

Ing. Lukáš Lipnický

Autoreferát dizertačnej práce

METODIKA VÝPOČTU PARAMETROV VEREJNÉHO OSVETLENIA

na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

v študijnom odbore 5.2.30 Elektroenergetika

Miesto a dátum: Bratislava, 11.06.2019

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Lukáš Lipnický

Autoreferát dizertačnej práce

METODIKA VÝPOČTU PARAMETROV VEREJNÉHO OSVETLENIA

na získanie akademického titulu
doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

Miesto a dátum: Bratislava, 11.06.2019

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia.

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

Predkladateľ: **Ing. Lukáš Lipnický**
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: o hod..

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

.....
dekan FEI
prof. Dr. Miloš Oravec

Obsah

Úvod.....	4
Ciele dizertačnej práce.....	5
1 Súčasný stav riešenej problematiky	6
1.1 Rozloženie bodov pre meranie a výpočet jednotlivých parametrov verejného osvetlenia podľa súčasnej metodiky.....	6
1.2 Vstupné údaje pre výpočet	8
2 Analýza vplyvu hustoty výpočtovej siete na výsledné parametre osvetlenia.....	9
3 Návrh hustoty siete pre meranie a výpočet parametrov verejného osvetlenia.....	12
3.1 Sieť pre výpočet a meranie jasů	12
3.2 Sieť pre výpočet a meranie osvetlenosti.....	14
4 Riešenie splajnovej interpolácie v tabuľkách svietivosti a odrazivosti	18
Prínos práce a výsledky	23
Použitelnosť výsledkov a prínosy.....	23
Odporúčania pre ďalšiu prácu	24
Záver.....	25
Použitá literatúra.....	26
Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce	27

Úvod

Ľudia sa už od staroveku pomocou osvetlenia snažia prispôsobiť nočný obraz miest svojim potrebám a vytvoriť si tak pomocou neho určitý druh bezpečnosti. Historicky si najskôr začalo vytvárať osvetlenie vonkajších priestorov, komunikácii, neskôr sa začalo používať v lodnej a železničnej doprave. Osvetlenie miest sa začalo najviac rozširovať po nástupe elektrických svetelných zdrojov. S príchodom elektrických svetelných zdrojov nastáva taktiež pokrok v oblasti výskumu verejného osvetlenia.

V súčasnosti musí byť každý návrh verejného osvetlenia v súlade s normatívnymi požiadavkami na parametre osvetlenia, ku ktorým patrí udržiavaný jas, udržiavaná osvetlenosť, celková a pozdĺžna rovnomernosť osvetlenia, prahový prírastok TI a novo zavedený parameter pomer osvetlenia okrajov komunikácie EIR. Metodiku výpočtu týchto parametrov definuje medzinárodný dokument CIE 140, ktorý je modifikáciami implementovaný do európskej normy EN 13201-3. V súčasnosti sa ukončila revízia oboch dokumentov a pripravujú sa témy na riešenie ďalších metodických problémov. Ide predovšetkým o otázku hustoty výpočtovej siete, splajnové interpolácie v I-tabuľkách a R-tabuľkách a aplikáciu fotometrie mezopického videnia do metodiky.

Metodikou výpočtu jednotlivých parametrov verejného osvetlenia sa zaoberá štvrtá divízia medzinárodnej komisie pre osvetľovanie CIE. V rámci jednotlivých technických komisií štvrtej divízie sa stretávajú odborníci členských krajín za účelom riešenia aktuálnych problémov vo verejnom osvetlení a konfrontácii získaných poznatkov. Získané výsledky, dohodnuté závery a odporúčania sa zverejňujú v rámci publikácii CIE ktoré bývajú zväčša implementované do európskych noriem.

Dizertačná práca je zameraná na riešenie hustoty výpočtovej siete, meracej siete a riešenie splajnovej interpolácie.

Ciele dizertačnej práce

Dizertačná práca je zameraná na riešenie aktuálnych problémov v oblasti metodiky výpočtu parametrov verejného osvetlenia. Výsledky práce budú použité v rámci príprav nasledujúcich revízií príslušných medzinárodných dokumentov týkajúcich sa metodiky výpočtu a verifikácie jednotlivých parametrov verejného osvetlenia.

Tézy dizertačnej práce

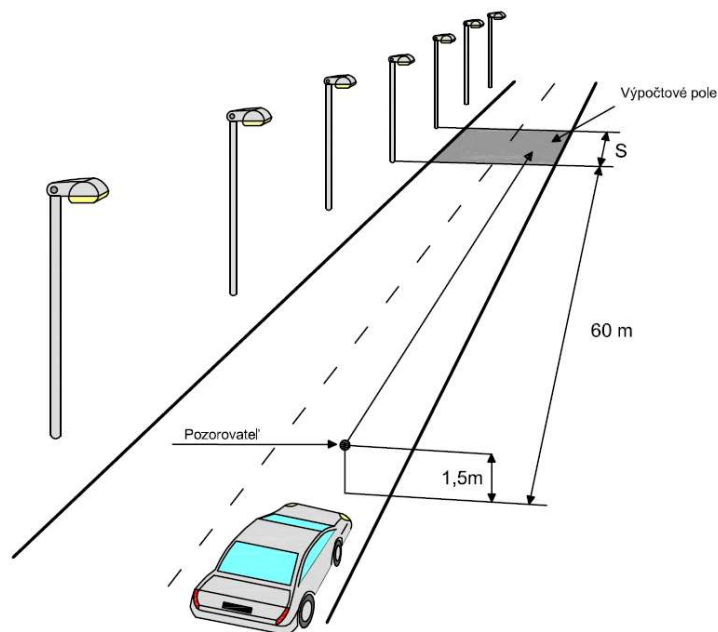
1. Analýza vplyvu hustoty výpočtovej siete na výsledné parametre verejného osvetlenia.
2. Návrh hustoty siete na meranie a výpočet parametrov verejného osvetlenia v normatívnych dokumentoch.
3. Riešenie splajnovej interpolácie hodnôt svietivosti v I-tabuľkách a odrazivosti v R-tabuľkách.

1 Súčasný stav riešenej problematiky

1.1 Rozloženie bodov pre meranie a výpočet jednotlivých parametrov verejného osvetlenia podľa súčasnej metodiky

Vo verejnom osvetlení sa v závislosti od požadovanej aplikácie používa ako návrhové kritérium jas alebo osvetlenosť. Jas sa používa na hodnotenie a návrh osvetlenia komunikácií kde je možné presne definovať odrazné vlastnosti povrchov a polohu pozorovateľa. Priemerný jas na vozovke $\bar{L}$ má zásadný vplyv na zrakovú pohodu, zrakový výkon vodiča a ovplyvňuje viditeľnosť prekážok. Vplyv na zrakový výkon a pohodu má tiež celková rovnomernosť U_0 ktorá sa vypočíta ako pomer minimálnej a priemernej hodnoty jasu na komunikácii. Pri komunikáciách s dobrou celkovou rovnomernosťou môže nepriaznivo ovplyvniť zrakovú pohodu vodiča zlá pozdĺžna rovnomernosť U_1 ktorá sa vypočíta ako pomer minimálnej a maximálnej hodnoty jasu v osi jazdného pruhu. Na hodnotenie obmedzujúceho oslnenia sa používa prahový prírastok f_{TI} ktorý charakterizuje zvýšenie prahu rozlíšiteľnosti jasu. Obmedzujúce oslnenie klesá v závislosti od zvyšujúceho sa priemerného jasu pozadia. Posledným parametrom pri návrhovom kritériu jasu je pomer osvetlenia okolia R_{EI} . Tento parameter sa vyhodnocuje vzhľadom na to že vodič musí vnímať nielen vozovku ohraničenú obrubníkmi ale aj jej okolie aby mohol včas zareagovať na rôzne nepredvídateľné udalosti.

Pozícia výpočtového poľa je presne definovaná v priečnom aj pozdĺžnom smere (obr. 1). V pozdĺžnom smere relevantného priestoru je výpočtové pole vymedzené pozíciou dvoch susedných svietidiel ležiacich v jednom rade [1], [6]. V priečnom smere relevantného priestoru je pozícia definovaná celou šírkou komunikácie pokiaľ sa jedná o komunikáciu bez stredného oddeľovacieho pásu alebo šírkou jednej časti komunikácie pokiaľ sa jedná o komunikáciu so stredným oddeľovacím pásom [1], [6]. Poloha pozorovateľa pri výpočte jasu je definovaná v osi každého jazdného pruhu vo výške 1,5 m čo zodpovedá výške zraku pozorovateľa v automobile a vo vzdialenosti 60 m pred prvým svietidlom vo výpočtovom poli [1], [6], [15]. Uhol pozorovania α smeruje 1° nadol.



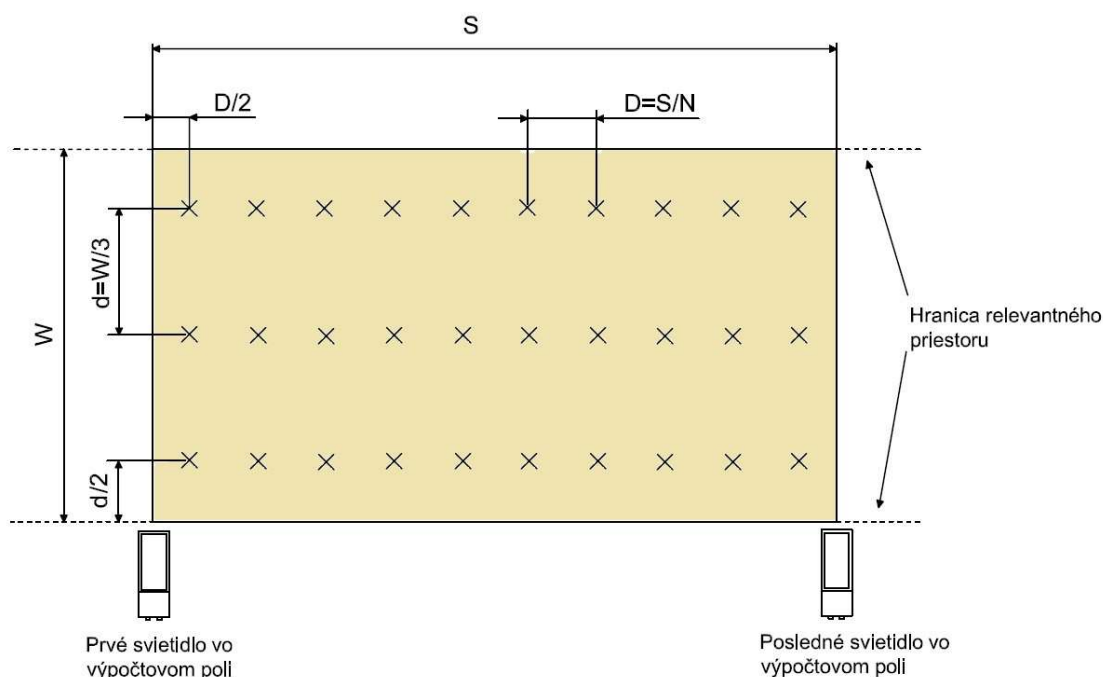
Obr. 1 Poloha výpočtového poľa

Rozmiestnenie bodov vo výpočtovom poli je rovnomerné (obr. 2). Počet bodov výpočtového rastru je v pozdĺžnom smere definovaný vzťahom (1) a v priečnom smere vzťahom (2) [1], [6].

$$D = \frac{S}{N} \quad (\text{m}) \quad (1)$$

$$d = \frac{W}{3} \quad (\text{m}) \quad (2)$$

- D je vzdialenosť medzi bodmi v pozdĺžnom smere
 S - vzdialenosť medzi bodmi v jednom rade (m)
 N - počet bodov výpočtu v pozdĺžnom smere
 pre $s \leq 30\text{m}$, $N = 10$
 pre $s > 30\text{m}$, $N =$ najmenšia celá hodnota pre ktorú platí $D \leq 3\text{m}$
 d - vzdialenosť medzi bodmi v priečnom smere
 W - šírka jazdného pruhu (m)



Obr. 2 Výpočtový raster pre jeden jazdný pruh [1], [6]

Osvetlenosť sa ako návrhové kritérium používa vo viacerých situáciách. Pre zaistenie bezpečného pohybu chodcov, cyklistov a detekciu prekážok je potrebné zaistiť dostatočnú hladinu horizontálnej osvetlenosti E_h na komunikácii. Horizontálna osvetlenosť sa alternatívne používa aj pri komunikáciách pre motorovú dopravu kde je rozhl'ad menší ako 60 m alebo je potrebné zohľadniť viaceré polohy používateľa. Ako alternatívne hodnotenie komunikácii pre chodcov a cyklistov je možné použiť polguľovú osvetlenosť E_{hs} ktorá charakterizuje osvetlenie na povrchu polgule. Pomocou polguľovej osvetlenosti sa dá hodnotiť kvalita osvetlenia väčších oblastí ako sú námestia, parky a pod. kde je dôležitá osvetlenosť zo všetkých smerov polpriestoru. Pri dôležitosti viditeľnosti vertikálnych povrchov ako sú napríklad body pripájania na križovatkách sa na hodnotenie používa vertikálna osvetlenosť E_v . V oblastiach so zvýšenou kriminalitou kde je potrebné rozpoznávanie tvárí sa na hodnotenie používa polvalcová osvetlenosť E_{sc} ktorá charakterizuje osvetlenie na povrchu tvaru polvalcového plášťa. Pomocou polvalcovej osvetlenosti je možné vyhodnotiť kvalitu osvetlenia tváre, čo v prípade nebezpečenstva kriminálneho deliktu prispieva k identifikácii páchateľa. Hodnota polvalcovej osvetlenosti má vplyv na vzdialenosť pri ktorej je možné identifikovať tvár oproti idúcej osobe. Je dokázané že človek má pocit bezpečia keď je možné rozoznať tvár oproti idúcich zo vzdialenosti 4m [9]. Rozmiestnenie bodov vo výpočtovom poli pre výpočet osvetlenosti je rovnaké ako pri výpočte jasu.

