

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

**Ověření relací mezi výpočetními a měřicími metodami ve
veřejném osvětlení**

**Verification of relations between calculation and measurement
methods in public lighting**

2018

Petr Šebesta

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Šebesta**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Ověření relací mezi výpočetními a měřicími metodami ve veřejném osvětlení**
Verification of relations between calculation and measurement methods in public lighting

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- o Nové trendy ve veřejném osvětlení
- o LED svítidla ve veřejném osvětlení
- o Udržovací činitel - realita versus výpočty, nové přístupy
- o Variabilní návrh osvětlovací soustavy veřejného osvětlení
- o Ověření veřejného osvětlení v různých režimech provozu měřením
- o Vyhodnocení výhodnosti řízení veřejného osvětlení

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
- [2] Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
- [3] Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU, sborníky CIE
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)
- [5] www.csorsostrava.cz

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

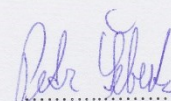


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 24. dubna 2018


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své sestře Žanetě Šebestové za jazykovou korekci této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou aplikace LED technologie do osvětlovacích soustav veřejného osvětlení. Teoretická část práce se zabývá rozšířením problematiky LED svítidel ve VO. Na základě zahraničních publikací jsou rozebrány nové trendy ve veřejném osvětlení a také je rozebrána závislost LED svítidel na teplotě a dalších důležitých faktorech. Tato diplomová práce se rovněž věnuje problematice volby udržovacího činitele pro osvětlovací soustavy VO. Na volbu korektního udržovacího činitele pro VO je v této práci kladen velký důraz a jsou rozebrány možné nové přístupy pro jeho korektnější volbu. Hlavním cílem práce je zhodnotit energetickou náročnost testovacího polygonu na parkovišti Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO a zaměřit se na všechny dílčí faktory, které ovlivňují výslednou velikost naměřených a vypočtených udržovaných hodnot. V praktické části budou zhodnoceny světelně-technické parametry původní a nové osvětlovací soustavy VO na testovacím polygonu parkoviště FEI spolu s návrhem systému stmívání dle požadavků normy ČSN EN 13201-2.

Klíčová slova

Veřejné osvětlení, udržovací činitel, normativní požadavky, teplota chromatičnosti, LED, teplotní závislosti, regulace, stmívání, testovací polygon, osvětlenost, jas, rovnoměrnost

Abstract

This thesis deals with the application issues of LED technology to lighting systems of public lighting. The theoretical part of the thesis deals with the extension of LED lighting in PL. Based on foreign publications, new trends in public lighting are analyzed and the dependence of LED luminaires on temperature and other important factors is analyzed. This thesis also deals with the issue of selection of the maintenance factor for public lighting systems. A great emphasis is placed on the selection of a correct maintenance factor for PL, and new possible approaches to its correct choices are analyzed. The main aim of the thesis is to evaluate the energy intensity of the test polygon at the parking space of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of VŠB-TUO and to focus on all the partial factors affecting the resulting measured and calculated maintained values. In the practical part, the lighting and technical parameters of the original and new street lighting system will be evaluated on the test polygon of the FEI car park together with the design of the dimming system according to the requirements of the ČSN EN 13201-2 standard.

Key words

Street lighting, maintenance factor, normative requirements, color temperature, LED, temperature dependence, regulation, dimming, test polygon, illumination, luminance, uniformity

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Nové trendy ve veřejném osvětlení.....	2
2.1	Vliv přechodu barvy emitovaného světla pomocí LED svítidla na reakční čas a viditelnost objektu na pozemní komunikaci	2
2.1.1	Výsledné reakční časy.....	5
2.2	Vliv stmívání na viditelnost objektů na pozemní komunikaci	6
2.2.1	Výpočet úrovně viditelnosti kritického detailu VL pro pohybujícího se účastníka	8
3	LED svítidla ve veřejném osvětlení	10
3.1	Problematika nelinearity parametrů LED při stmívání	10
3.2	Problematika náběhového proudu LED v praxi	16
3.3	Problematika chlazení a směřování světelného toku LED svítidel	18
3.4	Srovnání životnosti komponentů LED svítidla	20
4	Udržovací činitel – realita versus výpočty, nové přístupy	21
4.1	Teoretický postup výpočtu udržovacího činitele pro osvětlovací soustavu VO	21
4.2	Určení udržovacího činitele pro měření veřejného osvětlení	25
4.3	Problémové aspekty současných norem pro volbu udržovacího činitele, návrhy nových přístupů.....	26
4.3.1	Nezvratné změny LED čipů a problematika uvádění životnostních parametrů LED (v návaznosti na metodiku CIE 97 a 154).....	26
4.3.2	Problematika volby činitele znečištění svítidel	29
4.3.3	Problematika časové změny odrazných vlastností asfaltu a dalších povrchů ve VO	30
4.3.4	Provozní vlivy a udržovací činitel.....	31
5	Variabilní návrh osvětlovací soustavy veřejného osvětlení.....	32
5.1	Zhodnocení kvantitativních a kvalitativních parametrů testovaných svítidel s původním svítidlem.....	34
5.2	Výpočet udržovacího činitele pro původní a nové (testované) svítidla na testovacím polygonu parkoviště FEI.....	39
5.3	Zatřídění testovacího polygonu na FEI VŠB-TUO	41
5.4	Světelně-technické výpočty testovacího polygonu na FEI VŠB-TUO	41
5.5	Zhodnocení světelných výpočtů modelu testovacího polygonu parkoviště s požadavky normy ČSN EN 13201-2.....	43
5.5.1	Zhodnocení modelu úseku Naica (starý versus nový stav)	43
5.5.2	Zhodnocení modelu úseku Thorn R2L2 (starý versus nový stav).....	44
5.5.3	Zhodnocení modelu úseku Schreder Teceo (starý versus nový stav).....	45

5.5.4	Zhodnocení nejlepšího úseku VO modelu testovacího polygonu parkoviště FEI.....	47
5.6	Zhodnocení energetické náročnosti modelu testovacího polygonu parkoviště dle ČSN EN 13201-5	47
5.6.1	Zhodnocení energetické náročnosti úseku Naica (starý versus nový stav)	47
5.6.2	Zhodnocení energetické náročnosti úseku Thorn (starý versus nový stav).....	48
5.6.3	Zhodnocení energetické náročnosti úseku Teceo (starý versus nový stav).....	48
5.6.4	Zhodnocení velikosti ukazatele PDI u jednotlivých roztečí nového stavu.....	49
6	Ověření veřejného osvětlení v různých režimech provozu měřením	50
6.1	Ověření světelně-technických parametrů původního stavu (Riviéra)	51
6.2	Ověření světelně-technických parametrů nového stavu (LED svítidla – Boos, Thorn, Schreder).....	52
6.3	Ověření energetické náročnosti dle ČSN EN 13201-5 z naměřených hodnot	53
6.4	Fotky nového stavu na testovacím polygonu parkoviště FEI.....	54
7	Vyhodnocení výhodnosti řízení veřejného osvětlení	56
8	Závěr.....	59

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam použitých veličin

T_C	(K)	Teplota chromatičnosti
L	(cd.m ⁻²)	Jas
VL	(-)	Visibility glare – viditelnost kritického detailu
SD	(m)	Safe distance – bezpečná vzdálenost
P	(W)	Elektrický příkon
I	(mA)	Elektrický proud
U	(V)	Elektrické napětí
cosφ	(-)	Účinník
THD	(-)	Total harmonic distortion – zkreslení sinus. Signál
T_{SP}	(°C)	Teplota PN přechodu
f_M	(-)	Udržovací činitel
φ	(lm)	Světelný tok
η	(lm.W ⁻¹)	Měrný výkon svítidla
Ra	(-)	Činitel podání barev
IP	(-)	Stupeň krytí svítidla
IK	(-)	Stupeň mechanické odolnosti svítidla
D_P	(mW.lx ⁻¹ .m ⁻²)	Power density indicator – ukazatel příkonové hustoty

Seznam použitých zkratk

VO	Veřejné osvětlení
MF	Maintenance factor – udržovací činitel
ISO	Mezinárodní komise pro normalizaci
CIE	Mezinárodní normalizační institut
NAV	Vysokotlaká sodíková výbojka
LED	Light Emitting Diode – elektroluminiscenční dioda

Seznam obrázků

Obr. 1 Ukázka osvětlovacích soustav VO s LED svítidly s odlišnými barvami emitovaného světla (modrá, červená, tyrkysová) [2]	2
Obr. 2 Model pozemní komunikace v měřítku 1:20 [2]	4
Obr. 3 Testovací brýle se stínítky pro měření reakč. času na modelu pozemní komunikace VO [2]	4
Obr. 4 Střední reakční časy pro jednotlivé přechody barev emitovaného světla pomocí LED [2]	5
Obr. 5 Střední subjektivní hodnocení viditelnosti objektu na modelu pozemní komunikace VO [2]	5
Obr. 6 Experimentální měření viditelnosti kritického detailu na pozemní komunikaci [3]	7
Obr. 7 Závislost relativního světelného toku na relativním skutečném spotřebovaném příkonu [13] ..	12
Obr. 8 Závislost účinníku na relativním světelném toku [13]	13
Obr. 9 Závislost THD na relativním světelném toku [13]	14
Obr. 10 Závislost výkonových ztrát na velikosti procházejícího proudu LED driverem [13]	15
Obr. 11 Závislost relativní teploty LED driveru na relativní celkové spotřebě energie [13]	15
Obr. 12 Závislost teploty LED modulu (PN přechodu) na relativním světelném toku [13]	16
Obr. 13 Závislost náběhového proudu na čase [14]	17
Obr. 14 Závislost náběhového proudu na čase pro dva úhly napětí [14]	17
Obr. 15 Hybridní stykač od firmy Schneider [14]	18
Obr. 16 Nasvětlení chodníkové trasy lesoparku v obci Orlová – LED svítidlem bez optiky	19
Obr. 17 Udržovací činitel osvětlovací soustavy VO [4]	23
Obr. 18 Srovnání funkční spolehlivosti světelného zdroje výbojkového svítidla s LED svítidlem [6]	28
Obr. 19 Vliv změny odrazných vlastností na výpočet MF [6]	31
Obr. 20 Testovací polygon na parkovišti Fakulty elektrotechniky a informatiky na VŠB-TUO	32
Obr. 21 Poziční rozdělení testovaných svítidel na testovacím polygonu	33
Obr. 22 Původní svítidlo na testovacím polygonu – Thorn Riviéra	34
Obr. 23 Svítidlo Boos Naica	35
Obr. 24 Svítidlo Thorn R2L2	35
Obr. 25 Svítidlo Artechnic-Schreder Teceo	36
Obr. 26 Křivka svítivosti svítidla Thorn Riviéra – původní svítidlo	37
Obr. 27 Křivka svítivosti svítidla Boos Naica	37
Obr. 28 Křivka svítivosti svítidla Artechnic-Schreder Teceo	38
Obr. 29 Křivka svítivosti svítidla Thorn R2L2	38
Obr. 30 Udržovací činitel osvětlovací soustavy VO se svítidlem Thorn Riviéra	40
Obr. 31 Situace prostoru parkoviště Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO	41
Obr. 32 Model prostoru parkoviště Fakulty elektrotechniky a informatiky	42
Obr. 33 Nasvětlení prostoru parkoviště FEI pomocí LED svítidel – Pohled 1	42
Obr. 34 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Naica – původní stav (Riviéra)	43
Obr. 35 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Naica – nový stav	44
Obr. 36 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku R2L2 – původní stav (Riviéra)	45
Obr. 37 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku R2L2 – nový stav	45
Obr. 38 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Teceo – původní stav (Riviéra)	46
Obr. 39 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Teceo – nový stav	46
Obr. 40 Fotografie nového stavu – úsek Teceo (v pozadí přechod pro chodce)	54
Obr. 41 Fotografie nového stavu – úsek R2L2	54

Obr. 42 Fotografie nového stavu – úsek Naica	55
Obr. 43 Fotografie celkového pohledu na nový stav testovacího polygonu - parkoviště FEI	55

