

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky

**Optimalizace křivek svítivosti svítidel
pro venkovní komunikace**

Diplomová práce

Praha 2018

Autor práce: **Jakub Močička**
Vedoucí práce: **Ing. Petr Žák, Ph.D.**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Močička** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **420350**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace křivek svítivosti svítidel pro venkovní komunikace

Název diplomové práce anglicky:

Optimisation of luminous intensity curves of luminaires for road

Pokyny pro vypracování:

1. Požadavky světelně technických norem na osvětlení venkovních komunikací.
2. Návrh metody pro optimalizaci křivek svítivosti svítidel pro venkovní komunikace.
3. Ověření výsledků optimalizace křivek svítivosti pomocí výpočetního programu pro projektování osvětlovacích soustav.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 13201: Osvětlení pozemních komunikací
- [2] CIE 115:2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic
- [3] HABEL, Jirí, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978 80 86534 21 3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Petr Žák, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **08.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Petr Žák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

1. Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.
2. Souhlasím s tím, aby práce byla zpřístupněna pro studijní a výzkumné účely.

V Praze dne 22. 5. 2018

Jakub Močíčka

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své práce Ing. Petru Žákovi, Ph.D. za nespočet podnětů k mé diplomové práci a za poskytnutí podkladů k mé diplomové práci. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během celého studia a za udílení motivace, která mě dovedla až sem.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací křivek svítivosti svítidel pro osvětlení venkovní komunikace. V práci jsou shrnuty základní požadavky na osvětlení venkovní komunikace dle normy ČSN EN 13201 částí 2 a 3. Kromě požadavků udaných normou je v diplomové práci představen teoretický základ k výpočtu hodnot fotometrických veličin. Dále je představena konfigurace, pro kterou je provedena optimalizace. Stejně tak i algoritmus použitý k výpočtu hodnot svítivosti pro dané C-roviny a úhly. Na závěr jsou představeny grafické výsledky obdržené z optimalizace prováděné v softwaru Wolfram Mathematica a kontrola vypočítaných hodnot pro námi zvolenou konfiguraci v softwaru Dialux.

Abstract

This diploma thesis is focused on optimization of luminous intensity curves for road lighting. In this thesis are summarized basic demands on road lighting according to technical norm ČSN EN 13201 part 2 and 3. Besides that this thesis presents theoretical background for lighting calculations. Next part introduces road configuration used in calculations and algorithm for calculating luminous intensity for given C-planes and angles. Last part is focused on presenting graphical results obtained via Wolfram Mathematica software as well as graphical verification of calculated luminous intensities for given configuration in Dialux software.

Klíčová slova

Optimalizace, svítivost, pozemní komunikace, osvětlenost, jas, svítidla, C-roviny, třídy komunikace.

Keywords

Optimization, luminous intensity, carriageway, illuminance, luminance, luminaires, C-planes, road lighting classes.

Obsah

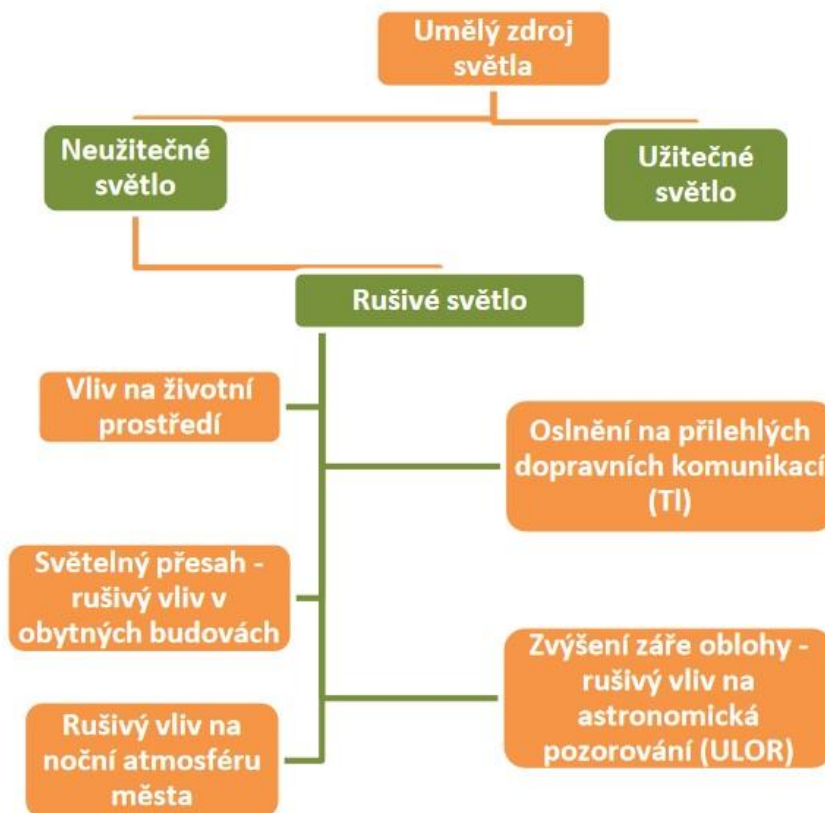
1	Úvod.....	10
2	Světelnětechnické veličiny	12
2.1	Světelný tok.....	12
2.2	Prostorový úhel.....	12
2.3	Svítivost.....	13
2.3.1	Měření svítivosti.....	15
2.3.2	Měření čar svítivosti.....	16
2.4	Osvětlenost	17
2.5	Jas svazku světelných paprsků	18
3	Integrální charakteristiky světelného pole.....	20
3.1	Světelný vektor.....	20
3.2	Střední kulová osvětlenost.....	21
3.3	Střední válcová osvětlenost	21
3.4	Střední polokulová osvětlenost	22
3.5	Střední poloválcová osvětlenost.....	23
4	Světelnětechnické výpočty	24
4.1	Toková metoda výpočtu osvětlení komunikace	24
4.1.1	Výpočet průměrné osvětlenosti	24
4.1.2	Výpočet průměrného jasu.....	25
4.1.3	Výpočet osvětlenosti	25
5	Požadavky na osvětlení pozemních komunikací.....	28
5.1	Požadavky tříd osvětlení	28
5.1.1	Třídy M.....	28
5.1.2	Třídy C	28
5.1.3	Třídy P a HC.....	29
5.1.4	Třídy SC	30
5.1.5	Třídy EV.....	31
5.1.6	Požadavky na omezující oslnění	32

5.1.7	Požadavky na rušivé oslnění	32
5.2	Užití provozních tříd svítivosti.....	33
5.2.1	Dopravní silnice	33
5.2.2	Osvětlování mostů.....	33
5.2.3	Pozemní komunikace v obytných oblastech	33
5.2.4	Konfliktní oblasti	33
5.3	Požadavky normy na výpočet světelnotechnických veličin pro osvětlování komunikace	33
5.3.1	Horizontální osvětlenost.....	33
5.3.2	Poloválcová osvětlenost.....	34
5.3.3	Prahový přírůstek	35
5.3.4	Pozice výpočtových bodů pro výpočet jasu	37
5.3.5	Pozice výpočtových bodů pro výpočet osvětlenosti.....	38
6	Vlastní výpočet optimálních křivek svítivosti.....	40
6.1	Předpoklady optimalizace	40
6.2	Optimalizace křivek svítivosti pro třídy P.....	43
6.2.1	Algoritmus výpočtu křivek svítivosti pro třídy P.....	43
6.2.2	Křivky svítivosti pro základní konfiguraci pro třídy P.....	47
6.2.3	Porovnání křivek svítivosti	49
6.3	Optimalizace křivek svítivosti pro třídy M	55
6.3.1	Algoritmus výpočtu křivek svítivosti pro třídy M	55
6.3.2	Křivky svítivosti pro základní konfiguraci pro třídy M.....	57
7	Závěr	59
8	Seznam použité literatury.....	61
9	Seznam použitých obrázků	62
10	Seznam použitých tabulek.....	63
11	Seznam použitých zkratk.....	64
12	Seznam příloh	65
	Přílohy.....	66

1 Úvod

V diplomové práci se zabývám optimalizací křivek svítivosti pro osvětlení venkovní komunikace. Konkrétně pak pro komunikace patřící do třídy P a M, tak jak jsou stanoveny v normě ČSN EN 13201 část 1.

Uvažovaná optimalizace vychází z předpokladu, že je dán úsek komunikace s již fungující osvětlovací soustavou a je zapotřebí vyměnit světelné zdroje ve stávajících stožárech za nové. V praxi se nejčastěji provádí náhrada svítidel pro vysokotlaké sodíkové výbojky za svítidla se světelnými diodami (LED). Očekáváme, že budou splňovat požadavky norem na osvětlení komunikace co nejefektivněji bez světelného toku mimo požadovaná místa komunikace, a nebudou tedy přispívat k rušivému světlu. Podíl elektrické energie vyžadované pro provoz veřejného osvětlení činí přibližně 1,14 % z celkové vyrobené elektrické energie. [1] Omezení světelného toku směřujícího mimo komunikaci, respektive snížení nadbytečného světelného toku vede k nižším nárokům na výkony světelných zdrojů, a tedy nižší spotřebě elektrické energie. Klasifikaci rušivého světla lze vidět na obrázku číslo 1. Předmětem zájmu je zejména neúčinné světlo, které představuje světlo vyzařované mimo osvětlovaný objekt, a světelné znečištění, které kombinuje nepříznivé účinky umělého osvětlení. [2]



Obrázek 1 - Klasifikace rušivého světla pro venkovní prostředí [2]

Světelné znečištění je nežádoucí z důvodu negativních vlivů na živé organismy (včetně člověka). U zvířat umělé noční osvětlení způsobuje zhoršení orientace, reprodukce či komunikace. [3] U člověka pak nadměrné osvětlení v nočních hodinách narušuje cirkadiánní rytmy, jako následek ovlivňování hladiny melatoninu v lidském těle. Důsledkem pak může být řada nemocí či poruch. Příkladem jsou poruchy metabolismu, stres, poruchy imunitního systému či rakovina. [4]

Standardním postupem při návrhu osvětlení je proces výběru svítidla z dostupných svítidel, jehož křivka svítivosti splňuje požadavky dané normou, což může mít za následek výběr svítidla, jehož křivka se více, či méně liší od ideálního tvaru, který minimalizuje světelné znečištění prostřednictvím osvětlování pouze požadované plochy komunikace a minimalizace osvětlování okolního prostředí.

Cílem diplomové práce je předvést přístup k výběru vhodného svítidla, umožňující nalézt optimální podobu křivky svítivosti svítidla pro danou konfiguraci komunikace a na jejím základě vybrat ze všech dostupných svítidel takové, jehož křivka svítivosti se nejvíce blíží optimálnímu. Zároveň tato metoda poskytuje možnost minimalizovat množství nežádoucího světelného toku do okolí komunikace nebo přebytek světelného toku přímo na komunikaci.

2 Světelnotechnické veličiny

2.1 Světelný tok

„Veličina odpovídající zářivému toku. Vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový počitek.“ [5] Světelný tok monochromatického záření je definován vztahem [5]:

$$\phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda)$$

kde

ϕ_e je zářivý tok ve W,

$K(\lambda)$ je světelný účinek monochromatického záření v $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$,

K_m je maximální hodnota spektrálního průběhu $K(\lambda)$ v $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$,

$V(\lambda)$ je poměrná světelná účinnost monochromatického záření.

2.2 Prostorový úhel

„Jeho velikost je určena velikostí plochy vyřaté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule se středem totožným s vrcholem uvažované kuželové plochy.“ [5] Prostorové úhly se udávají ve steradiánech.

Prostorový úhel je dán rovnicí [5]:

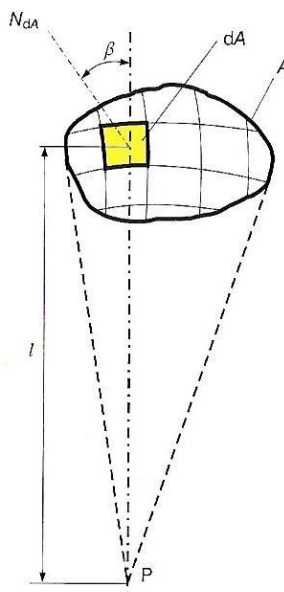
$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

kde

A je plocha na povrchu koule v m^2 ,

r je poloměr koule v m.

Neboli prostorový úhel, pod nímž je vidět vyřatá plocha A na povrchu koule pozorována ze středu této koule o poloměru r . [5]



Obrázek 2 - Znáornění prostorového úhlu [5]

2.3 Svítivost

Svítivost je definována jako prostorová hustota světelného toku v různých směrech.

Svítivost je definována rovnicí [5]:

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}}$$

kde

$d\Omega_{\gamma\zeta}$ je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly γ a ζ v sr,

$d\phi$ je svítidlem vyzařovaný tok v lm.

Při výpočtech využívajících hodnot svítivosti se uvažuje, že svítidlo leží ve vrcholu prostorového úhlu, a tudíž je svítivost definována pouze pro bodový zdroj (respektive svítidlo bodového typu), tedy zdroj, u něhož jsou rozměry vyzařovací plochy zanedbatelné vůči vzdálenosti kontrolního bodu od vrcholu prostorového úhlu. Vrchol prostorového úhlu se pak nazývá světelný střed bodového zdroje, respektive světelný střed svítidla bodového typu. Jednotkou svítivosti je kandela. „Zjistí-li se hodnoty svítivosti svítidla ve všech směrech prostoru a nanesou-li se prostorově od světelného středu zdroje jako radiusvektory, dostane se spojením všech těchto koncových bodů těchto radiusvektorů fotometrická plocha svítivosti.“ [5] Při vybrání řezů (zpravidla procházejících rovinami bodového zdroje) obdržíme v jejich rovinách křivky svítivosti. Křivky svítivosti lze popsat následujícím vztahem [5]:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma)$$

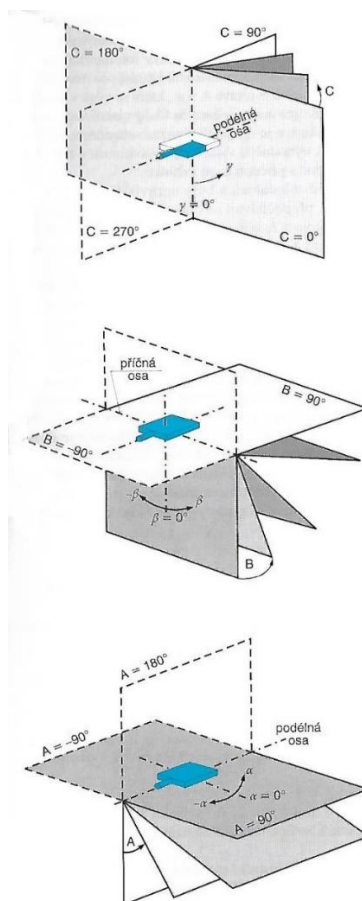
kde

I_γ je svítivost přečtená z uvažovaného diagramu svítivosti, pod úhlem γ od vztažného směru v cd,

I_0 je svítivost uvažovaného zdroje ve vztažném směru, tj. obvykle ve směru kolmém k hlavní vyzařovací ploše svítidla v cd,

$f_I(\gamma)$ je charakteristická funkce (indikatrix) svítivosti, tj. funkce matematicky popisující (aproximující) uvažovanou křivku svítivosti.

Čáry svítivosti se nejčastěji udávají v soustavě fotometrických rovin $C-\gamma$ tvořené svazkem polorovin s osou kolmou k hlavní vyzařovací ploše svítidla nebo zdroje, která je zpravidla totožná se směrem vztažné svítivosti I_0 . Další alternativou je soustava fotometrických rovin $B-\beta$ (osa totožná s příčnou osou svítidla) či již nepoužívaná soustava $A-\alpha$. Při popisu svítidel v praxi se uvádějí roviny s křivkami svítivosti dle vyzařování jednotlivých svítidel. V případě rotačně souměrných vyzařování svítidel stačí pouze polorovina $C-0$. Pro svítidla, jejichž vyzařování je souměrné podle dvou rovin je zvykem udávat roviny $C0-C180$ a $C90-C270$. Křivky svítivosti jsou pak zpravidla vykreslovány v polárních souřadnicích pro požadované poloroviny (roviny). [5]



Obrázek 3 - Varianty uspořádání svazků polorovin [5]

2.3.1 Měření svítivosti

Jednou z metod měření svítivosti je vizuální porovnání jasu plošek pozorovaných v okuláru fotometru. Další možností je měření současně s osvětleností, přičemž v případě první metody se jedná o subjektivní měření, zatímco v případě druhé metody o objektivní měření. Zároveň obě tyto metody jsou nepřímé metody měření. Vizuální měření je prováděno prostřednictvím srovnání zkoumaného světelného zdroje s normálem nebo substituční metodou za pomoci srovnávacího světelného zdroje. Měření substituční metodou je charakteristické použitím konstantní osvětlenosti čidla k vyloučení nelineární závislosti fotoelektrického proudu fotočlánku na osvětlenosti. Samotný průběh měření spočívá v osvětlování fotočlánku etalonem svítivosti a následným osvětlováním zkoušeným zdrojem za současné změny polohy zkoušeného zdroje až do momentu, kdy je údaj udávaný měřicím přístrojem pro zkoušený zdroj shodný s hodnotami pro etalon svítivosti. Svítivost zkoušeného zdroje se posléze vypočítá z následující rovnice [5]:

$$\frac{I_Z}{I_N} = \frac{l_Z^2}{l_N^2}$$

kde

I_Z je svítivost zkoušeného zdroje v cd,

I_N je svítivost etalonu (nebo normálu) svítivosti v cd,

l_Z vzdálenost zkoušeného zdroje od hlavice fotometru v m,

l_N vzdálenost etalonu (nebo normálu) svítivosti od hlavice fotometru v m.

2.3.2 Měření čar svítivosti

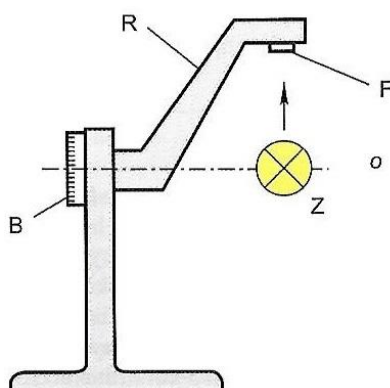
Měření čar svítivosti probíhá v zásadě za pomoci goniofotometru, což je zařízení umožňující měření svítivosti svítidla či světelného zdroje v různých fotometrických rovinách a pod různými úhly. Měření s goniofotometrem probíhá v různých uspořádáních, kterými jsou [5]:

otočný zdroj (svítidlo) a pevný fotometr,

pevný zdroj (svítidlo) a otočný fotometr,

pevný zdroj (svítidlo) i fotometr a otočná zrcadlová soustava.

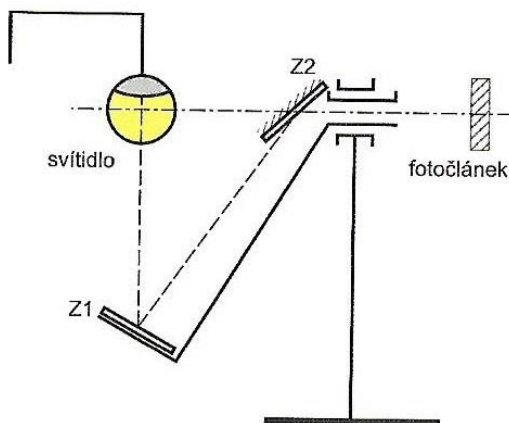
V obrázku číslo 4 lze vidět schéma goniofotometru s pevným zdrojem a otočným fotometrem. „Rameno R s fotočlánkem se otáčí kolem měřeného zdroje (svítidla) umístěného v ose otáčení o . Úhel natočení se čte na stupnici vyznačené na bubínku B . Rovina, ve které se měří křivka svítivosti, se mění natočením svítidla (zdroje). Čáry svítivosti svítidel se popsáním goniofotometrem měří v soustavě fotometrických rovin $C - \gamma$.“ [5] Výhoda této metody spočívá v měření a umístění zkoušeného zdroje v poloze, která je ve většině případů shodná s jeho provozní polohou, naopak nevýhodou je konstrukční omezení nastavení vzdálenosti fotočlánku od zkoušeného zdroje. [5]



Obrázek 4 - Goniofotometr s pevným zdrojem a otočným fotometrem [5]

V obrázku číslo 5 je uvedeno schéma pro goniofotometr s pevným zdrojem i fotometrem a otočnou zrcadlovou soustavou. „Okolo svítidla se na pevném rameni otáčí zrcadlo Z_1 . Světlo odražené zrcadlem Z_1 vrhá druhé zrcadlo Z_2 ve směru osy otáčení na pevně

umístěný fotočlánek. Fotometrická vzdálenost je v tomto případě dána součtem vzdáleností od měřeného svítidla, přes obě zrcadla až k fotočlátku.“ [5] Výhodou tohoto uspořádání je možnost nastavení větší fotometrické vzdálenosti od zkoušeného zdroje oproti předcházejícímu uspořádání, i zde je však fotometrická vzdálenost omezená konstrukčními možnostmi zejména z hlediska kvality zrcadel. [5]



Obrázek 5 - Goniofotometr s pevným zdrojem i fotometrem a otočnou zrcadlovou soustavou [5]

Po všechna uspořádání goniofotometru je typická pevná konstrukce, tak aby se předcházelo vzniku dodatečných chyb měření způsobených kýváním či deformací. Výsledky měření se nejčastěji uvádí v relativních hodnotách v polárním grafu ocejchovaném jednou absolutní hodnotou zjištěnou zvláštním měřením na goniofotometru či fotometrické lavici. [5]

2.4 Osvětlenost

Osvětlenost je definována jako plošná hustota světelného toku dopadajícího na plochu A. Rovnice má následující tvar [5]:

$$E = \frac{d\phi_d}{dA}$$

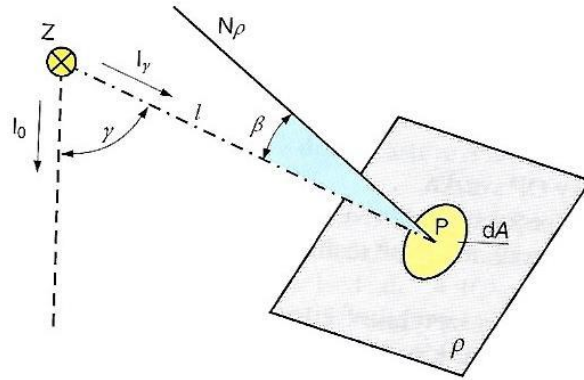
kde

$d\phi_d$ je světelný tok v lm,

dA je plocha, na niž dopadá světelný tok v m².