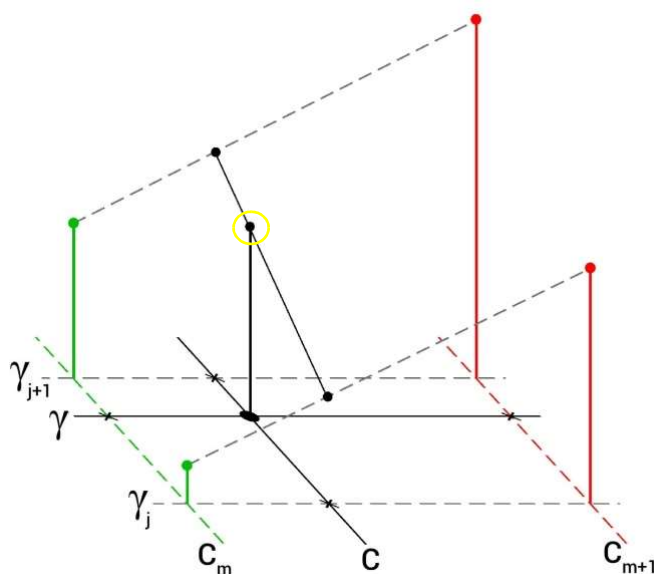
1.2 Vstupné údaje pre výpočet

Pre výpočet jednotlivých parametrov verejného osvetlenia sú okrem geometrie osvetľovaného priestoru potrebné údaje o vyžarovacej charakteristike použitého svietidla prípadne údaje o odrazných vlastnostiach použitého povrchu komunikácie. Údaje o vyžarovacej charakteristike svietidla sú uvedené v I-tabuľke, kde sú zaznamenané hodnoty svietivosti I prepočítanej na 1000 lm v súradnicovej sústave $C; \gamma$. Údaje o odrazných vlastnostiach povrchov sú uvedené v R-tabuľke, kde sú zaznamenané hodnoty redukovaného súčiniteľa jasu r vynásobené koeficientom 10^4 v súradnicovej sústave $\beta; \varepsilon$. Pri výpočte jednotlivých parametrov verejného osvetlenia sa stáva že je potrebná hodnota svietivosti alebo redukovaného súčiniteľa jasu nachádzajúca sa medzi uzlovými bodmi I a R-tabuliek.

Na výpočet hodnoty ležiacej medzi nameranými hodnotami v I a R-tabuľkách sa v súčasnosti používa lineárna interpolácia. V uzlových bodoch R-tabuliek sa vykonáva interpolácia rovnako ako v uzlových bodoch I-tabuliek. Hľadanú hodnotu je možné stanoviť pomocou lineárnej interpolácie medzi štyrmi hodnotami ktoré sa nachádzajú najbližšie k požadovanému smeru (obr. 3). Základom pre lineárnu interpoláciu je všeobecný vzťah (3) [10].

V Starších dokumentoch zaoberajúcich sa metodikou výpočtu verejného osvetlenia bola na výpočet hľadanej hodnoty dovolená aj kvadratická interpolácia. Kvadratická interpolácia poskytovala v porovnaní s lineárnou interpoláciou zlepšenie presnosti výpočtu pri menej hustých intervaloch $C; \gamma$.

$$y(x) = y_1 \left(\frac{x-x_2}{x_1-x_2} \right) + y_2 \left(\frac{x-x_1}{x_2-x_1} \right) \quad (3)$$



Obr. 3 Uzlové body potrebné pre lineárnu interpoláciu v I tabuľke

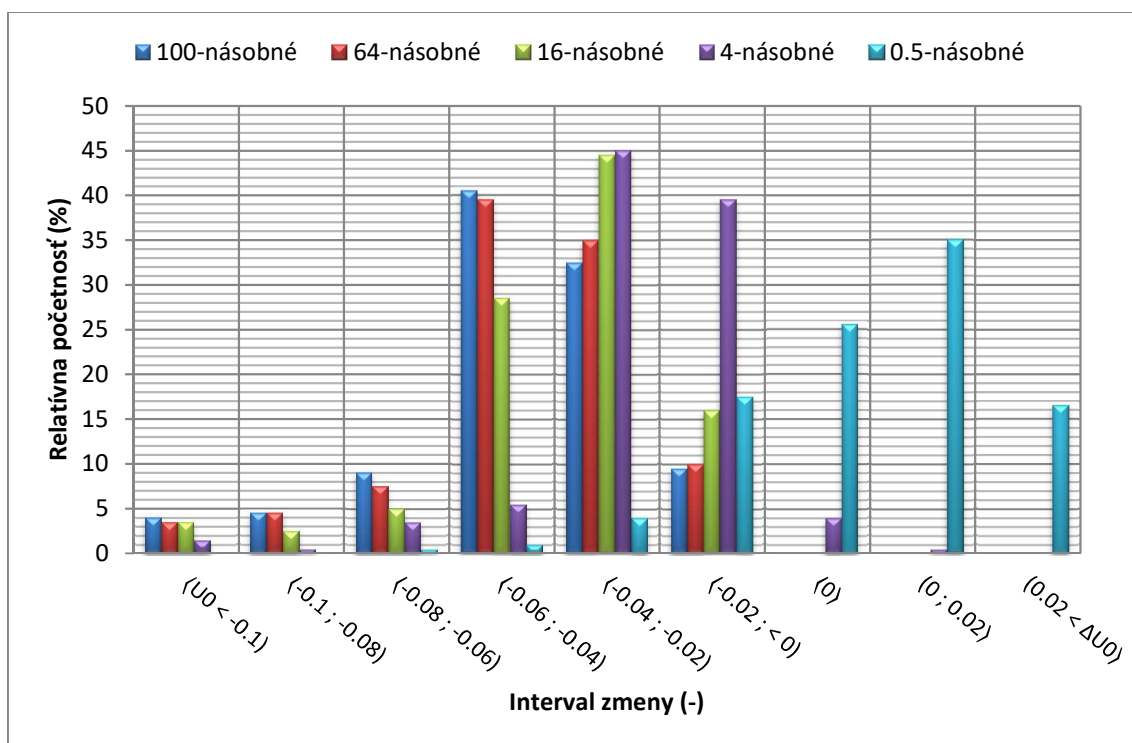


je hľadaná hodnota $I(C, \gamma)$

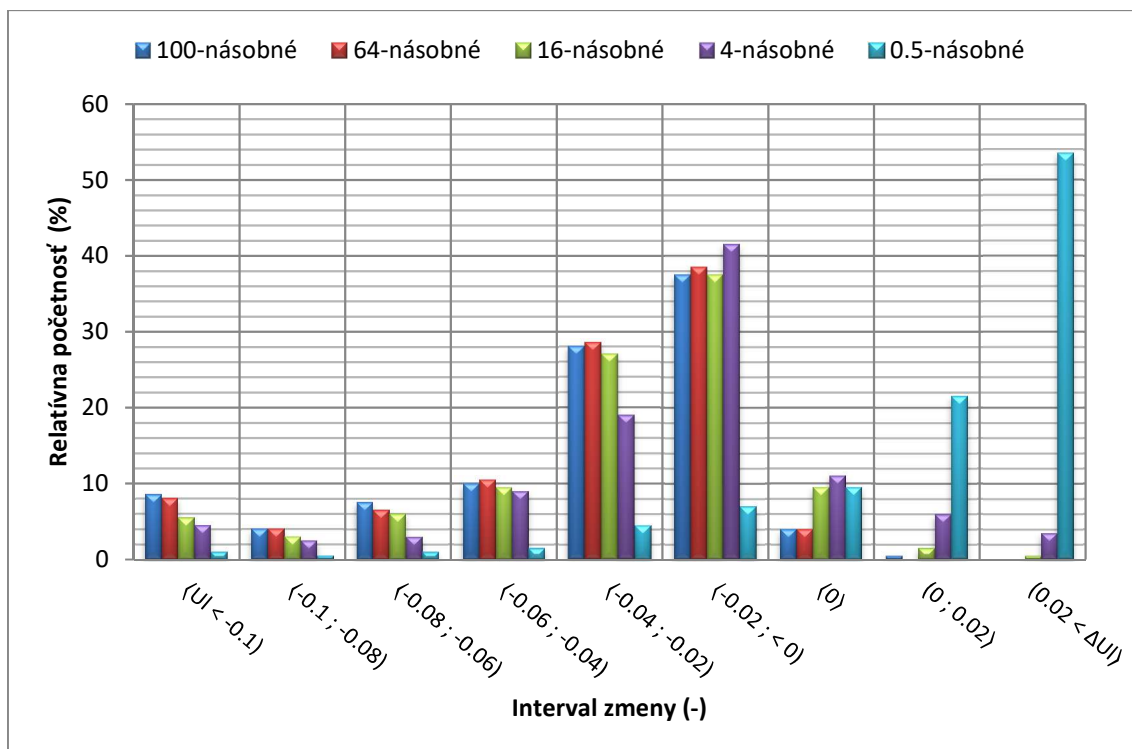
2 Analýza vplyvu hustoty výpočtovej siete na výsledné parametre osvetlenia

Pre analýzu vplyvu hustoty výpočtovej siete na výsledné parametre $\bar{L}$, $\bar{E}$, U_0 , U_1 , f_{Ti} bola potrebná simulácia pri ktorej sa dané parametre vypočítavali v rôznych sieťach výpočtových bodov. Simulácia bola vykonaná vo výpočtovom programe Dialux [11], ktorý umožňuje manuálne nastavenie rozloženia výpočtových bodov. Zo vstupných údajov (geometria osvetľovacej sústavy, geometria komunikácie, typ svietidla) bolo pre účely simulácie vplyvu hustoty výpočtových bodov na výsledné parametre verejného osvetlenia zostavených 200 kombinácií ktoré sú uvedené v dizertačnej práci. Šírky komunikácií pri jednotlivých kombináciách sa pohybujú v rozmedzí 5 – 10 m pre hlavné komunikácie (určené pre motorové vozidlá) a 1 – 3 m pre vedľajšie komunikácie (určené pre chodcov). Rozstupy stožiarov sa pohybujú v rozmedzí 20 - 40 m a montážne výšky svietidiel v rozmedzí 4 - 12 m. Pre jednotlivé kombinácie bolo zvolených 25 typov svietidiel s ohľadom na navrhnuté geometrie komunikácií a geometrie osvetľovacích sústav. S ohľadom na zahrnutie rôznych častí vyžarovacích charakteristík, rôznych lokálnych extrémov ktoré sa v daných častiach nachádzajú a zistenie ich vplyvu na výsledné fotometrické parametre sú pri simuláciách použité viaceré nastavenia výpočtovej siete. Pri každej navrhutej kombinácii je pre výpočet referenčných hodnôt jednotlivých parametrov verejného osvetlenia použitá sieť výpočtových bodov podľa aktuálne platnej metodiky (CIE 140 a STN EN 13201-3). Okrem uvedeného rozloženia siete výpočtových bodov sú použité siete ktoré predstavujú 0,5; 4; 16; 64 a 100-násobné zhustenie výpočtových bodov v porovnaní s rozložením podľa aktuálne platnej metodiky.