Seznam tabulek

Tab. 1 Řada barevných přechodů pro zkoumání reakčního času [2]	3
Tab. 2 Minimální hodnoty VL pro jednotlivé třídy osvětlení [3].....	7
Tab. 3 Změny ve viditelnosti kritického detailu pro třídy osvětlení M2, M3, M4 [3]	9
Tab. 4 Vstupní parametry testovaných LED svítidel [13].....	11
Tab. 5 Srovnání životnosti dílčích komponentů LED svítidla [15].....	20
Tab. 6 Hodnoty činitele znečištění svítidla [5].....	22
Tab. 7 Hodnoty činitele stárnutí světelných zdrojů [5]	23
Tab. 8 Srovnání kvantitativních a kvalitativních parametrů – Naica, R2L2, Teceo, Riviéra	36
Tab. 9 Hodnoty činitele znečištění svítidla [5].....	39
Tab. 10 Hodnota činitele stárnutí světelného zdroje VIALOX NAV-T SUPER 4Y	40
Tab. 11 Zhodnocení světelně-technických parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro úsek Naica ...	43
Tab. 12 Zhodnocení světelně-technických parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro úsek R2L2 ...	44
Tab. 13 Zhodnocení světelně-technických parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro úsek Teceo...	46
Tab. 14 Zhodnocení energetické náročnosti VO dle normy ČSN EN 13201-5 pro úsek Naica	47
Tab. 15 Zhodnocení energetické náročnosti VO dle normy ČSN EN 13201-5 pro úsek R2L2	48
Tab. 16 Zhodnocení energetické náročnosti VO dle normy ČSN EN 13201-5 pro úsek Teceo.....	48
Tab. 17 Zhodnocení naměřených parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro původní stav	51
Tab. 18 Zhodnocení naměřených parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro nový stav.....	52
Tab. 19 Zhodnocení energetické náročnosti dle normy ČSN EN 13201-5	53
Tab. 20 Příkonová náročnost nového stavu při stmívání pouze 1 rozteče (% příkonu 1 svítidla)	56
Tab. 21 Příkonová náročnost nového stavu při stmívání všech roztečí naráz (% příkonu 1 svítidla)...	56
Tab. 22 Procentuální rozdíl příkonů svítidel pro případ stmívání jedné rozteče a všech roztečí	57
Tab. 23 Procentuální úspora příkonů svítidel nového stavu oproti svítidlu původ. stavu (Riviéra)	57

1 Úvod

V praxi se LED svítidel pro osvětlování pozemních komunikací užívá stále více a více. Větší zájem o LED svítidla ve veřejném osvětlení je jednak díky menšímu cenovému rozdílu oproti svítidlu s vysokotlakou sodíkovou výbojkou a lepším parametrům těchto svítidel. Světelně-technické parametry LED svítidel se stále dynamicky zlepšují, kdežto svítidla s výbojovými zdroji již dosáhly svých maximálních světelně-technických parametrů. Avšak problémem současných LED svítidel je stále nedokončená standardizace a opomíjení jejich základních vlastností v praktických aplikacích.

Dalšími důvody častějšího použití LED svítidel ve VO je jednak nezanedbatelná energetická úspora, díky které lze získat na revitalizovaný úsek VO dotaci od státu, velmi dobré světelně-technické parametry a široké možnosti regulace LED svítidel. Díky těmto aspektům je užití LED svítidel ve VO čím dál častější.

Potenciál využití LED svítidel ve VO je velký. Od inteligentního řízení výkonu na základě dat z kamerového systému, po využití k šíření datové konektivity. Systémy inteligentního řízení a další doplňkové služby jsou součástí takzvaného „Smart City“. Oblast „Smart City“ se rychle vyvíjí a v současnosti vznikají ve větší městech první testovací úseky.

Teoretická část této diplomové práce se zabývá novými trendy ve veřejném osvětlení, nelinearitou závislosti LED svítidel při jejich stmívání a v poslední řadě je rozebrána volba udržovacího činitele osvětlovacích soustav VO. Nové trendy se zaměřují na vliv barvy vyzařovaného světla na reakční čas uživatele pozemní komunikace. V kapitole LED svítidla ve veřejném osvětlení je rozebrána problematika změny provozních vlastností a jejich vliv na napájecí síť. Velký důraz je kladen na volbu udržovacího činitele osvětlovacích soustav VO s jeho rozбором připravovaných změn.

Praktická část práce se zabývá komplexním návrhem a vyhodnocením osvětlovací soustavy VO realizované pomocí LED svítidel na testovacím polygonu parkoviště Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO. Budou zde rozebrány a zhodnoceny základní světelně-technické parametry použitých svítidel a bude vytvořen komplexní model parkoviště FEI ve výpočetním programu Relux Pro.

A dále bude provedeno světelně-technické zhodnocení jednotlivých úseků VO nového a původního stavu dle požadavků normy ČSN EN 13201-2, ale také bude vyhodnocena energetická náročnost jednotlivých úseků VO podle ukazatele PDI dle normy ČSN EN 13201-5. V další části bude provedeno vzájemné zhodnocení jednotlivých úseků VO testovacího polygonu a budou zde uvedeny základní relace mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami s odůvodněním vzniklých rozdílů. V závěru bude spočtena a zhodnocena příkonová náročnost pro jednotlivé stupně regulace mezi novou a původní osvětlovací soustavou veřejného osvětlení testovacího polygonu.

2 Nové trendy ve veřejném osvětlení

Masivní vývoj LED svítidel v uplynulých letech pro aplikaci ve veřejném osvětlení nám dává mnohem více možností volby a nastavení kvantitativních a kvalitativních parametrů v porovnání s konvenčním světelným zdrojem jakým je například vysokotlaká sodíková výbojka.

S příchodem LED svítidel do veřejného osvětlení se začínají využívat jeho hlavní výhody, kterými jsou: stmívání v rozsahu 0–100% jmenovitého toku, volba náhradní teploty chromatičnosti, možnost individuálního řízení každého svítidla zvlášť, vyšší měrný výkon, vyšší index podání barev, vyšší životnost atd. Všechny základní vlastnosti LED svítidel byly již popsány v bakalářské práci zabývající se energetickou náročností veřejného osvětlení a dále jim nebude věnována pozornost. Pozornost bude věnována problematice volby barvy emitovaného světla pomocí LED a její vliv na vnímání objektu na komunikaci potažmo vliv na celkovou bezpečnost provozu na komunikaci. [1]

Rozhodující pro začátek aplikace LED svítidel ve veřejném osvětlení byla velikost měrného výkonu (nižší energetická náročnost) a snižující se pořizovací náklady na jedno svítidlo (které se dnes pohybují již pouze v rozsahu 1,5-2x násobku ceny svítidla s výbojkou).

Velkou předností LED svítidla, které má značný vliv na zrakový výkon, je volba náhradní teploty chromatičnosti, potažmo volba barvy vyzařovaného světla. Je známo, že se zvyšující se teplotou chromatičnosti v oblasti mezopického vidění (které se ve VO velice často uplatňuje díky nízkým jasům komunikace) roste schopnost periferního vidění. Volba barvy světla má tedy ve VO významný vliv.

2.1 Vliv přechodu barvy emitovaného světla pomocí LED svítidla na reakční čas a viditelnost objektu na pozemní komunikaci

Odstín barvy vyzařovaného světla z LED svítidla nemusí být čistá bílá, ale může svítit modře, červeně, zeleně, žlutě (jak je tomu na Obr. 1). Volba takovéhoto odstínu vyzařovaného světla je buď estetická, designová nebo mají za cíl svou barvou omezit rušení okolního prostředí, případně chtějí využít principu mezopického vidění (volba studenějších odstínů v mezopické oblasti má za důsledek lepší periferní vidění). [2]



Obr. 1 Ukázka osvětlovacích soustav VO s LED svítidly s odlišnými barvami emitovaného světla (modrá, červená, tyrkysová) [2]

Použití LED svítidel, jejichž barva emitovaného světla se blíží k jedné ze spektrálních barev, není příliš výhodné, jelikož dochází k zhoršení indexu podání barev vlivem potlačení zbylých spektrálních barev v celé viditelné oblasti spektra.

Problematicke přechodů barvy emitovaného světla se věnuje tým vědců na univerzitě v Eindhoven University of Technology (Netherlands) a instituce Philips Lighting Research Eindhoven pod vedením Donnerse, M.A.H. [2]

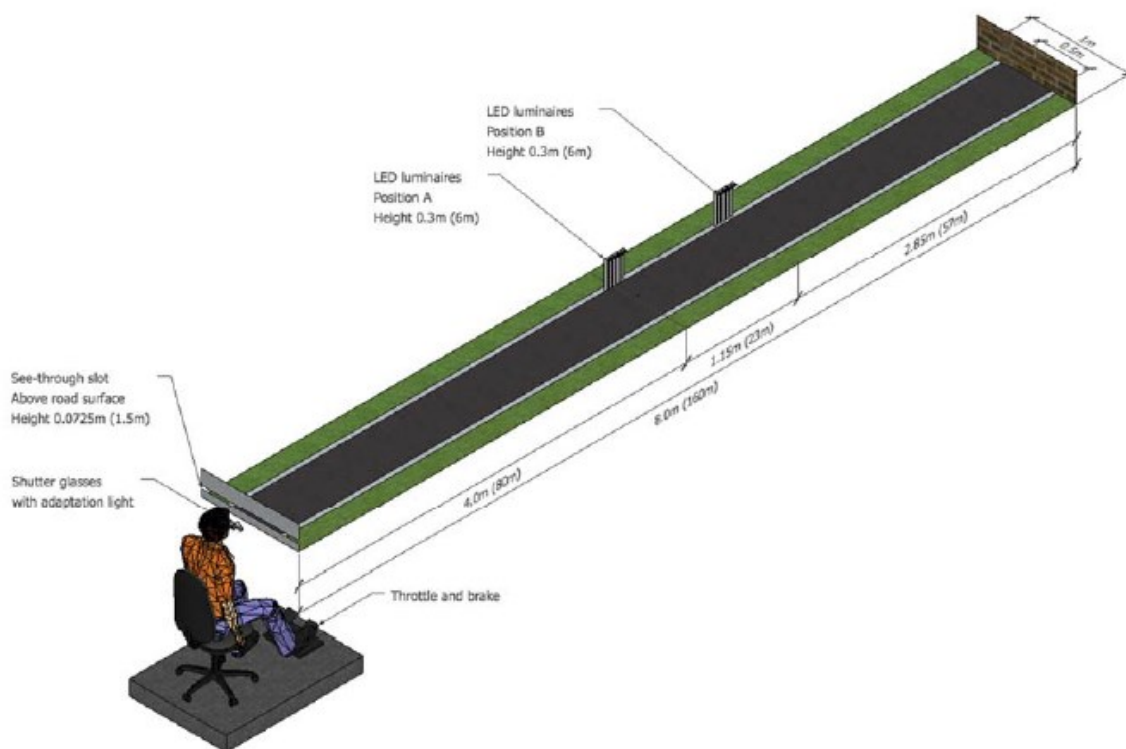
Pro zkoumání dané problematiky byl vytvořen model v měřítku 1:20, který můžete vidět na Obr. 2. Dále bylo vybráno 10 barevných přechodů (viz Tab.1 - červená 617 nm, zelená 530 nm, modrá 470 nm, žlutá 590 nm, bílá 3050 K pro případ kontroly) při jasech povrchu vozovky 1 cd/m² a 0,15 cd/m² (odpovídá třídám osvětlení M3 a P3). [2]

Tab. 1 Řada barevných přechodů pro zkoumání reakčního času [2]

White	To	Red
Red	To	White
White	To	Green
Green	To	White
White	To	Blue
Blue	To	Red
Red	To	Blue
Blue	To	White
White	To	Amber
Amber	To	White
White	To	White

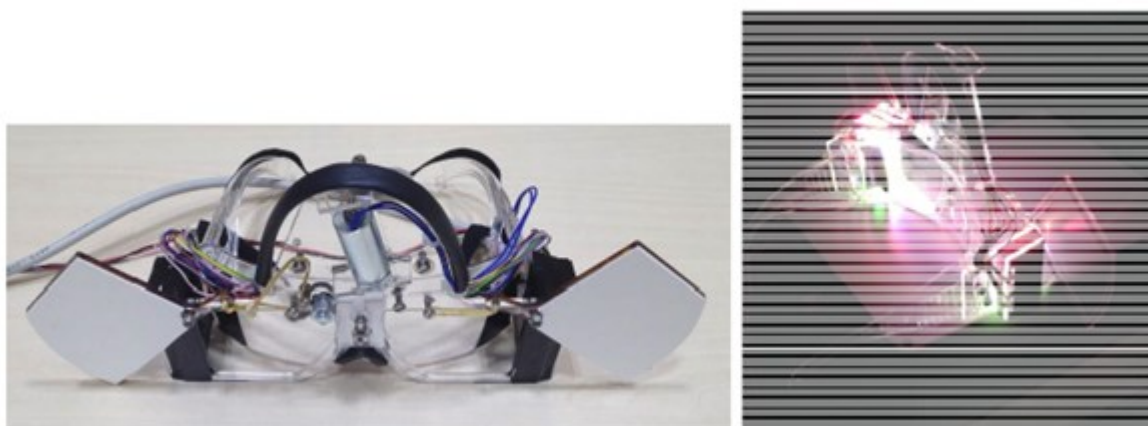
Testovací osoba si sedla před model a dívala se na pozemní komunikaci (v modelovém měřítku) přes výřez o velikosti 7,25 cm (viz Obr. 2). K dispozici měla pedál plynu a brzdy, který byl připojen k počítači, který počítal reakční čas stisku pedálu brzdy. Celé měření reakčního času probíhalo tak, že testovací osoba měla na sobě testovací brýle (viz Obr. 3) s neprůhledným stínítkem, které ji po dobu 90 vteřin svítilo do očí jedním odstínem barvy (LED, která osvětlovala každé oko zvlášť odpovídala osvětlenosti, resp. jasům třídy osvětlení M3 a P3). Po 90 vteřinách byly LED na testovacích brýlích zhasnuty a stínítka otevřena, s tím, že testovací osoba měla na dohled model komunikace s objektem osvětleným odlišnou barvou o stejném jasu jako LED na brýlích. Jakmile testovací subjekt zaznamenal objekt na modelu pozemní komunikace, pustil plynový pedál a sešlápl brzdu (byl zaznamenán reakční čas). [2]

Při měření reakčního času byla zároveň stanovena míra viditelnosti objektu na komunikaci při jednotlivých barevných přechodech pomocí stupnice od 1 do 10 (1-5 je nedostatečně viděn, 6 dostatečně viděn, 7 dobře viděn...)