Při osvětlování z bodového zdroje platí Lambertův kosinusový zákon (osvětlenost bodovým zdrojem je přímo úměrná kosinu úhlu β dopadu světelných paprsků) a zákon čtverce vzdálenosti (osvětlenost bodovým zdrojem je nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti osvětlované plochy od bodového zdroje). Rovnici pro osvětlenost můžeme přepsat do tvaru [5]:

$$E = \frac{I_\gamma}{l^2} \cos\beta$$



Obrázek 6 - Znárodnění osvětlenosti [5]

2.5 Jas svazku světelných paprsků

Jas je veličina, na niž bezprostředně reaguje zrakový orgán, a je dána rovnicí [5]:

$$L_{OP} = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_n}$$

kde

L_{OP} je jas svazku paprsků ve směru osy OP svazku v $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$,

ϕ je světelný tok v lm,

$d\Omega$ je prostorový úhel, ve kterém se paprsky šíří ve sr,

dA_n je ploška kolmá k ose svazku paprsků, na níž se realizuje plošná hustota světelného toku v m^2 .

„Zjistí-li se hodnoty jasu svazku paprsků dopadajících z různých směrů do okolí určitého bodu prostoru a nanesou-li se tyto hodnoty na odpovídající směry od uvažovaného bodu jako radiusvektory, dostane se spojením všech koncových bodů radiusvektorů fotometrická plocha rozložení jasu.“ [5] Stejně jako v případě svítivosti, i zde se berou řezy fotometrickou plochou provedené rovinami, které zde vytvářejí čáry (křivky) jasu. I zde můžeme čáry (křivky) popsat matematickým vztahem, který má následující podobu [5]:

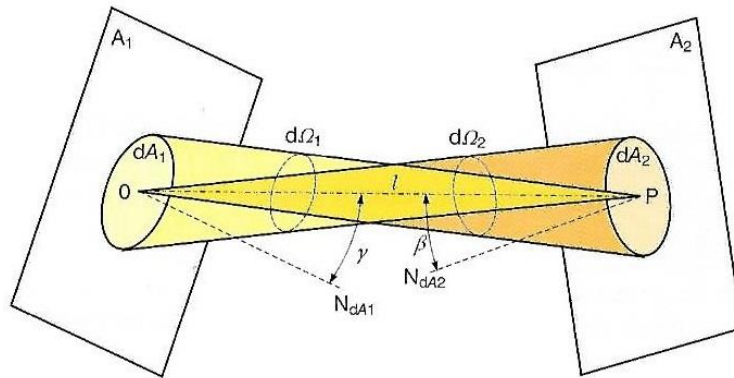
$$L_\gamma = L_0 \cdot f_L(\gamma)$$

kde

L_0 je jas svazku paprsků ve směru, který je zvolen za vztažný směr (většinou se bere směr normály ke svítící ploše) v $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$,

L_γ jas svazku paprsků ve směru pod úhlem γ měřeným od vztažného směru v $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$,

$f_L(\gamma)$ je charakteristická funkce (indikatrix) jasu, tj. funkce matematicky popisující (aproximující) tvar uvažované čáry jasu.



Obrázek 7 - Znázornění jasu [5]

3 Integrální charakteristiky světelného pole

Osvětlenost prostorů nelze posuzovat pouze na základě osvětlenosti rovných ploch, ale je potřeba uvažovat, že se v prostoru budou vyskytovat i předměty různých tvarů, z tohoto důvodu se zavádějí střední kulová osvětlenost, střední válcová osvětlenost atd., které charakterizují osvětlenost na předmětech odpovídajících tvarů. [5]

3.1 Světelný vektor

„Poyntingův vektor se v podmínkách světelného pole nahrazuje vektorem hustoty světelného toku, který se nazývá světelný vektor. Světelný vektor určuje měrný výkon přenosu světelné energie v libovolném bodě pole, nezávisle na volbě souřadnic. Jeho velikost je určena energií, která projde za jednotku času jednotkovou plochou kolmou na směr šíření, a je tedy rovna rozdílu normálových osvětleností jedné a druhé strany plochy umístěné v daném bodě kolmo ke směru šíření záření. Orientovaný směr světelného vektoru je určen směrem přenosu světelné energie v uvažovaném bodě pole.“ [5] Rovnicí lze světelný vektor vyjádřit následujícím způsobem [5]:

$$|\varepsilon_1| = \varepsilon_1 = \frac{d\phi}{dA_N} = E_N$$

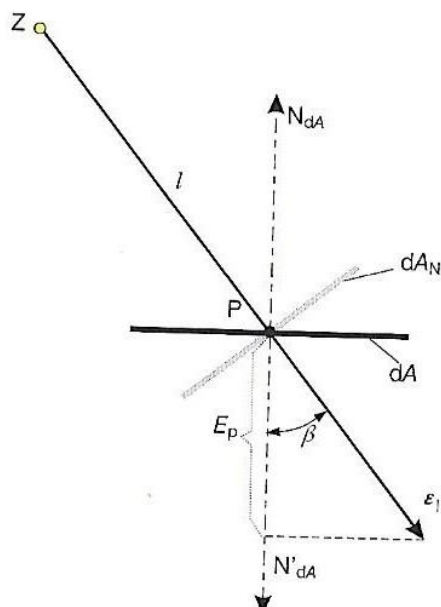
kde

$d\phi$ je světelný tok v lm,

dA_N je ploška, na niž dopadá světelný tok v m²,

E_N je normálová osvětlenost v lx.

V případě více světelných zdrojů je výsledný světelný vektor dán vektorovým součtem jednotlivých světelných vektorů příslušících jednotlivým světelným zdrojům. *„Osvětlují-li všechny zdroje pouze jednu stranu určitého povrchu v daném bodě pole, je průmět světelného vektoru v tomto bodě do normály k uvažovanému povrchu roven přímo hodnotě osvětlenosti zmíněného povrchu v okolí sledovaného bodu.“* [5]

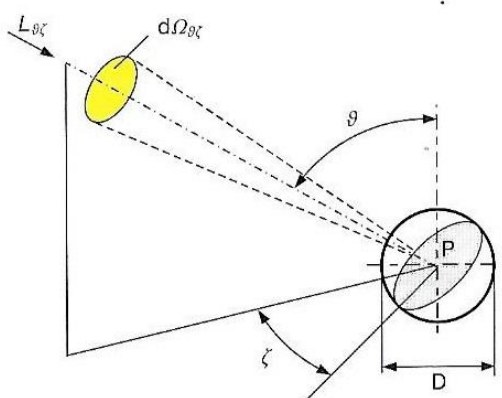


Obrázek 8 - Znárodnění světelného vektoru [5]

3.2 Střední kulová osvětlenost

Střední kulová osvětlenost je určena střední hodnotou osvětlenosti povrchu přijímače ve tvaru koule se středem v daném bodě, jejíž průměr D je zanedbatelný v porovnání se vzdáleností uvažovaných zdrojů od kontrolního bodu P pole. Střední kulové osvětlenosti odpovídá následující rovnice [5]:

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} dE_N = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta}$$



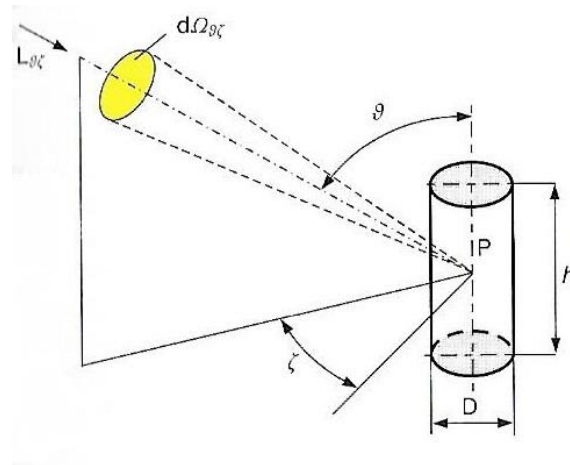
Obrázek 9 - Znárodnění střední kulové osvětlenosti [5]

3.3 Střední válcová osvětlenost

„Používá se při hodnocení osvětlenosti veřejných a společenských prostorů s převažujícími směry pozorování blízkými vodorovnému. Střední válcová osvětlenost odpovídá

střední hodnotě osvětlenosti pláště elementárního válečku svíse umístěného v uvažovaném bodě pole.“ [5] Střední válcovou osvětlenost lze vyjádřit následující rovnicí [5]:

$$E_z = \frac{1}{\pi} \int_0^{4\pi} \sin \vartheta \cdot L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta} = \frac{1}{\pi} \int_0^{4\pi} \sin \vartheta \cdot dE_N$$

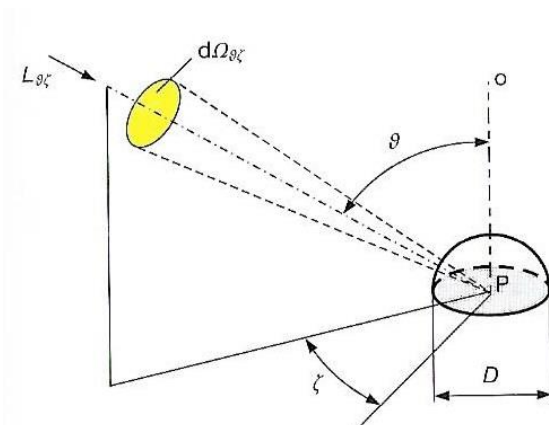


Obrázek 10 - Znárodnění střední válcové osvětlenosti [5]

3.4 Střední polokulová osvětlenost

Střední polokulová osvětlenost se používá k hodnocení osvětlení prostorů, kde je kladen důraz na osvětlení trojrozměrných detailů umístěných na velké ploše a zároveň není kladen důraz na osvětlení předmětů, či jejich částí, které jsou odvrácené od pozorovatele. *Střední polokulová osvětlenost je rovna střední hodnotě osvětlenosti povrchu elementární půlkoule umístěné do sledovaného bodu pole. Rozměry modelového přijímače jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností kontrolního bodu od jednotlivých zdrojů.* [5] Pokud je osa přijímače umístěna do směru, kde je hodnota úhlu ϑ nulová, lze definovat střední polokulovou osvětlenost následujícím vztahem [5]:

$$E_{hs} = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} (1 + \cos\vartheta) \cdot L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta}$$



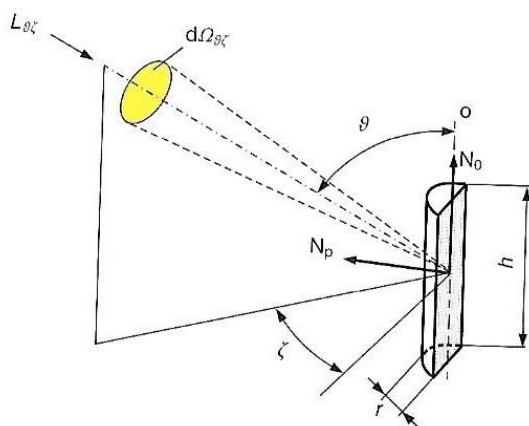
Obrázek 11 - Znáornění střední polokulové osvětlenosti [5]

3.5 Střední poloválcová osvětlenost

V případě potřeby přesněji vymezit směry osvětlování se používá střední poloválcová osvětlenost, která je definovaná jako střední hodnota osvětlenosti povrchu jedné poloviny pláště válcové plochy, jejíž rozměry jsou zanedbatelné v porovnání se vzdáleností kontrolního místa od uvažovaných zdrojů světla. Poloválcovou osvětlenost lze tak zapsat následující rovnicí:

$$E_{sz} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \sin\vartheta \cdot (1 + \cos\zeta) \cdot L_{\theta\zeta} \cdot d\Omega_{\theta\zeta}$$

Vektory N_0 a N_p určují polohu modelového přijímače P, kde N_0 je umístěn ve směru podélné osy o přijímací plochy pláště půlválce a N_p je polohován do normály k obdélníkové základně přijímače ve směru povrchu půlválce. [5]



Obrázek 12 - Znáornění střední poloválcové osvětlenosti [5]

4 Světelnotechnické výpočty

4.1 Toková metoda výpočtu osvětlení komunikace

4.1.1 Výpočet průměrné osvětlenosti

Toková metoda se používá k zjištění požadovaných hodnot světelných toků zdrojů použitých k osvětlení daného prostoru, plochy atd. Udržovanou osvětlenost úseku komunikace lze vypočítat z následujícího vztahu [5]:

$$E_m = \frac{\phi_z}{b \cdot l} \cdot z \cdot \eta_E = \frac{\phi_z}{b \cdot l} \cdot z \cdot \frac{\phi_{už}}{\phi_z}$$

kde

ϕ_z je jmenovitý světelný tok světelných zdrojů v lm,

b je šířka komunikace v m,

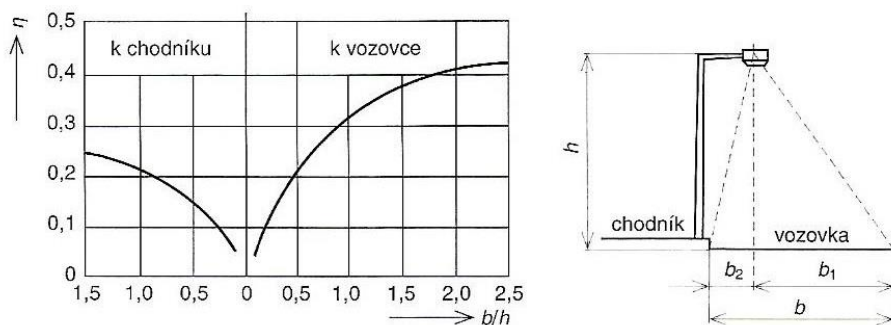
l je rozteč svítidel v m,

z je udržovací činitel,

η_E je činitel využití,

$\phi_{už}$ je užitečný světelný tok v lm.

„Většinou se činitel využití η_E stanovuje pro dané svítidlo v závislosti na poměrné šířce komunikace b/h (kde h je výška stožáru).“ [5] V obrázku číslo 13 lze vidět graficky závislost činitele využití na poměrné šířce komunikace. Pro výpočet činitele využití v závislosti na poměrné šířce komunikace pro uspořádání svítidel na jedné straně komunikace se nejprve spustí kolmice na plochu komunikace ze svítidla, která rozdělí celou šířku komunikace na dva úseky (b_1 a b_2 v obrázku číslo 13). Podílem těchto délek k výšce, ve které se nachází svítidlo, dostaneme jednotlivé činitele využití. Následným sečtením těchto činitelů dostaneme celkový činitel využití pro daný úsek komunikace. Při skutečném instalování svítidel dle navržených hodnot světelných toků se zjistí odchylka od navržených hodnot a zkontroluje se splnění požadovaných hodnot fotometrických veličin pro daný úsek komunikace. [5]

Obrázek 13 - Závislost činitele využití na poměru b/h [5]

4.1.2 Výpočet průměrného jasu

Hlavním rozdílem při výpočtu průměrného jasu ve srovnání s průměrnou osvětleností je závislost na poloze pozorovatele. Součinitel jasu vozovky lze pak vypočítat z následující rovnice [5]:

$$q = \frac{L}{E}$$

kde

L je jas v daném bodě a směru v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$,

E je osvětlenost vodorovné roviny v kontrolním bodě v lx.

Příčemž průměrný jas je pak dán rovnicí [5]:

$$L_m = \overline{E}_m \cdot q_p$$

kde

\overline{E}_m je potřebná hodnota osvětlenosti,

q_p je průměrná hodnota součinitele jasu vozovky v $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{lx}^{-1}$.

Postup výpočtu je ekvivalentní k výpočtu průměrné osvětlenosti tokovou metodou. [5]

4.1.3 Výpočet osvětlenosti

Vzorce pro výpočet světelného vektoru a osvětlenosti pro bodový zdroj už byly uvedeny v předešlých kapitolách, ale v závislosti na poloze srovnávací roviny lze tyto vzorce dále upravit. V případě, že srovnávací rovina prochází kontrolním bodem, lze rovnici pro výpočet osvětlenosti zapsat v následujícím tvaru [5]:

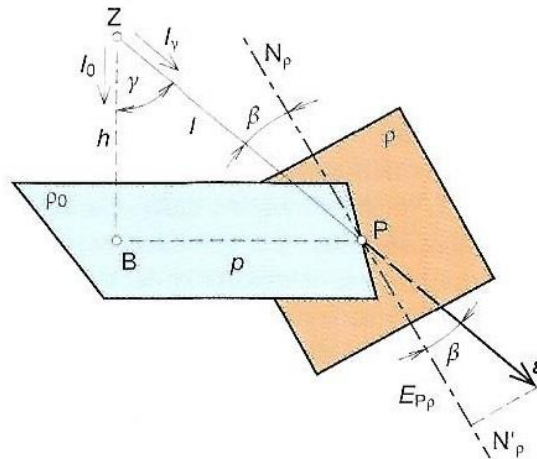
$$E = \frac{I_\gamma}{h^2 + p^2} \cos \beta$$

kde

I_γ je svítivost bodového zdroje Z v úhlu γ od zvoleného směru vztažné svítivosti I_0 z křivky svítivosti v rovině určené body Z, P, B,

h je výška svítidla nad rovinou ρ_0 (dle obrázku číslo 14) v m,

p je vzdálenost průniku kolmice spuštěné ze svítidla s rovinou ρ_0 ke kontrolnímu bodu (dle obrázku číslo 14) v m.



Obrázek 14 - Schéma pro výpočet osvětlenosti bodového zdroje s obecně natočenou rovinou [5]

V případě, že rovina ρ_0 je kolmá ke zvolenému směru vztažné svítivosti ($\beta = \gamma$), má rovnice pro osvětlenost tvar [5]:

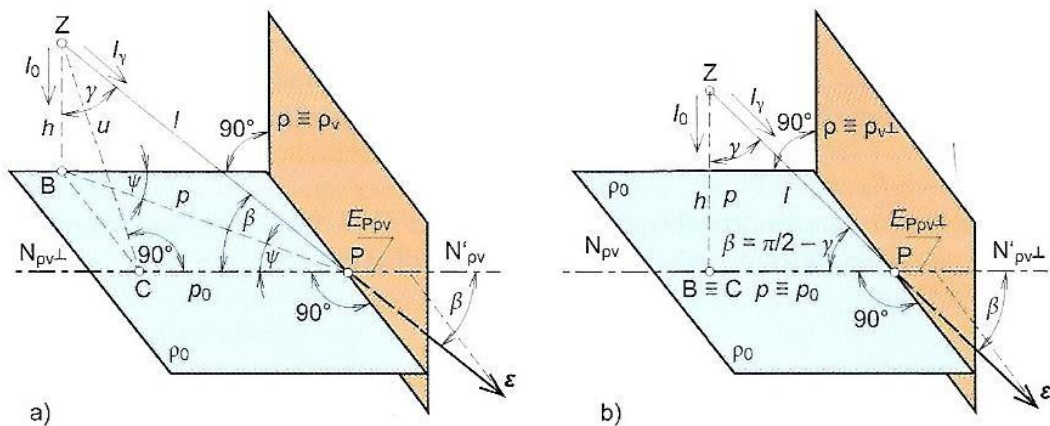
$$E = \varepsilon \cdot \cos\gamma = \frac{I_\gamma \cdot \cos^3\gamma}{h^2} = \frac{I_\gamma \cdot h}{\sqrt{h^2 + p^2}}$$

Na obrázku číslo 15 lze vidět další možnosti uspořádání polohy svítidla a roviny ρ_v . Je-li rovina ρ_v kolmá k ρ_0 , rovnice pro osvětlenost má tvar [5]:

$$E = \frac{I_\gamma \cdot \cos^3\gamma}{h^2} \cdot \sin\gamma \cdot \cos\psi$$

Obrázek 15 b odpovídá situaci, kdy je ρ_v kolmá jak k ρ_0 , tak i k rovině určené body Z, P, B. Rovnici pro osvětlenost lze psát ve tvaru [5]:

$$E = \varepsilon \cdot \sin\gamma = \frac{I_\gamma \cdot \cos^3\gamma \cdot p}{h^3} = \frac{I_\gamma \cdot p}{\sqrt{h^2 + p^2}}$$



Obrázek 15 - Schéma pro výpočet osvětlenosti bodového zdroje pro různě natočené roviny [5]

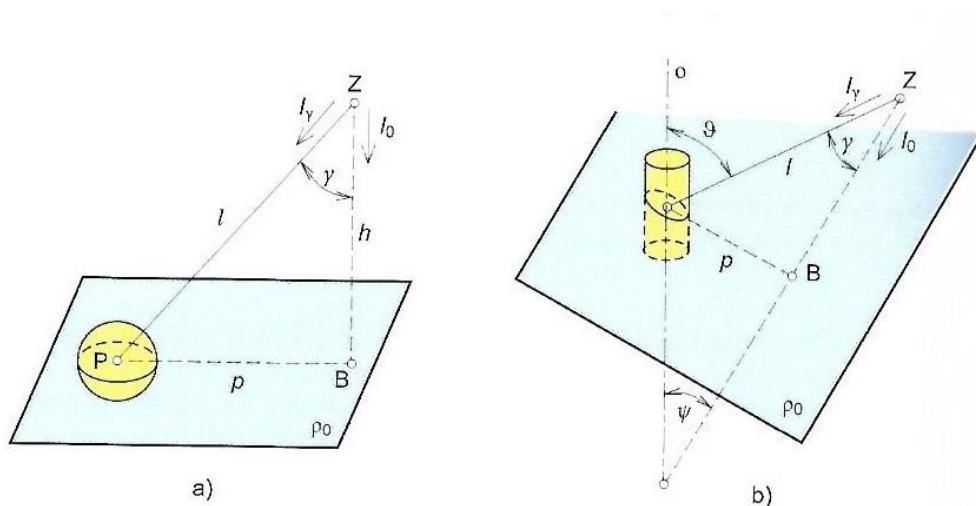
Úpravu rovnic pro výpočet osvětlenosti bodového zdroje lze uplatnit i v rovnicích pro střední kulovou a střední válcovou osvětlenost. Pro střední kulovou osvětlenost platí, že osvětlenost je rovna jedné čtvrtině normálové osvětlenosti a lze ji vyjádřit rovnicí [5]:

$$E_{4\pi} = \frac{1}{4} \cdot E_N = \frac{1}{4} \cdot \frac{I_\gamma}{l^2} = \frac{1}{4} \cdot \frac{I_\gamma}{h^2 + p^2}$$

A pro střední válcovou osvětlenost platí [5]:

$$E_z = \frac{\sin \vartheta}{\pi} \cdot \frac{I_\gamma}{l^2} = \frac{\sin(\gamma + \psi)}{\pi} \cdot \frac{I_\gamma}{h^2} \cdot \cos^2 \gamma = \frac{\sin(\gamma + \psi)}{\pi} \cdot \frac{I_\gamma}{h^2 + p^2}$$

Kde rozložení svítidla a kontrolního bodu je vidět pro střední kulovou osvětlenost na obrázku 16 a pro střední válcovou osvětlenost na obrázku 16 b. [5]



Obrázek 16 - Schéma pro výpočet střední kulové a střední válcové osvětlenosti bodového zdroje [5]