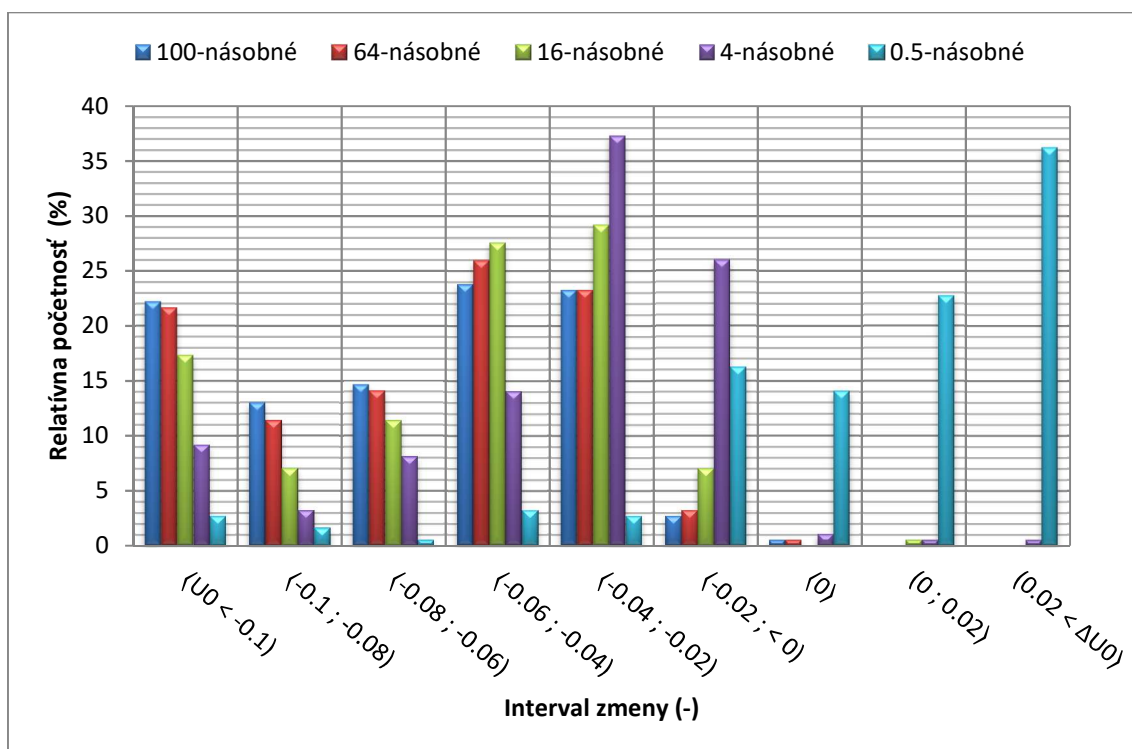
Výsledky analýz vplyvu hustoty výpočtovej siete na vybrané parametre verejného osvetlenia sú znázornené na obr. 4 až obr. 7. Vzhľadom na to že vypočítané parametre nadobúdajú množstvo zmien bol súbor hodnôt každého parametra rozdelený na niekoľko intervalov. Na výpočet počtu intervalov bol použitý Sturgesov vzorec [8].



Obr. 4 Zmena celkovej rovnomernosti jasu U_0 na hlavnej komunikácii určenej pre motorové vozidlá

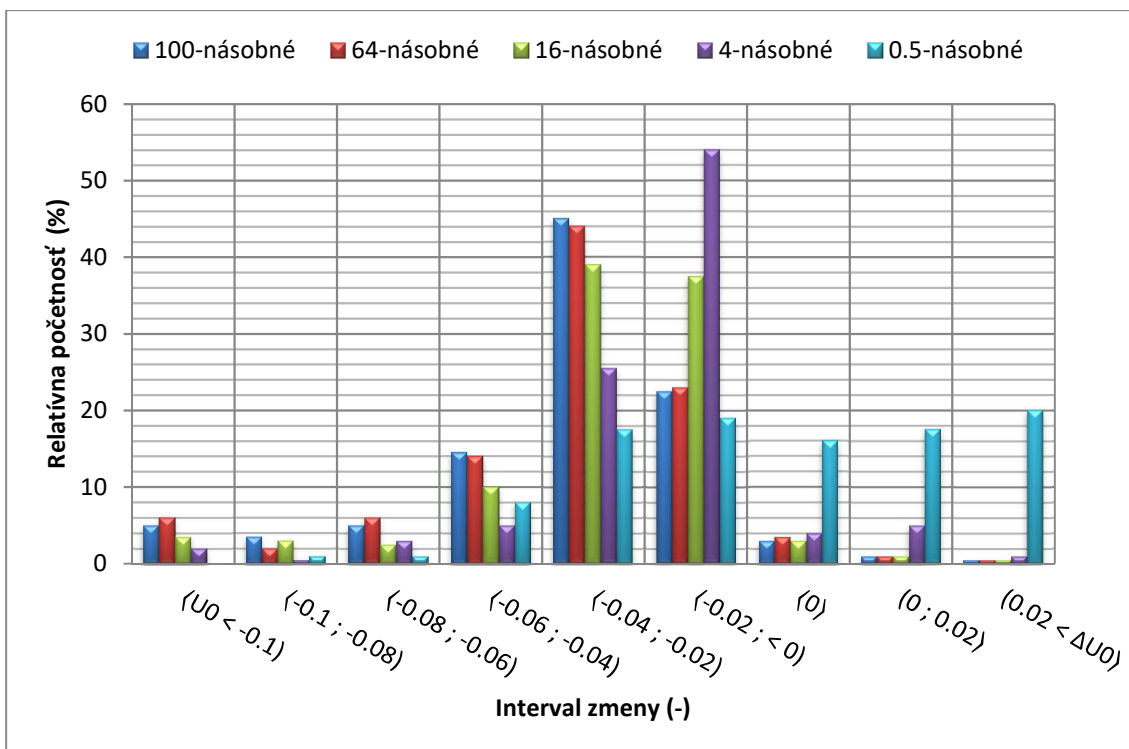


Obr. 5 Zmena pozdĺžnej rovnomernosti jasů U_0 na hlavnej komunikácii určenej pre motorové vozidlá



Obr. 6 Zmena celkovej rovnomernosti osvetlenosti $U_{0(L)}$ na vedľajšej komunikácii určenej pre chodcov

L je vedľajšia komunikácia umiestnená rovnobežne s ľavým okrajom hlavnej komunikácie



Obr. 7 Zmena celkovej rovnomernosti osvetlenosti $U_{0(P)}$ na vedľajšej komunikácii určenej pre chodcov

P je vedľajšia komunikácia umiestnená rovnobežne s pravým okrajom hlavnej komunikácie

Z hľadiska priemerných hodnôt jasu a osvetlenosti dochádzalo k najvýraznejším zmenám v rozmedzí $\pm 3 \%$ v porovnaní s referenčnými hodnotami vypočítanými v sieti bodov podľa aktuálne platnej metodiky. Oveľa výraznejšie zmeny nastávali pri rovnomernostiach jasu a osvetlenosti ktoré sú znázornené na obr. 4 až obr. 7. Zmenou počtu výpočtových bodov dochádzalo k zahrnutiu maximálnych a minimálnych hodnôt ktoré by inak neboli zahrnuté do výpočtu. Hlavne minimálne hodnoty sa podieľajú na zmene uvedených rovnomerností.

Vzhľadom na to že hustota výpočtových bodov má vplyv na výsledné parametre osvetlenia a vo veľkej väčšine daný vplyv spôsobuje to že parameter nemusí vyhovieť stanoveným požiadavkám pre jednotlivé triedy osvetlenia uvedených v STN EN 13201-2 [5] je potrebné zvážiť revíziu súčasného prístupu k voľbe výpočtových bodov.

Analýzy uvedené v dizertačnej práci poukazujú na to že pri voľbe novej hustoty výpočtovej siete je možné ako základ uvažovať 4 až 16-násobné zhustenie súčasne používanej siete výpočtových bodov. Pri tvorbe novej výpočtovej siete bodov musí byť počet výpočtových bodov vo výpočtovom poli korigovaný s ohľadom na používané geometrie komunikácií, geometrie osvetľovacích sústav a metódy verifikácie jednotlivých vypočítaných parametrov.

3 Návrh hustoty siete pre meranie a výpočet parametrov verejného osvetlenia

Analýzy uvedené v predchádzajúcej kapitole poukazujú na to že je potrebné zrevidovať súčasné rozloženie výpočtových a meracích bodov. Z výsledkov analýz je zrejme že najväčšie zmeny nastávali do 16-násobného zhustenia, ktoré je možné zobrať ako základ tvorby novej siete. Návrh nových sietí výpočtových a meracích bodov uvedených v tejto kapitole je tvorený s ohľadom na používané geometrie komunikácií [7], geometrie osvetľovacích sústav a súčasne možnosti meracej techniky.

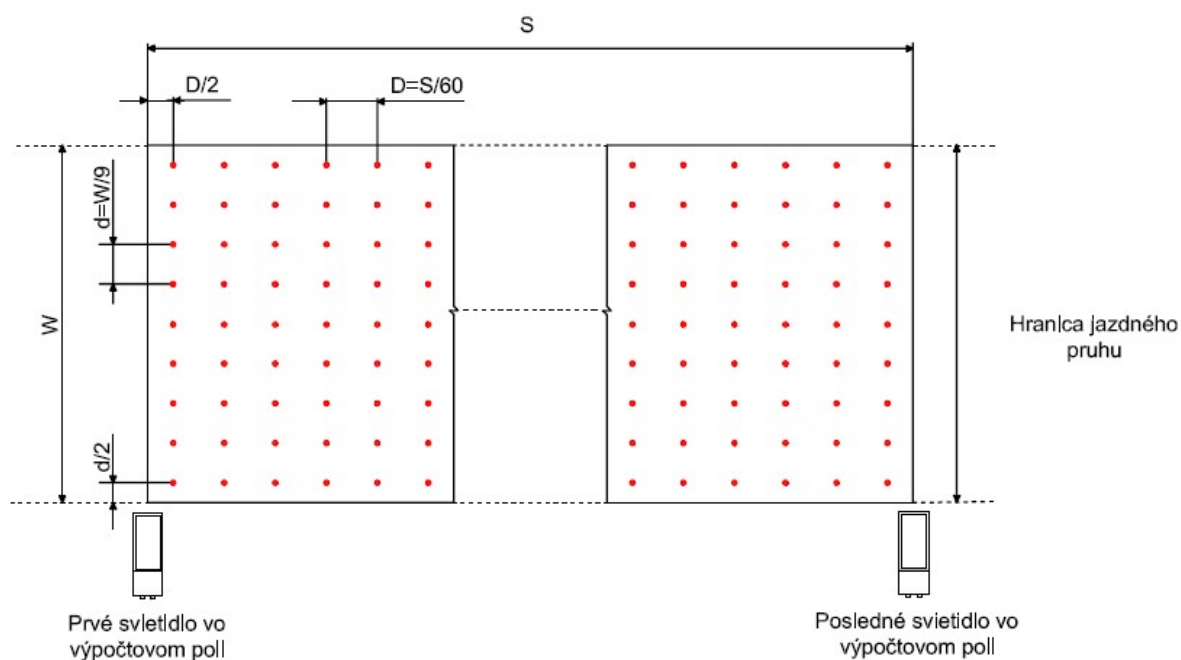
3.1 Sieť pre výpočet a meranie jasů

V normách STN EN 12193 [2], STN EN 12464-1 [3] a STN EN 12464-2 [4] je uvedený vzorec na výpočet siete výpočtových a kontrolných bodov (4). Tento vzorec je tvorený pre približne štvorcové rozloženie s podmienkou že pomer priečnej a pozdĺžnej vzdialenosti medzi bodmi musí byť v rozmedzí 0,5 až 2. Pokiaľ sa aplikuje tento vzorec na geometriu výpočtovej plochy používanú vo verejnom osvetlení tak hodnota a predstavuje šírku jazdného pruhu. Po dosadení šírky pruhu 3,75 m je hodnota maximálneho rozmeru vzdialenosti medzi výpočtovými bodmi 0,5 m.

