického vnímania objektov v zornom poli pozorovateľa s ohľadom na adaptačný jas pozorovateľa, kde nové práce poukazujú práve na smerovanie ďalších prác v oblasti mezopickkej fotometrie pozorovateľa. Ďalej je nutné zvážiť či počet modelových situácií na základe vytvoreného klasifikačného systému je postačujúci s možnosťou rozšírenia tento systém o ďalšie modelové situácie v podmienkach verejného osvetlenia. Taktiež by bolo dobré výskum v ďalších prácach orientovať na iné aplikácie vo svetelnej technike kde sa dá uvažovať podmienky mezopického videnia ako napr. núdzové osvetlenie v interiérových osvetľovacích sústavách. Výskum musí obsahovať väčší súbor meraných dát, na základe ktorých bude možné analyzovať či nie je potrebné rozšíriť navrhnutý klasifikačný systém. Pri tvorbe mezopickkej krivke svietivosti by bolo dobré overiť v akej miere je postačujúce meranie iba pri jednom uhle vyžarovania svietiacej a taktiež svietidiel, pretože niektoré práce poukazujú že spektrálne zloženie sa s uhlom pozorovania pre LED svietidlá istou mierou mení. Je nutné kvantifikovať či táto možná zmena pre svietidlá výrazne ovplyvní výsledné mezopické fotometrické veličiny.

Z hľadiska výpočtu mezopických veličín je potrebné vykonať väčší počet výpočtov a vzťahnúť Teoretický návrh meracích systémov pre meranie mezopických fotometrických parametrov verejného osvetlenia za podmienok mezopického videnia pozorovateľa dáva priestor pre ich konštrukciu ako aj vyjadrenia neistôt merania na základe popísaných kalibrácií týchto systémov ktoré sa však vykonávajú v laboratórnych podmienkach. Je taktiež potrebné tieto systémy porovnať s návrhmi pre mezopickú fotometriu odrážajúc všetky vplyvy, ktoré sa v reálnych podmienkach môžu vyskytovať. Pri praktických meraniach v teréne je dobré vyjadriť neistotu merania, ktorú užívateľ takýchto meracích systémov môže odhadnúť.

Záver

Práca sa zameriava na jeden z najaktuálnejších problémov v oblasti verejného osvetlenia v podmienkach mezopickej fotometrie. Praktické použitie mezopickej fotometrie na základe odporúčaného systému popísaného v dokumente CIE 191:2010 stále nie je v praxi používané hoci dokument už jestvuje 7 rokov. Najväčším problémom je práve stanovenie adaptačného jasu, tvarom a rozmerom adaptačného poľa v mezopickom videní kde pomerná spektrálna účinnosť ľudského oka sa dynamicky mení práve na základe tohto parametra, ktorý vyjadruje mieru adaptácie zrakového systému pozorovateľa. Práve na tento problém sa dizertačná práca zameriava pre stanovenie adaptačného jasu v podmienkach mezopického videnia a následne určenie pomernej spektrálnej účinnosti oka pozorovateľa, čo sa dá následne použiť pri výpočtoch alebo meraniach mezopických fotometrických veličín. Keďže popísanými matematickými modelmi v práci sa povaha jednotiek používaných nemení je možné na základe zrakového výkonu porovnať vplyv fotometrických veličín na rôzne situácie. V práci je popísaný vplyv periférneho videnia, ktorý v niektorých situáciách významnou mierou vplýva na adaptáciu zraku pozorovateľa.

Hlavnou podstatou práce bolo vytvorenie klasifikačného systému, ktorý by sa dal použiť reálne v praxi. Klasifikačný systém v práci zohľadňuje triedy pozemných komunikácií pre motorové vozidlá na základe analýzy jasových pomerov v zornom poli pozorovateľa čo doposiaľ v mezopickej fotometrii a jej používanie v praxi chýbalo. Na základe tohto systému je možné stanoviť podmienky mezopického videnia pozorovateľa s pomocou vyjadrenia pomernej spektrálnej účinnosti pre konkrétny stav adaptácie zraku pozorovateľa, a tým vypočítať mezopické fotometrické veličiny, ktorý zohľadňujú zrakový výkon pozorovateľa v podmienkach verejného osvetlenia.

Posledná časť práce sa zaoberá teoretickými návrhmi meracích systémov, ktoré v budúcnosti môžu byť reálne skonštruované a použité pre overenie svetelnotechnických výpočtov po realizácii osvetľovacích sústav verejného osvetlenia na základe návrhu mezopických fotometrických veličín.

Čiastkové výstupy dizertačnej práce budú nové poznatky, ktoré sa využijú pri vypracovaní normatívnych dokumentov v CIE v rámci pracovnej skupiny JTC-001 a CEN. Táto práca bola vytvorená v medzinárodnej spolupráci s firmou PANASONIC a talianskeho metrologického inštitútu INRIM.