5 Požadavky na osvětlení pozemních komunikací

Požadavky na osvětlení pozemních komunikací se zabývá norma ČSN EN 13201. Pro klasifikaci světelných požadavků komunikací a za účelem snadnějšího vývoje a použití osvětlení byl vytvořen systém tříd osvětlení, které jsou charakteristické fotometrickými požadavky vyplývajícími ze zrakových požadavků na příslušných typech pozemních komunikací. Tyto požadavky se mohou měnit jak v průběhu noci, tak i s ročním obdobím. [6]

Pro výběr normální třídy osvětlení se uvažují v daném časovém úseku nejnepříznivější a maximální podmínky parametrů pozemní komunikace. Změny parametrů v průběhu roku či dne můžou mít za následek snížení třídy daného úseku na třídu odpovídající nižším požadavkům. Jako zásadní parametry jsou uváděny intenzita dopravy, skladba dopravního proudu, aktuální odrazné vlastnosti vozovky, skutečný stav povrchu vozovky a jasnost okolí. [6]

5.1 Požadavky tříd osvětlení

5.1.1 Třídy M

Třídy M (motorová doprava) se týkají pozemních komunikací pro motorovou dopravu jako jsou silnice a v případě některých zemí také místních komunikací se střední až vysokou rychlostí jízdy. Požadavky pro tuto třídu jsou průměrný jas, jednotné podmínky pro dlouhodobě suché komunikace, míra oslnění a osvětlení objektů v okolí komunikace, v některých zemích pak také rovnoměrnost jasu za stavu vlhké komunikace. [6]

Tabulka 1 - Světelné požadavky na třídy M

Třída	Jas povrchu komunikace				Oslnění	Světlo vyzařované okolím
	Za sucha			Za mokra	Za sucha	
	L (udržované minimum) [cd·m ⁻²]	U ₀ (minimum)	U ₁ (minimum)	U _{ow} (minimum)	f _{TI} (maximum) [%]	R _{EI} [minimum]
M1	2,00	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M2	1,50	0,40	0,70	0,15	10	0,35
M3	1,00	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M4	0,75	0,40	0,60	0,15	15	0,30
M5	0,50	0,35	0,40	0,15	15	0,30
M6	0,30	0,35	0,40	0,15	20	0,30

Zdroj: Dostupný na [6]

5.1.2 Třídy C

Třídy C jsou určeny pro pozemní komunikace pro motorovou dopravu v konfliktních oblastech, jako jsou parkoviště obchodních domů, křižovatky, kruhové objezdy, kde jsou standardní výpočty jasu povrchu komunikace obtížné nebo nemožné. Patří sem dále požadavky

pro chodce a cyklisty. Základem pro světelné požadavky je horizontální osvětlenost a její rovnoměrnost. Požadavky jsou vyjádřeny průměrnou osvětleností a celkovou rovnoměrností. [6]

Tabulka 2 - Požadavky na třídy C

Třída	Horizontální osvětlenost		Oslnění
	\bar{E} (minimální udržovaná) [lx]	U_0 (minimální)	f_{T1} (maximum) [%]
C0	50	0,40	15
C1	30	0,40	15
C3	20,0	0,40	15
C3	15,0	0,40	20
C4	10,0	0,40	20
C5	7,50	0,40	20

Zdroj: Dostupný na [6]

5.1.3 Třídy P a HC

Třídy P (oblast pro chodce a pomalou dopravu) a HC jsou určeny pro chodce a cyklisty pohybující se na chodnících, cyklostezkách, nouzových pružích a ostatních částech pozemních komunikací ležících odděleně či podél hlavní komunikace, včetně příjezdových cest, pro pěší zóny, parkoviště, školní kampusy a jiné. Světelná kritéria pro třídu P tvoří horizontální osvětlenost cesty a jsou vyjádřena jako střední a minimální osvětlenost. Pro třídu HC je to pak polokulová osvětlenost oblasti cesty a celková rovnoměrnost osvětlenosti. [6]

Tabulka 3 - Požadavky na třídy P

Třída	Horizontální osvětlenost		Oslnění	Dodatečné požadavky při nezbytnosti rozeznání obličeje	
	\bar{E} (minimální udržovaná) [lx]	E_{min} (udržovaná) [lx]		f_{T1} (maximum) [%]	$E_{v,min}$ (udržovaná) [lx]
P1	15,00	3,00	20	5,0	5,0
P2	10,00	2,00	25	3,0	2,0
P3	7,50	1,50	25	2,5	1,5
P4	5,00	1,00	30	1,5	1,0
P5	3,00	0,60	30	1,0	0,6
P6	2,00	0,40	35	0,6	0,2
P7	neurčeno	neurčeno	neurčeno		

Zdroj: Dostupný na [6]

Tabulka 4 - Požadavky na třídy HS

Třída	Polokulová osvětlenost	
	\bar{E}_{hs} (minimální udržovaná)	U_0 (minimální)
HS1	5,00	0,15
HS2	2,50	0,15
HS3	1,00	0,15
HS4	neurčeno	neurčeno

Zdroj: Dostupný na [6]

Zároveň norma udává doporučené hodnoty prahového přírůstku pro omezující oslnění, které lze vidět v tabulce níže.

Tabulka 5 - Požadavky na prahový přírůstek pro třídy P

Třída	f_{TI} (maximum) [%]
P1	20
P2	25
P3	25
P4	30
P5	30
P6	35
P7	neurčeno

Zdroj: Dostupný na [6]

5.1.4 Třídy SC

Třídy SC jsou dodatkové třídy pro místa v blízkosti komunikací, kde je nutné rozeznávání obličejů z důvodu zvýšené kriminality. Třída je založená na poloválcové osvětlenosti. [6]

Tabulka 6 - Požadavky na poloválcovou osvětlenost pro třídy SC

Poloválcová osvětlenost	
Třída	$E_{sc,min}$ (udržovaná) [lx]
SC1	10,00
SC2	7,50
SC3	5,00
SC4	3,00
SC5	2,00
SC6	1,50
SC7	1,00
SC8	0,75
SC9	0,50

Zdroj: Dostupný na [6]

5.1.5 Třídy EV

Třídy EV jsou dodatkové pro místa, kde je nutné řádně vidět vertikální povrchy. Příkladem jsou mýtné brány. Třídy jsou založeny na osvětlenosti vertikálních rovin. [6]

Tabulka 7 - Požadavky na osvětlenost vertikální roviny pro třídy EV

Osvětlenost vertikální roviny	
Třída	$E_{v,min}$ (udržovaná) [lx]
EV1	50
EV2	30
EV3	10,0
EV4	7,50
EV5	5,00
EV6	0,50

Zdroj: Dostupný na [6]

Každá série tříd pak obsahuje pořadí klesajících požadavků a kroky pro světelnou úroveň. V normě jsou použity specifické úrovně odpovídající udržovaným úrovním, které jsou definovány jako počáteční hladiny snížené udržovacím činitelem. [6]

Některé světelné zdroje jsou citlivé na teplotu, v normě jsou však uvedeny fotometrické požadavky pro referenční teplotu 25 stupňů Celsia, v případě jiné teploty je třeba v úvahu brát korekční koeficient. [6]

5.1.6 Požadavky na omezující oslnění

V některých případech se stanovuje mez omezujícího oslnění ze svítidla osvětlujícího pozemní komunikace, a to zejména v případech, kdy nelze spočítat prahový přírůstek

Tabulka 8 - Požadavky na omezující oslnění

Třída	Maximální svítivost ve směrech pod horizontální v cd/klm z výstupního toku svítidla			Ostatní požadavky
	70° a více	80° a více	90° a více	
G*1		200	50	/
G*2		150	30	/
G*3		100	20	/
G*4	500	100	10	svítivost nad 90° brána jako 0
G*5	350	100	10	svítivost nad 90° brána jako 0
G*6	350	100	0	svítivost nad 90° brána jako 0

Zdroj: Dostupný na [6]

Pro třídy G*4, G*5 a G*6 je nutné zkontrolovat, že svítivost je nad 95 stupňů rovna 0, není-li to patrné z konstrukce. [6]

5.1.7 Požadavky na rušivé oslnění

Tabulka níže udává třídy oslnění a jejich požadavky na omezení rušivého oslnění. Tyto třídy se používají zejména u pozemních komunikací pro chodce a cyklisty. Index oslnění se vypočítá jako [6]:

$$D = I \times A^{-0,5}$$

kde

I je maximální hodnota svítivosti (v kandelách) v jakémkoli směru svírajícím úhel 85 stupňů s vertikální rovinou,

A je průmět plochy (m²) svítících částí svítidla do roviny kolmé ke směru I. Jsou-li ve směru I přímo viditelné svítící části světelného zdroje nebo jejich zrcadlové odrazy, plocha A musí obsahovat pouze tyto části.

Tabulka 9 – Index oslnění

Třída	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6
maximum indexu oslnění	/	7000	5500	4000	2000	1000	500

Zdroj: Dostupný na [6]

5.2 Užití provozních tříd svítivosti

5.2.1 Dopravní silnice

„Na vrcholu stoupání pozemní komunikace může být nezbytné snížit oslnění svítidly za vrcholem komunikace, jelikož tato svítidla mohou být pozorována v úhlech, ve kterých mají vysokou hodnotu svítivosti, a vzdálenější svítidla se mohou jevit v pohledu nízko. V takových situacích lze použít svítidla, která splňují provozní třídy svítivosti G*4, G*5 a G*6.“ [6]

5.2.2 Osvětlování mostů

„Při osvětlování mostů lze použít podobná kritéria jako na vrcholu stoupání komunikace.“ [6] Problémy spojené s jízdou v tomto ohledu mohou představovat omezení čelního rozhledu řidiče, vytvoření matoucího popředí scény, oslnění a snížení osvětlenosti za vozidlem pro řidiče blížící se k vrcholu mostu. Dalším problémem je matoucí čelní rozhled vlivem veřejného osvětlení či světlometů vozidel a světel budov v blízkém nebo vzdáleném zorném poli. [6]

5.2.3 Pozemní komunikace v obytných oblastech

„Přímé oslnění od svítidel na vedlejších pozemních komunikacích a přidružených prostorech, chodnicích a cyklostezkách by mělo být omezováno. Svítidla s čirými vypouklými kryty nebo refraktory by měla, pro zajištění dostatečného omezení oslnění, splňovat požadavky provozní třídy svítivosti G*1 nebo vyšších tříd.“ [6]

5.2.4 Konfliktní oblasti

Konfliktní oblasti zvyšují nároky na viditelnost pro řidiče, a tak musí být oslnění kontrolováno. Norma uvádí možnost použití všech tříd v závislosti na použitých svítidlech, přičemž doporučené jsou třídy G*a, G*5, G*6. [6]

5.3 Požadavky normy na výpočet světelnětechnických veličin pro osvětlování komunikace

5.3.1 Horizontální osvětlenost

Pro výpočet horizontální osvětlenosti norma udává následující vzorec [7]:

$$E_h = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C, \gamma) \cdot f_M \cdot \cos^3 \varepsilon_k}{H_k^2}$$

kde

E_h je udržovaná horizontální osvětlenost v daném bodě,

k je index jednotlivých svítidel,

n_{LU} je počet svítidel uvažovaných při výpočtu,

$I_k(C, \gamma)$ je svítivost v jednotkách kandela pro danou C-rovinu a úhel γ ,

f_M je celkový udržovací činitel, udržovací činitel světelného zdroje a udržovací činitel jasů,

ε_k úhel dopadu světla v daném bodě,

H_k montážní výška k-tého svítidla.

Osvětlenost je počítána ve výšce odpovídající rovině vozovky.

5.3.2 Poloválcová osvětlenost

V případě poloválcové osvětlenosti je osvětlenost počítána ve výšce 1,5 m nad rovinou vozovky. Vzorec poloválcové osvětlenosti udávaný normou má následující podobu [7]:

$$E_{sc} = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C, \gamma) \cdot f_M \cdot \sin \varepsilon_k \cdot (1 + \cos \alpha_k)}{\pi \cdot d_{LkP}^2}$$

kde

E_{sc} je udržovaná poloválcová osvětlenost v daném bodě,

k je index jednotlivých svítidel,

n_{LU} je počet svítidel uvažovaných při výpočtu,

$I_k(C, \gamma)$ je svítivost v jednotkách kandela pro danou C-rovinu a úhel γ ,

f_M je celkový udržovací činitel, udržovací činitel světelného zdroje a udržovací činitel svítidla,

ε_k je úhel dopadu světla v daném bodě,

α_k je úhel mezi vertikální rovinou obsahující dráhu dopadajícího světla a vertikální rovinou pravoúhlo k plochému povrchu poloválce,

d_{LkP} je vzdálenost mezi svítidlem Lk a bodem P ležícím ve středu obdélníkové základny poloválce.

5.3.3 Prahový přírůstek

Při výpočtech křivek svítivosti jsou hodnoty omezeny požadavky normy na oslnění. Uvažován byl jak Index oslnění, jehož výpočet je uveden výše, tak i prahový přírůstek, pro něhož norma udává následující vzorec [7]:

$$f_{TI} = 65 \frac{L_v}{\bar{L}_i^{0,8}} \%$$

přičemž platí:

$$L_v = \sum_{k=1}^{n_{LU}} L_{vk}$$

$$L_{vk} = 9,86 \cdot \left[1 + \left(\frac{A_y}{66,4} \right)^4 \right] \frac{E_k}{\theta_k^2} \quad \text{pro: } 1,5^\circ < \theta_k \leq 60^\circ$$

$$L_{vk} = E_k \cdot \left(\frac{10}{\theta_k^3} + \left[\frac{5}{\theta_k^2} \right] \cdot \left[1 + \left(\frac{A_y}{62,5} \right)^4 \right] \right) \quad \text{pro: } 0,1^\circ < \theta_k \leq 1,5^\circ$$

$$\theta_k = \cos^{-1} \left(\frac{(x_{Lk} - x_{Obs}) \cdot \cos \alpha + (z_{Lk} - z_{Obs}) \cdot \sin \alpha}{\sqrt{(x_{Lk} - x_{Obs})^2 + (y_{Lk} - y_{Obs})^2 + (z_{Lk} - z_{Obs})^2}} \right)$$

kde

\bar{L}_i je průměrný počáteční jas vozovky,

L_v je ekvivalentní počáteční závojevý jas,

k je index jednotlivých svítidel,

n_{LU} je počet svítidel uvažovaných při výpočtu,

E_k je počáteční hodnota osvětlenosti vytvářená k-tým svítidlem v jeho novém stavu na rovině normálové k linii pohledu a k výšce oka pozorovatele,

θ_k je úhel mezi linií pohledu a středem k-tého svítidla udávaný ve stupních,

A_y je věk pozorovatele udávaný v letech,

x_{Lk}, y_{Lk}, z_{Lk} jsou souřadnice k-tého svítidla,

$x_{Obs}, y_{Obs}, z_{Obs}$ jsou souřadnice oka pozorovatele,

$\alpha = -1^\circ$ fixní úhel v linii pohledu pozorovatele pod horizontálou.

Průměrný počáteční jas vozovky se vypočítá z následujícího vzorce [7]:

$$\bar{L}_i = \frac{\sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C, \gamma) \cdot f_M \cdot r_k(\tan \varepsilon, \beta)}{H_k^2}}{n_{LU}}$$

kde

\bar{L}_i je udržovaný jas v kandelách na čtvereční metr,

k je index jednotlivých svítidel,

n_{LU} je počet svítidel uvažovaných při výpočtu,

$I_k(C, \gamma)$ je svítivost v jednotkách kandela pro danou C-rovinu a úhel γ ,

f_M je celkový udržovací činitel, udržovací činitel světelného zdroje a udržovací činitel svítidla,

$r_k(\tan \varepsilon, \beta)$ je koeficient jasu redukovaný pro současnou světelnou dráhu v úhlových souřadnicích udávaný ve steradiánech,

H_k je montážní výška k-tého svítidla.

Pro β pak dostáváme následující vzorec [7]:

$$\beta = \arccos\left(\frac{(x_P - x_{Oh}) \cdot (x_L - x_P) + (y_P - y_{Oh}) \cdot (y_L - y_P)}{\sqrt{(x_P - x_{Oh})^2 + (y_P - y_{Oh})^2} \cdot \sqrt{(x_L - x_P)^2 + (y_L - y_P)^2}}\right)$$

kde

x_P, y_P jsou souřadnice pozorovaného (výpočtového) bodu,

x_L, y_L jsou souřadnice svítidla,

x_{Oh}, y_{Oh} jsou souřadnice pozorovatele.

A pro $\tan \varepsilon$ platí [7]:

$$\tan \varepsilon = \frac{PT}{H} = \frac{\sqrt{(x_P - x_L)^2 + (y_P - y_L)^2}}{H}$$

kde

PT je vzdálenost mezi pozorovaným bodem a místem geometrické projekce optického středu svítidla na zem měřená po zemském povrchu,

H je montážní výška svítidla,

x_P, y_P jsou souřadnice pozorovaného (výpočtového) bodu,

x_L, y_L jsou souřadnice svítidla.

A osvětlenost E_k dostaneme ze vzorce, který odpovídá vertikální osvětlenosti. Vzorec má následující tvar [7]:

$$E_v = \sum_{k=1}^{n_{LU}} \frac{I_k(C, \gamma) \cdot f_M \cdot \sin \varepsilon_k \cdot (1 + \cos \alpha_k)}{d_{LkP}^2}$$

kde

E_v je udržovaná vertikální osvětlenost v daném bodě,

k je index jednotlivých svítidel,

n_{LU} je počet svítidel uvažovaných při výpočtu,

$I_k(C, \gamma)$ je svítivost v jednotkách kandela pro danou C-rovinu a úhel γ ,

f_M je celkový udržovací činitel, udržovací činitel světelného zdroje a udržovací činitel svítidla,

ε_k je úhel dopadajícího světla v daném bodě,

α_k je úhel mezi vertikální rovinou obsahující dráhu dopadajícího světla a vertikální rovinou pravoúhlou k výpočtové rovině,

d_{LkP} je vzdálenost mezi svítidlem Lk a středem základny obdélníku ležícím ve vertikální osvětlované rovině.

5.3.4 Pozice výpočtových bodů pro výpočet jasu

Vzdálenosti výpočtových bodů v podélném směru jsou dány následujícím vzorcem [7]:

$$D = \frac{S}{N}$$

kde

D je krok mezi výpočtovými body v podélném směru v m,

S je vzdálenost mezi svítidly ve stejné řadě v m,

N je počet bodů v podélné vzdálenosti, přičemž platí, že pro:

$$S < 30, N = 10,$$

$$S > 30 \text{ nejnižší celé číslo, které dává } D \leq 3 \text{ m.}$$

Pro vzdálenost výpočtových bodů v příčném směru platí [7]:

$$d = \frac{W_L}{3}$$

kde

d je krok mezi výpočtovými body v příčném směru,

W_L je šířka pruhu v m.

Platí, že body nejvzdálenější od středu leží ve vzdálenosti $d/2$ od okraje jízdního pruhu. Při výpočtech je pozorovatel umístěn 60 m od počátku výpočtové plochy a oko pozorovatele je uvažováno ve výšce 1,5 m. V příčném směru je pozorovatel umístěn postupně ve středu každého z jízdních pruhů. [7]

Svítidla, která se nacházejí na straně pozorovatele v maximální vzdálenosti rovné pětinásobku výšky stožáru měřené v podélném směru od výpočtového bodu a v maximální vzdálenosti rovné pětinásobku výšky stožáru ve směru příčném, se zahrnují do výpočtu. Pro svítidla na opačné straně od pozorovatele podmínka výpočtových bodů zůstává stejná v příčném směru, ale pro podélný směr se zahrnují do výpočtu všechna svítidla v maximální vzdálenosti rovné dvanáctinásobku montážní výšky svítidla. [7]

5.3.5 Pozice výpočtových bodů pro výpočet osvětlenosti

Pro vzdálenost výpočtových bodů v podélném směru pro výpočet osvětlenosti platí [7]:

$$D = \frac{S}{N}$$

kde

D je krok mezi výpočtovými body v podélném směru v m,

S je vzdálenost mezi svítidly ve stejné řadě v m,

N je počet bodů v podélné vzdálenosti, přičemž platí, že pro:

$$S < 30, N = 10,$$

$$S > 30 \text{ nejnižší celé číslo, které dává } D \leq 3 \text{ m.}$$

Pro vzdálenosti výpočtových bodů v příčném směru pak platí [7]:

$$d = \frac{W_L}{n}$$

kde

d je krok mezi výpočtovými body v příčném směru,

W_L je šířka pruhu v m,

n je počet výpočtových bodů v příčné vzdálenosti, přičemž jejich počet je větší nebo roven 3 a jedná se o nejmenší celé číslo, pro které platí $d \leq 1,5 m$.

Do výpočtu osvětlenosti jsou zahrnuta všechna svítidla, jejichž vzdálenost od výpočtového bodu je rovna maximálně pětinásobku montážní výšky svítidla.

6 Vlastní výpočet optimálních křivek svítivosti

6.1 Předpoklady optimalizace

Diplomová práce se zabývá optimalizací křivek svítivosti pro dvě třídy pozemní komunikace, a sice třídu P a třídu M, jejichž požadavky byly uvedeny v předcházejících kapitolách diplomové práce. Při optimalizaci bylo zvoleno několik základních předpokladů.

Prvním z nich je uvažování pouze přímé složky světla, jelikož i při samotném návrhu předpokládáme pouze minimální příspěvek nepřímé složky na celkové osvětlení komunikace. Druhým předpokladem je shodnost všech svítidel pro osvětlování daného úseku komunikace. Tento předpoklad vychází z neočekávání zachování některých původních svítidel v úseku komunikace, ve kterém je prováděna výměna svítidel. Jako důsledek bude zajištěna jednotnost křivek svítivosti všech nových svítidel.

Dalším předpokladem je znalost geometrie soustavy (výška stožárů i svítidla, vzdálenost stožárů od komunikace, vyložení svítidla, sklon svítidla, šířka komunikace, šířka pruhů komunikace a délka komunikace). Tento předpoklad je nezbytný pro určení optimalizovaného tvaru křivky svítivosti pro danou komunikaci. Samotný algoritmus umožňuje výpočet optimální křivky svítivosti pro komunikace různých parametrů.

Mezi předpoklady patří i symetrie kolem poloroviny C-90. Tento předpoklad je důležitý zejména z hlediska hodnocení příspěvků od jednotlivých svítidel. Osvětlenost v každém bodě komunikace, respektive výpočtového rastru sloužícího k modelování výpočtů pro celou komunikaci, je dána součtem příspěvků od jednotlivých svítidel nalézajících se v určité vzdálenosti od uvažovaného bodu, přičemž hodnotu této vzdálenosti udává norma. Příspěvky osvětlenosti jednotlivých svítidel mohou nabývat různých hodnot podle vzdálenosti svítidla od daného bodu a charakteru křivek svítivosti. Vzhledem k tomu, že při optimalizaci uvažujeme svítidla pouze v jedné řadě podél komunikace a jak už bylo zmíněno, předpokládáme shodnost svítidel ve všech stožárech, symetrie kolem osy C-90 zaručí shodný podíl svítivosti všech svítidel, která se podílejí na osvětlenosti v daném bodě.