$$P_p = 0,2 \times 5^{\log_{10}(a)} \quad (4)$$

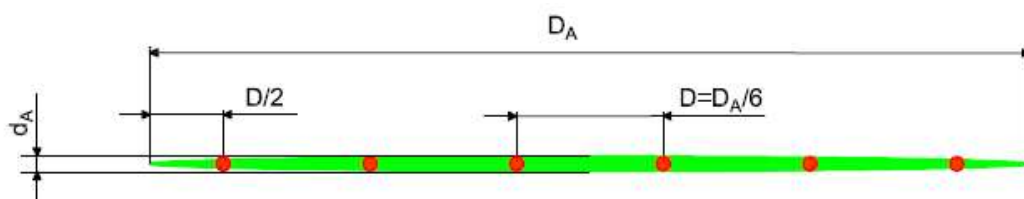
P_p je maximálny rozmer siete (vzdialenosti medzi výpočtovými a kontrolnými bodmi)
 a - dlhší rozmer uvažovanej plochy (m), pokiaľ je pomer dlhšej a kratšej strany plochy 2 alebo viac, hodnotou sa stáva kratší rozmer plochy

Po aplikácii maximálneho rozmeru siete na výpočtovú plochu s rozmerom 3,75 m x 30 m adekvátnu jednému jazdnému pruhu vznikne sieť s rozložením 8 x 60 bodov čo zodpovedá 16-násobnému zhutneniu v porovnaní so súčasným. Vzhľadom na jednoduchšie vypočítanie pozdĺžnej rovnomernosti je vhodné doplniť ešte jeden rad výpočtových bodov čím sa zvýši počet bodov v priečnom smere z 8 na 9. Vznikne tak sieť z rozložením 9 x 60 bodov ktorá zodpovedá 22-násobnému zhutneniu v porovnaní so súčasným (obr. 8). Pri zachovaní pomeru priečnej a pozdĺžnej vzdialenosti rozmedzí 0,5 až 2 je možné daný počet aplikovať pre jazdné pruhy v rozmedzí 2,5 až 3,75 m.



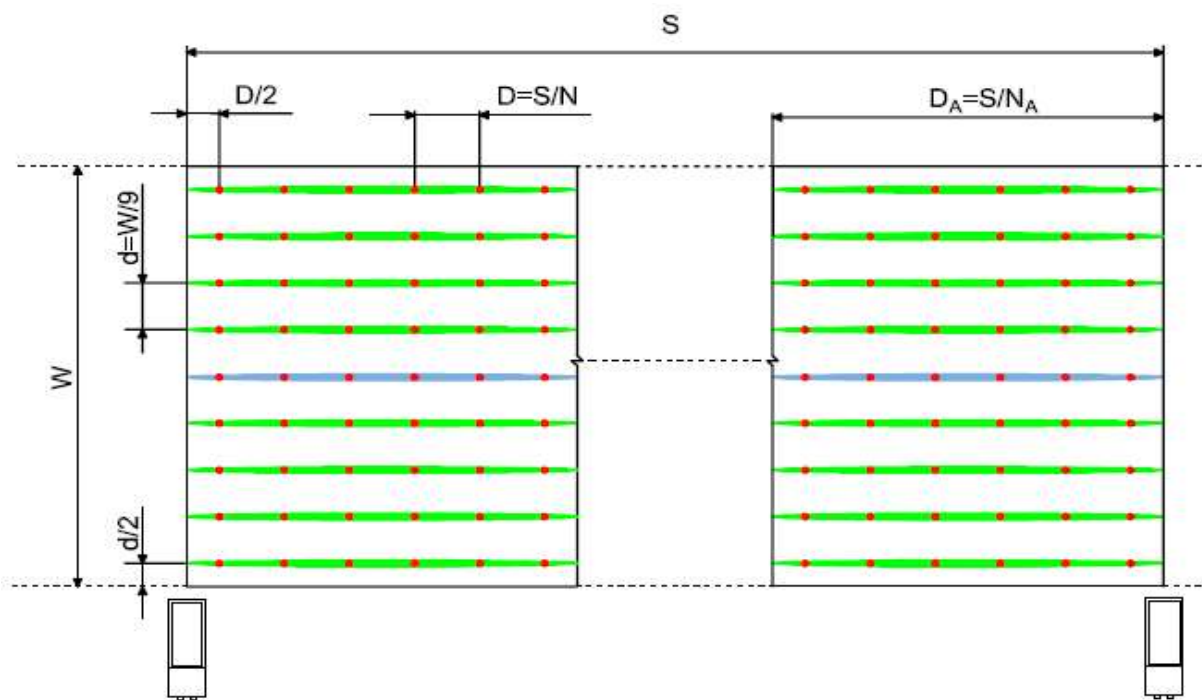
Obr. 8 Navrhované rozloženie výpočtových bodov pre jazdný pruh

Pre priblíženie vypočítaných a nameraných hodnôt je potrebné aby sa nevyhodnocovali hodnoty vypočítané v jednotlivých bodoch samostatne, ale vyhodnocoval sa priemer hodnôt vypočítaných v bodoch ktoré spadajú do oblasti meranej plochy pri verifikácii. Pre vyhodnocovanie priemerného jasov plôch je možné použiť plochy s označením A ekvivalentné priemetu otvorového uhla $2'$ na komunikácii vo vzdialenosti dopadu osi pozorovania na komunikáciu ktorá je približne 86 m od pozorovateľa. Takáto plocha má tvar elipsy s rozmerom hlavnej polosi ($D_A/2$) 1,435 m a rozmerom vedľajšej polosi ($d_A/2$) 0,025 m. Pri navrhovanom rozložení výpočtových bodov (obr. 8) spadá do takejto plochy 6 bodov. Rozloženie výpočtových bodov v rámci jednej plochy je znázornená na obr. 9. Otvorový uhol $2'$ súvisí s minimálnym uhlom rozlíšenia pri úrovniach jasov vo verejnom osvetlení [16], [17]. Priemerom hodnôt vypočítaných v uvedených bodoch sa získa jas plochy $\bar{L}_A$ ktorý bude reprezentatívnejší ako vypočítaná hodnota jasov v jednom bode umiestnenom v priesečníku osí elipsy podľa súčasne platnej metodiky.



Obr. 9 Navrhované rozloženie výpočtových bodov v rámci oblasti meranej plochy

Týmto spôsobom vznikne pri rozstupe 30 m pre jeden jazdný pruh 90 výpočtových plôch z ktorých každá je reprezentovaná priemernou hodnotou jasov $\bar{L}_{Ai}$ vypočítanou z jej prislúchajúcich bodov (obr. 10). Zo všetkých priemerných jasov $\bar{L}_{Ai}$ jednotlivých plôch sa následne vypočíta priemerný jas vozovky $\bar{L}$ a celková rovnomernosť jasov U_0 . Pozdĺžna rovnomernosť jasov U_1 sa vypočíta z priemerných hodnôt jasov plôch v osi jazdného pruhu. Hodnota prahového f_{TI} prírastku sa vypočíta v osi každého jazdného pruhu pre pozície pozorovateľa pohybujúceho sa dopredu s počtom krokov rovnajúcim sa polovičnému počtu výpočtových bodov v pozdĺžnom smere a v prírastkoch ktoré sú rovné dvojnásobku vzdialenosti medzi výpočtovými bodmi D .



Obr. 10 Navrhované rozloženie výpočtových bodov a plôch pre jeden jazdný pruh

Vzhľadom na navrhované riešenie hustoty výpočtových bodov a plôch je potrebné upraviť vzorce pre výpočet rozloženia daných objektov vo výpočtovom poli (5, 6). Počet plôch N_A v pozdĺžnom smere sa volí ako najmenšie celé číslo pri ktorom je dĺžka jednej plochy D_A maximálne 3 m čo približne zodpovedá dĺžke priemetu otvorového uhla 2' na komunikácii vo vzdialenosti dopadu osi pozorovania na komunikáciu ktorá je 2,87 m. Dĺžka plochy D_A vypočítaná podľa vzťahu 7 sa prispôsobuje počtu zvolených plôch v pozdĺžnom smere. Pri bežných rozstupoch od 20 m tak bude dĺžka jednej plochy D_A v rozsahu $\pm 5\%$ dĺžky priemetu uhla 2' na komunikácii vo vzdialenosti dopadu osi pozorovania. Počet bodov v pozdĺžnom smere sa vypočíta podľa vzťahu 8. V priečnom smere je pre jazdné pruhy v rozmedzí 2,5 – 3,75 m navrhovaných 9 bodov.

$$d = \frac{W}{n_w} \quad (\text{m}) \quad (5)$$

$$D = \frac{D_A}{6} = \frac{S}{N} \quad (\text{m}) \quad (6)$$

$$D_A = \frac{S}{N_A} \quad (\text{m}) \quad (7)$$

$$N = 6 \times N_A \quad (8)$$

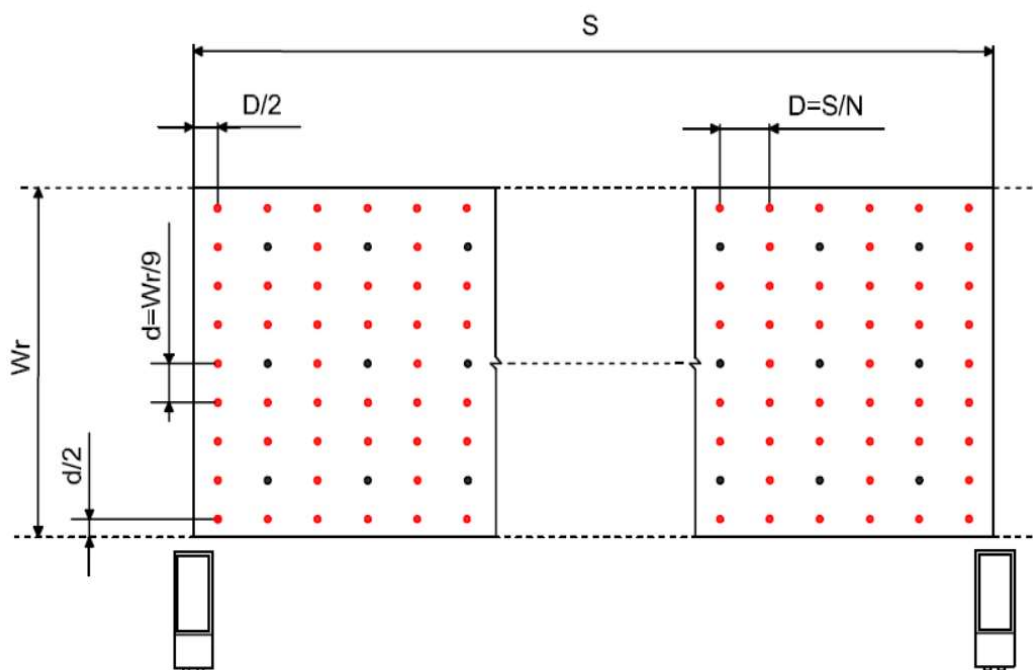
D	je vzdialenosť medzi výpočtovými bodmi v pozdĺžnom smere
D_A	- dĺžka jednej plochy pre vyhodnotenie jednotlivých parametrov
S	- vzdialenosť medzi svetelnými bodmi (svietidlami) v jednom rade (m)
N_A	- počet plôch A v pozdĺžnom smere - najmenšia celá hodnota pre ktorú platí $D_A \leq 3\text{m}$
d	- vzdialenosť medzi bodmi v priečnom smere
W	- šírka jazdného pruhu (m)
n_w	- počet bodov v priečnom smere
N	- počet bodov v pozdĺžnom smere

Navrhovaný počet bodov je rovnomerne rozložený vo výpočtovom poli. Pri navrhovanom rozložení výpočtových bodov sa vzdialenosti medzi výpočtovými bodmi v pozdĺžnom smere pohybujú pri rozstupoch svetidiel od 20 do 45 m v rozmedzí 0,46 až 0,5 m. Pri šírkach jazdných pruhov od 2,5 do 3,75 m sa vzdialenosti medzi výpočtovými bodmi v priečnom smere pohybujú v rozmedzí 0,28 až 0,42 m. S uvažovaním maximálnej šírky výpočtovej a meranej plochy $d_A = 5\text{ cm}$ je minimálna vzdialenosť medzi plochami 0,23 až 0,37 m. Pri verifikácii je tak možné v prípade výskytu jasných čiar, retroreflexných prvkov alebo iných objektov na komunikácii posunúť dané plochy mimo týchto objektov bez toho aby sa prekryvali.