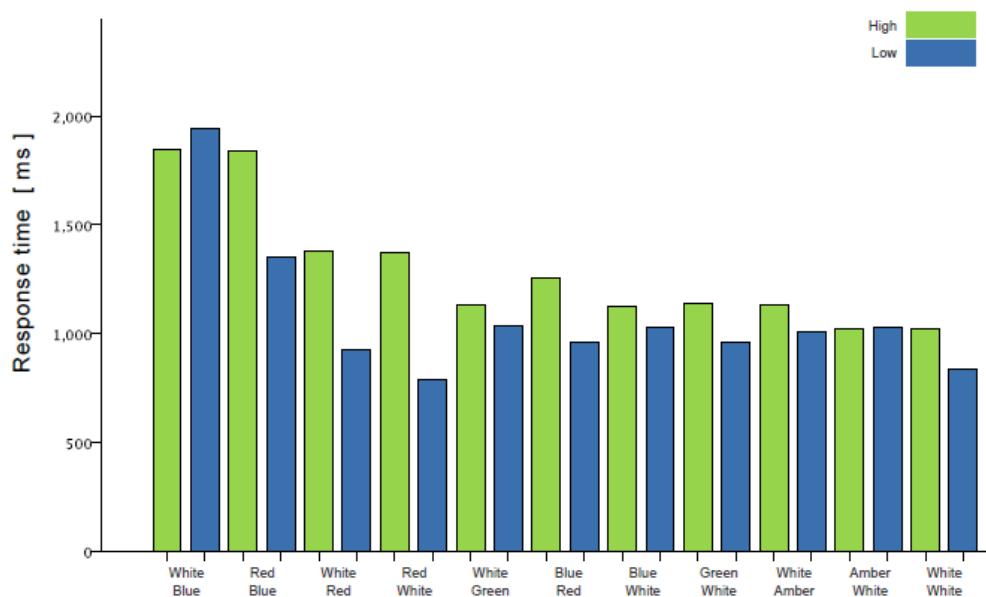
Obr. 2 Model pozemní komunikace v měřítku 1:20 [2]

Jako testovací subjekty byli vybráni zaměstnanci univerzity v TU Eindhoven a to 16 mužů a 11 žen. Před měřením na modelu pozemní komunikace byly podrobeny testy na oční vady (všichni splnili podmínky testu).

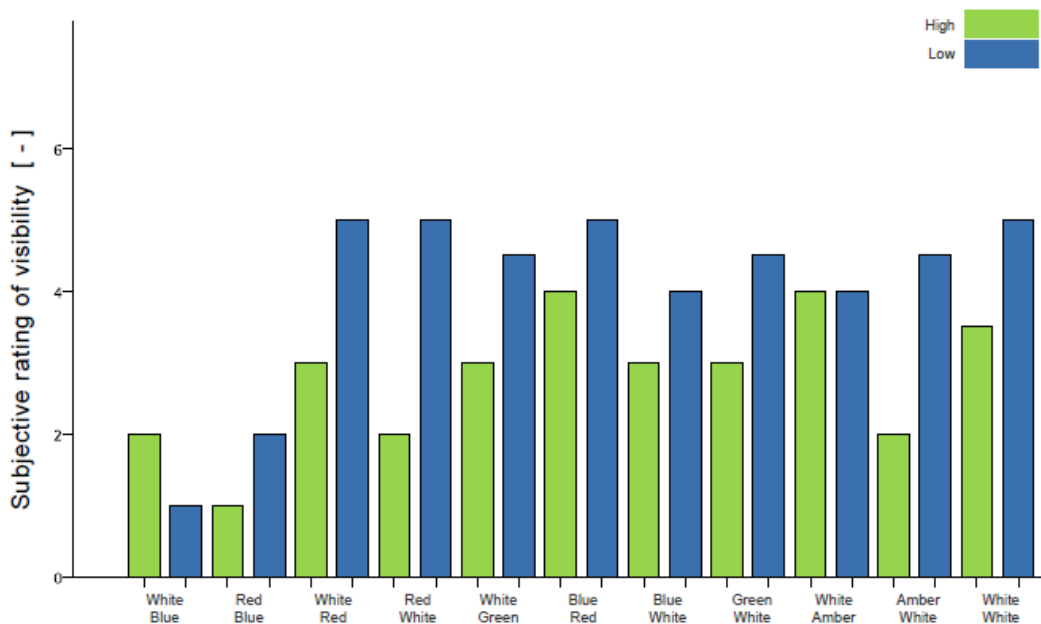


Obr. 3 Testovací brýle se stínítky pro měření reakč. času na modelu pozemní komunikace VO [2]

2.1.1 Výsledné reakční časy



Obr. 4 Střední reakční časy pro jednotlivé přechody barev emitovaného světla pomocí LED [2]



Obr. 5 Střední subjektivní hodnocení viditelnosti objektu na modelu pozemní komunikace VO [2]

Podíváme-li se do Obr. 4, kde zelenými sloupci jsou znázorněny střední reakční časy pro třídu osvětlení P3 a modrými sloupci střední reakční časy třídy osvětlení M3, můžeme vidět, že nejhorší reakční čas je při přechodu z bílého světla do modrého (pro třídu osvětlení M3) s reakčním časem 1880 ms, který je než více než dvojnásobný času z přechodu bílé do bílé. [2]

Dále lze poznamenat, že přechod barvy světla z bílé do jakékoliv testované spektrální barvy, má delší reakční čas než přechod ze spektrální barvy do bílé. Porovnání střední hodnoty reakčního času všech barevných přechodů s třídou osvětlení M3 (1250 ms) se střední hodnotou reakčního času všech barevných přechodů s třídou osvětlení P3 (980 ms) vyplývá, že reakční čas pro nižší hladiny osvětlenosti je značně kratší (o 270 ms) než pro hladiny vyšší. Stejná situace nastává při porovnání střední hodnoty subjektivního hodnocení viditelnosti objektu pro obě hladiny osvětlenosti. Pro nižší hladiny osvětlenosti je střední hodnota viditelnosti objektu značně vyšší (lépe viditelné) než pro vyšší hladiny osvětlenosti. Nejhorší střední subjektivní hodnocení má přechod světla z bílé do modré barvy, který následuje přechod z barvy červené do modré. [2]

Při porovnání středního reakčního času přechodu barvy z bílé do bílé s reakčními časy všech testovaných barevných přechodů spektrálních barev bylo zjištěno, že střední reakční čas přechodu barvy z bílé do bílé je značně kratší, než střední reakční čas přechodu spektrálních barev (rozdíl 250 ms). [2]

Přechod z bílé do spektrální barvy (kromě modré a červené) má za následek delší brzdovou dráhu o 10% (vlivem delšího reakčního času). Přechod z bílé barvy do modré a bílé do červené má za následek prodloužení brzdové dráhy o 47% !

2.2 Vliv stmívání na viditelnost objektů na pozemní komunikaci

Díky širokému regulačnímu rozsahu světelného toku LED svítidel se v praxi uplatňuje stmívání veřejného osvětlení na pozemních komunikacích. Bohužel velice často se stává, že stmívání soustavy VO není provedeno v souladu s třídami osvětlení dle ČSN EN 13201-2. Zásadní chybou při stmívání je nevypracování nového zařídování dle ČSN CEN/TR 13201-1 při změně vstupních parametrů (intenzita provozu a hladina okolní jasu).

V současnosti neexistuje aktuální studie zabývající se vlivem stmívání LED svítidel na zrakový výkon uživatele na pozemní komunikaci. Bylo by vhodné stanovit úroveň viditelnosti kritického detailu pro jednotlivé třídy osvětlení, jejichž změna třídy byla vyvolána změnou intenzity provozu a změnou okolního jasu. Na základě změny viditelnosti kritického detailu lze určit vliv stmívání na účastníka provozu (řidiče). [3]

Výpočet úrovně viditelnosti kritického detailu VL (visibility level) [3]

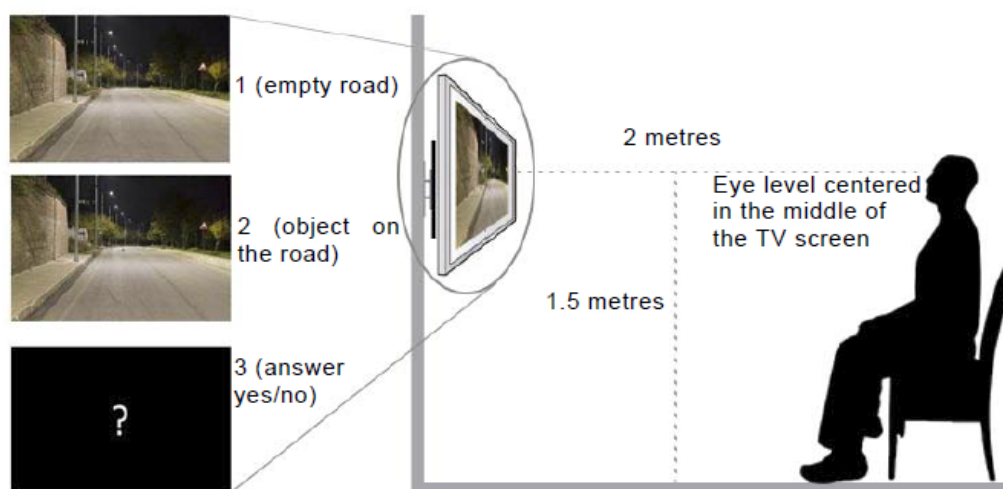
$$VL = \frac{\Delta L_{actual}}{\Delta L_{th}} \quad (1)$$

kde ΔL_{actual} ... je rozdíl jasu kritického objektu a pozadí (cd.m^{-2})

ΔL_{th} ... je prahový odchylka jasu (cd.m^{-2})

Velikost vyhodnocovaného kritického detailu je 20x20 cm. Tato velikost je použita ze základů a doporučení pro osvětlování pozemních komunikací (CIE 2010). Tento kritický detail je ve skutečnosti Lambertův povrch s odrazivostí 0,2 (dle standardu CIE 2010). Pro tuto hodnotu odrazivosti kritického detailu je stanovena minimální úroveň viditelnosti kritického detailu $VL = 2,22$. Bylo zjištěno, že od hodnoty $VL = 1$ se kritický detail jeví již jako silueta. [3]

Bylo provedeno experimentální měření (v měřítku), kdy byla testovanému subjektu nejprve po dobu 2 vteřin ukázána prázdná komunikace, následně na dobu 0,2 vteřin byla ukázána komunikace s kritickým detailem. Testovaný subjekt měl za úkol říci, zda na druhém snímku viděl kritický detail. Obdobně bylo postupováno pro zbylé třídy osvětlení. Testovaný subjekt seděl před obrazovkou ve vzdálenosti 2 metrů a rovina jeho oka se nacházela ve výšce 1,5 metru. [3]



Obr. 6 Experimentální měření viditelnosti kritického detailu na pozemní komunikaci [3]

Testovacími subjekty byly osoby ve věku 25 až 35 let (18 mužů a 12 žen). Před započítím experimentálního měření byl proveden test zraku pro vyloučení očních vad. Nikdo z testovaných subjektů neměl žádné oční vady. [3]

Tab. 2 Minimální hodnoty VL pro jednotlivé třídy osvětlení [3]

	80 %	90 %	100 %
M2	2.5	5.5	8.5
M3	2.5	4.5	7.5
M4	2.5	3.5	7.0

V Tab. 2 můžeme vidět hodnoty VL pro jednotlivé třídy osvětlení v závislosti na procentuální viditelnosti kritického detailu (80-100%). Bylo zjištěno, že objekty s hodnotou VL větší než 7 je vidět v 100% případech. Při zvýšení třídy osvětlení až na M2 roste hodnota VL (pro 100% viditelnost) až k hodnotě 8. Pro 90% viditelnost kritického detailu byla stanovena velikost VL v rozmezí 3,5-5,5. Opět

se zvyšující se třídou osvětlení velikost parametru VL roste. Pro poslední údaj tabulky, kdy 80% testovaných subjektů kritický detail vidělo, byla velikost VL pro všechny třídy osvětlení stanovena na 2,5. [3]