Posledním předpokladem je nahrazení exponentu ve jmenovateli rovnice pro prahový přírůstek. Místo hodnoty 0,8 je jmenovatel umocněn na 1. Tento předpoklad byl zvolen z důvodu zjednodušení a výrazného zrychlení výpočtu hodnot svítivosti.

Pro optimalizování křivek svítivosti byla zvolena následující geometrie:

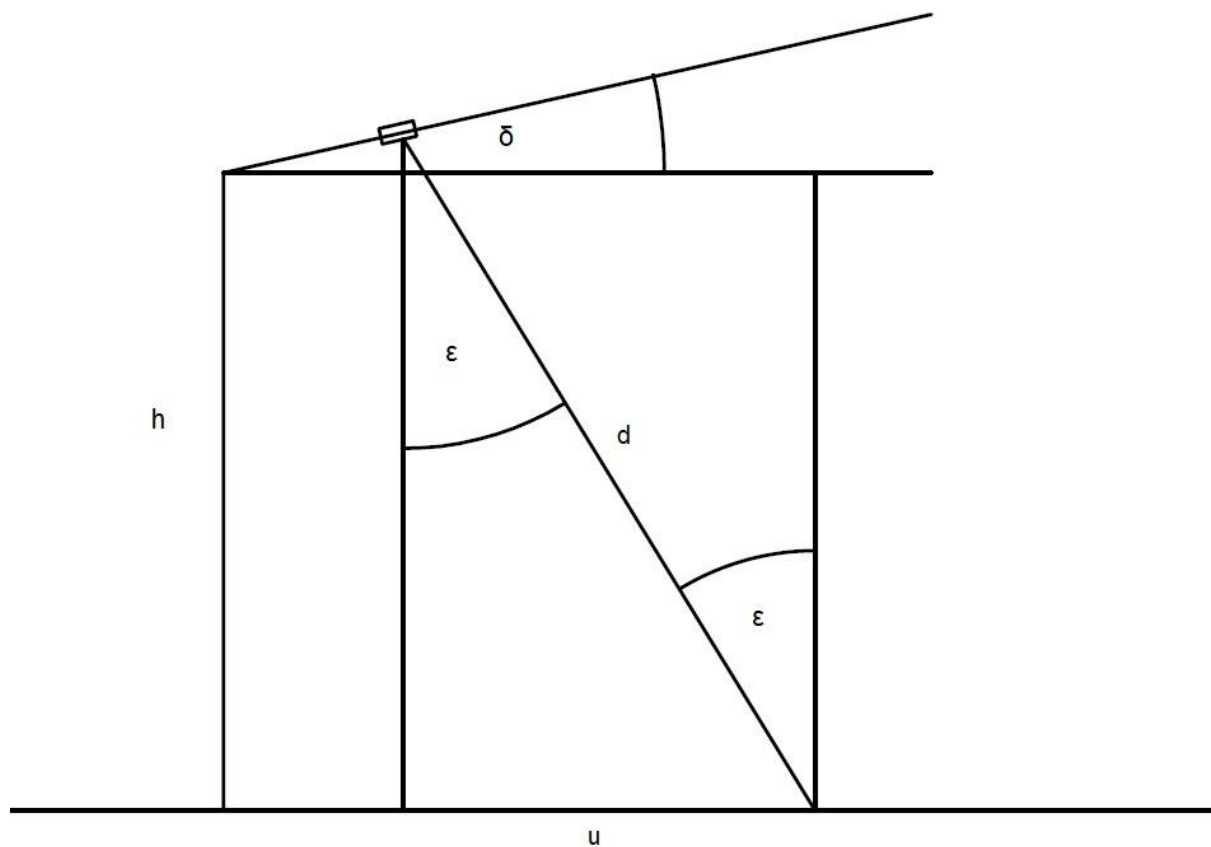
Tabulka 10 - Geometrie základní specifikace komunikace

	Třídy P	Třídy M
Rozteč stožárů	20 m	24 m
Výška stožárů i svítidla	5 m	5 m
Vzdálenost stožárů od komunikace	0,5 m	0,5 m
Vyložení svítidla	0	0
Sklon svítidla	0	0
Šířka komunikace	3 m	3 m
Počet pruhů	1	2

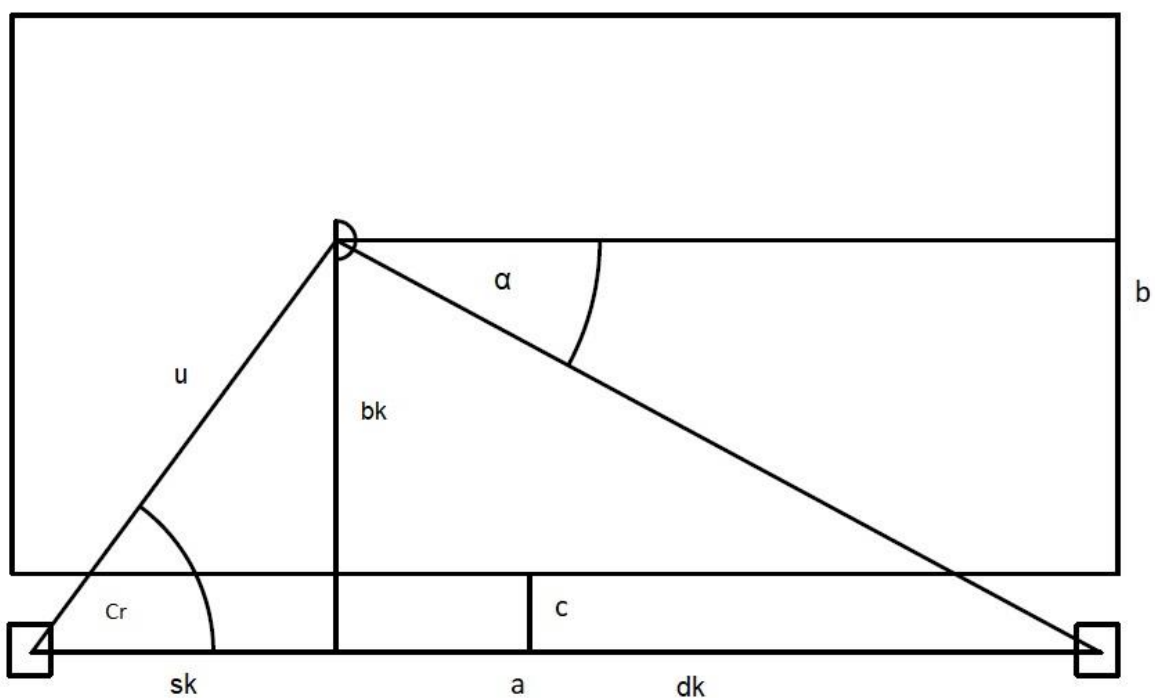
Zdroj: Vlastní

Dále pro svítidlo bude zvolena vyzářovací plocha ve tvaru válce o výšce 300 mm, průměru 100 mm s podélnou osou orientovanou kolmo vůči horizontální rovině.

Při výpočtu podoby křivky svítivosti dle požadavků normy pro třídy P byly značně rozšířeny výpočtové body, aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků, jelikož norma požaduje jak minimální hodnotu osvětlenosti, tak minimální průměrnou hodnotu osvětlenosti v rámci bodů výpočtového rastru. K optimalizaci pak lze přistoupit dvěma způsoby. Prvním z nich je splnění nutných podmínek bez ohledu na rovnoměrnost v rámci celé plochy výpočtového rastru, což vede ke špičkovým hodnotám osvětleností, respektive jasů, ve snaze o vyrovnání minimální hodnoty. Další metodou je snaha o maximální rovnoměrnost, což vede ke zbytečnosti požadavku normy na minimální osvětlenost. Jelikož výpočet hodnot pro ověření splnění požadavků normy probíhá pouze v omezeném počtu bodů stanovených normou, jak již bylo zmíněno, nabízí se možnost kombinovaného přístupu, kdy v normou požadovaných bodech rastru není kladen ohled na co nejvyšší rovnoměrnost a ve zbylých výpočtových bodech (dle zvoleného kroku) je snaha o maximální rovnoměrnost. Problémem metody je, že softwary zpracovávající křivky svítivosti obvykle nepracují s tak malým krokem, aby bylo možné postihnout možné skokové změny zapříčiněné kombinováním těchto dvou přístupů, což vede k zanedbání hodnot. I přesto byl tento postup zvolen v rámci diplomové práce. Samotný postup výpočtu spočíval v tom, že pro jednotlivé C-roviny, respektive poloroviny byla pro postupně se zvyšující úhel určena hodnota svítivosti.



Obrázek 17 - Schéma osvětlení pozemní komunikace, pohled z boku



Obrázek 18 - Schéma osvětlení pozemní komunikace, pohled shora

6.2 Optimalizace křivek svítivosti pro třídy P

6.2.1 Algoritmus výpočtu křivek svítivosti pro třídy P

1, Určení pozice bodu ve výpočtovém rastru odpovídajícím dané C-polorovině a úhlu gama s využitím funkce tangens úhlu gama, upraveného o úhel náklonu svítidla (ve zvolené konfiguraci je úhel náklonu nulový) v pravoúhlém trojúhelníku, k zjištění délky spojnice bodu a svítidla. Následné použití funkce sinus v pravoúhlém trojúhelníku k zjištění souřadnice y (počátek souřadnicového systému je uvažovaný u paty stožáru svítidla) daného bodu a následné dopočítání souřadnice x za pomoci Pythagorovy věty. Jelikož je nutná znalost pozice bodu pro daný úhel, jak pro horizontální, tak i pro poloválcovou osvětlenost, postup se opakuje i pro bod nacházející se ve výšce 1,5 m nad povrchem pro daný úhel gama.

$$u = h \cdot |\tan(\gamma + \delta)|$$

$$bk = u \cdot \sin(\alpha)$$

$$sk = \sqrt{u^2 - bk^2}$$

2, Určení vzdálenosti ve směru osy x bodu od prvního svítidla nacházejícího se vpravo od daného bodu. Jelikož rozteč mezi stožáry je konstantní, zjištění této vzdálenosti nám umožní znát vzdálenost všech ostatních svítidel napravo od daného bodu, která jsou zahrnuta do výpočtu.

$$dk = a - sk$$

3, Určení počtu svítidel zahrnutých do výpočtu. Jak již bylo popsáno v kapitolách výše, norma udává, že svítidla, která jsou vzdálena od výpočtového bodu nejvýše pětinašobek výšky stožáru, jsou zahrnuta do výpočtu. Počet svítidel napravo od výpočtového bodu pak dostaneme testováním podmínky pro součet vzdálenosti od bodu k prvnímu svítidlu zjištěné v kroku jedna a k-násobkem rozteče stožáru, kde k představuje pořadové číslo stožáru napravo od výpočtového bodu. Obdobně pro svítidla nalevo od výpočtového bodu testujeme podmínku pro součet souřadnice x výpočtového bodu zjištěné v kroku jedna a k-násobkem rozteče stožáru, kde k opět představuje pořadové číslo svítidla nalevo od výpočtového bodu. Stejný postup se aplikuje i pro zjištění počtu svítidel zahrnutých do výpočtu poloválcové osvětlenosti. Problémem tohoto kroku je, že je-li pětinašobek výšky stožáru menší než rozteč mezi stožáry a dojde k výpadku některého ze svítidel, je na částech výpočtového rastru, respektive částech komunikace, nulová hodnota osvětlenosti. Alternativou je pokrytí osvětlenosti na celém výpočtovém rastru pouze z jednoho svítidla, pak ale při funkčnosti obou svítidel dostáváme nadbytečný světelný tok na povrchu komunikace. Další alternativou je, že na osvětlenosti v příčné rovině přímo pod svítidlem se podílí dané svítidlo a po jednom svítidle z každé strany

a na osvětlenosti pro ostatní výpočtové body se podílí dvě svítidla, po jednom z každé strany. I tato metoda je ovšem problematická, protože při výpadku jednoho svítidla sice nebude osvětlenost nulová, ale pořád bude menší, než je požadováno normou.

4, Dalším krokem je výpočet úhlu epsilon za účelem výpočtu horizontální osvětlenosti pro všechna svítidla, která se podílí na osvětlenosti v daném bodě. Toho se docílí výpočtem délky spojnice mezi výpočtovým bodem a svítidly za pomoci Pythagorovy věty a následné použití goniometrické funkce v pravoúhlém trojúhelníku (konkrétně funkce arkus tangens) pro jednotlivé spojnice a montážní výšky svítidel. Obdobně zjistíme úhly epsilon od jednotlivých svítidel pro poloválcovou osvětlenost, jediným rozdílem je snížení velikosti výšky o 1,5 m, která odpovídá výšce, pro niž se poloválcová osvětlenost počítá.

$$\varepsilon = \operatorname{Tan}^{-1}\left(\frac{u}{h}\right)$$

5, Pro výpočet poloválcové osvětlenosti je zapotřebí výpočet úhlu alfa pro jednotlivá svítidla, která se podílejí na osvětlenosti v daném bodě. Dle požadavků normy uvedených v předcházející kapitole je nutná k určení úhlu alfa orientace poloválce, daná směrem pohledu pozorovatele. V našem případě byl zvolen pohled zleva doprava. Úhel alfa pro svítidla napravo od výpočtového bodu vypočteme za použití znalosti příčné vzdálenosti bodu od okraje vozovky a vzdálenosti svítidla od výpočtového bodu za použití funkce arkus sinus v pravoúhlém trojúhelníku. Pro svítidla nalevo od výpočtového bodu je postup obdobný, je však potřeba navíc vzít v úvahu natočení poloválce a úhel obdrženy z výsledku goniometrické funkce v pravoúhlém trojúhelníku odečíst od úhlu velikosti π .

$$\alpha = \operatorname{Sin}^{-1}\left(\frac{bk}{u}\right)$$

6, Pro výpočet poloválcové osvětlenosti je dále nutná znalost délky spojnice středu svítidla a výpočtového bodu pro všechna svítidla, která se podílí na osvětlenosti v daném bodě. K výpočtu opět použijeme Pythagorovu větu spolu se znalostí délky spojnice výpočtového bodu, paty stožáru daného svítidla a znalost montážní výšky svítidla sníženou o výšku 1,5 m.

$$d = \sqrt{u^2 + (h - 1.5)^2}$$

7, Dalším krokem je určení nejkrajnějšího bodu komunikace pro danou C-polorovinu. Nejprve je třeba určit, jakému úhlu odpovídá nejvzdálenější vrchol výpočtového rastru pro dané svítidlo. Maximální velikost pro poloroviny do poloroviny C-90 pak zjistíme ze znalosti C-poloroviny a délky komunikace (pro poloroviny s hodnotou menší, než která odpovídá vrcholu komunikace) nebo součtu šířky komunikace a kolmé vzdálenosti svítidla od komunikace (pro poloroviny

s hodnotou větší, než které odpovídají vrcholu komunikace, pro poloroviny od C-90 do C-180 pak platí ekvivalentní pravidlo.

$$l = \frac{a}{\cos(cr)}$$

$$l = \frac{b + c}{\sin(cr)}$$

8, Hodnoty svítivosti jsou pak omezeny oslněním, rozlišujeme rušivé a omezující oslnění.

a, Vzorec pro výpočet rušivého oslnění stejně jako parametry zvolené vyzařovací plochy byly uvedeny v předcházejících kapitolách. Výpočet je tedy velmi přímý, nicméně při naší zvolené konfiguraci komunikace bude osvětlenost pro úhel 85° nulová, bez ohledu na C-polorovinu, i navzdory tomu je výpočet rušivého oslnění v algoritmu zachován, pro případnou odlišnou konfiguraci.

b, Omezující oslnění se vyjadřuje ve formě prahového přírůstku a stejně jako v případě rušivého oslnění i pro omezující oslnění byl již vzorec uveden v předcházejících kapitolách. Pro výpočet prahového přírůstku je nutné znát počáteční průměrný jas vozovky, který lze pro třídy P dle normy vypočítat za pomoci počáteční průměrné osvětlenosti ve tvaru [7]:

$$L_i = \frac{0,2 \cdot E_i}{\pi}$$

Dále je nutné znát polohu pozorovatele, která se vypočítá ze vzorce [7]:

$$x_d = 2,75 \cdot (h - 1,5)$$

kde

h je montážní výška svítidla.

Norma pak dále udává, že na výpočtu prahového přírůstku se podílejí svítidla od začátku výpočtového rastru až do vzdálenosti 500 m od polohy pozorovatele ve směru řady svítidel. Počet svítidel je pak lehce vyjádřitelný jako největší celé číslo podílu rozdílu vzdálenosti 500 m a vzdálenosti x_d . Norma dále udává, že pokud je příspěvek svítidla na celkovém závojevém jasu menší než 2 % celkové hodnoty, toto svítidlo, stejně jako všechna vzdálenější svítidla, se již nezapočítává do výpočtu. Jelikož hledáme optimální hodnoty svítivosti, je více určující, z kolika svítidel svítivost dosáhne bodu, v němž je umístěn pozorovatel. K tomu je třeba určit vzdálenosti od výpočtového bodu (odpovídá poloze pozorovatele ve výšce 1,5 m) ke středům jednotlivých svítidel a úhel alfa. Určení vzdáleností probíhá obdobně jako v kroku 5 s tím rozdílem, že všechna svítidla jsou pouze vpravo

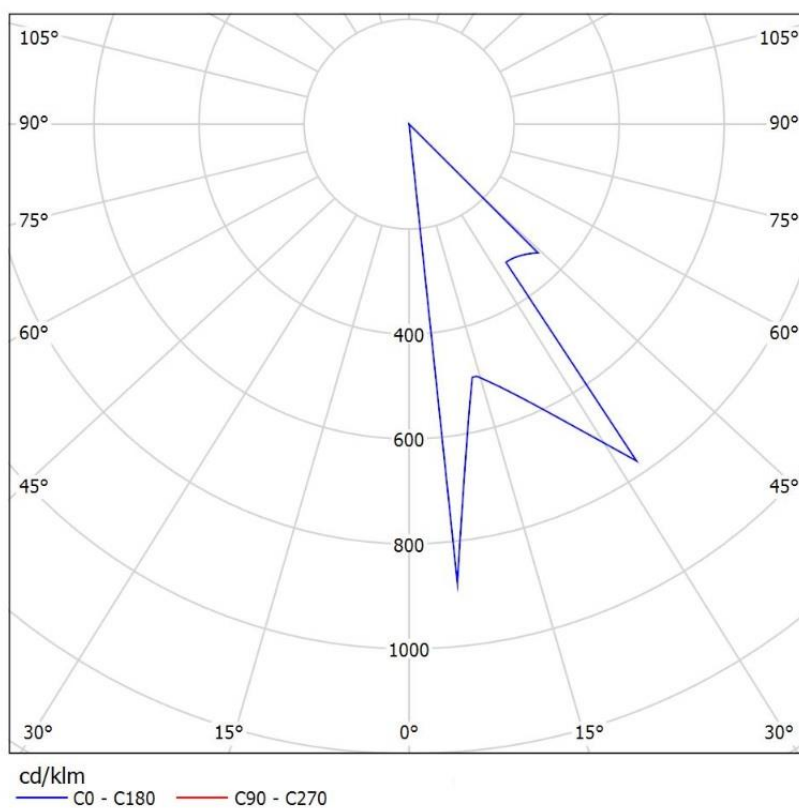
od výpočtového bodu, a jak již bylo zmíněno, výška stožárů je uvažována menší o 1,5 m. Stejně tak i výpočet úhlů alfa probíhá obdobně jako v bodě s uvažováním pouze svítidel napravo od výpočtového bodu (fakt, že se jedná o úhel alfa pro horizontální osvětlenost, nemá vliv, protože svítidla nalevo od pozorovatele neuvažujeme). Jelikož uvažujeme svítidla pouze na jedné straně komunikace, lze upravit rozdíl souřadnic x a y při výpočtu úhlu ω . Rozdíl x -ové souřadnice svítidla a pozorovatele lze pak vyjádřit jako součet vzdálenosti x_d a $(k-1)$ násobku rozteče, kde k vyjadřuje pořadové číslo svítidla měřené od pozice pozorovatele. Rozdíl souřadnic y pak upravíme na součet kolmé vzdálenosti svítidla od kraje komunikace a poloviny šířky komunikace.

9, Jelikož pracujeme zvláště po výpočtové body rastru tak, jak je stanovuje norma, je zapotřebí spočítat hodnoty úhlu ϵ pro jednotlivá svítidla k těmto bodům. Polohu výpočtových bodů určuje norma a jejich nalezení bylo popsáno v předešlé kapitole. Zjištění úhlu probíhá ze stejného vzorce jako zjišťování vzdálenosti výpočtového bodu ke svítidlu popsanému v kroku jedna, s tím rozdílem, že tuto vzdálenost jsme schopni spočítat za pomoci Pythagorovy věty z již nalezených souřadnic bodů rastru a hledáme úhel ϵ . Předpokladem k výpočtu je znalost počtu svítidel, která se podílejí na osvětlenosti. Metoda k jejich zjištění se přesně shoduje s metodou popsanou v kroku 2.

10, Posledním krokem je vytvoření samotné funkce pro křivku svítivosti. Ta je rovna nule pro všechny body ležící mimo výpočtový rastr (mimo komunikaci), kdy bod ležící v prostoru mezi svítidly a krajem komunikace určíme prostřednictvím příčné souřadnice výpočtového bodu, která je menší než kolmá vzdálenost svítidla k okraji komunikace. Body ležící mimo výpočtový rastr v ostatních místech jsou identifikovány pomocí maximálního úhlu ϵ pro danou C-polorovinu, určeného pomocí funkce arkus tangens v pravoúhlém trojúhelníku, využívajícího již dříve vypočítanou maximální délku a výšku stožáru. V ostatních místech požadujeme splnění minimální poloválcové osvětlenosti, průměrné hodnoty horizontální osvětlenosti, kterou považujeme za minimální hodnotu, jak již bylo vysvětleno v předcházející kapitole, a neposlední řadě rušivé a omezující oslnění. Je však nutné vzít v potaz, že pro daný úhel γ odpovídající okraji výpočtového rastru pro poloválcovou osvětlenost se nacházíme mimo rastr s horizontální osvětleností, tudíž pro úhly ležící v této oblasti požadujeme pouze splnění podmínky o minimální poloválcové osvětlenosti. Poslední variantou je, že úhel γ a C-polorovina odpovídají bodu výpočtového rastru (s dostatečnou přesností), tak je stanovuje norma, v tomto případě vyžadujeme splnění minimální osvětlenosti pro poloválcovou i horizontální osvětlenost, průměrnou hodnotu horizontální osvětlenosti a dodržení podmínek rušivého a omezujícího oslnění. Navíc zavádíme podmínku, že poměr nejmenší a největší horizontální osvětlenosti musí být větší než 0,4. Důvodem této hranice je zvýšení rovnoměrnosti řešení hodnot vypočítaných používaným softwarem.