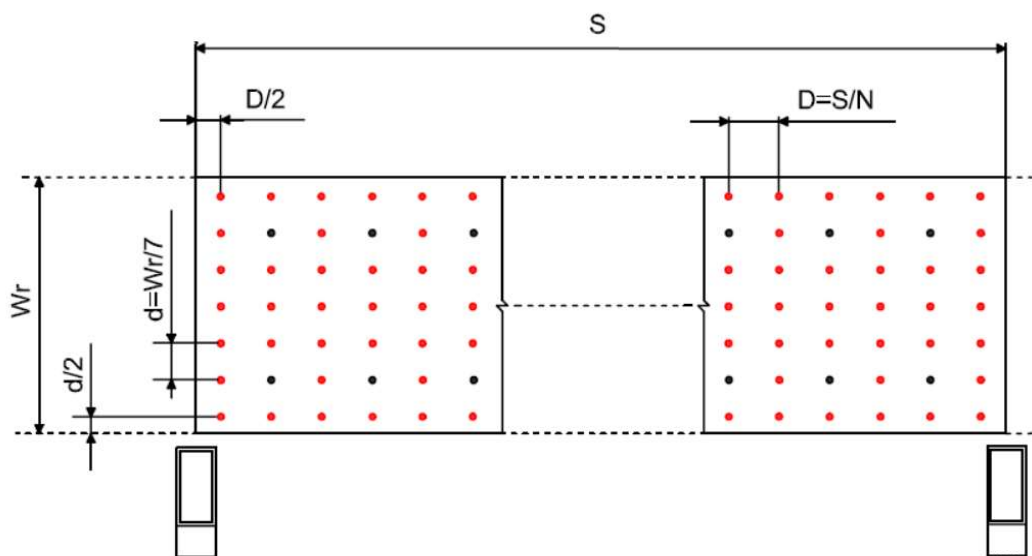
3.2 Sieť pre výpočet a meranie osvetlenosti

Osvetlenosť sa ako návrhové kritérium na rozdiel od jasu používa pre komunikácie s väčším rozsahom šírky. Šírky jazdných pruhov v rámci návrhového kritéria jasu sa pohybujú v rozmedzí od 2,5 do 3,75 m. Pri návrhovom kritériu osvetlenosti sa zvyčajne vyskytujú šírky jazdných pruhov prípadne relevantného priestoru (komunikácie) od 1 do 3,75 m v závislosti od účelu použitia. Pri daných šírkach dochádza v priečnom smere k väčšej variabilite vzdialeností medzi výpočtovými a meracími bodmi ktorá sa pri súčasnej metodike v priečnom smere pohybuje v rozmedzí od 0,33 do 1,25 m. Tento fakt poukazuje na to že pri novej tvorbe výpočtovej a meracej siete pre osvetlenosť je potrebné uvažovať s variabilným počtom bodov nielen v pozdĺžnom ale aj priečnom smere. So zreteľom na používané šírky a zachovanie pomeru medzi priečnou a pozdĺžnou vzdialenosťou medzi výpočtovými bodmi je vhodná kategorizácia na tri skupiny pre jazdné pruhy prípadne relevantné priestory zo šírkami $\leq 1,25\text{ m}$; 1,5 – 2,25 m a 2,5 - 3,75 m. Pre šírky jazdných pruhov v rozmedzí 2,5 – 3,75 m ktoré sa vyskytujú hlavne na komunikáciách zo zmiešanou dopravou a konfliktných zónach je navrhovaný rovnaký počet výpočtových bodov v priečnom smere ako pri výpočte jasu (obr. 11).

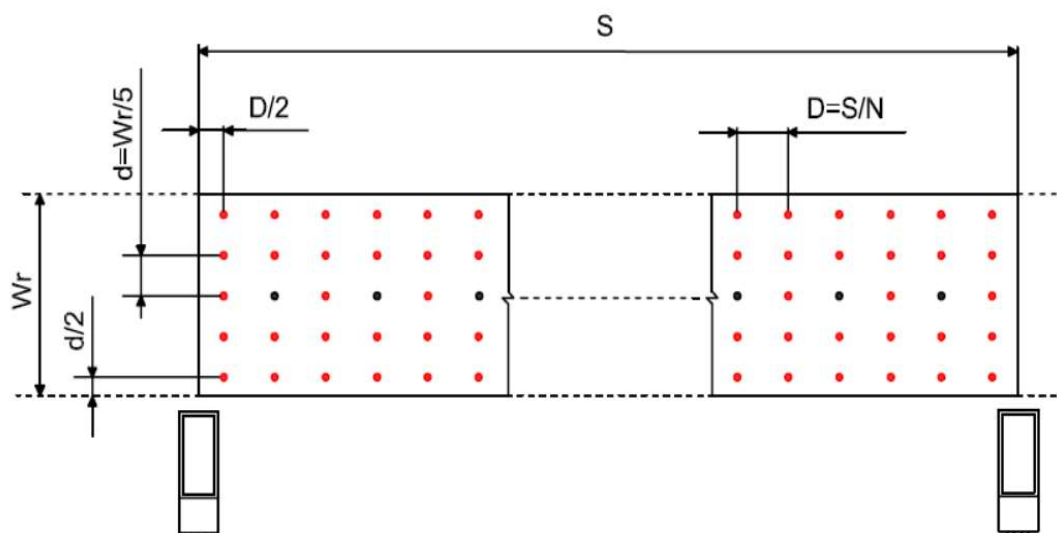
Pri šírkach komunikácií v rozmedzí 1,5 až 2,25 m ktoré sú prevažne určené pre chodcov, prípadne cyklistov je potrebné znížiť počet výpočtových bodov v priečnom smere na 7 (obr. 12). Pre komunikácie so šírkou menšou ako 1,25 m ktoré sú prevažne určené pre cyklistov prípadne chodcov je navrhovaný počet výpočtových bodov 5 (obr. 13). Touto voľbou výpočtových bodov v priečnom smere sa pre jednotlivé šírky dosiahne rozstup bodov v priečnom smere pre každú skupinu v rozmedzí $\sim 0,2 - 0,42$ m. Vzhľadom na používaný systém verifikácie a veľký počet navrhovaných výpočtových bodov je vhodné špecifikovať body pre meranie ktoré budú len v určitých uzlových bodoch navrhovanej siete. Jednotlivé parametre osvetlenia by mohli byť do budúcnosti pre účely verifikácie vypočítané aj v sieti bodov pre meranie a vo výsledkoch výpočtov zobrazené ako alternatívny výsledok pre overenie. Rozvrhnutie kontrolných bodov pre jednotlivé šírky relevantných priestorov je znázornené na obr. 11 až 13. Rozloženie bolo zvolené s ohľadom na zachovanie pomeru medzi priečnou a pozdĺžnou vzdialenosťou bodov pre verifikáciu výpočtu. Vzdialenosti medzi bodmi na meranie osvetlenosti v priečnom smere sa v závislosti od šírky 1,5 - 3,75 m (obr. 11, 12) pohybujú od 0,83 m do 1,29 m. Pri komunikáciách so šírkou menšou ako 1,25 m sú vzhľadom na vzdialenosti bodov od hranice komunikácie navrhnuté body pre meranie len v osi komunikácie. V pozdĺžnom smere sa vzdialenosti medzi bodmi pre meranie pri rozstupoch svetidiel od 20 do 45 m pohybujú v rozmedzí 0,93 až 1 m. Červené body na obr. 11 až 13 predstavujú body pre výpočet a čierne body predstavujú body pre výpočet a overenie.



Obr. 11 Rozloženie bodov pre výpočet a meranie osvetlenosti, kde: W_r je v rozmedzí 2,5 až 3,75 m



Obr. 12 Rozloženie bodov pre výpočet a meranie osvetlenosti, kde: W_r je v rozmedzí 1,5 až 2,25 m



Obr. 13 Rozloženie bodov pre výpočet a meranie osvetlenosti, kde: W_r je $\leq 1,25$ m

Rozloženie výpočtových bodov pre výpočet osvetlenosti v rámci relevantného priestoru sa vypočíta podľa vzťahov 9 až 11. Počet bodov v pozdĺžnom smere ostáva rovnaký ako počet bodov pre výpočet jasů uvedený v predchádzajúcej kapitole. Počet bodov v priečnom smere sa mení v závislosti od šírky relevantného priestoru.

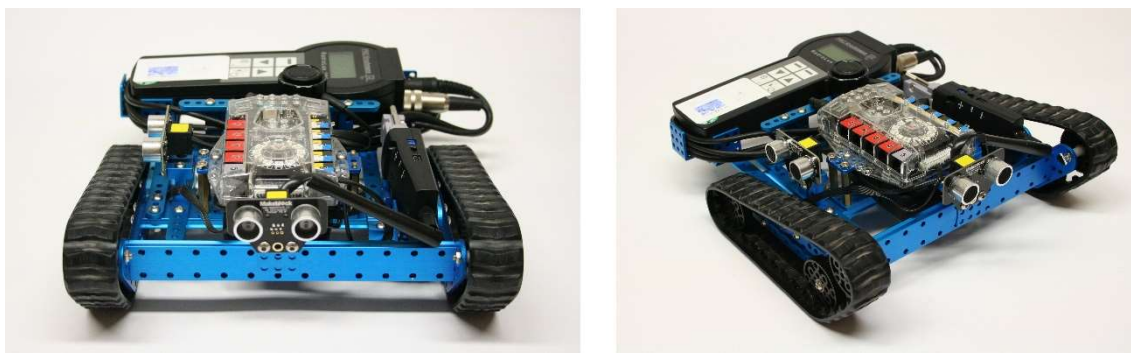
$$d = \frac{W_r}{n_w} \text{ (m)} \quad (9)$$

$$D = \frac{S}{N} \text{ (m)} \quad (10)$$

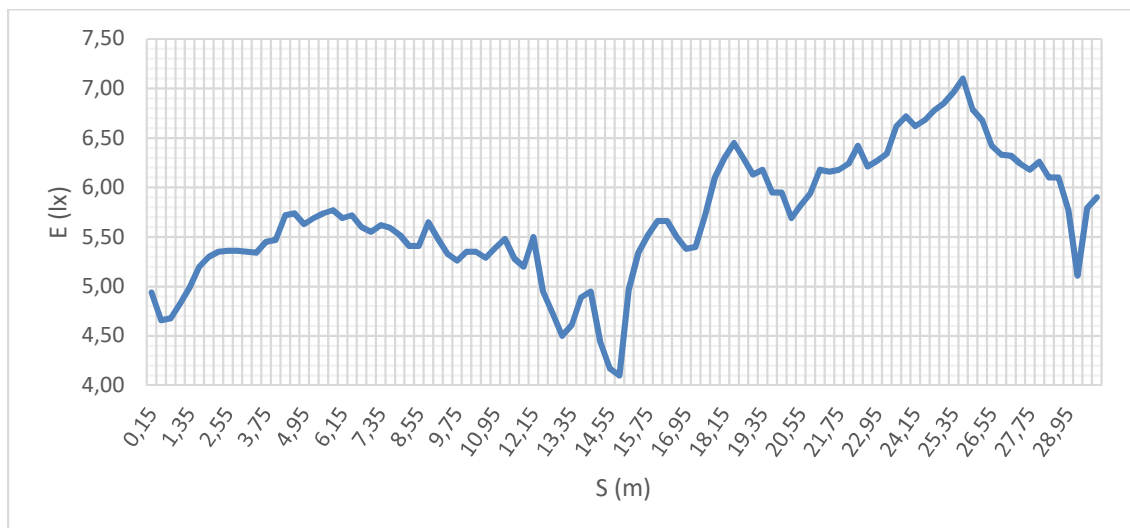
$$N = 6 \times N_A \quad (11)$$

D je vzdialenosť medzi výpočtovými bodmi v pozdĺžnom smere
 S je vzdialenosť medzi svetelnými bodmi (svietidlami) v jednom rade (m)
 N je počet bodov v pozdĺžnom smere
 N_A je najmenšia celá hodnota pre ktorú platí $\frac{S}{N_A} \leq 3\text{m}$
 W_r je šírka jazdného pruhu, relevantného priestoru (m)
 d je vzdialenosť medzi bodmi v priečnom smere
 n_w je počet bodov v priečnom smere:

V budúcnosti je možné uvažovať nad zhustením súčasne navrhovanej siete pre meranie osvetlenia s využitím konštrukcie automatizovaných meracích systémov. Pre účely overenia použiteľnosti automatizovaného meracieho systému na verifikáciu vypočítaných parametrov bol v rámci dizertačnej práce vytvorený skúšobný automatizovaný merací systém (obr. 14). Z pohľadu následného spracovania nameraných údajov je zaujímavá možnosť kontinuálneho záznamu v priečných alebo pozdĺžnych líniiach (obr. 15) kedy sa spolu s osvetlenosťami môžu zaznamenávať aj počty impulzov z enkóderov umiestnených na hnacích motoroch. Pri existencii záznamu impulzov je možné dodatočne vyhodnotiť meraný úsek s rôznymi rozloženiami meracích bodov.