2.2.1 Výpočet úrovně viditelnosti kritického detailu VL pro pohybujícího se účastníka

Při výpočtu viditelnosti kritického detailu by měl být brán v potaz pohyb pozorovatele (řidiče vozidla) místo statického měření jasů ze vzdálenosti 60 metrů před měřenou komunikací. Je důležité, aby osvětlovací soustava VO poskytovala takové světelně-technické parametry, aby řidič byl schopen zastavit v bezpečné vzdálenosti. Výpočet bezpečné vzdálenosti (SD – safe distance) zastavení vozidla vypočteme z rychlosti při zatřídování komunikace pomocí vztahu [3]:

$$SD = u \cdot t_0 + \frac{u^2}{2 \cdot g \cdot (f \pm s)} \quad (2)$$

kde u ... je rychlost pohybu vozidla před začátkem brzdění ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

t_0 ... je reakční čas (s)

f ... je odpor mezi pneumatikou a povrchem vozovky (-)

g ... je tíhové zrychlení ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

s ... je sklon komunikace (-)

Tento vztah pro SD je dán dle CIE 88:2004 a je složen z reakční vzdálenosti (uražená vzdálenost mezi časem kdy řidič spatřil kritický detail a šlápnul na brzdový pedál) a brzdné vzdálenosti. Pro třídu osvětlení M2 (nominální rychlost 90 km/h) je velikost bezpečné brzdné vzdálenosti na suché komunikaci cirká 78 metrů. [3]

Při stmívání, kdy dochází ke změně třídy osvětlení např. z M2 na M3 a následně z M3 na M4 nesmí poklesnout zrakový výkon účastníka provozu. Pro zjištění případné změny ve zrakovém výkonu uživatele, je nutné pro každou třídu osvětlení změřit jas povrchu vozovky a jas pozadí ze vzdálenosti 78 metrů, která odpovídá bezpečné vzdálenosti zastavení vozidla pohybující se rychlostí 90 km/h.

Při vyhodnocování změn ve viditelnosti kritického detailu byla velikost uvažovaného kritického detailu 0,2. [3]

Tab. 3 Změny ve viditelnosti kritického detailu pro třídy osvětlení M2, M3, M4 [3]

M2	1	2	3	4	5	6	M3	1	2	3	4	5	6	M4	1	2	3	4	5	6
10	8.0	10.5	11.0	10.5	8.5	7.0	10	5.5	8.0	9.5	9.0	7.5	7.0	10	4.5	7.0	8.5	8.5	7.0	6.0
9	7.5	10.5	11.0	9.5	8.0	7.5	9	4.5	8.0	9.5	9.0	7.0	6.5	9	4.5	6.5	8.0	8.0	6.5	5.5
8	7.0	10.0	11.0	9.5	7.5	6.0	8	4.5	7.0	8.0	7.5	6.0	6.0	8	4.0	6.5	7.5	7.5	5.5	5.0
7	7.0	9.5	10.0	8.0	6.0	5.5	7	4.5	7.0	7.5	7.0	5.0	5.0	7	4.0	6.0	6.5	6.5	5.0	4.5
6	6.0	8.0	8.5	8.5	6.0	5.0	6	4.0	6.0	6.5	7.0	4.0	4.0	6	3.5	5.5	5.5	5.5	5.0	4.0
5	5.5	7.0	7.5	7.5	5.5	5.0	5	2.5	5.0	5.0	5.5	3.5	3.5	5	3.0	4.5	5.0	4.5	4.0	3.0
4	4.0	6.0	6.5	7.0	5.5	5.5	4	2.5	3.5	3.5	4.0	3.0	2.5	4	2.5	3.5	4.0	4.5	3.5	3.0
3	3.0	6.0	6.0	5.5	6.0	4.0	3	2.5	4.0	2.5	3.0	2.5	4.5	3	2.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.5
2	4.5	6.0	6.5	6.5	7.0	7.0	2	4.0	6.0	5.0	3.0	3.5	5.0	2	3.0	4.5	4.0	3.5	4.0	4.5
1	7.5	9.0	8.5	7.0	7.5	7.5	1	6.0	8.0	4.0	6.0	5.0	7.0	1	5.5	7.0	6.5	5.5	5.5	6.5

Target detection rates

100%	90%	80%
------	-----	-----

Pozn. k Tab. 3:

Hodnoty VL, které jsou viděny všemi pozorovateli jsou v bílých buňkách. Ve světle šedých buňkách jsou hodnoty VL, které jsou viděny 90% účastníků a ve tmavě šedých jsou hodnoty VL, které vidí 80% účastníků.

Hodnota VL (z Tab. 3) musí být rovna nebo větší hodnotě 2,5 aby byla viděna 80% účastníků provozu. Tato hodnota byla stanovena na základě experimentálního měření.

Provedením experimentálního měření bylo zjištěno, že hodnota VL byla při stmívání osvětlovací soustavy viděna 80% účastníků. Tato hodnota je v přijatelných mezích a lze tedy říci, že stmívání až o dvě třídy osvětlení neovlivňuje dramaticky zrakový výkon účastníka provozu pohybující se konstantní rychlostí.

3 LED svítidla ve veřejném osvětlení

Teoretické vlastnosti světelných diod (LED), klíčové výhody a nevýhody byly popsány v bakalářské práci, která se zaměřovala na energetickou náročnost veřejného osvětlení. Specifické parametry a vlastnosti LED zdrojů jsou v široké odborné veřejnosti dobře známy. Avšak při dalších výzkumech LED zdrojů a jejich praktických aplikacích byly potvrzeny a odhaleny nové skutečnosti, které si je nutno rozebrat. Mezi nejzásadnější problémy patří: nelinearita měrného výkonu při stmívání svítidla, náběhový proud, problémy s účinníkem a zkreslením síťové sinusovky, korektní směřování světelného toku a rozdílná životnost jednotlivých komponentů LED. [1]

V následujících kapitolách budou jednotlivé problémy rozebrány a budou navrženy možné způsoby řešení či omezení problémových parametrů. Z praktického hlediska je největším problémem při samotných realizacích osvětlovacích soustav VO především náběhových proud LED zdroje a rozdílná životnost komponentů LED svítidla. Zvýšený náběhový proud způsobuje problémy v rozvodných zařízeních, kdy zapříčiňuje výpadek jistícího prvku, a tudíž nefunkčnost dané sekce osvětlovací soustavy.

Rozdílná životnost jednotlivých komponentů LED svítidla zapříčiňuje degradaci světelného toku či celkové selhání svítidla. Je nutné vzít v úvahu životnost jednotlivých komponentů svítidla a zvážit jejich výměnu (je-li to možné) či výměnu celého svítidla.

3.1 Problematika nelinearity parametrů LED při stmívání

Postupným zaváděním LED technologie do aplikací veřejného osvětlení dochází k razantnímu poklesu spotřeby elektrické energie. V současné době se veřejné osvětlení podílí na celkové spotřebě elektrické energie v Evropě cca 14%. V budoucnu, kdy budou osvětlovací soustavy veřejného osvětlení realizovány pouze pomocí LED zdrojů, klesne tento podíl na celkové spotřebě elektrické energie na pouhé 4%. V případě inteligentního řízení LED svítidla (tj. dynamické stmívání na základě okolního provozu) můžeme dosáhnout další úspory na spotřebě elektrické energie. [13]

Revize normy ČSN CEN TR 13201-1 pro zařídování veřejného osvětlení nám jednak značně zjednodušila zařídování do jednotlivých tříd osvětlení, a také umožnila snadnou změnu třídy osvětlení při stmívání (za podmínky že to okolní jas a hustota provozu umožní). Změna intenzity provozu a okolního jasu jsou jediné dva proměnlivé parametry během provozu VO, které nám umožňují danou osvětlovací soustavu stmívat. Nikdy se nesmí stmívat pod parametry okolního jasu či intenzity provozu, které dané třídě osvětlení náleží. [13]

Existují dva principy stmívání LED svítidel VO a to buďto autonomní, kdy jsou předřadníky od výroby nastaveny spínací časy, anebo dálkové řízení realizované pomocí Power-Line, WiFi, GSM či jiné technologie. Současným problémem LED svítidel je, že při stmívání se neuvažuje nelinearita jeho parametrů. Rovněž výpočetní programy pro výpočet osvětlení (Relux, Dialux a další) neuvažují nelinearitu mezi světelným tokem a příkonem LED svítidla. Tato skutečnost je způsobena záměrně nevědomým či vědomým postojem výrobců LED svítidel, kteří se prozatím zdráhají tento problém detailněji řešit. Ze strany výrobců LED svítidel tedy čelíme nedostatku informací ohledně nelinearity

světelně-technických parametrů při stmívání svítidla. Ani odborná veřejnost v současnosti nemá dostatečné informace ohledně nelinearity LED svítidel při jejich stmívání. [13]

V budoucnu by měl vzniknout jednotný informační systém, kdy každý výrobce LED svítidel bude uvádět charakteristiky (vždy pro konkrétní kombinaci LED modulu a driveru), které budou stanovovat míru nelinearity parametrů LED svítidel a pro každou hodnotu příkonu, tak bude možné odečíst přesné hodnoty světelného toku a příkonu. Takto korektní parametry povedou k přesnějším ukazatelům plošné příkonové hustoty a spotřeby elektrické energie, které jsou součástí normy ČSN EN 13201-5 pro stanovení energetické náročnosti osvětlovacích soustav veřejného osvětlení.

V následujících řádcích bude rozebrána především nelinearita mezi světelným tokem a příkonem. Avšak pro účely výzkumu byly měřeny i ostatní světelně-technické parametry pro získání celkové představy o chování LED svítidla při jeho stmívání. Proto tedy byly měřeny změny teplot chromatičnosti, teploty PN přechodu, teplot uvnitř svítidla a na předřadníku. [13]

Parametry zkoumaných svítidel pro účely ověření nelinearity parametrů

Pro účely zkoumání nelinearity světelně-technických parametrů LED svítidel byla vybrána dvě svítidla. První svítidlo bylo pro účely testování napájeno nejprve předřadníkem s proudem 500 mA a poté předřadníkem s proudem 700 mA (nominální proud). Celkově byly tedy zkoumány 3 vzorky viz Tab. 4. [13]

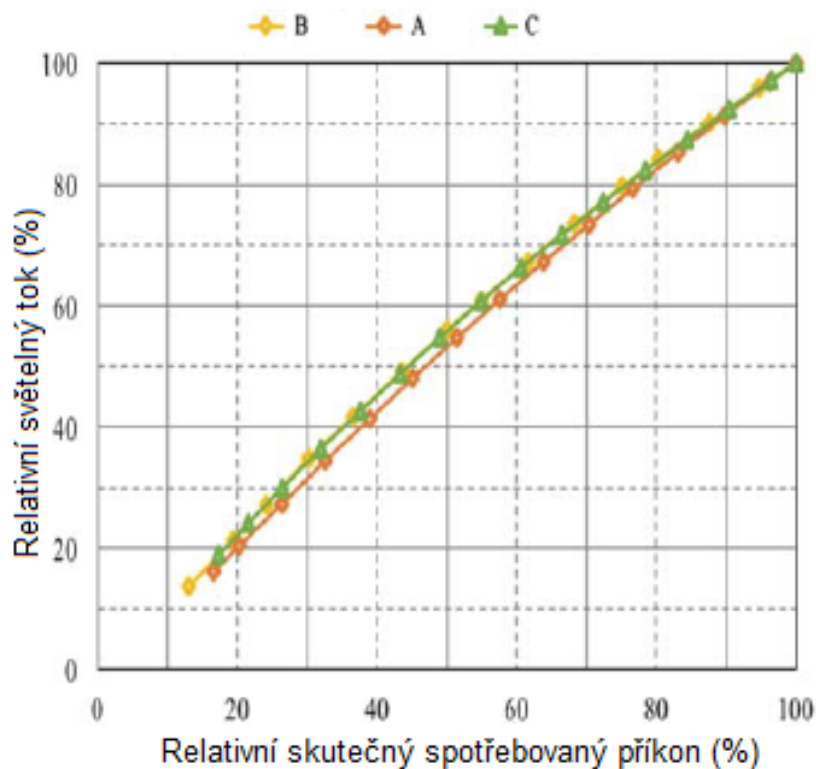
Tab. 4 Vstupní parametry testovaných LED svítidel [13]

Vzorek (-)	Počet LED (-)	Proud (mA)	Nominální příkon svítidla (W)	Skutečný spotřebovaný příkon (W)
A	64	500	150	99,16
B	64	700	150	141,94
C	66	700	150	140,2

Každé testované svítidlo bylo vybaveno protokolem 1-10 V pro jeho stmívání. Stmívání bylo prováděno s krokem 0,5 V v celém rozsahu protokolu 1-10 V. Pro zvolené stmívací body (příkony) byly naměřeny hodnoty: výstupního světelného toku, skutečného spotřebovaného příkonu, účinníku, zkreslení sinusového signálu, teploty PN přechodu, driveru a teploty chromatičnosti. [13]

Výsledky nelinearity světelně-technických parametrů zkoumaných svítidel

Z první závislosti, kterou můžeme vidět na Obr. 7 lze usuzovat, že průběh relativního měrného výkonu má nelineární charakter (v rozporu s teoretickou lineární závislostí měrného výkonu), avšak je velmi blízký přímkové závislosti. Dále můžeme vidět, že průběhy relativního měrného výkonu vzorků B a C se značně překrývají a jsou vyšší než u vzorku A. Požadavek 50% relativního světelného toku odpovídá 46,9% relativního skutečného příkonu pro vzorek A, 44,3% pro vzorek B a 44,4% pro vzorek C.