6.2.2 Křivky svítivosti pro základní konfiguraci pro třídy P

Na obrázku číslo 19 lze vidět výslednou křivku svítivosti vykreslenou v softwaru Dialux. Nulová hodnota svítivosti v okolí 0, úhlu gama, odpovídá skutečnosti, že stožáry jsou vzdálené od okraje komunikace, a jelikož je uvažována svítivost pouze na silnici, dochází při těchto malých úhlech k nulové hodnotě svítivosti pro všechny C-poloroviny. Z křivky lze snadno odečíst maximální úhel gama, který je dosažen při osvětlení komunikace. Jak bylo řečeno, v krajních úhlech je uvažována pro určení svítivosti pouze poloválcová osvětlenost a nikoliv horizontální, což se projevuje zubem v polárním grafu.



Obrázek 19 - Intenzita osvětlení pro základní konfiguraci v polárních souřadnicích

V obrázcích číslo 20 a 21 jsou pak uvedeny vypočítané hodnoty minimální a průměrné horizontální osvětlenosti, prahového přírůstku a poloválcové osvětlenosti. Je patrné, že v případě poloválcové osvětlenosti nejsou splněny požadavky udávané normou. Důvodem, jak již bylo uvedeno dříve, jsou skokové změny svítivosti, které neumí software Dialux postihnout. V obrázku číslo 22 je uveden za účelem srovnání výsledek poloválcové osvětlenosti pro konfiguraci komunikace, v níž je změněna velikost vzdálenosti svítidel od okraje komunikace (konkrétně na 0,2 m). Ze srovnání obrázku pro tuto a základní konfiguraci lze vidět, že hodnota minimální poloválcové osvětlenosti se liší, což dále nasvědčuje tvrzení o nedostatečném postihnutí skokových změn svítivosti.



2.500	<u>10</u>	<u>4.78</u>	4.87	4.87	4.84	4.84	4.87	4.87	<u>4.78</u>	<u>10</u>
1.500	4.80	6.23	4.94	4.85	4.86	4.86	4.85	4.94	6.23	4.80
0.500	<u>10</u>	<u>10</u>	6.34	4.86	4.85	4.85	4.86	6.34	<u>10</u>	<u>10</u>
m	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000	11.000	13.000	15.000	17.000	19.000

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Lux.

Rastr: 10 x 3 Body

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]
6.15	4.78	10
E_{min} (poloválc.) [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
0.23	0.777	0.455

Obrázek 20 - Hodnoty osvětlenosti pro základní konfiguraci



2.500	0.37	0.19	0.23	0.32	0.40	0.42	0.40	0.29	0.20	0.34
1.500	0.18	0.25	0.29	0.42	0.54	0.60	0.52	0.36	0.31	0.17
0.500	0.38	0.58	0.53	0.62	0.82	0.88	0.70	0.59	0.59	0.37
m	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000	11.000	13.000	15.000	17.000	19.000

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Candela/m².

Rastr: 10 x 3 Body

Pozice pozorovatele: (-60.000 m, 1.500 m, 1.500 m)

Povrch: R3, q0: 0.070

L_m [cd/m ²]	U0	UI	TI [%]
0.43	0.40	0.28	11

Obrázek 21 - Hodnoty jasů a prahového přírůstku pro základní konfiguraci



2.500	9.51	<u>5.73</u>	5.87	5.86	5.90	5.90	5.86	5.87	<u>5.73</u>	9.51
1.500	5.78	7.30	5.85	5.84	5.96	5.96	5.84	5.85	7.30	5.78
0.500	<u>14</u>	12	6.68	5.87	5.85	5.85	5.87	6.68	12	<u>14</u>
m	1.000	3.000	5.000	7.000	9.000	11.000	13.000	15.000	17.000	19.000

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Lux.

Rastr: 10 x 3 Body

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]
7.19	5.73	14
E_{min} (poloválc.) [lx]	E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}
0.16	0.797	0.415

Obrázek 22 - Hodnoty osvětleností pro srovnávací konfiguraci

6.2.3 Porovnání křivek svítivosti

Pro srovnání křivek svítivosti obdržných dle uvedeného algoritmu s křivkami svítivosti běžně používaných svítidel na daném úseku komunikace bude použit návrh osvětlení pozemní komunikace pro obec Tatinná. Pro danou osvětlovací soustavu jsou uvažovány stožáry s roztečí 27 m a výškou 5 m. Stožáry jsou dále uvažovány ve vzdálenosti 0,514 m od okraje komunikace. [8] Šířka komunikace je 5 m s dvěma jízdními pruhy (pruh má šířku 2,5 m), přičemž pro naše účely budeme počítat pouze s jedním jízdním pruhem o šířce 5 m. Osvětlení tohoto úseku komunikace bylo navrženo pro třídu S5 podle způsobu označování tříd z dřívějších norem. Jelikož při návrhu, s kterým provádíme srovnání, nebyla uvažována poloválcová osvětlenost, je pro tento případ vypuštěna i z algoritmu pro zjištění optimální podoby křivek svítivosti. Zároveň byl zvýšen požadavek na rovnoměrnost horizontální osvětlenosti na 0,6. Pro tento úsek komunikace byla navržena svítidla Leader Light Street 16 W [9]. V obrázku číslo 23 a 24 jsou uvedeny hodnoty osvětlenosti a jasů pro navržená svítidla, vypočítané softwarem Dialux. V obrázcích číslo 25 a 26 jsou pak hodnoty osvětlenosti a jasů pro svítidla s křivkami svítivosti navrženými dle postupu uvedeného výše.



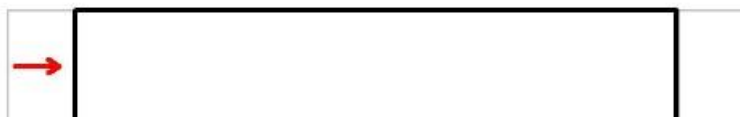
4.167	3.21	3.83	2.99	1.94	1.38	1.39	1.96	3.03	3.92	3.25
2.500	6.10	5.96	3.71	2.17	1.44	1.42	2.14	3.66	5.98	6.12
0.833	<u>7.49</u>	6.48	3.62	2.08	1.35	<u>1.33</u>	2.04	3.56	6.48	7.41
m	1.350	4.050	6.750	9.450	12.150	14.850	17.550	20.250	22.950	25.650

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Lux.

Rastr: 10 x 3 Body

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]
3.58	1.33	7.49
E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}	
0.373	0.178	

Obrázek 23 - Osvětlenost komunikace, pro verzi Leader Light



4.167	0.10	0.14	0.13	0.11	0.11	0.13	0.17	0.19	0.16	0.11
2.500	0.21	0.21	0.19	0.16	0.16	0.20	0.26	0.33	0.32	0.22
0.833	0.32	0.31	0.30	0.30	0.32	0.41	0.52	0.53	0.50	0.33
m	1.350	4.050	6.750	9.450	12.150	14.850	17.550	20.250	22.950	25.650

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Candela/m².

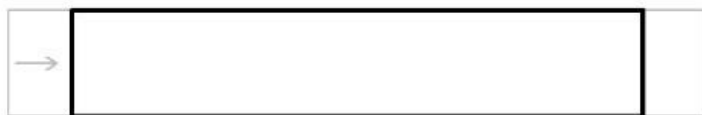
Rastr: 10 x 3 Body

Pozice pozorovatele: (-60.000 m, 2.500 m, 1.500 m)

Povrch: R3, q0: 0.070

L_m [cd/m ²]	U0	UI	TI [%]
0.25	0.42	0.47	14

Obrázek 24 - Jas komunikace, pro verzi Leader Light



4.167	<u>4.11</u>	2.94	3.35	2.97	2.99	2.99	2.97	3.35	2.94	<u>4.11</u>
2.500	3.04	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.04
0.833	3.22	2.95	2.89	<u>2.69</u>	2.84	2.84	<u>2.69</u>	2.89	2.95	3.22
m	1.350	4.050	6.750	9.450	12.150	14.850	17.550	20.250	22.950	25.650

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Lux.

Rastr: 10 x 3 Body

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]
3.07	2.69	4.11
E_{min} / E_m	E_{min} / E_{max}	
0.878	0.655	

Obrázek 25 - Osvětlenost komunikace, verze podle návrhové metody



4.167	0.13	0.11	0.16	0.19	0.23	0.27	0.24	0.21	0.12	0.12
2.500	0.11	0.12	0.18	0.26	0.34	0.40	0.35	0.26	0.15	0.10
0.833	0.13	0.17	0.30	0.51	0.69	0.82	0.60	0.39	0.20	0.11
m	1.350	4.050	6.750	9.450	12.150	14.850	17.550	20.250	22.950	25.650

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Candela/m².

Rastr: 10 x 3 Body

Pozice pozorovatele: (-60.000 m, 2.500 m, 1.500 m)

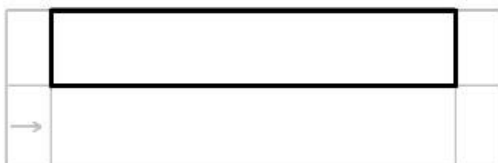
Povrch: R3, q0: 0.070

L_m [cd/m ²]	U0	UI	TI [%]
0.27	0.38	0.25	24

Obrázek 26 - Jas komunikace, verze podle návrhové metody

Jak lze vidět, svítidlo navržené dle postupu uvedeného v diplomové práci dosahuje nižší absolutní hodnoty, zároveň je celková rovnoměrnost výrazně vyšší než pro srovnávané svítidlo. Což potvrzuje limitující omezení normy, kdy ne pro všechny světelné třídy jsou stanoveny nároky na rovnoměrnost osvětlení. Zároveň díky faktu, že se měří osvětlenost pouze v relativně malém počtu bodů, může dojít k výrazné nerovnoměrnosti mimo normou stanovené ověřované body. Srovnání hodnot prahového přírůstku nemá význam, protože u navrhované komunikace se počítá se dvěma pruhy, zatímco my uvažujeme pouze jeden.

Další důležité srovnání spočívá v množství světelného toku směřujícího mimo komunikaci. V obrázcích číslo 27 a 28 jsou uvedeny osvětlenosti na opačné straně, než jsou svítidla, za komunikací. Jak lze vidět, pro navržená svítidla pro danou komunikaci osvětlenost výrazně poklesla, ale pořád se hodnoty pohybují okolo 1 luxu. V případě svítidla dle uvedeného algoritmu je vidět, že hodnota osvětlenosti výrazně poklesla, stejně jako v předcházejícím případě. V tomto případě však je hodnota osvětlenosti nulová, což znamená absenci zbytečného světelného toku vyzařovaného do okolí. V případě komunikace uvnitř obce to vede k zamezení častému problému, kdy jsou veřejným osvětlením osvětlovány fasády domů přilehlých komunikací.



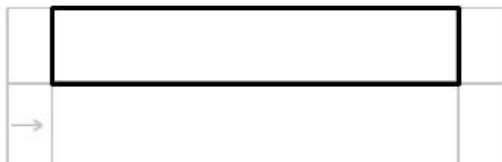
4.375	<u>0.43</u>	0.59	0.69	0.74	0.73	0.74	0.77	0.73	0.62	0.44
3.125	0.60	0.83	0.93	0.94	0.87	0.88	0.98	0.98	0.87	0.62
1.875	0.87	1.20	1.31	1.20	1.03	1.04	1.23	1.37	1.26	0.91
0.625	1.36	1.85	1.84	1.47	1.19	1.20	1.51	<u>1.92</u>	<u>1.92</u>	1.42
m	1.350	4.050	6.750	9.450	12.150	14.850	17.550	20.250	22.950	25.650

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Lux.

Rastr: 10 x 4 Body

E_m [lx]	E_{min} [lx]	E_{max} [lx]
1.05	0.43	1.92
E_{min} / E_m		E_{min} / E_{max}
0.406		0.222

Obrázek 27 - Osvětlenost mimo komunikace, pro verzi Leader Light



4.375	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>
3.125	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>
1.875	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>
0.625	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>
m	1.350	4.050	6.750	9.450	12.150	14.850	17.550	20.250	22.950	25.650

Pozor: Souradnice se vztahují na výše uvedený graf. Hodnoty v Lux.

Rastr: 10 x 4 Body

$$E_m \text{ [lx]}$$

$$0.00$$

$$E_{min} \text{ [lx]}$$

$$0.00$$

$$E_{max} \text{ [lx]}$$

$$0.00$$

$$E_{min} / E_m$$

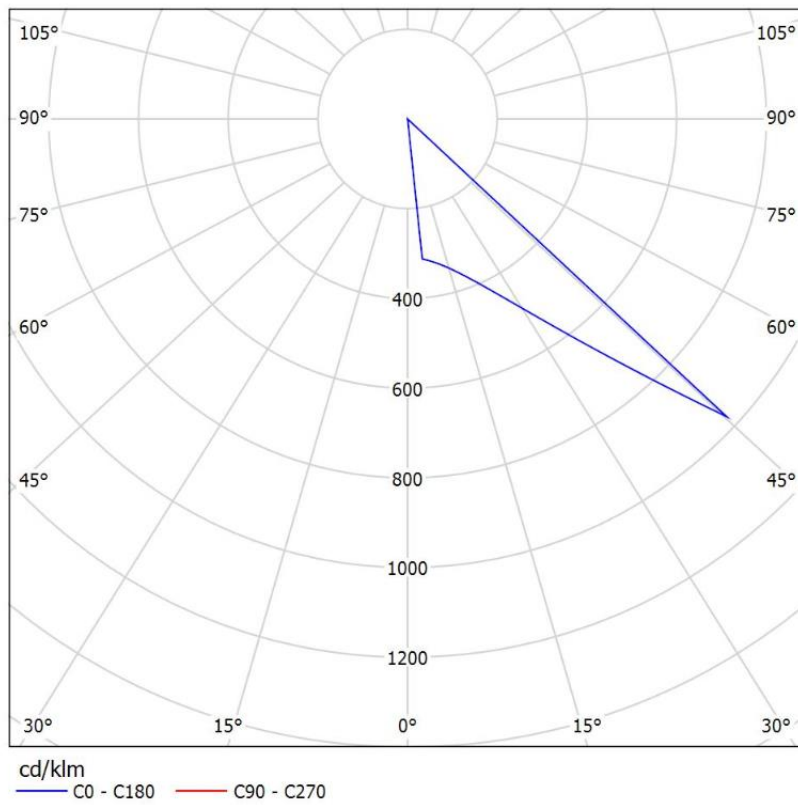
$$0.000$$

$$E_{min} / E_{max}$$

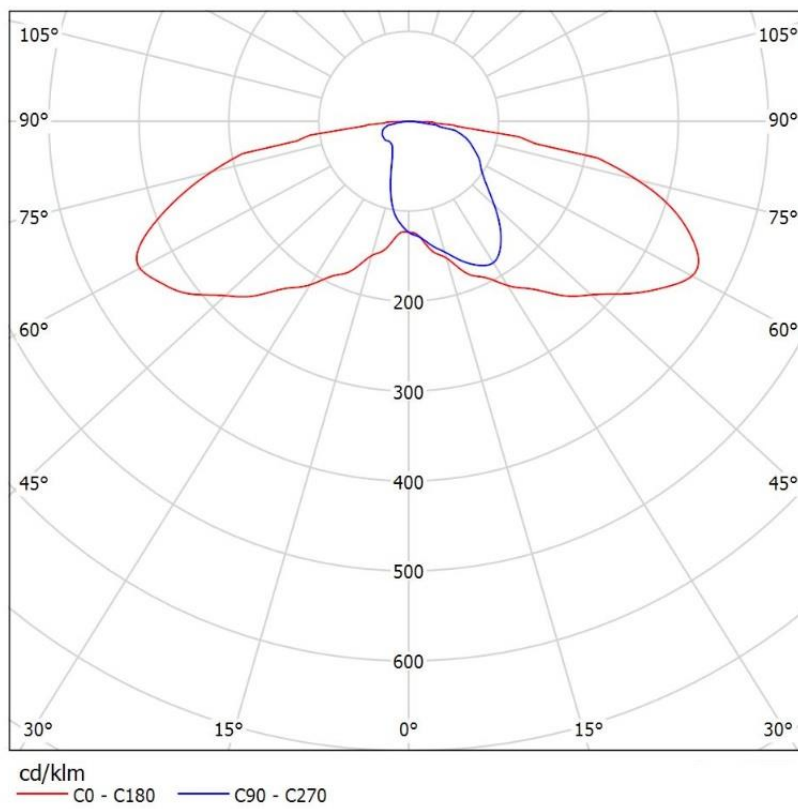
$$0.000$$

Obrázek 28 - Osvětlenost mimo komunikaci, verze podle návrhové metody

V obrázcích číslo 29 a 30 jsou hodnoty svítivosti v polárních souřadnicích pro verzi podle návrhové metody a skutečné parametry svítidla Leader Light. C-roviny verze Leader Light jsou natočeny o 90 stupňů, oproti podobě udávané výrobcem, z důvodu zachování shodnosti se systémem zvoleným pro algoritmus v diplomové práci. Verze Leader Light se vyznačuje rovnoměrnějšími hodnotami svítivosti, což se ale negativně projevuje na rovnoměrnosti osvětlenosti, jak bylo uvedeno dříve. Zároveň to vede k produkci zbytečného světelného toku.



Obrázek 29 - Hodnoty svítivosti pro verzi podle návrhové metody v polárních souřadnicích



Obrázek 30 - Hodnoty svítivosti pro verzi Leader Light v polárních souřadnicích

6.3 Optimalizace křivek svítivosti pro třídy M

6.3.1 Algoritmus výpočtu křivek svítivosti pro třídy M

1, Určení počtu a polohy výpočtových bodů rastru. Rozdílem oproti výpočtu pro třídy P je zahrnutí více pruhů, což zvětší počet výpočtových bodů pro komunikace jako celek. Jelikož pro třídy M je nutné počítat i s osvětleností okolí, bude nutné vypočítat polohu a počet výpočtových bodů pro plochy přiléhající ke komunikaci na obou stranách. Pro určení polohy těchto bodů zvolíme stejnou metodiku, kterou norma udává pro určení výpočtových bodů za účelem zjištění hodnoty osvětlenosti.

2, Určení počtu svítidel, která se podílejí na osvětlení ve výpočtových bodech rastru a ve výpočtových bodech přiléhajících komunikaci. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, požadavky na svítidla započítaná do výpočtu jasu se liší od požadavků na svítidla pro výpočet osvětlenosti. Zde jsou uvažovány pouze vzdálenosti v podélném směru svítidel a ve směru kolmém na řadu svítidel. Oproti osvětlenosti je rozdíl v nesymetrii, kdy uvažujeme svítidla ve vzdálenosti 5 m od výpočtového bodu směrem k pozorovateli, ale 12 m ve směru opačném, přičemž je nutné tuto skutečnost zahrnout do výpočtu.

3, Výpočet úhlu epsilon odpovídajícího každému ze svítidel, která se podílejí na osvětlení v daném bodě, pro všechny body rastru. Úhel epsilon určíme za pomoci funkce arkus tangens v pravoúhlém trojúhelníku, kdy argumentem je podíl vzdálenosti patice stožáru a daného bodu získaného za použití Pythagorovy věty pro souřadnice daného bodu a montážní výšky svítidla. Obdobně postupujeme při určení velikosti úhlu epsilon pro výpočtové body v oblastech přiléhajících komunikaci.

4, Výpočet úhlu beta, který dostaneme z rovnice uvedené v části pro výpočet jasu komunikace. Pozorovatel je umístěn ve vzdálenosti 60 m od počátku výpočtového rastru v každém z jízdních pruhů, jak udává norma. Hodnoty úhlu beta se počítají pro všechna svítidla, která se podílejí na osvětlenosti v daném bodě. Počty svítidel byly zjištěny v kroku 2.

5, Hodnoty úhlu beta a tangens úhlu epsilon se použijí k určení redukovaného součinitele jasu. Jelikož neznáme hodnoty redukovaného součinitele jasu pro danou komunikaci, použijeme jako vzor tabulky obecné. Jejich příklad je možné vidět v příloze. Postupnou interpolací pro hodnoty úhlu beta a epsilon pro všechny výpočtové body a jim náležící svítidla dostaneme požadované hodnoty redukovaného součinitele jasu, které dále použijeme při výpočtu jasu.

6, Hodnoty svítivosti jsou, stejně jako v případě tříd P, omezeny rušivým a omezujícím oslněním.

a, Jak již bylo řečeno, rušivé osvětlení se vztahuje na úhly epsilon větší nebo rovné 85 stupňům, kterých v naší zvolené základní konfiguraci nebude dosaženo. I ve výpočtu křivek svítivosti byl však výpočet rušivého oslnění zanechán pro případné jiné konfigurace vozovky, na niž by se již vztahoval.

b, Pro účely omezující oslnění je opět nutné spočítat vertikální osvětlenost v místě pozorovatele ve výšce oka. I zde je pozorovatel umístěn ve vzdálenosti x_d od počátku výpočtového rastru, nezávisle na poloze pozorovatele pro určení hodnot jasu. Podmínkou je výpočet úhlu alfa, který dostaneme jako arkus sinus podílu kolmé vzdálenosti bodu od linie stožárů a součtu k-násobku rozteče stožáru a vzdálenosti x_d , kde k je pořadové číslo stožáru od počátku výpočtového rastru směrem od pozorovatele. Dále je nutné spočítat vzdálenost středu svítidla od místa pozorovatele ve výšce 1,5 m. I zde je postup shodný s postupem pro třídy P, a sice užití Pythagorovy věty pro vzdálenost od svítidla k místu pozorovatele v rovině rovnoběžné s komunikací a montážní výšky svítidla snížené o 1,5 m. Na rozdíl od tříd P se zde nepoužije k výpočtu počátečního průměrného jasu průměrná osvětlenost, ale přímo počáteční průměrný jas. I zde platí podmínka o započítání svítidel až do vzdálenosti 500 m od počáteční polohy pozorovatele (pro naši konfiguraci se započítává pouze první svítidlo) a v případě, že je příspěvek svítidla na celkovém závojevém jasu menší než 2 % z celkové hodnoty, toto svítidlo, stejně jako všechna vzdálenější svítidla, se již nezapočítává do výpočtu.

7, Dalším krokem je výpočet maximální vzdálenosti k okraji výpočtové plochy. Na rozdíl od tříd P zde musíme uvažovat i osvětlování ploch přiléhajících ke komunikaci v obou směrech. Opět byl proveden výpočet maximální vzdálenosti pro plochu výpočtového rastru, kterou dostaneme jako podíl rozteče stožárů a kosinu úhlu C-poloroviny, respektive podíl součtu šířky komunikace a kolmé vzdálenosti svítidla od okraje komunikace a sinu úhlu C-poloroviny. Zvlášť je proveden výpočet maximální vzdálenosti pro plochy přiléhající ke komunikaci v obou směrech. Pro plochu na opačné straně vozovky, než jsou svítidla, odpovídá maximální vzdálenost maximální vzdálenosti výpočtového rastru, s tím rozdílem, že uvažujeme součet šířky komunikace a kolmé vzdálenosti svítidla od okraje vozovky, a navíc šířku jednoho jízdního pruhu. Pro plochu na stejné straně komunikace, na jaké se nalézají svítidla, nahrazujeme součet šířky komunikace a kolmé vzdálenosti svítidla od okraje komunikace rozdílem šířky pruhu a kolmé vzdálenosti svítidla od okraje komunikace.