Literatúra

- [1] CIE S 017/E:2011, *ILV: International Lighting Vocabulary*, Vienna: CIE, 2011.
- [2] Horňák, P., *Svetelná technika*, Bratislava: Alfa, 1989. 247 s., ISBN 80-05-00122-3.
- [3] CIE 81, *Mesopic Photometry History, Special Problems and Practical Solutions*, Vienna: CIE 1989
- [4] CIE 191, *Recommended system for mesopic photometry based on visual performance*, Vienna: CIE, 2010.
- [5] T. Uchida, Y. Ohno, "Defining the visual adaptation field for mesopic photometry: How does a high-luminance source affect peripheral adaptation?", *Lighting Research and Technology*, zv.47, pp. 845-858, 2014.
- [6] T. Uchida, "Adaptation luminance simulation for CIE mesopic photometry system implementation," rev. *Proceedings of 28th CIE Session 2015*, Manchester, Great Britain, 29th June – 3rd July 2015, pp.307 – 316.
- [7] CIE 146, *CIE Equations for Disability Glare*, Vienna: CIE, 2002
- [8] EN 13 201-2, *Road lighting, Part 2: Performance requirements*, 2016
- [9] EN 13 201-3, *Road lighting, Part 3: Calculation of performances*, 2016
- [10] R. Dubnička, D. Gašparovský, "Analysis of visual field of observer in connection with the adaptation luminance determination in mesopic photometry," rev. *Proceedings of CIE 2016 'Lighting Quality and Energy Efficiency'*, March 3–5, 2016, Melbourne, Australia, Vienna : CIE, 2016, pp. 513-522. ISBN 978-3-902842-65-7
- [11] D. Gašparovský, R. Dubnička, T. Uchida, J. Raditschová, "Classification of road lighting situations for mesopic calculations.," rev. *Lux Pacifica 2015 : conference*, Kolkata, India, 27-29 November 2015. Kolkata : Indian Society of Lighting Engineers, 2015, pp. 462-472.
- [12] Uchida, T., Akashi, Y., Terai, N., Iwamoto, K., "TESTING A MESOPIC ADAPTATION SIMULATION METHOD WITH SIMPLE LUMINANCE," rev. *PROCEEDINGS of the Conference on Smart Lighting for Better Life at the CIE Midterm Meeting 2017*, pp. 173-179, Jeju, South Korea, 2017
- [13] CIE 121, *The Photometry and Goniophotometry of Luminaires*, Vienna: CIE, 1996
- [14] <http://www.dial.de/DIAL/en/dialux-international-download/cestina.html>
- [15] L. Kómar, A. Rusnák, R. Dubnička, "Analysis of Diffuse Irradiance from Two Parts of Sky Vault Divided by Solar Meridian Using Portable Spectral Sky-Scanner", *Solar Energy*, zv. 96, pp. 1-9, 2013, ISSN 0038-092X.
- [16] A. Rusnák, Meranie a hodnotenie spektrálnych charakteristík slnečného žiarenia, Dizertačná práca, Bratislava, August 2014

Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

- [1] ADC01 KÓMAR, Ladislav - RUSNÁK, Anton - DUBNIČKA, Roman. Analysis of Diffuse Irradiance from Two Parts of Sky Vault Divided by Solar Meridian Using Portable Spectral Sky-Scanner. In *Solar Energy*. Vol. 96 (2013), s.1-9. ISSN 0038-092X.

AFA Publikované pozvané príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [2] AFA01 DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Experience with LED in road lighting. In *Razsvetljavo 2014: Lighting Engineering 2014 [elektronický zdroj] : Zbornik: Proceedings; 23rd International Symposium; Čatež, Slovenia; 2-3 October 2014*. Maribor : Slovensko društvo za razsvetljavo, 2014, USB kľúč, s. 139-148. ISBN 978-961-93733-0-9.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [3] AFC02 DUBNIČKA, Roman - RUSNÁK, Anton - PÍPA, Marek. 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, 15-16 April 2013*. Vienna : Commission Internationale de l'Eclairage, 2013, s.611-615. ISBN 978-3-902842-44-2.
- [4] AFC04 DUBNIČKA, Roman - JANIGA, Peter - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - BARČÍK, Michal. Measurement of luminance distribution of street light under different weather conditions. In *Proceedings of CIE 2014 'Lighting Quality and Energy Efficiency' : Kuala Lumpur, Malaysia; 23-26 April 2014*. Vienna : Commission Internationale de l'Eclairage, 2014, s. 907-915. ISBN 978-3-902842-49-7.
- [5] AFC06 DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - BARČÍK, Michal - LIPNICKÝ, Lukáš. Calculation of roadlighting photometric parameters under mesopic conditions. In *LIGHT-SVĚTLO 2015 [elektronický zdroj] : proceedings of the 21st International Conference. Brno, ČR, 8. - 10. 9. 2015*. Brno : Brno University of Technology, 2015, USB, s. 173-176. ISBN 978-80-214-5244-2.
- [6] AFC07 DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - LIPNICKÝ, Lukáš - RADITSCHOVÁ, Jana. Method of visual field analysis for investigation of mesopic vision conditions. In *Balkan light 2015 : The 6th balkan conference on lighting. Athens, Greece. 16-19 September 2015*. Athens : National Technical University of Athens, 2015, S. 435-439. ISBN 978-618-80348-2-2.
- [7] AFC08 DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Analysis of visual field of observer in connection with the adaptation luminance determination in mesopic photometry. In *Proceedings of CIE 2016 'Lighting Quality and Energy Efficiency' : Melbourne, Australia. March 3-5, 2016*. Vienna : CIE, 2016, s. 513-522. ISBN 978-3-902842-65-7. V databáze: WOS: 000386326700065.
- [8] AFC09 DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Classification system for lighting design under condition of mesopic photometry. In *LUMEN V4 : 6th IEEE Lighting conference of the visegrad countries. Karpacz, Poland. September 13-16, 2016*. Warsaw : IEEE, 2016, s. 262-268. ISBN 978-1-5090-3304-1. V databáze: IEEE: 7745559 ; WOS: 000390683200055 ; SCOPUS: 2-s2.085002681118.