Obr. 7 Závislost relativního světelného toku na relativním skutečném spotřebovaném příkonu [13]

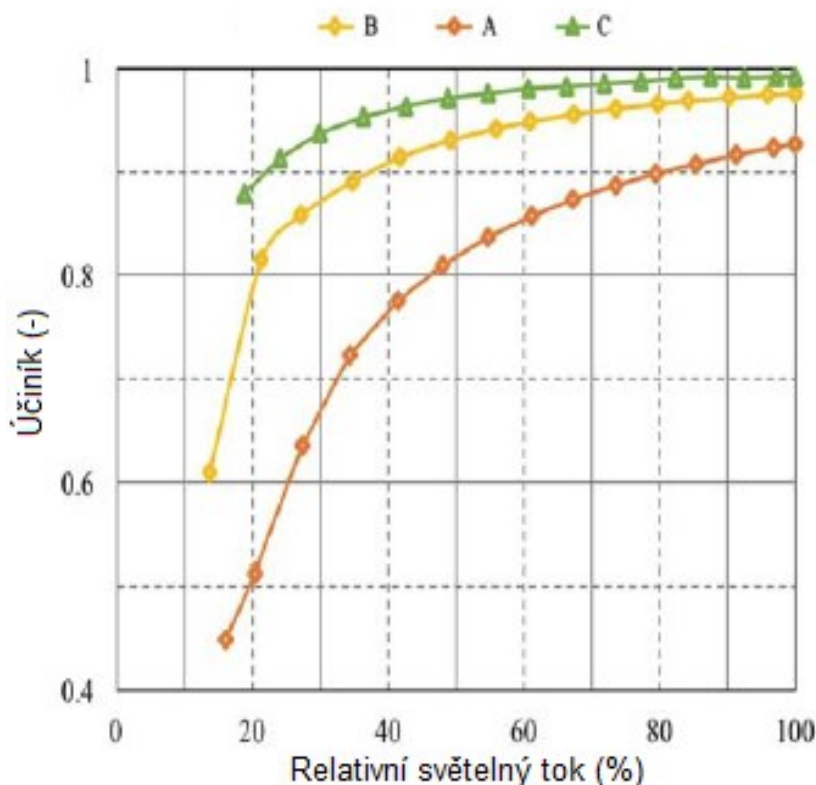
Dle teoretických poznatků by se dalo předpokládat, že vzorek A bude mít vyšší relativní měrný výkon než vzorky B a C, díky tomu, že jednotlivé LED moduly jsou buzeny driverem s menším proudem (500 mA). Dle závislosti na Obr. 7 tomu tak není, a to z prostého důvodu. Protože LED drivery o jmenovitém výkonu 700 mA dodávají naprosto stejný proud jako driver o jmenovitém výkonu 500 mA, avšak v případě 700 mA driveru je jeho relativní zatížení k jmenovité hodnotě proudu driveru nižší než u vzorku A. Driver 700 mA má v důsledku toho nižší teplotu, a i vyšší účinnost než driver u vzorku A.[13]

Dále se dle teorie LED technologie předpokládalo, že vzorek C s vyšším počtem LED modulů (o 2 více než u vzorku B) bude mít vyšší relativní měrný výkon. Dle Obr. 7 tomu tak není a příčinou je opět napájecí driver. Oba drivery (pro vzorek B i C) jsou stejné, avšak kombinace nižšího počtu LED modulů a vyššího budicího proudu na jeden LED modul u vzorku B dopomáhají k vyšší účinnosti napájecího driveru pro vzorek B. Je tedy nutné konstatovat, že každý LED driver se pro různé typy a příkony LED modulů chová rozdílně. Proto je nezbytné všechny LED moduly prozkoušet vždy s konkrétními LED drivery, které společně tvoří celé LED svítidlo. [13]

Při návrhu osvětlovací soustavy VO s LED svítidly je tedy nutné zvážit či bude soustava stmívána či nikoliv, jelikož některé předřadníky jsou účinnější pro stmívání a některé zase pro jmenovitý provoz.

Na Obr. 8 můžeme vidět závislost účinníku na relativním světelném toku opět pro stejné testovací vzorky (stejná kombinace LED modulů a předřadníků). Na první pohled je zřejmé, že čím menší je

relativní světelný tok (menší vstupní příkon předřadníku), tím je horší i účinek celého svítidla. Pro nejnižší nastavenou hodnotu relativního světelného toku má nejhorší účinek testovaný vzorek A. [13]

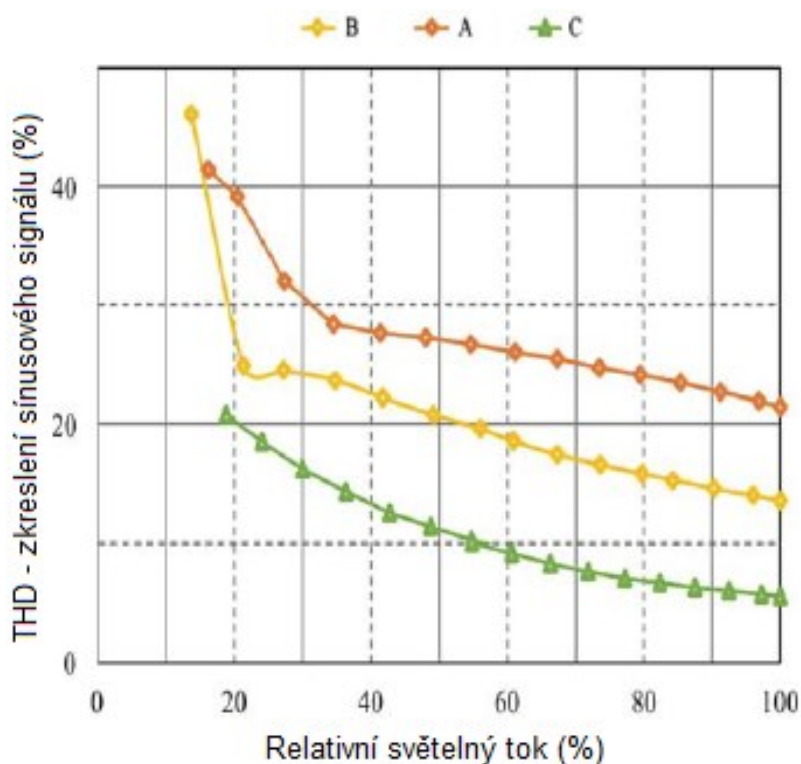


Obr. 8 Závislost účinku na relativním světelném toku [13]

Vzorek A má nejnižší účinek, jelikož má nejmenší poměr počátečního příkonu (nejnižší nastavený) k nominálnímu příkonu LED driveru. Tato skutečnost vede k dalším problémům, kterých se dopouštějí samotní výrobci svítidel. Je zaběhnutou praxí, že pro daný typ svítidla se vyrábějí například 3-4 typy LED driverů s nominálním proudem v rozmezí od 200 mA do 700 mA. Avšak výkonová řada LED modulů je mnohem obsáhlejší, takže se velice často stává, že pro výkon daného LED modulu je nutné použít mnohem silnější LED driver, což ve výsledku vede k značně nižší hodnotě účinku. V praxi se pak může stát, že napájecí síť veřejného osvětlení bude silně zatížena jalovou složkou proudu a bude nutné ji dalšími prostředky kompenzovat (kondenzátorová skupinová kompenzace). Je nutné uvést, že všechny testované vzorky (A, B i C) mají při nominálním výkonu účinek větší než 0,9. Dále je nutné zmínit, že čím větší je rozsah vstupního napětí (mnohdy 110-230 V efektivních), tím horší je i účinek a zkreslení sinusového signálu. Padesátiprocentní velikosti relativního světelného toku odpovídá účinek 0,81 pro vzorek A, 0,93 pro vzorek B a 0,97 pro vzorek C. Vzorek C s 700 mA LED driverem a 66 LED zdroji má tedy nejlepší účinek z testovaných vzorků. [13]

Na Obr. 9 můžeme vidět závislost zkreslení sinusového signálu (THD) v závislosti na změně relativního světelného toku. Zkreslení sinusového signálu způsobené odebíraným proudem LED driveru, může zapříčinit přehřívání elektrických komponentů. Jelikož LED svítidla nevytvářejí lineární zátěž, je nutné se zkreslením sinusového signálu počítat především při stmívání VO. V praxi je akceptovatelná 20% velikost THD (hodnoty pod 10% jsou brány jako velmi dobré). Padesátiprocentní velikost relativního světelného toku odpovídá hodnotě 27,1% THD pro vzorek A, 20,6% pro vzorek B

a 11,1% pro vzorek C. Vzorek A má nejnižší hodnotu THD (nejnižší průměrnou hodnotu, jelikož u vzorku B vyskočila pro nejnižší hodnotu toku značně vyšší hodnota THD, která převyšuje A). [13]



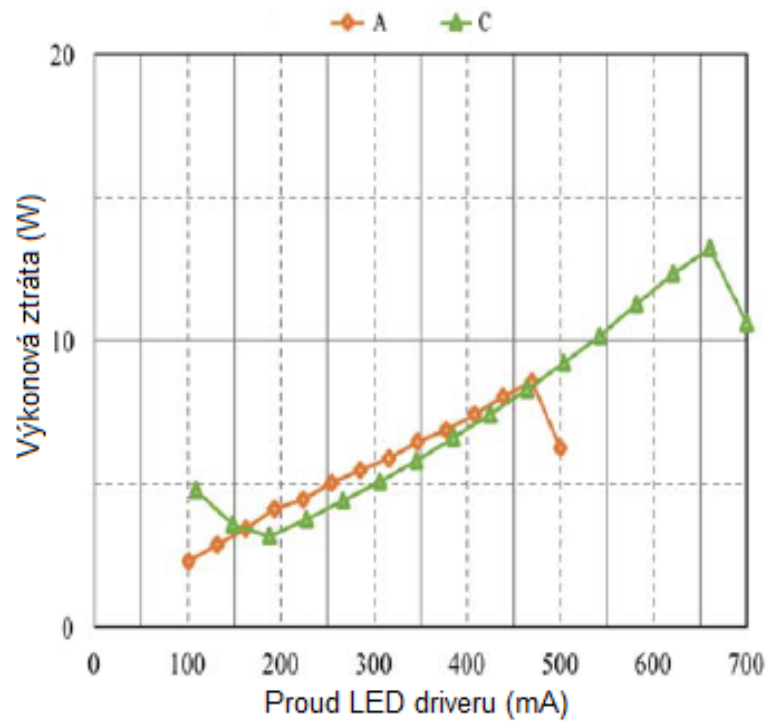
Obr. 9 Závislost THD na relativním světelném toku [13]

V případě stmívání vzorku A by bylo vhodné ho napájet silnějším LED driverem (700 mA) za účelem snížení hodnoty THD.