8, Dalším krokem je výpočet hodnot svítivosti pro výpočtový rastr. K tomu je zapotřebí sestavit soustavu rovnic, která zahrnuje všechny podmínky dané normou. Patří sem rovnice pro průměrný jas komunikace, rovnice pro podélnou rovnoměrnost komunikace, rovnice pro prahový přírůstek, která, jak již bylo řečeno, zastupuje omezující oslnění, rovnice pro činitel osvětlení okolí, ke kterému je potřebný výpočet horizontální osvětlenosti, jejíž vzorec je uveden

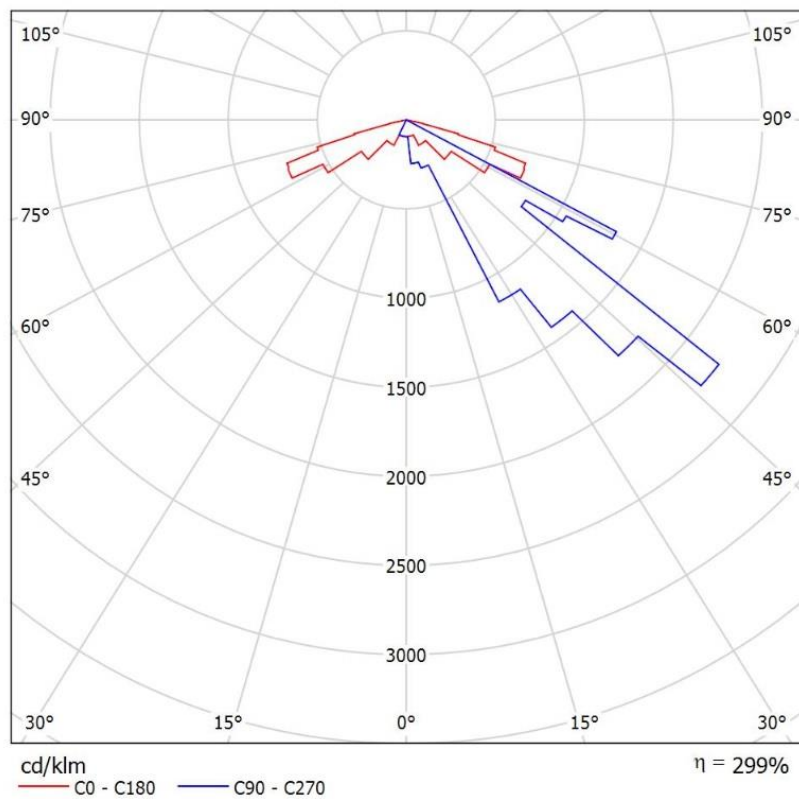
v dřívější kapitole, kdy použijeme montážní výšku svítidel a úhel epsilon vypočítaný v kroku 3. Dále pak rovnice pro celkovou rovnoměrnost a rušivé oslnění. Navíc jsou přidány dvě rovnice, jedna stanovuje nezápornost svítivosti, ke snazšímu nalezení výsledku, a rovnice vyjadřující symetrii svítivosti kolem úhlu π půl, zvolená jako počáteční předpoklad.

9, Posledním krokem je vytvoření křivek svítivosti prostřednictvím funkce. Postupně měníme úhel γ a C-poloroviny s tím, že pro C-poloroviny do 180 stupňů (včetně) je hodnota funkce nula, je-li velikost úhlu epsilon větší než úhel získaný funkcí arkus tangens pro podíl největší délky pro plochu přiléhající komunikace na opačné straně, než jsou svítidla, a montážní výšky svítidel. Pro úhel epsilon menší než výše popsany úhel, ale zároveň větší než úhel obdrženy jako arkus tangens podílu největší délky pro plochu výpočtového rastru a montážní výšky svítidel, je funkce rovna řešení rovnice pro osvětlení okolí komunikace. V situaci, kdy je kolmá vzdálenost výpočtového bodu a linií, v nichž se nacházejí svítidla, menší než kolmá vzdálenost této linie a okraje komunikace, je funkce rovna řešení rovnice pro osvětlení okolí komunikace, pro stranu, na níž se nacházejí svítidla. V případě zbylých hodnot úhlu epsilon je hodnota funkce rovna řešení rovnice z kroku 8. Pro C-poloroviny nad 180 stupňů platí, že pokud je úhel epsilon větší než úhel daný jako arkus tangens podílu největší vzdálenost pro plochu přiléhající komunikaci na stejné straně jako svítidla a montážní výšky svítidel, je funkce rovna nule. V ostatních případech je funkce rovna řešení rovnice pro osvětlení okolí komunikace, pro stranu, na níž se nacházejí svítidla.

6.3.2 Křivky svítivosti pro základní konfiguraci pro třídy M

Všechny požadavky na osvětlení komunikace dané normou pro třídy M vyžadují pouze relativní hodnoty vzhledem k hodnotám v ostatních bodech rastru. Kompletní polární graf křivek svítivosti lze pak obdržet ze svítivosti ve výpočtových bodech rastru různými způsoby. Jedním z nich je interpolace ze známých bodů rastru, problémem této metody je velmi omezená znalost hodnot, z kterých lze interpolovat (dány počtem bodů výpočtového rastru). Důsledkem jsou značně odlišné očekávané hodnoty svítivosti. Druhou metodou, která byla zároveň aplikována v této diplomové práci, je použití hodnot svítivosti výpočtového bodu nacházejícího se nejbližší zkoumanému bodu. V obrázku číslo 31 jsou uvedeny křivky svítivosti vztahující se na třídy M pro základní konfiguraci. Stejně jako v předchozím případě, i tato metoda produkuje neoptimální výsledky a graf v podobě schodů, kterých si lze všimnout na obrázku. Je zřejmé, že svítidla používaná v praxi mají výrazněji hladší podobu. Absolutní velikosti hodnot svítivosti jsou závislé na použitých hodnotách redukovaného součinitele jasu. Pro naši základní konfiguraci byla použita tabulka hodnot pro silnice CI odpovídající světlým povrchům a vedoucím k hodnotám svítivosti, které lze vidět na obrázku číslo 31. Při odlišném povrchu je

zapotřebí použít jiné hodnoty redukovaného součinitele jasu, nejlépe přímo zjištěného pro danou komunikaci.



Obrázek 31 - Hodnoty svítivosti pro základní konfiguraci v polárních souřadnicích (třídy M)

Způsobem, jak v obou metodách určování křivek svítivosti zvýšit přesnost, je zvýšením počtu výpočtových bodů. Důsledkem může ovšem být zhoršení výsledků v bodech výpočtového rastru, tak jak ho stanovuje norma. Dalším problémem tohoto řešení je výrazné navýšení výpočtového času, až k hodnotám, zcela nevhodným k praktickému použití.

7 Závěr

V diplomové práci byly popsány požadavky norem na osvětlení pozemních komunikací a vzorce k výpočtu světelnotechnických veličin, vyžadovaných těmito normami. Pro dvě skupiny tříd – P a M – byl navržen algoritmus k zjištění křivek svítivosti, které splňují požadavky norem a zároveň minimalizují světelný tok, tak aby se omezilo světelné znečištění. Samotný kód, naprogramovaný v softwaru Wolfram Mathematica, umožňující zjištění optimálních křivek svítivosti pro různé konfigurace komunikace, je uveden v příloze. Při realizaci algoritmu vyplynula některá omezení výpočtu křivek svítivosti, která vedla k zavedení zjednodušujících předpokladů s ohledem na požadavky na rychlost výpočtu. Výstupem je tabulka v Excelu, obsahující C-poloroviny, úhly gama dle kroku zvoleného v programu a jim odpovídající hodnoty svítivosti. Tabulka může být převedena vhodným editorem (například QLumEdit) na eulumdata k dalšímu zpracování v softwarech pro návrh osvětlení.

Dále bylo provedeno srovnání svítidla s křivkami svítivosti navrženými dle algoritmu v diplomové práci se svítidly navrženými pro osvětlení pozemní komunikace v obci Tatinná. Výsledky ukázaly, že hlavní výhodou optimalizovaných křivek svítivosti není dosahování rovnoměrných hodnot v rámci výpočtového rastru, ale zejména redukce zbytečného světla, což vede ke snížení vyzařovaného světelného toku a úsporám energie skrze volbu světelných zdrojů s nižším příkonem.

Ze zjištěných křivek svítivosti v polárních souřadnicích lze vidět, že rovnoměrnost hodnot osvětlenosti v jednotlivých bodech výpočtového rastru má za následek špičky hodnot svítivosti. Typické tvary křivek svítivosti pro svítidla používaná k osvětlení venkovní komunikace mají spíše rovnoměrnější charakter. Hledání svítidla s podobnými křivkami svítivosti se jeví jako poměrně složitý úkol, kde shoda výsledného svítidla se svítidlem s křivkami svítivosti navrženými podle metody uvedené v diplomové práci by nebyla příliš velká. Řešením je individuální výroba optických soustav pro potřeby dané komunikace. Za současného stavu je nevýhodou této metody její ekonomická neefektivita.

Výsledky optimalizovaných hodnot křivek svítivosti pro třídy M poukázaly na nedostatky metody, kdy bez znalosti hodnot funkce redukovaného součinitele jasu pro danou komunikaci nejsme schopni potvrdit výsledky ve standardních softwarech určených k návrhu osvětlení. Vzhledem k tomu, že v optimalizační úloze jsme se zabývali hledáním co nejpřesnějších výsledků, při potenciálním užití v praxi by vyplynula nutnost znát přesné hodnoty redukovaného součinitele jasu, aby svítidlo s navrženými křivkami svítivosti splňovalo podmínky norem.

Další možností, jak na diplomovou práci navázat, je doplnění výpočtu křivek svítivosti o všechny třídy stanovené normou pro venkovní komunikace a vytvoření aplikace sloužící ke generování eulumdat pro uživatelem stanovenou třídu a konfiguraci venkovní komunikace.

8 Seznam použité literatury

- [1] TESAŘ, Jiří. Veřejné osvětlení a jeho současný stav v České republice. *Deník veřejné správy* [online]. Praha, 2010 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.dvs.cz/clanek.asp?id=6437936>
- [2] ŠAFAŘÍK, Miroslav, Theodor TERRICH, Vítězslav MALÝ, Michal ČEJKA, Petr DANIŠ, Štěpánka ROSOVÁ, Lukáš PUČELÍK a Andrea MALÁ. Jak na chytré veřejné osvětlení: Příručka pro města a obce. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha 4, 2017 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne_znecistení/\\$FILE/OFDN_prirucka_obce_20180205.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/svetelne_znecistení/$FILE/OFDN_prirucka_obce_20180205.pdf)
- [3] LONGCORE, Travis a Catherine RICH. Ecological Light Pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment* [online]. 2004, 2(4), 191- [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.2307/3868314. ISSN 15409295. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.2307/3868314>
- [4] NAVARA, Kristen J. a Randy J. NELSON. The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of Pineal Research* [online]. 2007, 43(3), 215-224 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1111/j.1600-079X.2007.00473.x. ISSN 0742-3098. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-079X.2007.00473.x>
- [5] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-808-6534-213.
- [6] ČSN EN 13201-2: *Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky*. 2016.
- [7] ČSN EN 13201-3: *Osvětlení pozemních komunikací - Část 3: Výpočet*. 2016.
- [8] Pasportizace veřejného osvětlení v obci Bitozeves - Tatinná: TECHNICKÁ ZPRÁVA. *OFICIÁLNÍ STRÁNKY OBCE BITOZEVES: NEHASICE - TATINNÁ - VIDOVLE* [online]. Bitozeves, 2015, 1/2015 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: http://www.bitozeves.cz/e_download.php?file=data/uredni_deska/obsah478_18.pdf&original=D1.4-01+-+Technick%C3%A1+zpr%C3%A1va.pdf
- [9] Photometrics IES files. *LEADER LIGHT* [online]. Spisska Nova Ves, 2013, 24.10.2013 [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.leaderlight.eu/?l=support&support=ies>

9 Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 - Klasifikace rušivého světla pro venkovní prostředí.....	10
Obrázek 2 - Znázornění prostorového úhlu.....	13
Obrázek 3 - Varianty uspořádání svazků polorovin.....	15
Obrázek 4 - Goniofotometr s pevným zdrojem a otočným fotometrem.....	16
Obrázek 5 - Goniofotometr s pevným zdrojem i fotometrem a otočnou zrcadlovou soustavou .	17
Obrázek 6 - Znázornění osvětlenosti.....	18
Obrázek 7 - Znázornění jasů	19
Obrázek 8 - Znázornění světelného vektoru.....	21
Obrázek 9 - Znázornění střední kulové osvětlenosti	21
Obrázek 10 - Znázornění střední válcové osvětlenosti.....	22
Obrázek 11 - Znázornění střední polokulové osvětlenosti	23
Obrázek 12 - Znázornění střední poloválkové osvětlenosti.....	23
Obrázek 13 - Závislost činitele využití na poměru b/h.....	25
Obrázek 14 - Schéma pro výpočet osvětlenosti bodového zdroje s obecně natočenou rovinou .	26
Obrázek 15 - Schéma pro výpočet osvětlenosti bodového zdroje pro různě natočené roviny	27
Obrázek 16 - Schéma pro výpočet střední kulové a střední válcové osvětlenosti bodového zdroje	27
Obrázek 17 - Schéma osvětlení pozemní komunikace, pohled z boku	42
Obrázek 18 - Schéma osvětlení pozemní komunikace, pohled seshora	42
Obrázek 19 - Intenzita osvětlení pro základní konfiguraci v polárních souřadnicích	47
Obrázek 20 - Hodnoty osvětleností pro základní konfiguraci.....	48
Obrázek 21 - Hodnoty jasů a prahového přírůstku pro základní konfiguraci.....	48
Obrázek 22 - Hodnoty osvětleností pro srovnávací konfiguraci	49
Obrázek 23 - Osvětlenost komunikace, pro verzi Leader Light.....	50
Obrázek 24 - Jas komunikace, pro verzi Leader Light.....	50
Obrázek 25 - Osvětlenost komunikace, verze podle návrhové metody.....	51
Obrázek 26 - Jas komunikace, verze podle návrhové metody	51
Obrázek 27 - Osvětlenost mimo komunikace, pro verzi Leader Light	52
Obrázek 28 - Osvětlenost mimo komunikaci, verze podle návrhové metody.....	53
Obrázek 29 - Hodnoty svítivosti pro verzi podle návrhové metody v polárních souřadnicích ...	54
Obrázek 30 - Hodnoty svítivosti pro verzi Leader Light v polárních souřadnicích	54
Obrázek 31 - Hodnoty svítivosti pro základní konfiguraci v polárních souřadnicích (třídy M) .	58

10 Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 - Světelné požadavky na třídy M	28
Tabulka 2 - Požadavky na třídy C.....	29
Tabulka 3 - Požadavky na třídy P	29
Tabulka 4 - Požadavky na třídy HS	30
Tabulka 5 - Požadavky na prahový přírůstek pro třídy P.....	30
Tabulka 6 - Požadavky na poloválcovou osvětlenost pro třídy SC.....	31
Tabulka 7 - Požadavky na osvětlenost vertikální roviny pro třídy EV	31
Tabulka 8 - Požadavky na omezující oslnění.....	32
Tabulka 9 – Index oslnění.....	32
Tabulka 10 - Geometrie základní specifikace komunikace.....	41

11 Seznam použitých zkratek

- \bar{L} průměrný jas povrchu cesty, jas povrchu cesty zprůměrovaný na celou vozovku
- U_1 podélná rovnoměrnost, nejmenší z podílů vyhodnocených pro každý jízdní pruh vozovky, definovaných jako podíl nejmenšího k největšímu jasu povrchu cesty nalezený ve středové linii podél jízdního pruhu
- f_{TI} prahový přírůstek, procentuální nárůst kontrastu objektu, který je potřeba k udržení se na hranici viditelnosti v přítomnosti oslnění generovaného osvětlením komunikace
- R_{EI} činitel osvětlenosti okolí EIR, podíl průměrné horizontální osvětlenosti pruhu těsně mimo hranici vozovky ku průměrné horizontální osvětlenosti pruhu uvnitř vozovky, kdy pruh má šířku jednoho jízdního pásu vozovky
- \bar{E} průměrná osvětlenost, horizontální osvětlenost zprůměrovaná na oblast cesty
- E_{min} minimální osvětlenost, nejmenší osvětlenost oblasti cesty
- E_{hs} polokulová osvětlenost, světelný tok dopadající na malou polokouli s vodorovnou základnou dělený plochou povrchu polokoule
- \bar{E}_{hs} průměrná polokulová osvětlenost, polokulová osvětlenost zprůměrovaná na oblast cesty
- U_0 celková rovnoměrnost, podíl minimální a průměrné hodnoty
- E_{sc} poloválcová osvětlenost, celkový světelný tok dopadající na zakřivený povrch velmi malého poloválce dělený velikostí zakřivené plochy tohoto poloválce
- $E_{sc,min}$ minimální poloválcová osvětlenost, minimální poloválcová osvětlenost na rovině specifické výšky nad oblastí pozemní komunikace
- E_v osvětlenost vertikální roviny, osvětlenost bodu na vertikální rovině
- $E_{v,min}$ minimální osvětlenost vertikální roviny, minimální osvětlenost vertikální roviny na rovině specifické výšky nad oblastí pozemní komunikace

12 Seznam příloh

Příloha číslo 1: Kód výpočtu křivek svítivosti pro komunikace třídy P

Příloha číslo 2: Kód výpočtu křivek svítivosti pro komunikace třídy M

Příloha číslo 3: Hodnoty funkce $r_{\text{tab}}(\beta, \text{tg}\gamma)$ pro povrchy komunikací třídy CI

Přílohy

Příloha číslo 1: Kód výpočtu křivek svítivosti pro komunikace třídy P

```

<< JLink`;
InstallJava[];
ReinstallJava[JVMArguments -> "-Xmx2048m"];

SetDirectory[NotebookDirectory[]];

delkavozovky = 1000;

a = 20.;
b = 3;
c = 0.2;
Eh = 5.;
Esc = 1.;
Emin = 1;
h = 5.;
delta = 0;
fm = 0.6;
tokuprava = 2.22;
presnost = 0.2;
bc = b + c;
cr =  $\frac{Cplane * Pi}{180}$ ;
deltar =  $\frac{delta * Pi}{180}$ ;
epsilon = deltar + gama;
bodydelka = Piecewise[{{10, a <= 30}}, Ceiling[ $\frac{a}{3}$ ]];
bodysirka = Piecewise[{{3, Ceiling[ $\frac{b}{1.5}$ ] <= 3}}, Ceiling[ $\frac{b}{1.5}$ ]];
Droz =  $\frac{a}{bodydelka}$ ;
d =  $\frac{b}{bodysirka}$ ;
souradnicex = Table[x, {x, Droz / 2., bodydelka * Droz, Droz}];
souradnicey = Table[y + c, {y, d / 2., bodysirka * d, d}];
souradnice = Tuples[{{souradnicex, souradnicey}}];
urastrfunkce[{x_, y_}] :=  $\sqrt{x^2 + y^2}$ ;
epsilonfunkce[x_, y_] := ArcTan[ $\frac{x}{y}$ ];

```



```

u = h * Abs[Tan[epsilon]];
upol = (h - 1.5) * Abs[Tan[epsilon]];
bodkolmice = Piecewise[{{u * Sin[cr], cr <= Pi/2}}, u * Sin[Pi - cr]];
bodkolmicepol = Piecewise[{{upol * Sin[cr], cr <= Pi/2}}, upol * Sin[Pi - cr]];
svetlokolmice = Sqrt[u^2 - bodkolmice^2];
svetlokolmicepol = Sqrt[upol^2 - bodkolmicepol^2];
druhesvetlokolmice = a - svetlokolmice;
druhesvetlokolmicepol = a - svetlokolmicepol;
spojniceverfukce[x_, y_, z_] :=
  Table[x - y * souradnice[[i, z]], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
bodkolmicerastrhor = spojniceverfukce[0, -1, 2];
druhesvetlokolmicerastrhor = spojniceverfukce[a, 1, 1];
svetlokolmicerastrhor = spojniceverfukce[0, -1, 1];
crrastr = Table[ArcTan[bodkolmicerastrhor[[i]]/svetlokolmicerastrhor[[i]]], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
epsilonastr = epsilonfukce[urastrfukce/@souradnice, h];
urastrpol = Table[Tan[epsilonastr[[i]]] * (h - 1.5), {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
bodkolmicerastrpol =
  Table[Sin[crrastr[[i]]] * urastrpol[[i]], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
svetlokolmicerastrpol =
  Table[Sqrt[urastrpol[[i]]^2 - bodkolmicerastrpol[[i]]^2], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
druhesvetlokolmicerastrpol =
  Table[a - svetlokolmicerastrpol[[i]], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
alfa = Piecewise[{{Pi/2, svetlokolmicepol == 0}}, ArcTan[bodkolmicepol/svetlokolmicepol]];
dLKP = (h - 1.5) / Cos[epsilon];
nvpravo = If[gama >= 0, Count[Table[Sqrt[(Sqrt[bodkolmice^2 + (druhesvetlokolmice + i * a)^2] + h)^2],
  {i, 0, Floor[delkavozovky/a], 1}], (x_ /; x < 5 * h) && (druhesvetlokolmice > 0)]];

```

```

nvlevo = If[gama ≥ 0, Count[Table[ $\sqrt{\left(\sqrt{\text{bodkolmice}^2 + (\text{svetlokolmice} + i * a)^2}\right)^2 + h^2}$ ,
    {i, 1, Floor[ $\frac{\text{delkavozovky}}{a}$ ], 1}], (x_ /; x < 5 * h)]];
nvpravopol = If[gama ≥ 0,
    Count[Table[ $\sqrt{\left(\sqrt{\text{bodkolmicepol}^2 + (\text{druhesvetlokolmicepol} + i * a)^2}\right)^2 + (h - 1.5)^2}$ ,
    {i, 0, Floor[ $\frac{\text{delkavozovky}}{a}$ ], 1}], (x_ /; x < 5 * h) && (druhesvetlokolmicepol > 0)]];
nvlevopol = If[gama ≥ 0,
    Count[Table[ $\sqrt{\left(\sqrt{\text{bodkolmicepol}^2 + (\text{svetlokolmicepol} + i * a)^2}\right)^2 + (h - 1.5)^2}$ ,
    {i, 1, Floor[ $\frac{\text{delkavozovky}}{a}$ ], 1}], (x_ /; x < 5 * h)]];
nvpravotabhor = Table[
     $\sqrt{\left(\sqrt{\text{bodkolmicerastrhor}[[i]]^2 + (\text{druhesvetlokolmicerastrhor}[[i]] + j * a)^2}\right)^2 + h^2}$ ,
    {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}, {j, 0, Floor[ $\frac{\text{delkavozovky}}{a}$ ], 1}];
nvpravorastrhor =
    Table[Count[nvpravotabhor[[i, All]], x_ /; x < 5 * h], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
nvlevotabhor =
    Table[ $\sqrt{\left(\sqrt{\text{bodkolmicerastrhor}[[i]]^2 + (\text{svetlokolmicerastrhor}[[i]] + j * a)^2}\right)^2 + h^2}$ ,
    {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}, {j, 0, Floor[ $\frac{\text{delkavozovky}}{a}$ ], 1}];
nvlevorastrhor =
    Table[Count[nvlevotabhor[[i, All]], x_ /; x < 5 * h], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
nvpravotabpol =
    Table[ $\sqrt{\left(\left(\sqrt{\text{bodkolmicerastrpol}[[i]]^2 + (\text{druhesvetlokolmicerastrpol}[[i]] + j * a)^2}\right)^2 + (h - 1.5)^2\right)}$ , {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}, {j, 0, Floor[ $\frac{\text{delkavozovky}}{a}$ ], 1}];
nvpravorastrpol =
    Table[Count[nvpravotabpol[[i, All]], x_ /; x < 5 * h], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