Obr. 14 Skúšobný automatizovaný merací systém pre meranie osvetlenia

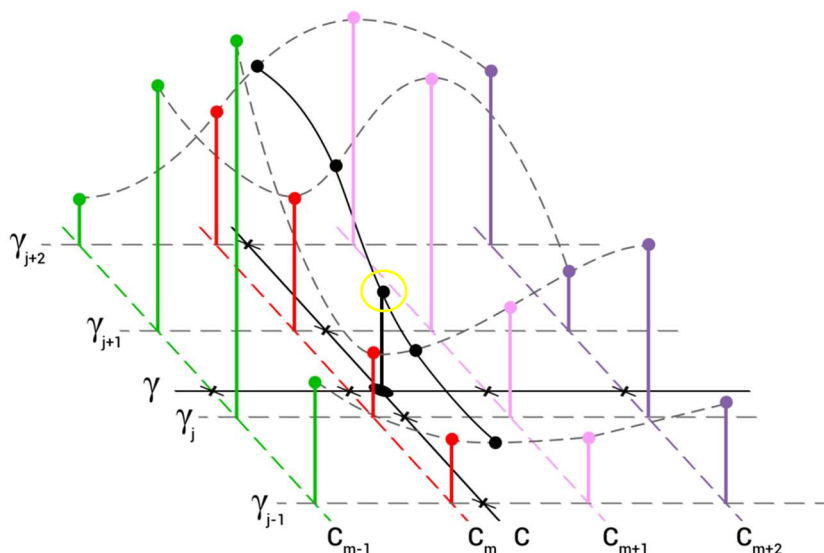


Obr. 15 Kontinuálny záznam osvetlenia v pozdĺžnom smere v osi komunikácii

4 Riešenie splajnovej interpolácie v tabuľkách svietivosti a odrazivosti

Výber vhodnej interpolačnej prípadne aproximačnej metódy by mal byť kompromisom medzi požadovanou presnosťou vypočítaných hodnôt, výpočtovým časom a rozsahom vstupných hodnôt. Pri interpolácii prechádza interpolačná funkcia všetkými uzlovými bodmi. Interpolácia sa vykonáva buď pomocou interpolačného polynómu (najčastejšie Lagrangeovho alebo Newtonovho) alebo pomocou splajnu [11], [12]. Lagrangeov polynóm má hlavnú nevýhodu v tom že hlavne pri vyšších stupňoch značne narastá počet matematických operácií. Pokiaľ je n_p stupeň polynómu tak pri výpočte hľadanej hodnoty pomocou Lagrangeovho polynómu je potrebné $2 n_p^2 + 2 n_p$ násobení a $2 n_p^2 + 3 n_p$ sčítaní. Newtonov polynóm má odlišný zápis a je pri ňom potrebných $\frac{1}{2} n_p^2 + \frac{3}{2} n_p$ násobení a $n_p^2 + 3 n_p$ sčítaní čo je výrazne menej ako pri Lagrangeovom polynóme [14]. Nevýhodou interpolácie polynómom vyššieho stupňa je kmitavosť. Znamená to že síce interpolačná funkcia prechádza uzlovými bodmi, ale mimo nich sa rozkmitá [13]. Tento nedostatok odstraňujú splajny. Interpolačná funkcia pri splajne je tvorená pomocou polynómov po častiach medzi susednými uzlovými bodmi. Medzi najčastejšie používané splajny patrí lineárny, kvadratický a kubický splajn. Lineárny splajn sa nepoužíva veľmi často, pretože interpolačná funkcia pri tomto druhu splajnu nadobúda ostré hroty. Pri kvadratickom splajne sú susedné body preložené parabolou a existuje prvá derivácia. Negatívnou vlastnosťou kvadratického splajnu je jeho zotrvačnosť. Najčastejšie používaným splajnom vzhľadom na jeho vlastnosti je kubický splajn. Tento splajn sa okrem iného využíva napríklad pri spracovaní obrazu.

Jednou z možností spresnenia procesu výpočtu parametrov verejného osvetlenia je voľba novej interpolačnej metódy založenej na použití splajnu. Vzhľadom na vlastnosti interpolačnej funkcie je pre tento účel vhodné použitie kubického splajnu. Pre výpočet hľadanej hodnoty pomocou kubického splajnu je potrebná matica 4×4 uzlových bodov. Body potrebné pre výpočet svietivosti nachádzajúcej sa medzi hodnotami svietivosti v uzlových bodoch I-tabuľky sú znázornené na obr. 16. Základom kubického splajnu je sústava kubických funkcií (12) medzi uzlovými bodmi ktoré na seba nadväzujú funkčnou hodnotou, prvou a druhou deriváciou. Častokrát leží hľadaná hodnota medzi štyrmi uzlovými bodmi (obr. 16) a interpoláciu je potrebné vykonať pre dva smery (stĺpce a riadky). Poradie smerov nemá vplyv na výsledné hodnoty a preto je možné začať ľubovoľným smerom.



Obr. 16 Uzlové body potrebné pre interpoláciu pomocou kubického splajnu

○ je hľadaná hodnota $I(C, \gamma)$

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (12)$$

Pre určenie $I(C; \gamma_{j-1})$ je potrebné nájsť riešenie sústavy polynómov (13, 14, 15) ktoré sa nachádzajú na intervaloch $\langle C_{m-1}; C_m \rangle, \langle C_m; C_{m+1} \rangle, \langle C_{m+1}; C_{m+2} \rangle$. V uvedenej sústave polynómov sa nachádza 12 neznámych koeficientov ($a_0 - a_3, b_0 - b_3, c_0 - c_3, d_0 - d_3$) ktoré je potrebné určiť.

$$S_0(C) = a_0 + b_0(C - C_{m-1}) + c_0(C - C_{m-1})^2 + d_0(C - C_{m-1})^3 \quad (13)$$

$$S_1(C) = a_1 + b_1(C - C_m) + c_1(C - C_m)^2 + d_1(C - C_m)^3 \quad (14)$$

$$S_2(C) = a_2 + b_2(C - C_{m+1}) + c_2(C - C_{m+1})^2 + d_2(C - C_{m+1})^3 \quad (15)$$

Polynómy prechádzajú bodmi $I(C_{m-1}; \gamma_{j-1}), I(C_m; \gamma_{j-1}), I(C_{m+1}; \gamma_{j-1}), I(C_{m+2}; \gamma_{j-1})$ z čoho je možné určiť koeficienty a_0 (16), a_1 (17), a_2 (18).

$$S_0(C_{m-1}) = I(C_{m-1}; \gamma_{j-1}) \Rightarrow a_0 = I(C_{m-1}; \gamma_{j-1}) \quad (16)$$

$$S_1(C_m) = I(C_m; \gamma_{j-1}) \Rightarrow a_1 = I(C_m; \gamma_{j-1}) \quad (17)$$

$$S_2(C_{m+1}) = I(C_{m+1}; \gamma_{j-1}) \Rightarrow a_2 = I(C_{m+1}; \gamma_{j-1}) \quad (18)$$

$$S_2(C_{m+2}) = I(C_{m+2}; \gamma_{j-1}) \Rightarrow \\ I(C_{m+1}; \gamma_{j-1}) + b_2(C_{m+2} - C_{m+1}) + c_2(C_{m+2} - C_{m+1})^2 + d_2(C_{m+2} - C_{m+1})^3 \quad (19)$$

Polynómy medzi jednotlivými intervalmi na seba nadväzujú v bodoch $I(C_m; \gamma_{j-1})$ (20), $I(C_{m+1}; \gamma_{j-1})$ (21). V tých istých bodoch na seba nadväzujú prvé derivácie (22), (23) a druhé derivácie (24), (25).

$$S_0(C_m) = S_1(C_m) = I(C_m; \gamma_{j-1}) = I(C_{m-1}; \gamma_{j-1}) + b_0(C_m - C_{m-1}) + c_0(C_m - C_{m-1})^2 + d_0(C_m - C_{m-1})^3 \quad (20)$$

$$S_1(C_{m+1}) = S_2(C_{m+1}) = I(C_{m+1}; \gamma_{j-1}) = I(C_m; \gamma_{j-1}) + b_0(C_{m+1} - C_m) + c_0(C_{m+1} - C_m)^2 + d_0(C_{m+1} - C_m)^3 \quad (21)$$

$$S'_0(C_m) = S'_1(C_m) = b_0 + 2c_0(C_m - C_{m-1}) + 3d_0(C_m - C_{m-1})^2 = b_1 \quad (22)$$

$$S'_1(C_{m+1}) = S'_2(C_{m+1}) = b_1 + 2c_1(C_{m+1} - C_m) + 3d_1(C_{m+1} - C_m)^2 = b_2 \quad (23)$$

$$S''_0(C_m) = S''_1(C_m) = 2c_0 + 6d_0(C_m - C_{m-1}) = 2c_1 \quad (24)$$

$$S''_1(C_{m+1}) = S''_2(C_{m+1}) = 2c_1 + 6d_1(C_{m+1} - C_m) = 2c_2 \quad (25)$$

Pre jednoznačné riešenie kubického splajnu je potrebné určiť ďalšie podmienky. Najčastejšie používaný je prirodzený kubický splajn kedy sa druhé derivácie v okrajových bodoch rovnajú 0. Po aplikácii podmienok prirodzeného kubického splajnu v okrajových bodoch C_{m-1} a C_{m+2} vzniknú rovnice (26) a (27)

$$S_0''(C_{m-1}) = 0 \Rightarrow 2c_0 = 0 \quad (26)$$

$$S_2''(C_{m+2}) = 0 \Rightarrow 2c_2 + 6d_2(C_{m+2} - C_{m+1}) = 0 \quad (27)$$

Koeficienty a_0, a_1, a_2 sú určené. Po zavedení podmienok pre prirodzený kubický splajn je ešte potrebné vyriešiť deväť rovníc s deviatimi neznámymi čo je možné napríklad pomocou Gaussovej eliminácie. V praxi sa pre zjednodušenie riešenia hodnôt koeficientov b_i, c_i, d_i používajú substitúcie. Použitím nasledujúcich substitúcií $h_i = C_{m+i} - C_{m-1+i}$, $h_{i+1} = C_{m+1+i} - C_{m+i}$, $\Delta y_i = \gamma_{j+i} - \gamma_{j-1+i}$, $\Delta y_{i+1} = \gamma_{j+1+i} - \gamma_{j+i}$ sa riešením sústavy rovníc (28) získajú koeficienty c_1, c_2 a c_3 . Koeficient c_0 je z podmienky prirodzeného kubického splajnu rovný 0. Po dosadení hodnôt koeficientov c_i do vzťahov (29) a (30) sa získajú zvyšné koeficienty b_i a d_i .

$$h_i c_i + 2(h_{i+1} + h_i) c_{i+1} + h_{i+1} c_{i+2} = 3 \left(\frac{\Delta y_{i+1}}{h_{i+1}} - \frac{\Delta y_i}{h_i} \right) \quad (28)$$

$$b_i = \frac{\Delta y_i}{h_i} - \frac{h_i}{3} (c_{i+1} + 2c_i) \quad (29)$$

$$d_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{3h_i} \quad (30)$$

Dosadením získaných koeficientov do základnej sústavy polynómov (13, 14, 15) sa získajú funkcie prirodzeného kubického splajnu pre jednotlivé intervaly. Tento postup je potrebný zopakovať pre zvyšné uhly $\gamma_j, \gamma_{j+1}, \gamma_{j+2}$. Následne je potrebné súradnice azimutu C nahradiť súradnicami γ . Vznikne nová sústava polynómov (31), (32), (33) ktorej neznáme koeficienty sa určia rovnakým spôsobom ako vyššie uvedeným.

$$S_0(\gamma) = a_0 + b_0(\gamma - \gamma_{j-1}) + c_0(\gamma - \gamma_{j-1})^2 + d_0(\gamma - \gamma_{j-1})^3 \quad (31)$$

$$S_1(\gamma) = a_1 + b_1(\gamma - \gamma_j) + c_1(\gamma - \gamma_j)^2 + d_1(\gamma - \gamma_j)^3 \quad (32)$$

$$S_2(\gamma) = a_2 + b_2(\gamma - \gamma_{j+1}) + c_2(\gamma - \gamma_{j+1})^2 + d_2(\gamma - \gamma_{j+1})^3 \quad (33)$$

V praxi sa vyskytujú prípady kedy je potrebné vypočítať hodnotu svietivosti v okolí $\gamma = 0$, prípadne maximálneho uhlu γ zvoleného pri meraní. Vzhľadom na počet potrebných bodov pre výpočet hľadanej hodnoty svietivosti a ich rozloženia v okolí hľadanej hodnoty je potrebné zdefinovať podmienky výberu bodov pre dané oblasti. Navrhovaný výber bodov vychádza zo vzájomnej nadväznosti C -rovín v týchto oblastiach (tab. 1). Body potrebné pre interpoláciu sa vzhľadom na polohu hľadanej hodnoty volia zo zrkadlových (nadväzujúcich) rovín vzhľadom na fotometrickú os. Príklad voľby potrebných bodov pre rôzne polohy hľadanej hodnoty je uvedený v tab. 2 a 3, kde žltá bunka predstavuje hľadanú hodnotu.