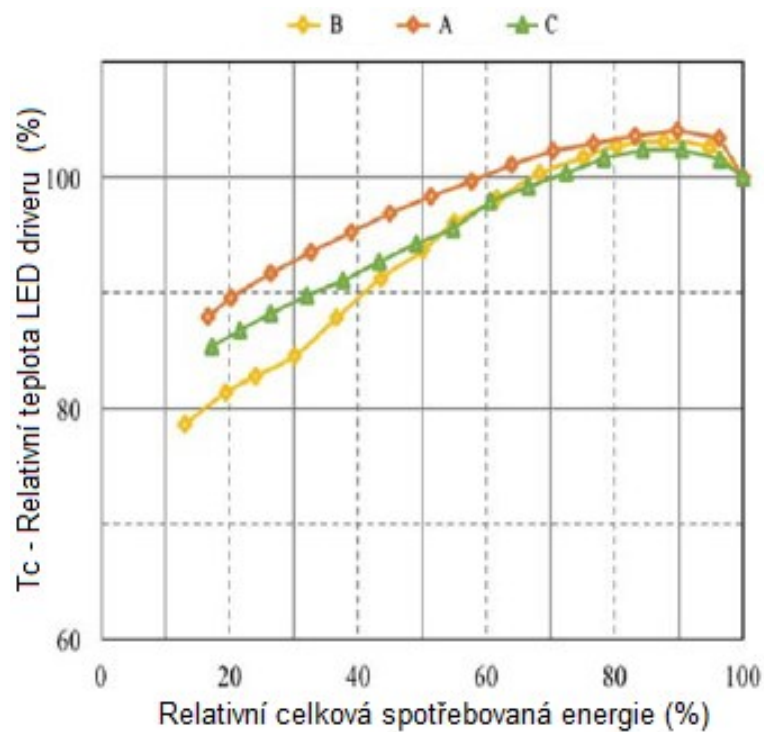
Účinnost LED driveru hraje klíčovou roli v problematice jeho tepelné zátěže a v zásadě definuje jeho spolehlivost. LED drivery s vysokou účinností se méně zahřívají a umožňují snadnější řízení teploty předřadníku. Životnost a spolehlivost elektrických komponentů LED driveru se vzrůstající teplotou prudce klesá. Předřadníky s vysokou účinností mají o mnohem vyšší životnost a spolehlivost než předřadníky s nízkou účinností. Všechny 3 testované vzorky (A, B i C) mají LED drivery s účinností vyšší než 90%. [13]

Podíváme-li se na Obr. 10, který vyjadřuje závislost činných výkonových ztrát na velikosti proudu LED driveru, můžeme vidět, že ve společném proudovém rozsahu vzorku A (do 500 mA) mají oba drivery srovnatelné výkonové ztráty. Vzorek B zde nebyl testován, jelikož má stejný driver jako vzorek C. [13]

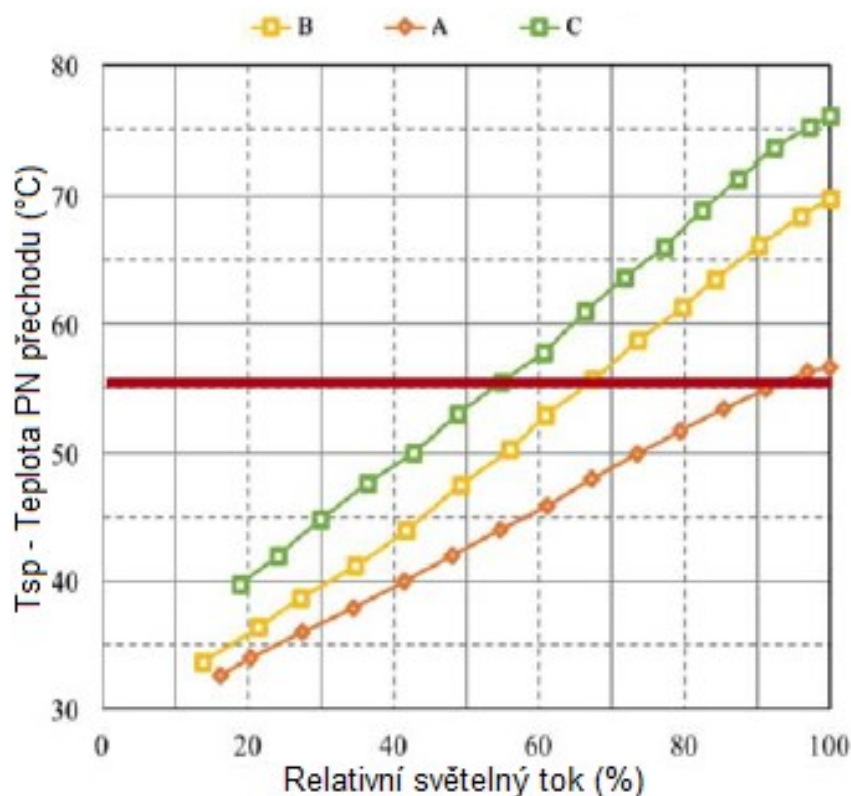
Na Obr. 11 můžeme vidět, že se snižující se hodnotou relativní celkové spotřebované energie klesá teplota LED driveru. Teplota LED driveru klesá, jelikož je předřadník méně zatěžován (menšímu příkonu odpovídají menší výkonové ztráty). Teplotní charakteristiky jednotlivých vzorků (A, B i C) mají rozdílný tvar, jelikož oba předřadníky napájí jinou kombinaci LED modulů. Nejnižší teplotu má LED driver u vzorku B, jelikož má tento vzorek stejný počet LED modulů jako vzorek A, avšak je napájen silnějším 700 mA předřadníkem. [13]



Obr. 10 Závislost výkonových ztrát na velikosti procházejícího proudu LED driverem [13]



Obr. 11 Závislost relativní teploty LED driveru na relativní celkové spotřebě energie [13]



Obr. 12 Závislost teploty LED modulu (PN přechodu) na relativním světelném toku [13]

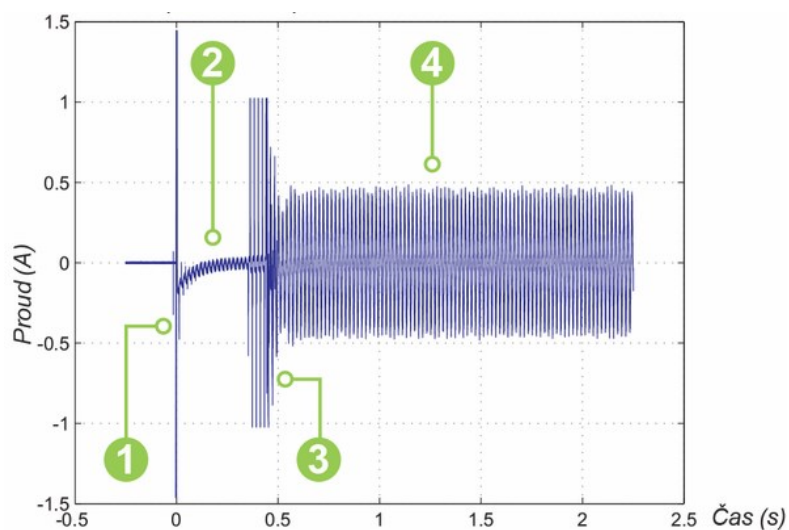
Na Obr. 12 můžeme vidět závislost teploty PN přechodu na relativním světelném toku. Na první pohled si lze všimnout mírně nelineární závislosti teploty PN přechodu na relativním světelném toku. U vzorku A nebyla překročena ideální teplota 55 °C (označena vodorovnou červenou čarou). Lze tedy konstatovat, že driver pro vzorek A nepovede ke zkracování životnosti LED modulu. Úplně jiná situace nastane u vzorku B a C. U vzorku B (při 68%) a C (55%) dochází k překročení ideální teploty PN přechodu, což povede k razantnímu zkrácení životnosti LED modulů vzorku B i C. [13]

U všech testovaných vzorků byly také provedeny měření stálosti teploty chromatičnosti. Změna teploty chromatičnosti u všech testovaných vzorků byla minimální. Pro vzorek A byla naměřena změna 2,3% od hodnoty uváděné výrobcem, pro vzorek B to byly 2,7% a pro C 4,1%. [13]

3.2 Problematika náběhového proudu LED v praxi

Náběhový (nárazový) proud LED svítidel způsobuje v praxi nemalé problémy. Náběhový proud je způsoben zapnutím LED svítidla, přesněji jeho předřadníku (driveru). Velikost tohoto nárazového proudu dosahuje až 250násobku jmenovitého proudu (Obr. 13, bod 1). Takto velký nárazový proud je způsoben nabíjením kompenzačních kondenzátorů LED předřadníku. Tato proudová špička je nejvyšší při úhlu napětí 90° (tj. maximální hodnota 325 V). V případě, že je LED svítidlo zapnuto při nulovém úhlu napětí, je jeho nárazový proud podstatně nižší. Po nárazovém proudu dochází ke startu předřadníku (Obr. 13, bod 2), který trvá od 100 ms po 1,5 sekundy. V úseku startu předřadníku je odebíraný proud nižší než jmenovitý proud předřadníku. Při rozsvícení LED modulů (Obr. 13, bod 3) odebírá předřadník

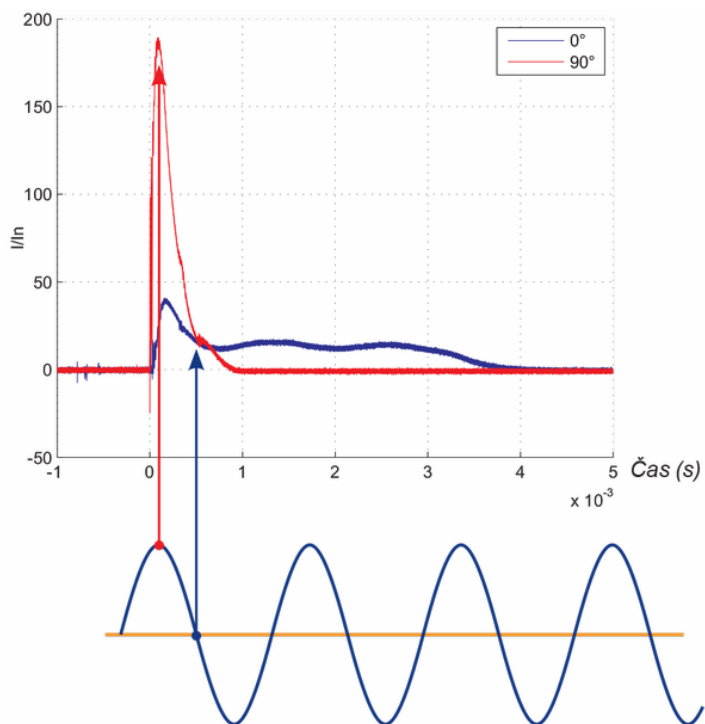
proud o velikosti cca dvojnásobku proudu jmenovitého. Po této části klesne amplituda proudu na úroveň jmenovitého proudu předřadníku (Obr. 13, bod 4). [14]



Obr. 13 Závislost náběhového proudu na čase [14]

Pozn. k Obr. 13:

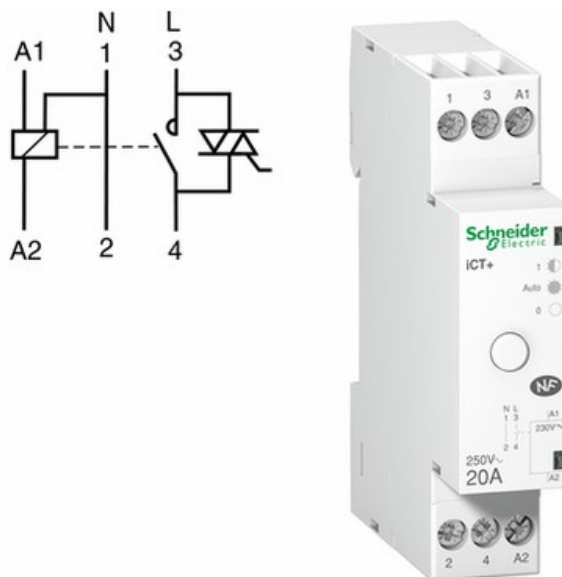
- (1) Špička proudu při zapnutí
- (2) Start předřadníku
- (3) Rozsvícení LED modulů
- (4) Ustálený provoz předřadníku



Obr. 14 Závislost náběhového proudu na čase pro dva úhly napětí [14]

Výše popsáný náběhový proud LED svítidel způsobuje v praxi, kdy je na jeden jisticí prvek zapojeno až několik desítek svítidel, výpadky jisticích prvků (jističů). Zobrazení rozdílů ve velikosti násobku náběhového proudu při úhlu napětí 90° a 0° , můžeme vidět na Obr. 14.

Toto nechtěné vybavení jističů lze řešit například pomocí hybridního stykače a impulzního relé, které spínají zátěž při úhlu napětí 0° . Tento hybridní systém kombinuje polovodičové spínání (triak) a mechanický kontakt. Jeden z takovýchto hybridních stykačů (od firmy Schneider) můžeme vidět na Obr. 15. Zátěž tohoto hybridního stykače může být až 3600 W. Jeho životnost je 5 miliónů spínacích cyklů.