```

```

nvlevotabpol = Table[

$$\sqrt{\left(\sqrt{\text{bodkolmicerastrpol}[[i]]^2 + (\text{svetlokolmicerastrpol}[[i]] + j * a)^2}\right)^2 + (h - 1.5)^2},$$

{i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}, {j, 0, Floor[ $\frac{\text{delkavozovky}}{a}$ ], 1}];

nvlevorastrpol =
Table[Count[nvlevotabpol[[i, All]], x_ /; x < 5 * h], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

ubodyfunkce[x_, y_, z_, v_, w_] := Table[ $\sqrt{x^2 + (y + u * z)^2}$ , {u, v, w, 1}];

uvpravo = If[gama ≥ 0, ubodyfunkce[bodkolmice, druhesvetlokolmice, a, 0, nvpravo - 1]];
uvlevo = If[gama ≥ 0, ubodyfunkce[bodkolmice, svetlokolmice, a, 1, nvlevo]];

uvpravorastrhor =
Table[ubodyfunkce[bodkolmicerastrhor[[i]], druhesvetlokolmicerastrhor[[i]],
a, 0, nvpravorastrhor[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

uvlevorastrhor =
Table[ubodyfunkce[bodkolmicerastrhor[[i]], svetlokolmicerastrhor[[i]],
a, 0, nvlevorastrhor[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

uvpravostrpol =
Table[ubodyfunkce[bodkolmicerastrpol[[i]], druhesvetlokolmicerastrpol[[i]],
a, 0, nvpravostrpol[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

uvlevostrpol =
Table[ubodyfunkce[bodkolmicerastrpol[[i]], svetlokolmicerastrpol[[i]],
a, 0, nvlevostrpol[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

uvpravopol =
If[gama ≥ 0, ubodyfunkce[bodkolmicepol, druhesvetlokolmicepol, a, 0, nvpravopol - 1]];
uvlevopol = If[gama ≥ 0, ubodyfunkce[bodkolmicepol, svetlokolmicepol, a, 1, nvlevopol]];

epsilonimat = If[gama ≥ 0, epsilonfunkce[Join[Flatten[uvpravo], Flatten[uvlevo]], h]];

epsilonimatrastrhor =
epsilonfunkce[Table[Join[uvpravorastrhor[[i]], uvlevorastrhor[[i]],
{i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}], h]];

epsilonimatrastrpol =
epsilonfunkce[Table[Join[uvpravostrpol[[i]], uvlevostrpol[[i]],
{i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}], h - 1.5]];

epsilonimatpol =
If[gama ≥ 0, epsilonfunkce[Join[Flatten[uvpravopol], Flatten[uvlevopol]], h - 1.5]];

hvyzplochy = 0.3;
dvyzplochy = 0.1;


$$A = \frac{\text{Pi} * \text{dvyzplochy}^2}{4.} * \text{Cos}\left[\frac{85. * \text{Pi}}{180.}\right] + \text{hvyzplochy} * \text{dvyzplochy} * \text{Cos}\left[\frac{85. * \text{Pi}}{180.}\right];$$


```

```

Ay = 23;
xd = 2.75 * Abs[h - 1.5];

nlu = Count[Table[ $\sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{b}{2} + c\right)^2 + (xd + i * a)^2}\right)^2 + (h - 1.5)^2}$ ,
  {i, 0, Floor[ $\frac{500. - xd}{a}$ ], 1}], (x_ /; x < 5 * h)];

alfafunkce[x_, y_, z_, u_] := x - y * ArcSin[ $\frac{z}{u}$ ];

dLkPfunkce[x_, y_] :=  $\sqrt{x^2 + y^2}$ ;

alfamatprava = If[gama ≥ 0, alfafunkce[0, -1, bodkolmicepol, uvpravopol]];
alfamatleva = If[gama ≥ 0, alfafunkce[Pi, 1, bodkolmicepol, uvlevopol]];
alfamat = If[gama ≥ 0, Join[Flatten[alfamatprava], Flatten[alfamatleva]]];

alfarastrprava =
  Table[alfafunkce[0, -1, bodkolmicerastrpol[[i]], uvpravorastrpol[[i]],
    {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

alfarastrleva = Table[alfafunkce[Pi, 1, bodkolmicerastrpol[[i]], uvlevorastrpol[[i]],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

alfarastr = Table[
  Join[alfarastrprava[[i]], alfastrleva[[i]], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

dLkPmat =
  If[gama ≥ 0, dLkPfunkce[Join[Flatten[uvpravopol], Flatten[uvlevopol]], h - 1.5]];

dLkPrastr = Table[dLkPfunkce[Join[uvpravorastrpol[[i]], uvlevorastrpol[[i]], h - 1.5],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

ufTI = ubodyfunkce[c + 1.5, xd, a, 0, nlu - 1];
epsilonfTI = epsilonfunkce[ufTI, h - 1.5];
Quiet[alfafTI = alfafunkce[0, -1, c + 1.5, ufTI]];
Quiet[dfTI = dLkPfunkce[ufTI, h - 1.5]];

hranicniuhe11 = ArcTan[ $\frac{bc}{a}$ ];
hranicniuhe12 = Pi - hranicniuhe11;
uhe1 = -8.86;

```

```

l = Piecewise[{{ {  $\frac{a}{\cos[cr]}$ ,  $0 \leq cr \leq \text{hranicniuhel1}$  }},
  {  $\frac{bc}{\sin[cr]}$ ,  $\text{hranicniuhel1} < cr \leq \frac{\text{Pi}}{2}$  }, {  $\frac{bc}{\sin[\text{Pi} - cr]}$ ,  $\frac{\text{Pi}}{2} < cr \leq \text{hranicniuhel2}$  },
  {  $\frac{a}{\cos[\text{Pi} - cr]}$ ,  $\text{hranicniuhel2} < cr \leq \text{Pi}$  }}, 0];

epsilonpol = ArcTan[  $\frac{1}{h - 1.5}$  ];

identifikacnirovnice = Table[Eh  $\leq \frac{\text{InezfTI}_i * fm * \cos[\text{epsilonfTI}[[i]]]^3}{h^2}$ , {i, 1, nlu, 1}];

nezapornarovnice = Table[Inezi  $\geq 0$ , {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

rovnomernosthor = 0.9 > Min[
  Table[  $\sum_{k=1}^{\text{nvpravorasthor}[[m]] + \text{nvlevorasthor}[[m]]} \frac{\text{Inez}_m * fm * \cos[\text{epsilonmatrastrhor}[[m, k]]]^3}{h^2}$ ,
    {m, 1, bodydelka * bodysirka, 1}]] / Max[
  Table[  $\sum_{k=1}^{\text{nvpravorasthor}[[m]] + \text{nvlevorasthor}[[m]]} \frac{\text{Inez}_m * fm * \cos[\text{epsilonmatrastrhor}[[m, k]]]^3}{h^2}$ ,
    {m, 1, bodydelka * bodysirka, 1}]]  $\geq 0.4$ ;

rovnosti =
  Flatten[Table[If[i == j, Unevaluated@Sequence[], If[Sort[epsilonmatrastrhor[[i]]] ==
    Sort[epsilonmatrastrhor[[j]]], Inezi == Inezj, Unevaluated@Sequence[]]],
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / 2, 1}, {j, 1, bodydelka * bodysirka, 1}]];

GI = Inez * A-0.5  $\leq 500$ ;

GIrastr = If[MemberQ[epsilonrastr,  $85 * \frac{\text{Pi}}{180}$ ] == True,
  {InezPosition[epsilonrastr,  $85 * \frac{\text{Pi}}{180}$ ] * A-0.5  $\leq 500$ }, {}];

Quiet[fTI =  $\sum_{p=1}^{nlu}$  Piecewise[
  {  $\left\{ 9.86 * \left( 1 + \left( \frac{Ay}{66.4} \right)^4 \right) * \frac{\text{InezfTI}_p * fm * \sin[\text{epsilonfTI}[[p]] * (1 + \cos[\text{alfafTI}[[p]])]}{\text{dfTI}[[p]]^2} \right\}$ ,
  {  $\left( \text{ArcCos} \left[ \frac{((p-1) * a + xd) * \cos[\frac{\text{uhel} - \text{Pi}}{180}] + (h - 1.5) * \sin[\frac{\text{uhel} - \text{Pi}}{180}]}{\sqrt{((p-1) * a + xd)^2 + (c * \frac{b}{2})^2 + (h - 1.5)^2}} \right] * \frac{180}{\text{Pi}} \right)^2$  }

```

$$\begin{aligned}
 & 1.5 \cdot \frac{\text{Pi}}{180} < \text{ArcCos} \left[\frac{((p-1) \cdot a + xd) \cdot \text{Cos} \left[\frac{u_{hel} \cdot \text{Pi}}{180} \right] + (h-1.5) \cdot \text{Sin} \left[\frac{u_{hel} \cdot \text{Pi}}{180} \right]}{\sqrt{((p-1) \cdot a + xd)^2 + \left(c + \frac{b}{2}\right)^2 + (h-1.5)^2}} \right] \leq \\
 & 60 \cdot \frac{\text{Pi}}{180} \left. \left\{ \left(\frac{\text{InezfTI}_p \cdot \text{fm} \cdot \text{Sin}[\text{epsilonfTI}[[p]]] \cdot (1 + \text{Cos}[\text{alfafTI}[[p]])]}{\text{dfTI}[[p]]^2} \right) \cdot \right. \right. \\
 & \left. \left(\frac{10}{\left(\text{ArcCos} \left[\frac{((p-1) \cdot a + xd) \cdot \text{Cos} \left[\frac{u_{hel} \cdot \text{Pi}}{180} \right] + (h-1.5) \cdot \text{Sin} \left[\frac{-\text{Pi}}{180} \right]}{\sqrt{((p-1) \cdot a + xd)^2 + \left(c + \frac{b}{2}\right)^2 + (h-1.5)^2}} \right]} \right) \cdot \frac{180}{\text{Pi}} \right)^3 + \right. \\
 & \left. \left. \frac{5}{\left(\text{ArcCos} \left[\frac{((p-1) \cdot a + xd) \cdot \text{Cos} \left[\frac{u_{hel} \cdot \text{Pi}}{180} \right] + (h-1.5) \cdot \text{Sin} \left[\frac{u_{hel} \cdot \text{Pi}}{180} \right]}{\sqrt{((p-1) \cdot a + xd)^2 + \left(c + \frac{b}{2}\right)^2 + (h-1.5)^2}} \right]} \right) \cdot \frac{180}{\text{Pi}}} \right)^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\text{Ay}}{62.5} \right)^4 \right) \right. \\
 & \left. \left. 0.1 \cdot \frac{\text{Pi}}{180} < \text{ArcCos} \left[\frac{((p-1) \cdot a + xd) \cdot \text{Cos} \left[\frac{u_{hel} \cdot \text{Pi}}{180} \right] + (h-1.5) \cdot \text{Sin} \left[\frac{u_{hel} \cdot \text{Pi}}{180} \right]}{\sqrt{((p-1) \cdot a + xd)^2 + \left(c + \frac{b}{2}\right)^2 + (h-1.5)^2}} \right] \leq \right. \right. \\
 & \left. \left. 1.5 \cdot \frac{\text{Pi}}{180} \right\} \right\} / \\
 & \left(\frac{0.2}{\text{Pi}} \cdot \left(\left(\sum_{n=1}^{\text{bodydelka} \cdot \text{bodysirka}} \left(\sum_{k=1}^{\text{nvpravorastrhor}[[m]] - \text{nvlevorastrhor}[[m]]} \right. \right. \right. \\
 & \left. \left. \left. \frac{\text{Inez}_m \cdot 0.9 \cdot \text{Cos}[\text{epsilonmatrastrhor}[[m, k]]]^3}{h^2} \right) \right) \right) / \\
 & \left. \left. \left. (\text{bodydelka} \cdot \text{bodysirka}) \right) \right)^2 \leq 30 \right];
 \end{aligned}$$

```

osvetlenostplochyhor = If[gama ≥ 0,
Piecewise[{{Eh ≤  $\sum_{k=1}^{nvpravo} \frac{Inez * fm * Cos[epsilon[mat][[k]]^3}{h^2}$ ,  $\sqrt{u^2 + h^2} > 5 * h$ }},
Eh ≤  $\left( \sum_{k=1}^{nvpravo + nvlevo} \frac{Inez * fm * Cos[epsilon[mat][[k]]^3}{h^2} \right) + \frac{Inez * fm * Cos[epsilon]^3}{h^2}$ ]];

osvetlenostplochypol = If[gama ≥ 0, Piecewise[{{Esc ≤  $\sum_{k=1}^{Count(uvpravopol, x_ / ; x > 0)}$ 
 $\frac{Inez * fm * Abs[Sin[epsilon[matpol][[k]]] * (1 + Cos[alfamat][[k]])]}{Pi * dLkPmat[[k]]^2}$ ,
 $\sqrt{upol^2 + (h - 1.5)^2} > 5 * h$ }}, Esc ≤
 $\left( \sum_{k=1}^{nvpravopol + nvlevopol} \frac{Inez * fm * Abs[Sin[epsilon[matpol][[k]]] * (1 + Cos[alfamat][[k]])]}{Pi * dLkPmat[[k]]^2} \right) + \frac{Inez * fm * Abs[Sin[epsilon]] * (1 + Cos[alfa])}{Pi * dLkP^2}$ ]];

minosvetlenost = If[gama ≥ 0,
Piecewise[{{Emin ≤  $\sum_{k=1}^{nvpravo} \frac{Inez * fm * Cos[epsilon[mat][[k]]^3}{h^2}$ ,  $\sqrt{u^2 + h^2} > 5 * h$ }},
Emin ≤  $\left( \sum_{k=1}^{nvpravo + nvlevo} \frac{Inez * fm * Cos[epsilon[mat][[k]]^3}{h^2} \right) + \frac{Inez * fm * Cos[epsilon]^3}{h^2}$ ]];

prumosvetlenost =
 $Eh ≤ \frac{\sum_{m=1}^{bodydelka * bodysirka} \left( \sum_{k=1}^{nvpravorastrhor[[m]] + nvlevorastrhor[[m]]} \frac{Inez_m * fm * Cos[epsilon[matrastrhor][[m, k]]^3}{h^2} \right)}{bodydelka * bodysirka} ≤$ 
1.5 * Eh;

minosvetlenosthor = Table[
Emin ≤  $\sum_{k=1}^{nvpravorastrhor[[m]] + nvlevorastrhor[[m]]} \frac{Inez_m * fm * Cos[epsilon[matrastrhor][[m, k]]^3}{h^2}$ ,
{m, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

minosvetlenostpol = Table[Esc ≤  $\sum_{k=1}^{nvpravorastrpol[[m]] + nvlevorastrpol[[m]]}$ 
 $\frac{Inez_m * fm * Sin[epsilon[matrastrpol][[m, k]]] * (1 + Cos[alfarastr[[m, k]])]}{Pi * dLkPrastr[[m, k]]^2}$ ,
{m, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

rovniceastr = Join[minosvetlenosthor, {prumosvetlenost}, minosvetlenostpol, {fTI},
identifikacnirovnice, nezapornarovnice, {rovnornosthor}, rovnosti, GIrastr];

```

```

resenirastr = FindInstance[rovniceastr,
  Join[Table[Inezm, {m, 1, bodydelka * bodysirka, 1}], Table[InezfTIm, {m, 1, nlu, 1}]]];
fTIzbytek = Min[Table[InezfTIi - bodydelka * bodysirka /. (resenirastr[[1, i]]),
  {i, bodydelka * bodysirka + 1, bodydelka * bodysirka + nlu, 1}]];
vysledkyrastr = Table[{svetlokolmicerastrhor[[i]], bodkolmicerastrhor[[i]],
  Inezi /. (resenirastr[[1, i]])}, {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
fTIzbytekrovnice = If[gama ≥ 0, Inez ≤ fTIzbytek];
rovnicezbytek = If[gama ≥ 0,
  Piecewise[{{(osvetlenostplochypol, osvetlenostplochyhor, GI), epsilon == 85 *  $\frac{\text{Pi}}$  / 180}},
  {osvetlenostplochypol, osvetlenostplochyhor, fTIzbytekrovnice}]];
resenipol = If[gama ≥ 0, Inez /. FindInstance[osvetlenostplochypol, Inez, Reals]];
resenizbytek = If[gama ≥ 0, Inez /. FindInstance[rovnicezbytek, Inez, Reals]];
fce = If[gama ≥ 0,
  Piecewise[{{{0}, (epsilonpol < epsilon) || (bodkolmice < c) || (Cplane > 180)},
  {resenipol, ArcTan[ $\frac{1}{h}$ ] < epsilon ≤ epsilonpol},
  {(vysledkyrastr[[Position[vysledkyrastr, {x-, y-, z-} /. (Abs[x - svetlokolmice] ≤
    presnost) && (Abs[y - bodkolmice] ≤ presnost)]][[1, 1]], 3]}],
  (MemberQ[vysledkyrastr, {x-, y-, z-} /. (Abs[x - svetlokolmice] ≤ presnost) &&
    (Abs[y - bodkolmice] ≤ presnost)) == True}}, resenizbytek]];
roviny = Table[0, {0, 0, 180, 0.5}];
stupne = Prepend[Table[p, {p, 0, 90, 0.5}], ""];
svitivosti =
  Table[fce[[1]] * tokuprava, {gama, 0, Pi / 2,  $\frac{0.5 * \text{Pi}}$  / 180}, {Cplane, 0, 180, 0.5}];
data = N[MapThread[Prepend, {Prepend[svitivosti, roviny], stupne}]];
Export["osvetlenost.xlsx", data, "XLSX"];

```


Příloha číslo 2: Kód výpočtu křivek svítivosti pro komunikace třídy M

```

SetDirectory[NotebookDirectory[]];
delkavozovky = 1000;
pocetpruhu = 2;
sirkapruhu = 3;
a = 24.;
b = 2 * sirkapruhu;
c = 0.5;
L = 0.75;
U0 = 0.4;
U1 = 0.6;
REI = 0.3;
h = 5.;
delta = 0;
fm = 0.6;
tokuprava = 1;
bc = b + c;
deltar =  $\frac{\text{delta} * \text{Pi}}{180}$ ;
bodydelka = Piecewise[{{10, a ≤ 30}}, Ceiling[ $\frac{a}{3}$ ]];
bodysirka = 3 * pocetpruhu;
Droz =  $\frac{a}{\text{bodydelka}}$ ;
d =  $\frac{b}{\text{bodysirka}}$ ;
souradnicex = Table[x, {x, Droz / 2., bodydelka * Droz, Droz}];
souradnicey = Table[y + c, {y, d / 2., bodysirka * d, d}];
dvojce = Tuples[{souradnicey, souradnicex}];
souradnice = Table[{dvojce[[i, 2]], dvojce[[i, 1]]}, {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
souradniceopacny =
  Table[y + c + pocetpruhu * sirkapruhu, {y, d / 2., bodysirka * d / pocetpruhu, d}];
souradnicestejnny = Table[c - y, {y, d / 2., bodysirka * d / pocetpruhu, d}];
souradniceopacny = Tuples[{souradnicex, souradniceopacny}];
souradnicestejnny = Tuples[{souradnicex, souradnicestejnny}];
rpodklad = Import["rtabulka.xlsx"][[1]];

```

```

rhodnoty = Flatten[Table[{{rpodklad[[1, j]], rpodklad[[i, 1]], rpodklad[[i, j]]},
  {i, 2, Length[rpodklad]}, {j, 2, Length[First[rpodklad]]}], 1];
rfunkce = Interpolation[rhodnoty];
epsilonfunkce[x_, y_] := ArcTan[ $\frac{x}{y}$ ];
nvpravo = Table[Floor[(12 * h - (a - souradnice[[i, 1]]) / a) + Piecewise[
  {{1, (a - souradnice[[i, 1]]) < 12 * h}}, 0], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
nvlevo = Table[Floor[Abs[5 * h - souradnice[[i, 1]] / a] +
  Piecewise[{{1, souradnice[[i, 1]] < 5 * h}}, 0], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
nvpravoopacny = Table[Floor[(12 * h - (a - souradniceopacny[[i, 1]]) / a) +
  Piecewise[{{1, (a - souradniceopacny[[i, 1]]) < 12 * h}}, 0],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
nvlevoopacny = Table[Floor[Abs[5 * h - souradniceopacny[[i, 1]] / a] +
  Piecewise[{{1, souradniceopacny[[i, 1]] < 5 * h}}, 0],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
nvpravostejny = Table[Floor[(12 * h - (a - souradnicestejny[[i, 1]]) / a) +
  Piecewise[{{1, (a - souradnicestejny[[i, 1]]) < 12 * h}}, 0],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
nvlevostejny = Table[Floor[Abs[5 * h - souradnicestejny[[i, 1]] / a] +
  Piecewise[{{1, souradnicestejny[[i, 1]] < 5 * h}}, 0],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
ubodyfunkce[x_, y_, z_, v_, w_] := Table[ $\sqrt{x^2 + (y + o * z)^2}$ , {o, v, w, 1}];
uvpravo = Table[ubodyfunkce[souradnice[[i, 2]], a - souradnice[[i, 1]],
  a, 0, nvpravo[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
uvlevo = Table[ubodyfunkce[souradnice[[i, 2]],
  souradnice[[i, 1]], a, 0, nvlevo[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];
uvpravoopacny =
  Table[ubodyfunkce[souradniceopacny[[i, 2]], a - souradniceopacny[[i, 1]], a,
  0, nvpravoopacny[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
uvlevoopacny = Table[ubodyfunkce[souradniceopacny[[i, 2]], souradniceopacny[[i, 1]],
  a, 0, nvlevoopacny[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
uvpravostejny =
  Table[ubodyfunkce[souradnicestejny[[i, 2]], a - souradnicestejny[[i, 1]], a,
  0, nvpravoopacny[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
uvlevostejny = Table[ubodyfunkce[souradnicestejny[[i, 2]], souradnicestejny[[i, 1]],
  a, 0, nvlevoopacny[[i]] - 1], {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];
epsilonmat = Table[
  epsilonfunkce[Join[uvpravo[[i]], uvlevo[[i]]], h], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