Tab. 1 Nadväzujúce roviny pri interpolácii v okolí $\gamma = 0$, $\gamma = \max(90, 100 \dots 180^\circ)$

C90	↔	C270		C135	↔	C315		C180	↔	C0		C225	↔	C45
C95	↔	C275		C140	↔	C320		C185	↔	C5		C230	↔	C50
C100	↔	C280		C145	↔	C325		C190	↔	C10		C235	↔	C55
C105	↔	C285		C150	↔	C330		C195	↔	C15		C240	↔	C60
C110	↔	C290		C155	↔	C335		C200	↔	C20		C245	↔	C65
C115	↔	C295		C160	↔	C340		C205	↔	C25		C250	↔	C70
C120	↔	C300		C165	↔	C345		C210	↔	C30		C255	↔	C75
C125	↔	C305		C170	↔	C350		C215	↔	C35		C260	↔	C80
C130	↔	C310		C175	↔	C355		C220	↔	C40		C265	↔	C85

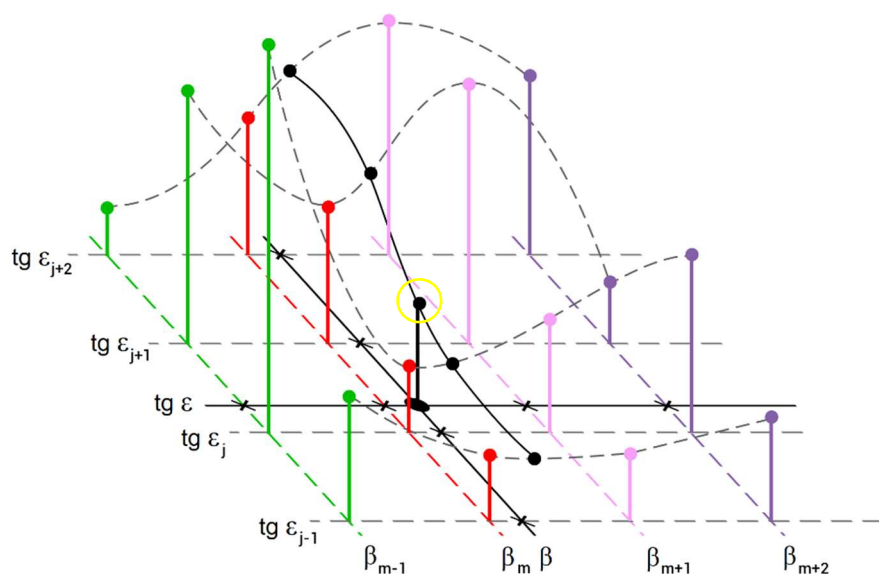
Tab. 2 Príklad interpolácie v okolí $\gamma = 0^\circ$, prechod rovín C90 – C270

C (°)	90					90-270	270				
γ (°)	7,5		5		2,5	0		2,5		5	7,5
	$\gamma(j-1)$		$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$	$\gamma(j+1)$					
			$\gamma(j-1)$		$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$		$\gamma(j+1)$		
					$\gamma(j-1)$	$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$		$\gamma(j+1)$	
						$\gamma(j-1)$	$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$		$\gamma(j+1)$
							$\gamma(j-1)$	$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$	$\gamma(j+1)$

Tab. 3 Príklad interpolácie v okolí $\gamma = 90^\circ$, prechod rovín C0 – C180

C (°)	0					0-180	180				
γ (°)	82,5		85		87,5	90		87,5		85	82,5
	$\gamma(j-1)$		$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$	$\gamma(j+2)$					
			$\gamma(j-1)$		$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$		$\gamma(j+2)$		
					$\gamma(j-1)$	$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$		$\gamma(j+2)$	
						$\gamma(j-1)$	$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$		$\gamma(j+2)$
							$\gamma(j-1)$	$\gamma(j)$	$I(C,\gamma)$	$\gamma(j+1)$	$\gamma(j+2)$

Postup pre výpočet redukovaného súčiniteľa jasu v uzlových bodoch R -tabuľky je identický avšak treba nahradiť súradnice C súradnicami β a súradnice γ súradnicami $\text{tg } \varepsilon$ (obr.17).



Obr. 17 Uzlové body potrebné pre interpoláciu pomocou kubického splajnu

je hľadaná hodnota $r(\beta, \text{tg } \varepsilon)$

Pre verifikáciu použitia kubickej splajnovej interpolácie boli zvolené 3 svietidlá s rôznymi vyžarovacími charakteristikami zameranými v skúšobnom laboratóriu s intervalom $C = 2,5^\circ$; $\gamma = 0,5^\circ$. Daný súbor údajov slúži na verifikáciu vypočítaných hodnôt svietivosti. Z nameraných údajov boli vytvorené tiež súbory s menej hustými intervalmi ($C = 5^\circ$; $\gamma = 2,5^\circ$ a $C = 15^\circ$; $\gamma = 2,5^\circ$) s ktorých sa dopočítavali chýbajúce hodnoty v uhloch ležiacich medzi danými uzlovými bodmi (obr. 18). Výpočet svietivosti medzi uzlovými bodmi bol realizovaný prostredníctvom výpočtového programu matlab. Pre porovnanie vplyvu interpolačných metód na výpočet svietivosti bola zvolená súčasne používaná lineárna interpolácia, navrhovaná kubická splajnová interpolácia a polynomická aproximácia metódou najmenších štvorcov. Stredná kvadratická chyba a koeficient determinácie boli vypočítané pre všetky kombinácie interpolačných metód a meracích uhlových intervalov (tab. 4, tab. 5).

$\gamma (^{\circ})$	$C (^{\circ})$		...
	0	5	
0	214,8	214,8	...
0,5	212,7	215,2	
1	211,4	215,5	
1,5	211,4	215	
2	209,6	213,8	
2,5	207,6	212,3	
3	205,3	210,7	
3,5	202,6	210,3	
4	202,4	210	
4,5	198,2	208,8	
5	195,3	207	
...	...	...	...

Obr. 18 Fragment tabuľky svietivosti ($C = 5^\circ$; $\gamma = 2,5^\circ$) – vľavo, fragment I-tabuľky zo znázornením dopočítaných hodnôt ($C = 2,5^\circ$; $\gamma = 0,5^\circ$) (zelené bunky)

Tab. 4 Stredná kvadratická chyba RRMSE a koeficient determinácie R^2 , vstupné údaje $C = 5$, $\gamma = 2,5$

	Svietidlo 1		Svietidlo 2		Svietidlo 3	
	RRMSE (%)	R^2	RRMSE (%)	R^2	RRMSE (%)	R^2
Lineárna interpolácia	7,65	0,9967	6,94	0,9982	14,16	0,9846
Kubická splajnová interpolácia	6,74	0,9971	6,07	0,9983	14,08	0,9848
Aproximácia polynómom 10. stupňa	43,75	0,8740	49,54	0,8733	43,99	0,8290

Tab. 5 Stredná kvadratická chyba RRMSE a koeficient determinácie R^2 , vstupné údaje $C = 15$, $\gamma = 2,5$

	Svietidlo 1		Svietidlo 2		Svietidlo 3	
	RRMSE (%)	R^2	RRMSE (%)	R^2	RRMSE (%)	R^2
Lineárna interpolácia	15,41	0,9855	14,59	0,9897	19,75	0,9688
Kubická splajnová interpolácia	13,96	0,9884	11,56	0,9933	18,45	0,9739
Aproximácia polynómom 10. stupňa	43,97	0,8730	50,06	0,8701	44,57	0,8250

Použitím kubickej splajnovej interpolácie (tab. 4, tab. 5) dochádza k zníženiu strednej kvadratickej chyby a preto je možné uvažovať o jej implementácii do procesu výpočtu hľadanej hodnoty svietivosti prípadne redukovaného súčiniteľa jas ležiacej medzi nameranými hodnotami v uzlových bodoch I a R-tabuliek.

Prínos práce a výsledky

Práca sa zaoberá problematikou metodiky výpočtu parametrov verejného osvetlenia. Hlavný prínos práce do praxe spočíva vo vytvorení nových sietí bodov pre výpočet a následnú verifikáciu jednotlivých parametrov. Ďalším dôležitým prínosom je aplikácia kubickej splajnovej interpolácie do procesu výpočtu jednotlivých návrhových parametrov.

Prezentované poznatky v práci:

- Analýza vplyvu hustoty siete výpočtových bodov na výsledné vypočítané parametre (L_0 , U_0 , U_1 , f_{T1} , E_h) pri 200 kombináciách rôznych geometrií osvetľovacích sústav, geometrií komunikácií a zvolených svietidiel.
- Vytvorenie nových sietí bodov pre výpočet a verifikáciu jednotlivých parametrov s ohľadom na súčasne používané metódy verifikácie.
- Aplikácia kubickej splajnovej interpolácie pre výpočet hodnôt ležiacich medzi uzlovými bodmi I a R tabuliek s uvedením postupu výpočtu.

Použitelnosť výsledkov a prínosy

- Výsledky analýz vplyvu hustoty siete výpočtových bodov na výsledné vypočítané parametre môžu byť použité pri budúcich revíziách dokumentu CIE 140 a európskej normy EN 13201-3 ako podklad tvorby novej výpočtovej siete.
- Výpočtové siete navrhnuté v práci môžu tiež poslúžiť ako podklad, prípadne byť prevzaté pri tvorbe nových sietí výpočtových bodov v rámci príslušných dokumentov CIE 140 a EN 13201-3.
- Návrh rovnomernejšieho rozloženia výpočtových bodov implikovaním postupu výpočtu siete kontrolnej bodov prevzatým z CIE x005, ktorý je používaný taktiež v STN EN 12193, STN EN 12464-1 a STN EN 12464-2.
- Návrh zmeny počtu výpočtových bodov v priečnom smere jazdného pruhu prípadne relevantnej oblasti pre výpočet osvetlenosti v závislosti od používaných rozmerov jazdných pruhov a komunikácií.
- Návrh úpravy vzťahov pre výpočet rozloženia bodov vo výpočtovom poli.
- Navrhnuté siete meracích bodov a v práci uvedené odporúčania týkajúce sa verifikácie jednotlivých parametrov môžu byť použité pri budúcich revíziách dokumentov CIE 194 a STN EN 13201-4.
- Aplikácia minimálnej rozlíšiteľnosti ľudského oka (minimum separabile) do procesu verifikácie jasů.
- Vytvorenie prototypu automatizovaného meracieho systému pre meranie horizontálnej osvetlenosti na ktorom je možné do budúcnosti testovať možnosti nasadenia a orientácie v teréne.
- Spresnenie výpočtu hodnôt ležiacich medzi uzlovými bodmi tabuliek svietivosti a odrazivosti prostredníctvom aplikácie kubickej splajnovej interpolácie.
- Vytvorenie zdrojového kódu pre výpočet svietivosti medzi uzlovými bodmi tabulky svietivosti pomocou lineárnej interpolácie, kubickej interpolácie a aproximácie zvoleným stupňom polynómu, ktorý je možné použiť na ďalšie analýzy vplyvu interpolačných metód na vypočítané hodnoty.