Obr. 15 Hybridní stykač od firmy Schneider [14]

3.3 Problematika chlazení a směřování světelného toku LED svítidel

Dalším nezanedbatelným problémem dnešních LED svítidel je chlazení a distribuce světelného toku z polovodičového přechodu LED zdroje. Princip směřování světelného toku z PN přechodu LED byl popsán v bakalářské práci zabývající se energetickým auditem VO. Na každém LED modulu je umístěna optika z PMMA (Polymethylmethakrylát), která vytváří křivku svítivosti daného LED svítidla. Tato optika je tepelným izolantem, a proto je tedy nutné maximálně zefektivnit přenos tepla z PN přechodu přes tloušťku tištěného spoje. Neoptimalizovaný přechod tepla přes tištěný spoj vede k zvýšení teploty PN přechodu LED a k drastickému snížení jeho životnosti. [1]

V praxi se optimalizuje přenos tepla např. pomocí takzvaného „Cu fillings“, což jsou měděné kruhy umístěné v elektricky nevodivé vrstvě tištěného spoje, které zvyšují jeho součinitel přestupu tepla. Dále musí být korektně řešeno uchycení tištěného spoje na kostru svítidla, která slouží jako chladič. Musí se eliminovat velikost vzduchové mezery mezi tištěným spojem a hliníkovou konstrukcí svítidla. To se nejčastěji provádí buďto pomocí tepelně vodivé pasty nebo bez tepelně vodivé pasty, kdy je tištěný spoj natvrdo přišroubován na kostru svítidla.

Problematika směřování světelného toku z LED modulu (PN přechodu) je stále aktuálním problémem, který může vytvářet řadu problémů, od oslnění až po nízkou účinnost. Korektní tvarování PMMA hraje klíčovou roli pro získání žádané křivky svítivosti a omezení oslnění. Tloušťka optiky a její tvar hraje klíčovou roli v optické účinnosti celého LED svítidla. Je žádoucí, aby světelný tok procházel co nejmenší vrstvou PMMA a tvrzeného skla. Čím větší vrstvou tvrzeného skla a PMMA světelný tok prochází, tím nižší je optická účinnost celého svítidla.

V praxi se objevují také svítidla, jejichž LED moduly nejsou opatřeny optikou. Takovéto svítidlo pak velmi silně oslňuje. Znárodnění, jak moc oslňuje LED svítidlo bez optiky, můžeme vidět na Obr. 16. Jedná se o realizaci projektu nasvětlení chodníkové trasy lesoparku v obci Orlová. Vybrané svítidlo vlivem absence optiky oslňuje již ze vzdálenosti 15 metrů (při vodorovném úhlu pohledu pozorovatele).



Obr. 16 Nasvětlení chodníkové trasy lesoparku v obci Orlová – LED svítidlem bez optiky

3.4 Srovnání životnosti komponentů LED svítidla

Každé LED svítidlo se skládá z několika částí, jejichž životnost není totožná. Pro uvedení životnosti jednotlivých dílů LED svítidla bylo vybráno svítidlo od firmy Artechnic-Schreder. Jedná se o svítidlo řady Voltana se stupněm krytí IP66 (i elektrické části) a mechanickým namáháním IK08. [15]

Tab. 5 Srovnání životnosti dílčích komponentů LED svítidla [15]

Část LED svítidla	Životnost (h)	Poznámka
Tělo svítidla	175 200	20 let
LED moduly	100 000	25 let provozu
Předřadník (Driver)	28 000	7 let provozu
Optika LED modulů	175 200	Při pravidelném čištění
Difuzor svítidla	175 200	Při pravidelném čištění

Životnostní parametry z Tab. 5 nejsou volně přístupné na stránkách společnosti, ale byly poptány u světelného technika pracujícího u firmy Artechnic-Schreder. Jak je zřejmé z Tab. 5 tak svítidlo je koncipováno na dobu užívání cca 20 let, avšak všechny díly tuto životnost nemají.

Nejkratší je životnost předřadníku, která je akceleračními testy odhadována na cca 7 let. Nutno uvést, že dodávaný předřadník nemusí být provozován na jmenovitý výkon (použití silnějšího předřadníku na slabší výkonovou variantu svítidla). Životnost takto provozovaného předřadníku vlivem menšího tepelného zatěžování může být až o jednu třetinu vyšší.

Životnosti optiky LED modulů a difuzoru svítidla platí při intervalu čištění co 4 roky. Nutno podotknout, že vlivem stárnutí materiálu optiky z PMMA a difuzoru svítidla, dochází k mírnému poklesu účinnosti optické části svítidla.

Druhou nejnižší životnost mají LED moduly. Výrobce udává životnost 100 000 hodin (L80B10) při dodržení maximální provozní teploty. Přepočteno na roční dobu provozu VO, která je 4 000 hodin, to odpovídá 25 letem provozu. V praxi je to tato hodnota nereálná, jelikož životnost hliníkového korpusu je 20 let a v mnoha případech je svítidlo ještě tepelně přetěžováno, takže LED moduly oněch 100 000 hodin ani nevydrží.

Za dobu života svítidla (20 let) je tedy potřeba třikrát vyměnit předřadník, jehož cena je 1 000 Kč včetně DPH. Doba života (20 let) platí při dodržení intervalu čištění (včetně výměny předřadníku), který je stanoven na 4 roky.

4 Udržovací činitel – realita versus výpočty, nové přístupy

Udržovací činitel hraje zásadní roli při návrhu jakékoliv osvětlovací soustavy, ať již veřejného osvětlení nebo vnitřního osvětlení škol, průmyslových hal a dalších prostor. Největším problémem udržovacího činitele je jeho přehlížení v praxi, při konkrétních návrzích a měřeních stávajících osvětlovacích soustav. Velice často je aplikován postup, kdy udržovací činitel je odhadnut a nejsou vůbec brány v potaz světelně-technické parametry zvolených svítidel a charakter prostředí kde jsou svítidla nainstalována. Výsledkem takového postupu je buďto přesvětlená nebo poddimenzovaná osvětlovací soustava, která v žádném případě nesplní požadavky dotyčných norem, kterými jsou ČSN EN 13201-2 (pro VO) či ČSN EN 12464-1 (pro vnitřní prostory) a mnohé další normy (např. pro sportoviště a další specifické prostory).

V následujících odstavcích se budeme věnovat problematice volby správného udržovacího činitele pro veřejné osvětlení, která je z velké části totožná s volbou udržovacího činitele pro vnitřní prostory. Kromě chyb, kterých se dopouští projekční firmy při volbě udržovacího činitele při konkrétním návrhu osvětlovací soustavy, je řada nedostatků na straně norem, které se věnují volbě udržovacího činitele. Jedná se především o normu ČSN 36 0455 (volba udržovacího činitele pro veřejné osvětlení), případně CIE 154:2003, ze které právě norma ČSN 36 0455 čerpá.

Největšími nedostatky těchto norem je jejich zastaralost, která nerespektuje především lepší konstrukční parametry současných svítidel (především stupeň krytí IP) a přísnější předpisy na emise škodlivých látek a prachu v dotyčných oblastech. Tyto nedostatky mají za následek příliš nízkou hodnotu udržovacího činitele, a to vede k značnému přesvětlení osvětlovací soustavy VO v počátku uvedení do jejího provozu. Dalším nesporným nedostatkem těchto norem je nekorektní respektování světelně-technických vlastností současných LED svítidel. Hlavní problém tkví především v rozdílném způsobu uvádění životnosti současných LED modulů, což vede opět k značnému zkreslení velikosti udržovací činitele (MF). Všechny tyto problémové aspekty volby udržovacího činitele jsou rozebrány v následujících kapitolách s jejich možnými návrhy řešení.

4.1 Teoretický postup výpočtu udržovacího činitele pro osvětlovací soustavu VO

Při výpočtu udržovacího činitele osvětlovací soustavy VO vycházíme z následujícího vztahu pro vnitřní osvětlovací soustavu [4]:

$$f_M = f_{LLM} \cdot f_{LS} \cdot f_{LM} \cdot f_{RSM} \quad (3)$$

kde f_{LLM} ... je činitel stárnutí světelných zdrojů (Lamp luminous flux maintenance factor) (-)

f_{LS} ... je činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů (Lamp survival factor) (-)

f_{LM} ... je činitel znečištění svítidla (Luminaire maintenance factor) (-)

f_{RSM} ... je činitel znečištění povrchu místnosti (Luminaire maintenance factor) (-)

Pro výpočet udržovacího činitele osvětlovací soustavy VO je vztah (3) z předchozí stránky zjednodušen. A to tak, že v případě veřejného osvětlení neuvažujeme činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů a činitel znečištění povrchu místnosti. Činitel funkční spolehlivosti neuvažujeme, jelikož není možné akceptovat výpadek jediného svítidla. Při výpadku jediného světleného zdroje z řady zdrojů na pozemní komunikaci dochází k značnému narušení rovnoměrnosti osvětlení a porušení požadavku na rovnoměrnost osvětlení dle ČSN EN 13201-2. Proto tedy není možné uvažovat funkční spolehlivost při výpočtu MF veřejného osvětlení. Činitel znečištění povrchů se neuvažuje, jelikož při stárnutí povrchu asfaltu dochází naopak k zvyšování odrazných vlastností povrchu než je tomu u vnitřních prostorů. [5]

Dle výše popsaných zjednodušení má MF osvětlovací soustavy VO následující tvar:

$$f_M = f_{LLM} \cdot f_{LM} \quad (4)$$

Při výpočtu udržovacího činitele osvětlovací soustavy VO je vhodné dodržet následující postup [5]:

- 1. Volba svítidla** – volba konkrétního svítidla od vybraného výrobce se specifickými světelně-technickými parametry. Na základě technických parametrů zvoleného svítidla, především pak stupně krytí IP, určíme činitel znečištění svítidla MF.
- 2. Určení činitele znečištění svítidla** – dle Tab. 6 (z ČSN EN 36 0455) určíme na základě stupně krytí svítidla, pro námi zvolený interval čištění, hodnotu činitele znečištění svítidla. Jedná se o vratnou změnu (čištěním lze uvést svítidlo do původního stavu).

Tab. 6 Hodnoty činitele znečištění svítidla [5]

Stupeň krytí optické části svítidla	Znečištění ovzduší*	Hodnoty činitele znečištění svítidla v závislosti na délce intervalu čištění (roky)				
		1	1,5	2	2,5	3
IP 2x	Malé	0,82	0,8	0,79	0,78	0,78
	Střední	0,62	0,58	0,56	0,54	0,53
	Velké	0,53	0,48	0,45	0,43	0,42
IP 5x	Malé	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88
	Střední	0,9	0,88	0,86	0,84	0,82
	Velké	0,89	0,87	0,84	0,8	0,76
IP 6x	Malé	0,93	0,92	0,91	0,9	0,9
	Střední	0,92	0,92	0,91	0,9	0,9
	Velké	0,91	0,9	0,88	0,85	0,83

Pozn. *: Malé znečištění ovzduší – v blízkém okolí nejsou žádné zdroje znečišťujících látek (kouř a plyny). Odpovídá malé intenzitě provozu. Obytné a venkovské oblasti

Střední znečištění ovzduší – oblasti s mírným zdrojem kouře a prachu. Odpovídá střední až velké intenzitě provozu.

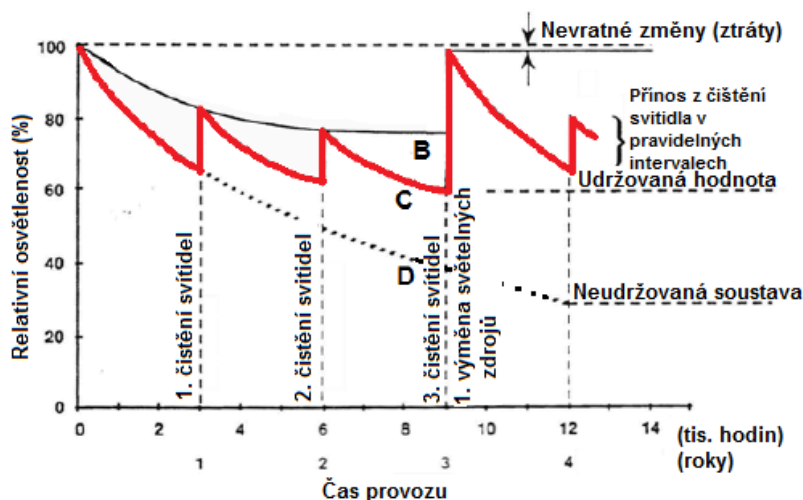
Velké znečištění ovzduší – Svítidla jsou vystavena oblakům kouře a prachu způsobené zdroji znečištění v blízkém okolí.

3. **Určení činitele stárnutí světelného zdroje - volba světelného zdroje** – Volba typu světelného zdroje se odvíjí od zvoleného svítidla. Dle normy ČSN 36 0455 je pro každý druh světelného zdroje, na základě délky provozních hodin, určena velikost činitele stárnutí světelných zdrojů dle Tab. 7. Jedná se o vratnou změnu (světelný zdroj lze vyměnit a dostat se na původní hodnotu světelného toku).