- [9] AFC10 DUBNIČKA, Roman - LIPNICKÝ, Lukáš - CSUTI, Péter - SZABÓ, Ferenc. Methods for correction of the LIDC by means of goniophotometers with rotating luminaires for different lamps. In *LUMEN V4 : 6th IEEE Lighting conference of the visegrad countries. Karpacz, Poland. September 13-16, 2016.* Warsaw : IEEE, 2016, S. 269-274. ISBN 978-1-5090-3304-1. V databáze: IEEE: 7745560 ; WOS: 000390683200056 ; SCOPUS: 2-s2.0-85002964191.
- [10] AFC12 DUBNIČKA, Roman - LIPNICKÝ, Lukáš - GRINAJ, Lukáš - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Impact of the photometric data of luminaires to the lighting design calculations with respect to the goniophotometry. In *Proceedings of CIE expert symposium on the CIE S 025 LED lamps, LED luminaires and LED modules test standard. Braunschweig, Germany. 26 November 2015.* Vienna : CIE, 2016, S. 52-61. ISBN 978-3-902842-28-2. V databáze: WOS: 000386326600008.
- [11] AFC13 GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - DUBNIČKA, Roman - JANIGA, Peter - BARČÍK, Michal. Energy performance numerical indicators of public lighting. In *Electric Power Engineering 2014 : 15th International scientific conference on Electric power engineering (EPE); Brno, Czech Republic, May 12-14, 2014.* 1. vydanie. Brno : Brno University of Technology, 2014, s. 641-644. ISBN 978-1-4799-3806-3.
- [12] AFC16 LIPNICKÝ, Lukáš - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - DUBNIČKA, Roman. Influence of the calculation grid density to the selected photometric parameters for road lighting. In *LUMEN V4 : 6th IEEE Lighting conference of the visegrad countries. Karpacz, Poland. September 13-16, 2016.* Warsaw : IEEE, 2016, s. 246-249. ISBN 978-1-5090-3304-1. V databáze: IEEE: 7745555 ; WOS: 000390683200051 ; SCOPUS: 2-s2.0-85003035752.
- [13] AFC18 DUBNIČKA, Roman - LIPNICKÝ, Lukáš - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Comparison of the measurement methods of road lighting. In *Lux Europa 2017 [elektronický zdroj] : European lighting conference. Lighting for modern society. Ljubljana, Slovenia. September 18-20, 2017.* Ljubljana : Lighting engineering society of Slovenia, 2017, USB, s. 418-422. ISBN 978-961-93733-4-7.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [14] AFD01 DUBNIČKA, Roman. Measurement of Photometric Quantities in Practice. In *LUMEN V4 : 4. konferencia Vyšehradských krajín pre osvetlenie. Bratislava, Slovensko, 26.-28. 9. 2012.* Bratislava : KONGRES Management, 2012, s.466-473. ISBN 978-80-89275-32-8.
- [15] AFD06 DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Lighting design of road lighting in mesopic photometry. In *Svetlo - Light 2017 [elektronický zdroj] : 22nd International conference. Podbanské, Slovakia. November 8-10, 2017.* 1. ed. Bratislava : Slovenská svetelnotechnická spoločnosť, 2017, USB, S. 220-229. ISBN 978-80-972865-0-7.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- [16] BEE01 DUBNIČKA, Roman. Mesopic Photometry using Spectroradiometric Means. In *Lux Junior 2013. Tagungsband Proceedings : 11. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs. Dörfeld bei Ilmenau, Germany, 27.-29.9.2013.* Ilmenau : TU Ilmenau, 2013, s.CD-ROM [5] s. ISBN 978-3-927787-46-9.
- [17] BEE04 GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - DUBNIČKA, Roman - RADITSCHOVÁ, Jana. Energy performance of road lighting. In *Lux Pacifica 2015 : conference, Kolkata, India, 27-29 November 2015.* Kolkata : Indian Society of Lighting Engineers, 2015, S. 66-84.
- [18] BEE05 GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - DUBNIČKA, Roman - UCHIDA, Tatsukiyo - RADITSCHOVÁ, Jana. Classification of road lighting situations for mesopic calculations. In *Lux Pacifica 2015 : conference, Kolkata, India, 27-29 November 2015.* Kolkata : Indian Society of Lighting Engineers, 2015, S. 462-472.