Odporúčania pre ďalšiu prácu

Vzhľadom na to že niektoré typy svietidiel s použitím nových svetelných zdrojov a optických systémov môžu v určitých uhlových intervaloch obsahovať rôzne lokálne extrémny by mala byť ďalšia práca zameraná na možnosti použitia výpočtových metód ktoré by dokázali zrekonštruovať dané extrémny. S týmto krokom súvisí aj prehodnotenie súčasne používanej hustoty meracích intervalov, prípadne stanovenie postupov merania ktorými je možné identifikovať či dané svietidlo obsahuje lokálne extrémny. Identifikácia by bola možná napríklad pomocou zrýchleného kontinuálneho merania svietivosti zvolených rovín a súčasného vyhodnocovania obsahu lokálnych extrémov, počtu rýchlych zmien v rámci určeného podintervalu. Na základe zrýchleného merania by sa následne stanovili hodnoty uhlových intervalov pre konečné meranie. Uhlový rozsah nemusí byť pevne daný pretože pri hladkých krivkách nemá zmysel zhrubovať súčasne stanovené minimálne uhlové intervaly. Zhustenie sa do budúcnosti môže uvažovať len pri identifikovaných kritických miestach čo výrazne skráti čas potrebný na meranie. Rozsahy uhlových intervalov je do budúcnosti potrebné stanoviť aj s ohľadom na odporúčenú metódu výpočtu hodnôt ležiacich medzi zadanými intervalmi. Pri niektorých výpočtových metódach ako adaptívna splajnová interpolácia uvedená v práci, môže veľký rozsah vstupných údajov značne predĺžiť výpočtový čas prípadne spôsobiť že výpočet neskonverguje.

Taktiež je možné ďalšiu prácu zamerať na implementáciu navrhovanej kubickej splajnovej interpolácie do celého procesu výpočtu a porovnanie výsledkov so súčasne používanou lineárnou interpoláciou. Proces porovnania môže byť prevedený so súčasne používaným a navrhovaným rozložením výpočtových bodov. V prípade návrhového kritéria jas by bolo možné porovnania verifikovať na rôznych skúšobných komunikáciách so známymi odrazovými vlastnosťami ktoré sú určené na výskum vo verejnom osvetlení.

Z hľadiska verifikácie je možné ďalšiu prácu zamerať aj na automatizované meracie systémy osvetlenosti ktoré budú schopné zmerať osvetlenosť v sieti výpočtových bodoch v dostatočne krátkom čase a s dostatočnou presnosťou. Veľkú perspektívu má aj práca zameraná na možnosti orientácie a pohybu automatizovaných systémov na meranie osvetlenosti vo verejnom osvetlení.

V súvislosti s navrhovaným počtom bodov pre výpočet a meranie sa naskytá otázka prehodnotenia súčasného prístupu k výpočtu celkovej rovnomernosti pri ktorom ovplyvňuje jedna minimálna hodnota spôsobilosť celej osvetľovacej sústavy.

Záver

Táto dizertačná práca je zameraná na metodiku výpočtu parametrov verejného osvetlenia. V práci je uvedená analýza skutkového stavu v oblasti metodiky výpočtu s poukázaním na niektoré zistené nedostatky v danej oblasti.

Medzi zistené nedostatky patrí hustota súčasne používanej výpočtovej siete ktorá bola tvorená vzhľadom na optimalizáciu výpočtového času a používanú meraciu techniku. V súčasnosti však počítačová technika bez problémov zvláda náročnejšie výpočty a pomocou jasových analyzátorov je možné vykonať meranie v hustejšej sieti bodov. Vzhľadom na tento fakt boli v práci navrhnuté nové siete výpočtových a meracích bodov zohľadňujúce súčasné možnosti výpočtovej a meracej techniky. Navrhnuté siete boli taktiež optimalizované s ohľadom na výsledky simulácii vplyvu hustoty výpočtovej siete na výsledné vypočítané parametre, rovnomerné rozloženie bodov v rámci výpočtového poľa a používané šírky jazdných pruhov a komunikácii v zmysle STN 73 6110. V rámci návrhu nových sietí boli upravené a doplnené aj aktuálne vzťahy na výpočet rozloženia bodov v rámci výpočtového poľa. S ohľadom na možnosti súčasnej meracích prístrojov pre meranie jasov je možné vyhodnocovať akékoľvek plochy na komunikácii. V práci je navrhnuté použitie plôch ekvivalentných priemetu uhla $2'$ na komunikácii ktorý korešponduje s minimálnym uhlom rozlíšenia ľudského oka pri daných úrovniach jasov. Pre meranie osvetlenosti v hustejšej sieti bodov je v práci navrhnutý prototyp automatizovaného meracieho systému.

V práci je pre spresnenie výpočtu parametrov verejného osvetlenia namiesto súčasne používanej lineárnej interpolácie navrhnutá kubická splajnová interpolácia. Výsledky preukázali že pri kubickej splajnovej interpolácii nastáva zlepšenie presnosti výpočtu svietivosti medzi uzlovými bodmi. Vzhľadom na tento fakt je možné uvažovať s implementáciou tejto metódy do procesu výpočtu parametrov verejného osvetlenia.

Výsledky práce budú nápomocné pri budúcich revíziách príslušných dokumentov zaoberajúcich sa metodikou výpočtu a verifikáciou jednotlivých vypočítaných parametrov medzi ktoré patria medzinárodné dokumenty CIE 140, CIE 194 a európske normy STN EN 13201-3, STN EN 13201-4.

Použitá literatúra

- [1] CIE 140:2019, Road lighting calculation, 2nd edition.
- [2] STN EN 12193:2009, Svetlo a osvetlenie, Osvetlenie športovísk.
- [3] STN EN 12464-1:2012, Svetlo a osvetlenie, Osvetlenie pracovísk, Časť 1: Vnútorne pracoviská.
- [4] STN EN 12464-2:2015, Svetlo a osvetlenie, Osvetlenie pracovísk, Časť 2: Vonkajšie pracoviská.
- [5] STN EN 13 201-2:2017, Osvetlenie pozemných komunikácií, Časť 2: Svetelnotechnické požiadavky.
- [6] STN EN 13 201-3:2018, Osvetlenie pozemných komunikácií, Časť 3: Svetelnotechnický výpočet.
- [7] STN 73 6110:2014, Projektovanie miestnych komunikácií
- [8] Somorčík, J., Teplička, I. *Štatistika zrozumiteľne*. Enigma Publishing, s.r.o., 2015. ISBN 978-80-8133-042-1.
- [9] Habel, J., Dvořáček, K., Dvořáček, V., Žák, P. *Světlo a osvětlování*. FCC Public s. r. o., 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [10] Simons, R.H., Bean, A.R. *Lighting engineering applied calculation*. luminaire distributions, 2001. ISBN 0-7506-5051-6.
- [11] Vitásek, E. *Numerické metody*. Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [12] Rektorys, K. *Přehled užití matematiky*. Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [13] Fajmon, B., Ružičková, I. *Matematika 3*. [online]. Brno 2003, [cit: 2019-05-16]. Dostupné na internete: <http://www.umat.feec.vutbr.cz/~novakm/matematika3.pdf>.
- [14] Numerické metody matematiky I, Aproximácie funkcií-splajny, [online]. [cit: 2019-05-16]. Dostupné na internete: http://www.earthphysics.sk/mainpage/stud_mat/menm/prednaska9.pdf.
- [15] Güler, Ö., Onaygil, S. The effect of observer positions for L_{avg} and U_0 in roadlighting. Light - XII National Conference on Lighting, Varna, Bulgaria 2014, pp. 38-43.
- [16] Plch, J. Reakční doba řidiče. Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení, Jablonec nad Nisou, 4. – 5. listopadu 2010.
- [17] Oláh, Z., Furdová, A. Přehľad fyziologických funkcií orgánu zraku. [online]. Klinika oftalmológie LF UK v Bratislave [cit: 2019-05-16]. Dostupné na internete: <https://portal.fmed.uniba.sk/clanky.php?aid=257>.
- [18] Výpočtový program Dialux. [online]. [cit: 2019-04-19]. Dostupné na internete: <https://www.dial.de/en/dialux-desktop/download/>.

Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

- [1] JANIGA, Peter - LIPNICKÝ, Lukáš - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Control systems for street lighting. In *Transactions on Electrical Engineering*. Vol. 6, No. 1 (2017), s. 1-5. ISSN 1805-3386.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- [2] DUBNIČKA, Roman - CSUTI, Péter - SCHANDA, János - SZABÓ, Ferenc - RUSNÁK, Anton - GRINAJ, Lukáš - LIPNICKÝ, Lukáš. Defining luminous intensity distributions of LED luminaires by the measurement of rotating luminaire goniophotometers. 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. 565-572. ISBN 978-3-902842-49-7.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] LIPNICKÝ, Lukáš - DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Measurement of luminaires for 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. 423-427. ISBN 978-961-93733-4-7.
- [7] LIPNICKÝ, Lukáš - DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Photometric measurement of road lighting luminaires. In *CIE Midterm Meeting 2017 : Conference on Smarter Lighting for Better Life. Jeju, South Korea. October 20-28, 2017*. Vienna : CIE, 2017, S. 1007-1011. ISBN 978-3-901906-95-4.
- [8] LIPNICKÝ, Lukáš - DUBNIČKA, Roman - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Impact of measuring angular intervals on the luminous intensity distribution curves of luminaires for road lighting. In *Balkan light 2018 : 7th Balkan conference on lighting. Sofia, Bulgaria. June 4-6, 2018*. Sofia : Minno-Geoložky Universitet, 2018, S. 279-281. ISBN 978-954-353-347-3.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

- [9] DUBNIČKA, Roman - LIPNICKÝ, Lukáš - GRINAJ, Lukáš - SZABÓ, Ferencz - CSUTI, Péter. Discharge luminaires correction of lide measurement by means of goniophotometers with rotating luminaires. In ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2015 [elektronický zdroj] : Konferencia s medzinárodnou účasťou. Trenčín, Slovakia. 13. – 15. október 2015. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU v Bratislave, 2015, CD-ROM, S. 71-75. ISBN 978-80-227-4437-9.
- [10] LIPNICKÝ, Lukáš - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz - DUBNIČKA, Roman. Effects of calculation points density to U0 and UI parameters. In ELOSYS. Elektrotechnika, informatika a telekomunikácie 2015 [elektronický zdroj] : Konferencia s medzinárodnou účasťou. Trenčín, Slovakia. 13. – 15. október 2015. 1. vyd. Bratislava : Nakladateľstvo STU v Bratislave, 2015, CD-ROM, S. 109-111. ISBN 978-80-227-4437-9.

BEE Odborné práce v zahraničných zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- [11] DUBNIČKA, Roman - LIPNICKÝ, Lukáš - CSUTI, Péter - SZABÓ, Ferenc - HORNISCHER, Rudolf. Comparison of the photometric measurement of LED luminaires with three different goniophotometer types. In LeCV 2016 : Lux et color vespremiensis. Veszprém, Hungary. October 14-15, 2016. Budapest : University of Technology and Economics, 2016, S. 18-24. ISBN 978-963-313-238-8.
- [12] LIPNICKÝ, Lukáš - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Calculation of the photometric parameters in public lighting. In Lux junior 2015. Tagungsband Proceedings [elektronický zdroj] : 12. Internationales forum für den lichttechnischen nachwuchs. Dörfeld bei Ilmenau, Germany. 25. bis 27. September 2015. Ilmenau : Technische Universität Ilmenau, 2015, CD-ROM, [6] s. ISBN 978-3-927787-51-3.

BEF Odborné práce v domácich zborníkoch (konferenčných aj nekonferenčných)

- [13] LIPNICKÝ, Lukáš - GAŠPAROVSKÝ, Dionýz. Technická hodnota a energetická efektívnosť starých typov svietidiel v súčasnej prevádzke. In Slovalux 2016 : 5. odborná konferencia. Prešov, Slovensko, 22.-24. jún 2016. 1. vyd. Bratislava : SSTS, 2016, S. 66-71. ISBN 978-80-89275-43-4.