```

```

epsilonrastr = Table[epsilonfunkce[ $\sqrt{\text{souradnice}[[i, 1]]^2 + \text{souradnice}[[i, 2]]^2}$ , h],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

epsilonmatopacny =
  Table[epsilonfunkce[Join[uvpravoopacny[[i]], uvlevoopacny[[i]]], h],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];

epsilonmatstejnny =
  Table[epsilonfunkce[Join[uvpravostejnny[[i]], uvlevostejnny[[i]]], h],
  {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];

beta = Table[ $\frac{180}{\text{Pi}} * \text{ArcCos}\left[\left(\text{souradnice}[[i, 1]] + 60\right) * \right.$ 
  Piecewise[{{(- (j - nvpravo[[i]] - 1) * a - 60, j > nvpravo[[i]]}, j * a - 60) +
```

$$\left(\text{souradnice}[[i, 2]] - c + \left(2 * \text{Ceiling}\left[\frac{i}{3}\right] - 1\right) * \frac{\text{sirkapruhu}}{2}\right) *$$

$$\left.(-\text{souradnice}[[i, 2]])\right] / \left(\sqrt{\left(\text{souradnice}[[i, 1]] + 60\right)^2 + \right.$$

$$\left.\left(\text{souradnice}[[i, 2]] - c + \left(2 * \text{Ceiling}\left[\frac{i}{3}\right] - 1\right) * \frac{\text{sirkapruhu}}{2}\right)^2\right) *$$

$$\sqrt{\left(\text{Piecewise}[\{- (j - \text{nvpravo}[[i]] - 1) * a - 60, j > \text{nvpravo}[[i]]\},$$

$$\left. j * a - 60\right)^2 + \left(-\text{souradnice}[[i, 2]]\right)^2}\right],$$

```

  {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}, {j, 0, nvpravo[[i]] + nvlevo[[i]] - 1,
  1}];

hvyzplochy = 0.3;
dvyzplochy = 0.1;

A =  $\frac{\text{Pi} * \text{dvyzplochy}^2}{4.} * \text{Cos}\left[\frac{85. * \text{Pi}}{180.}\right] + \text{hvyzplochy} * \text{dvyzplochy} * \text{Cos}\left[\frac{85. * \text{Pi}}{180.}\right];$ 

Ay = 23;

xd = 2.75 * Abs[h - 1.5];

nlu = Table[Count[Table[ $\sqrt{\left(\sqrt{\left(\frac{(2n - 1) * \text{sirkapruhu}}{2} + c\right)^2 + (\text{xd} + i * a)^2}\right)^2 + (h - 1.5)^2}$ ],
  {i, 0, Floor[ $\frac{500. - \text{xd}}{a}$ ], 1}], (x_ /; x < 5 * h)], {n, 1, pocetpruhu, 1}];

```

```

alfafunkce[x_, y_] := ArcSin[ $\frac{x}{y}$ ];

dLkPfunkce[x_, y_] :=  $\sqrt{x^2 + y^2}$ ;

ufTI = Table[
  ubodyfunkce[ $c + \frac{(2 * n - 1) * sirkapruhu}{2}$ , xd, a,  $\theta$ , nlu[[n]] - 1], {n, 1, pocetpruhu, 1}];

epsilonfTI = Table[epsilonfunkce[ufTI[[n]], h - 1.5], {n, 1, pocetpruhu, 1}];

alfafTI = Table[alfafunkce[ $c + \frac{(2 * n - 1) * sirkapruhu}{2}$ , ufTI[[n]]], {n, 1, pocetpruhu, 1}];

dfTI = Table[dLkPfunkce[ufTI[[n]], h - 1.5], {n, 1, pocetpruhu, 1}];

cr =  $\frac{Cplane * Pi}{180}$ ;

epsilon = deltar + gama;

u = Round[h * Abs[Tan[epsilon]], 0.0001];

bodkolmice = Round[Piecewise[{{u * Sin[cr],  $0 \leq cr < \frac{Pi}{2}$ }, {u * Sin[Pi - cr],  $\frac{Pi}{2} \leq cr < Pi$ },
  {u * Sin[cr - Pi],  $Pi \leq cr < \frac{3 * Pi}{2}$ }}, u * Sin[2 * Pi - cr]], 0.0001];

svetlokolmice =  $\sqrt{u^2 - bodkolmice^2}$ ;

hranicniuhel1 = ArcTan[ $\frac{bc}{a}$ ];

hranicniuhel2 = Pi - hranicniuhel1;

hranicniuhelopacny1 = ArcTan[ $\frac{bc + sirkapruhu}{a}$ ];

hranicniuhelopacny2 = Pi - hranicniuhelopacny1;

hranicniuhelstejny1 = ArcTan[ $\frac{sirkapruhu - c}{a}$ ] + Pi;

hranicniuhelstejny2 = 2 * Pi - ArcTan[ $\frac{sirkapruhu - c}{a}$ ];

l = Piecewise[{{ $\frac{a}{Cos[cr]}$ ,  $0 \leq cr \leq hranicniuhel1$ },
  { $\frac{bc}{Sin[cr]}$ ,  $hranicniuhel1 < cr \leq \frac{Pi}{2}$ }, { $\frac{bc}{Sin[Pi - cr]}$ ,  $\frac{Pi}{2} < cr \leq hranicniuhel2$ },
  { $\frac{a}{Cos[Pi - cr]}$ ,  $hranicniuhel2 < cr \leq Pi$ }}, 0];

```

$$\text{lopacny} = \text{Piecewise}\left[\left\{\left\{\frac{a}{\cos[cr]}, \theta \leq cr \leq \text{hranicniuhelopacny1}\right\}, \left\{\frac{bc + \text{sirkapruhu}}{\sin[cr]}, \text{hranicniuhelopacny1} < cr \leq \frac{\text{Pi}}{2}\right\}, \left\{\frac{bc + \text{sirkapruhu}}{\sin[\text{Pi} - cr]}, \frac{\text{Pi}}{2} < cr \leq \text{hranicniuhelopacny2}\right\}, \left\{\frac{a}{\cos[\text{Pi} - cr]}, \text{hranicniuhelopacny2} < cr \leq \text{Pi}\right\}\right\}, \theta\right];$$

$$\text{Istejny} = \text{Piecewise}\left[\left\{\left\{\frac{a}{\cos[cr - \text{Pi}]}, \text{Pi} \leq cr \leq \text{hranicniuhelstejny1}\right\}, \left\{\frac{\text{sirkapruhu} - c}{\sin[cr - \text{Pi}]}, \text{hranicniuhelstejny1} < cr \leq \frac{3 * \text{Pi}}{2}\right\}, \left\{\frac{\text{sirkapruhu} - c}{\sin[2 * \text{Pi} - cr]}, \frac{3 * \text{Pi}}{2} < cr \leq \text{hranicniuhelstejny2}\right\}, \left\{\frac{a}{\cos[2 * \text{Pi} - cr]}, \text{hranicniuhelstejny2} < cr \leq 2 * \text{Pi}\right\}\right\}, \theta\right];$$

$$\text{uhel} = -1;$$

$$\text{GIrastr} = \text{If}\left[\text{MemberQ}\left[\text{epsilonastr}, 85 * \frac{\text{Pi}}{180}\right] == \text{True}, \left\{\text{Inez}_{\text{Position}\left[\text{epsilonastr}, 85, \frac{\text{Pi}}{180}\right]} * A^{-0.5} \leq 500\right\}, \{\}\right];$$

$$\text{fTI} =$$

$$\text{Max}\left[\text{Flatten}\left[\text{Table}\left[\left(65 * \sum_{p=1}^{nlu[[n]]} \text{Piecewise}\left[\left\{\left\{9.86 * \left(1 + \left(\frac{Ay}{66.4}\right)^4\right) * \left(\text{InezfTI}_n * f_m * \sin\left[\text{epsilonfTI}[[n, p]] * (1 + \cos[\text{alfafTI}[[n, p]])\right])\right) / \text{dfTI}[[n, p]]^2 / \left(\text{ArcCos}\left[\left(\left((p-1) * a + xd\right) * \cos\left[\frac{\text{uhel} * \text{Pi}}{180}\right] + (h-1.5) * \sin\left[\frac{\text{uhel} * \text{Pi}}{180}\right]\right) / \left(\sqrt{\left(\left((p-1) * a + xd\right)^2 + \left(c + \frac{(2n-1) * \text{sirkapruhu}}{2}\right)^2 + (h-1.5)^2}\right)}\right) * \frac{180}{\text{Pi}}\right)^2\right], 1.5 * \frac{\text{Pi}}{180} < \text{ArcCos}\left[\left(\left((p-1) * a + xd\right) * \cos\left[\frac{\text{uhel} * \text{Pi}}{180}\right] + (h-1.5) * \sin\left[\frac{\text{uhel} * \text{Pi}}{180}\right]\right) / \left(\sqrt{\left(\left((p-1) * a + xd\right)^2 + \left(c + \frac{b}{2}\right)^2 + (h-1.5)^2}\right)}\right)\right] \leq 60 * \frac{\text{Pi}}{180}\right\}, \left\{\frac{1}{\text{dfTI}[[n, p]]^2} \text{InezfTI}_n * f_m * \sin\left[\text{epsilonfTI}[[n, p]] * (1 + \cos[\text{alfafTI}[[n, p]])\right]\right\} * \left(10 / \left(\text{ArcCos}\left[\left(\left((p-1) * a + xd\right) * \cos\left[\frac{\text{uhel} * \text{Pi}}{180}\right] + (h-1.5) * \sin\left[\frac{\text{uhel} * \text{Pi}}{180}\right]\right) / \left(\sqrt{\left(\left((p-1) * a + xd\right)^2 + \left(c + \frac{b}{2}\right)^2 + (h-1.5)^2}\right)}\right)\right]\right)\right]$$

rovnomernostpruh =

$$\text{Table}\left[U1 \leq \left(\text{Min}\left[\text{Table}\left[\sum_{k=1}^{n_{\text{pravo}}[m]+n_{\text{levo}}[m]} \frac{1}{h^2} \text{Inez}_m * fm * 10^{-4} * r_{\text{funkce}}[\text{beta}[[m, k]]], \text{Tan}[\text{epsilon}_{\text{mat}}[[m, k]]]\right], \{m, \text{bodydelka} + 1 + 3 * \text{bodydelka} * (n - 1), \text{bodydelka} + 1 + 3 * \text{bodydelka} * (n - 1) + \text{bodydelka} - 1, 1\}\right] / \right. \\ \left. \text{Max}\left[\text{Table}\left[\sum_{k=1}^{n_{\text{pravo}}[m]+n_{\text{levo}}[m]} \frac{1}{h^2} \text{Inez}_m * fm * 10^{-4} * r_{\text{funkce}}[\text{beta}[[m, k]]], \text{Tan}[\text{epsilon}_{\text{mat}}[[m, k]]]\right], \{m, \text{bodydelka} + 1 + 3 * \text{bodydelka} * (n - 1), \text{bodydelka} + 1 + 3 * \text{bodydelka} * (n - 1) + \text{bodydelka} - 1, 1\}\right]\right], \{n, 1, \text{pocetpruhu}, 1\}\right];$$

rovnomernost =

$$U0 \leq \left(\text{Min}\left[\text{Table}\left[\sum_{k=1}^{n_{\text{pravo}}[m]+n_{\text{levo}}[m]} \frac{1}{h^2} \text{Inez}_m * fm * 10^{-4} * r_{\text{funkce}}[\text{beta}[[m, k]]], \text{Tan}[\text{epsilon}_{\text{mat}}[[m, k]]]\right], \{m, 1, \text{bodydelka} * \text{bodysirka}, 1\}\right] / \right. \\ \left. \left(\sum_{m=1}^{\text{bodydelka} * \text{bodysirka}} \sum_{k=1}^{n_{\text{pravo}}[m]+n_{\text{levo}}[m]} \frac{1}{h^2} \text{Inez}_m * fm * 10^{-4} * r_{\text{funkce}}[\text{beta}[[m, k]]], \text{Tan}[\text{epsilon}_{\text{mat}}[[m, k]]]\right) / (\text{bodydelka} * \text{bodysirka})\right];$$

prumernyjas =

$$L \leq \left(\sum_{m=1}^{\text{bodydelka} * \text{bodysirka}} \sum_{k=1}^{n_{\text{pravo}}[m]+n_{\text{levo}}[m]} \frac{1}{h^2} \text{Inez}_m * fm * 10^{-4} * r_{\text{funkce}}[\text{beta}[[m, k]]], \text{Tan}[\text{epsilon}_{\text{mat}}[[m, k]]]\right) / (\text{bodydelka} * \text{bodysirka});$$

rovnice = Join[{prumernyjas}, rovnomernostpruh,

{rovnomernost}, {fTI}, GIrastr, nezapornarovnice, rovnosti];

reseni = FindInstance[rovnice, Join[Table[Inez_m, {m, 1, bodydelka * bodysirka, 1}],

Table[Inez_{fTI}, {m, 1, pocetpruhu, 1}]], Reals];

resenihodnoty = Table[Inez_i /. reseni[[1, i]], {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

$$\text{prumerrastropacny} = \frac{1}{\frac{\text{bodydelka} * \text{bodysirka}}{\text{pocetpruhu}}} \left(\sum_{m=\text{bodydelka} * \text{bodysirka} * \left(1 - \frac{1}{\text{pocetpruhu}\right) + 1}^{\text{bodydelka} * \text{bodysirka}} \sum_{k=1}^{n_{\text{pravo}}[m]+n_{\text{levo}}[m]} \frac{\text{resenihodnoty}[[m]] * fm * \text{Cos}[\text{epsilon}_{\text{mat}}[[m, k]]]^3}{h^2} \right);$$

$$\text{prumerrastrstejny} = \frac{1}{\frac{\text{bodydelka} + \text{bodysirka}}{\text{pocetpruhu}}} \left(\sum_{m=1}^{\text{bodydelka} + \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}} \sum_{k=1}^{\text{nvpravo}[\{m\}] + \text{nvlevo}[\{m\}]} \frac{\text{resenihodnoty}[\{m\}] * \text{fm} * \text{Cos}[\text{epsilon}[\text{mat}[\{m, k\}]]]^3}{h^2} \right);$$

osvetlenostokoliopacny =

$$\text{REI} \leq \left(\sum_{m=1}^{\text{bodydelka} + \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}} \left(\sum_{k=1}^{\text{nvpravoopacny}[\{m\}] + \text{nvlevoopacny}[\{m\}]} \frac{1}{h^2} \text{Inez}_m * \text{fm} * \text{Cos}[\text{epsilon}[\text{matopacny}[\{m, k\}]]]^3 \right) \right) / (\text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}) / \text{prumerrastropacny};$$

osvetlenostokolistejny = REI ≤ $\frac{1}{\text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}}$

$$\left(\sum_{m=1}^{\text{bodydelka} + \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}} \left(\sum_{k=1}^{\text{nvpravostejny}[\{m\}] + \text{nvlevostejny}[\{m\}]} \frac{1}{h^2} \text{Inez}_m * \text{fm} * \text{Cos}[\text{epsilon}[\text{matstejny}[\{m, k\}]]]^3 \right) \right) / \text{prumerrastrstejny};$$

rovnomernostopacny = 0.3 < Min [Flatten [

$$\text{Table} \left[\sum_{k=1}^{\text{nvpravoopacny}[\{m\}] + \text{nvlevoopacny}[\{m\}]} \frac{\text{Inez}_m * \text{fm} * \text{Cos}[\text{epsilon}[\text{matopacny}[\{m, k\}]]]^3}{h^2}, \{m, 1, \text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}, 1\} \right] / \text{Max} [\text{Flatten} [\text{Table} \left[\sum_{k=1}^{\text{nvpravoopacny}[\{m\}] + \text{nvlevoopacny}[\{m\}]} \frac{\text{Inez}_m * \text{fm} * \text{Cos}[\text{epsilon}[\text{matopacny}[\{m, k\}]]]^3}{h^2}, \{m, 1, \text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}, 1\} \right]]];$$

rovnomernoststejny = 0.3 < Min [Flatten [

$$\text{Table} \left[\sum_{k=1}^{\text{nvpravostejny}[\{m\}] + \text{nvlevostejny}[\{m\}]} \frac{\text{Inez}_m * \text{fm} * \text{Cos}[\text{epsilon}[\text{matstejny}[\{m, k\}]]]^3}{h^2}, \{m, 1, \text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}, 1\} \right] / \text{Max} [\text{Flatten} [\text{Table} \left[\sum_{k=1}^{\text{nvpravostejny}[\{m\}] + \text{nvlevostejny}[\{m\}]} \frac{\text{Inez}_m * \text{fm} * \text{Cos}[\text{epsilon}[\text{matstejny}[\{m, k\}]]]^3}{h^2}, \{m, 1, \text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}, 1\} \right]]];$$

reseniopacny =

$$\text{Table} [\text{Inez}_i / . \text{FindInstance} [\text{Join} [\{\text{osvetlenostokoliopacny}\}, \{\text{rovnomernostopacny}\}], \text{Table} [\text{Inez}_i, \{i, 1, \text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}, 1\}], \text{Reals}][[1, i]], \{i, 1, \text{bodydelka} * \text{bodysirka} / \text{pocetpruhu}, 1\}];$$


```

resenistejny =
  Table[Inezi /. FindInstance[Join[{osvetlenostokolistejny}, {rovnomernoststejny}],
    Table[Inezi, {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}], Reals][[1, i]],
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];

vysledkyrastr = Table[{souradnice[[i, 1]], souradnice[[i, 2]], resenihodnoty[[i]]},
  {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}];

vysledkyopacny =
  Table[{souradniceopacny[[i, 1]], souradniceopacny[[i, 2]], reseniopacny[[i]]},
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];

vysledkystejny =
  Table[{souradnicestejny[[i, 1]], souradnicestejny[[i, 2]], resenistejny[[i]]},
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}];

index = If[gama ≥ 0, Flatten[Position[Table[√((svetlokolmice - vysledkyrastr[[i, 1]])2 +
  (bodkolmice - vysledkyrastr[[i, 2]])2), {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}],
  Min[Flatten[Table[√((svetlokolmice - vysledkyrastr[[i, 1]])2 + (bodkolmice -
    vysledkyrastr[[i, 2]])2), {i, 1, bodydelka * bodysirka, 1}]]]]][[1]]];

indexopacny =
  If[gama ≥ 0, Flatten[Position[Table[√((svetlokolmice - vysledkyopacny[[i, 1]])2 +
    (bodkolmice - vysledkyopacny[[i, 2]])2),
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}],
  Min[Flatten[Table[√((svetlokolmice - vysledkyopacny[[i, 1]])2 +
    (bodkolmice - vysledkyopacny[[i, 2]])2),
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}]]]]][[1]]];

indexstejny =
  If[gama ≥ 0, Flatten[Position[Table[√((svetlokolmice - vysledkystejny[[i, 1]])2 +
    (bodkolmice - vysledkystejny[[i, 2]])2),
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}],
  Min[Flatten[Table[√((svetlokolmice - vysledkystejny[[i, 1]])2 +
    (bodkolmice - vysledkystejny[[i, 2]])2),
    {i, 1, bodydelka * bodysirka / pocetpruhu, 1}]]]]][[1]]];

Quiet[fce = If[gama ≥ 0, Piecewise[{{Piecewise[{{(0), epsilon > ArcTan[ $\frac{lopacny}{h}$ ]}}},
  {{vysledkyopacny[[indexopacny, 3]]}, ArcTan[ $\frac{1}{h}$ ] < epsilon ≤ ArcTan[ $\frac{lopacny}{h}$ ]}}},
  {{vysledkystejny[[indexstejny, 3]]}, bodkolmice < c}},
  {vysledkyrastr[[index, 3]]}, Pi ≥ cr ≥ 0}], Piecewise[
  {{(0), epsilon > ArcTan[ $\frac{1stejny}{h}$ ]}}}, {vysledkystejny[[indexstejny, 3]]}]]];

roviny = Table[0, {0, 0, 360, 0.5}];

stupne = Prepend[Table[p, {p, 0, 90, 0.5}], ""];

```

```
svitivosti =  
  Table[fce[[1]] * tokuprava, {gama, 0, Pi / 2,  $\frac{0.5 * \text{Pi}}{180}$ }, {Cplane, 0, 360, 0.5}];  
data = N[MapThread[Prepend, {Prepend[svitivosti, roviny], stupne}]];  
Export["jasy_diplomka.xlsx", data, "XLSX"];
```

Příloha číslo 3: Hodnoty funkce $r_{tab}(\beta, tg\gamma)$ pro povrchy komunikací třídy CI

tg γ	$\beta [^\circ]$																			
	0	2	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
0	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770	770
0,25	710	708	703	710	712	710	708	708	707	74	702	708	698	702	704	714	708	724	719	723
0,5	586	582	587	581	581	576	570	567	564	556	548	541	531	544	546	562	566	587	581	589
0,75	468	467	465	455	457	446	430	420	410	399	390	383	373	384	391	412	419	437	438	445
1	378	372	373	363	347	331	414	299	285	273	263	260	250	265	278	295	305	318	323	329
1,25	308	304	605	285	270	244	218	203	193	185	179	173	183	194	194	207	224	237	238	245
1,5	258	254	251	229	203	178	157	143	134	128	124	120	120	132	140	155	163	177	179	184
1,75	217	214	205	182	153	229	110	100	95	90	87	84	88	98	103	116	123	134	137	138
2	188	181	174	142	116	95	80	73	69	64	62	64	64	72	78	88	95	105	108	109
2,5	145	136	121	90	66	53	46	41	39	37	36	36	39	44	50	55	60	66	69	71
3	118	108	87	57	41	32	28	26	25	23	22	23	25	28	31	37	41	45	47	51
3,5	97	87	64	39	26	20	18	17	16	15	15	16	17	19	23	27	30	33	35	37
4	80	69	50	29	17	14	13	12	11	11	11	11	13	15	17	19	22	26	27	29
4,5	70	58	37	21	13	10	9	8	8	8	8	9	10	12	14	16	17	20	21	22
5	60	51	29	15	9	7	7	6	6	6	6	7	7	9	10	12	14	17	17	18
5,5	52	41	23	12	7	6	6	6	5	5	4									
6	48	36	19	8	6	5	5	5	5	5										
6,5	44	32	17	7	6	5	5	5	5	5										
7	41	28	14	6	5	4	4	4	4	4										
7,5	37	26	12	6	4	3	3	3	3	3										
8	34	23	11	5	4	3	3	3	3	3										
8,5	32	21	9	5	4	3	3	3	3	3										
9	29	19	8	4	3	3	3	3	3	3										
9,5	27	17	7	4	3	3	3	3	3	3										
10	26	16	6	3	3	3	3	3	3	3										
10,5	25	16	6	3	2	1	1	1	1	1										
11	23	15	6	3	2	1	1	1	1	1										
11,5	22	14	6	3	2	1	1	1	1	1										
12	21	14	5	3	2	1	1	1	1	1										