Tab. 7 Hodnoty činitele stárnutí světelných zdrojů [5]

Typ světelného zdroje	Provozní doba (tisíce hodin)				
	4	6	8	10	12
Vysokotlaká sodíková výbojka	0,98	0,97	0,94	0,91	0,9
Halogenidová výbojka	0,82	0,78	0,76	0,74	0,73
Vysokotlaká rtuťová výbojka	0,87	0,83	0,8	0,78	0,76
Nízkotlaká sodíková výbojka	0,98	0,96	0,93	0,9	0,87
Lineární zářivka s třípásmovým luminoforem	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91
Lineární zářivka s halofosfátovým luminoforem	0,82	0,78	0,74	0,72	0,71
Kompaktní zářivka	0,91	0,88	0,86	0,85	0,84

4. **Výpočet udržovacího činitele** – na základě zjištěných hodnot činitele znečištění svítidla a činitele stárnutí světelných zdrojů vypočítáme dle vztahu (4) hodnotu udržovacího činitele. Při dodržení intervalu čištění svítidel a výměny světelných zdrojů má udržovací činitel průběh, který je charakterizován na Obr.17 (červená křivka – MF udržované osvětlovací soustavy VO).



Obr. 17 Udržovací činitel osvětlovací soustavy VO [4]

Pozn. k Obr. 17:

- **B** je křivkou stárnutí světelného zdroje (pro zářivku s třípásmovým luminoforem s vysokofrekvenčním předřadníkem)
- **C** je křivka stárnutí svítidla
- **D** je křivka neudržované osvětlovací soustavy

Díky praktickým aplikacím technické normalizační informace TNI 36 0451 a normy ČSN 36 0455 bylo zjištěno, že hodnoty činitele znečištění svítidla jsou příliš přísné. Příčiny této skutečnosti jsou popsány v kapitole problémové aspekty současných norem pro výpočet udržovacího činitele. Dále je vhodnější namísto Tab. 5 pro volbu činitele stárnutí světelných zdrojů použít hodnoty pro konkrétní světelný zdroj přímo od výrobce z jeho katalogu. Tato hodnota je korektnější než hodnota z Tab.5 a rovněž určuje hodnotu činitele stárnutí konkrétního světelného zdroje pro širší provozní dobu. Toto nám dovoluje natáhnout interval výměny světelných zdrojů, aniž by došlo k poklesu udržované hodnoty osvětlenosti, pod projektovanou hodnotu.

Lze si povšimnout že v Tab. 5 nejsou uvedeny hodnoty pro LED moduly. Tato skutečnost je dána rozdílným uváděním životnosti tohoto zdroje a není tedy možné pro LED určit činitel stárnutí správně. Této problematice se dále opět věnuje kapitola problémové aspekty současných norem pro výpočet udržovacího činitele.

Díky neuvádění činitele stárnutí u LED svítidel v normě ČSN 36 0455 (a dalších dotčených normách) společně s rozdílným uváděním životnosti LED od samotných výrobců, vede v praktických aplikacích k odhadování tohoto činitele či dokonce odhadování celkového udržovacího činitele. Takovýto postup je zcela špatný a výsledkem je hodnota MF, která neodpovídá zvolenému LED svítidlu. Důsledky tohoto postupu mohou být jak poddimenzování či předdimenzování udržované hodnoty, která se však ve většině případů projeví až po značně dlouhé době provozu.

Řada projekčních firem jejichž specializací není světelná technika, ale projekční činnost obecně, používá pro LED svítidla striktně udržovací činitel 0,8 a pro vysokotlaké výbojové zdroje hodnotu 0,7. Zarážející je, že tuto hodnotu udržovacího činitele nepodloží žádným výpočtem, takže se lze jen domnívat, jak k ní došli. Ve výkladu normy ČSN 36 0455 je jasně uvedeno, že projektant musí doložit volbu obou činitelů, které se pro výpočet udržovacího činitele osvětlovacích soustav VO používají.

Nevratné změny

Nevratné změny nejsou zahrnuty do výpočtu udržovacího činitele. K nevratným změnám patří především degradace optických částí svítidel (jejich žloutnutí), koroze kovového skeletu svítidla, zhoršování odrazných vlastností hliníkových plechů (reflektor). I když je velikost nevratných změn pouze cca 3%, tak v některých případech může mít značný vliv na velikost udržovacího činitele i když do něj nejsou tyto nevratné změny započítány. Jedná se o situace, kde se svítidla nacházejí v silně znečištěném prostředí s velkým množstvím chemicky aktivních látek, pak dochází až k situaci, že se částice prachu společně s dalšími nečistotami zapečou do difuzoru svítidla (zhoršení prostupu světla difuzorem).

Současné směrnice CIE 97 a CIE 154 tyto nevratné změny neřeší. Avšak je plánováno začlenění nevratných změn do nové směrnice CIE, která aktuálně vzniká.

4.2 Určení udržovacího činitele pro měření veřejného osvětlení

Měření osvětlovací soustavy veřejného osvětlení se nejčastěji provádí při uvedení soustavy do provozu (kolaudaci) a pak v průběhu provozu dané soustavy. Tato měření slouží k ověření skutečné hodnoty osvětlenosti (v případě M komunikací jasu), která se na dané pozemní komunikaci vyskytuje. Tyto hodnoty jsou pak dále srovnávány s projektovanými hodnotami, které musí splňovat požadavky dle normy ČSN EN 13201-2. Nesmíme zapomínat na fakt, že projektovaná hodnota osvětlenosti případně jasu je hodnotou udržovanou, tudíž jí odpovídá určitý udržovací činitel.

Při měření se velice často opomíná, že se jedná o udržovanou hodnotu, která musí být upravena o korekční činitel, který zohledňuje aktuální velikost udržovacího činitele v čase měření osvětlovací soustavy VO. Udržovaná hodnota se tedy určí z následujícího vztahu [6]:

$$E_m = E_A \cdot c_M = E_A \cdot \frac{f_{M,P}}{f_{M,A}} \quad (5)$$

kde E_m ... je udržovaná hodnota naměřené osvětlenosti (lx)

E_A ... je naměřená (skutečná) hodnota osvětlenosti (lx)

c_M ... je korekční činitel udržovacího činitele (-)

$f_{M,P}$... je projektovaný udržovací činitel, který platí pro soustavu na konci života (-)

$f_{M,A}$... je udržovací činitel, který platí pro soustavu v čase měření (-)

Postup výpočtu pro udržovanou hodnotu jasu je totožný (postupuje se opět podle vzorce 5). Hodnota korekčního činitele je dána poměrem projektované udržované hodnoty ku aktuální hodnotě udržovacího činitele při měření.

Korekční činitele je možné zjednodušit či zanedbat pouze ve dvou případech. Prvním případem, kdy se korekční činitel zjednodušuje, je při měření, kdy se osvětlovací soustava uvádí do provozu (při kolaudaci), případně po právě vykonaném cyklu údržby, který je v souladu s navrhovaným cyklem pro projektovanou hodnotu udržovacího činitele. V tomto případě je hodnota korekčního činitele rovna hodnotě projektovaného udržovacího činitele a hodnota $f_{M,A}$ se rovná 1. Druhý případ, kdy je možné hodnotu korekčního činitele zanedbat, nastává při zanedbání pravidelné údržby soustavy dle projektovaného udržovacího činitele. V tomto případě se hodnota korekčního činitele rovná 1. [6]

V praxi se ve většině případů počítá udržovací činitel pro účely měření naprosto totožně jako při návrhu osvětlovací soustavy (nezohledňuje se žádný korekční činitel). Jedním ze způsobů, jak projektanti počítají udržovací činitel je, že si vezmou hodnotu projektovaného udržovacího činitele a tu upraví vzhledem k aktuálnímu stavu osvětlovací soustavy. Tímto způsobem dostanou upravenou hodnotu $f_{M,P}$, kterou pak roznásobí naměřenou hodnotou. Takto vypočtená hodnota neodpovídá skutečné udržované hodnotě osvětlenosti (jasu). Návrh této metodiky výpočtu je aktuálně ve fázi návrhu technické specifikace ISO/CIE a může být ještě pozměněn. [6]

4.3 Problémové aspekty současných norem pro volbu udržovacího činitele, návrhy nových přístupů

Význam a důležitost použití a volby správného udržovacího činitele pro osvětlovací soustavy VO jsme si popsali v předchozích odstavcích. Přestože udržovací činitel hraje při navrhování a měření osvětlovacích soustav VO významný vliv, dosud nebyla vypracována žádná jednotná mezinárodní či evropská norma, která by tuto problematiku korektně a zcela řešila. Jak již bylo řečeno, tak pro volbu udržovacího činitele venkovních osvětlovacích soustav platí norma CIE 154:2003 a s ní související ČSN 36 0455. Obě tyto normy jsou značně zastaralé. Přestože byla norma ČSN 36 0455 vydána v roce 2016 je značně zastaralá, jelikož se opírá o výsledky výzkumu z 60 let 20 století. Tato skutečnost má za následek, že není respektována technická úroveň současných svítidel a světelných zdrojů, dále charakteristika čistoty prostředí nekorresponduje s aktuálními emisními limity, které jsou přísnější, a tudíž by nemusely být kladeny tak velké nároky na krytí svítidla (IP).

Široká odborná veřejnost již řadu let žádá aktualizaci metodiky volby udržovacího činitele s tím, aby byly respektovány aktuální technické vlastnosti svítidel, světelných zdrojů včetně čistoty daného prostředí.

V roce 2017 začala Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) řešit problematiku volby udržovacího činitele. Byla vytvořena pracovní skupina WG3 „Maintenance Factor“, která má za úkol se této problematice věnovat. Na činnosti této pracovní skupiny se podílí i samotná ISO. Cílem této pracovní skupiny není vytvořit novou technickou normu pro volbu udržovacího činitele, ale bude sloužit pouze pro vytvoření technické specifikace ISO/CIE. Navíc tato technická specifikace se bude věnovat pouze volbě udržovacího činitele a nebude řešit údržbu osvětlovacích soustav komplexně, jak tomu dosud bylo v publikacích CIE 97 a CIE 154. Největším problémem je, že zůstane zachována původní metodika výpočtu MF z těchto norem, i když není pro dnešní použití korektní a nebude přinášet žádné nové přístupy.

Avšak v říjnu roku 2017 byla na kongresu CIE v Jižní Koreji jmenována technická komise JTC12, jejíž úkolem je vytvoření jednotné metodiky pro údržbu venkovních i vnitřních osvětlovacích soustav, která se bude skládat jednak z aktualizace metodiky, ale zároveň dojde k sjednocení směrnic CIE 97 a CIE 154 do jedné nové směrnice CIE.

4.3.1 Nezvratné změny LED čipů a problematika uvádění životnostních parametrů LED (v návaznosti na metodiku CIE 97 a 154)

Největší problémy při volbě udržovacího činitele VO způsobují LED svítidla. Podstata problému spočívá v rozdílném uvádění životnosti LED, která bude popsána níže. Taktéž nezvratné změny LED svítidel by měli být zahrnuty do výpočtu udržovacího činitele, jelikož pokles světelného toku a výpadkovost LED čipů je definována pouze pro časovou hodnotu na konci životnosti svítidla, která se dnes běžně pohybuje mezi 50 – 100 tisíci hodinami. Praktickými aplikacemi a z principiálního hlediska elektronického předřadníku bylo taktéž zjištěno, že životnost předřadníku není shodná s životností LED čipů. [6]

Vztáhneme-li běžnou životnost LED čipů (dnes již standardně 50 000 hodin) na hodnotu provozu veřejného osvětlení (4 000 hodin), budou tyto LED čipy, které jsou součástí LED svítidla svítit 12,5 let. Praktickými aplikacemi bylo zjištěno, že průměrná životnost LED driveru, je 7-8 let. To znamená, že v průběhu životnosti LED svítidla bude nutné vyměnit LED driver. Zkrácená životnost LED driveru je způsobena především elektrolytickými kondenzátory, kterým v průběhu života při opětovném zapínání, vypínání a stmívání vysychá elektrolyt. Vysychání elektrolytu vede až k úplnému vypovězení funkčnosti kondenzátoru.

Všechny tyto aspekty budou zahrnuty v aktualizaci metodiky volby udržovacího činitele osvětlovacích soustav VO. [6]

Teď již k samotné problematice uvádění životnosti LED svítidel, která je značně odlišná od původních činitelů stárnutí a funkční spolehlivosti tradičních světelných zdrojů (výbojkové zdroje a další). Důvodem, proč jsou životnostní parametry uváděny odlišně, je, že se vzhledem k dlouhé životnosti LED čipů neuvazuje s jejich výměnou. Proto se neuvádí životnostní parametry pro kratší dobu provozu, jak tomu bylo v případě konvenčních světelných zdrojů (s mnohem kratší funkční a užitnou životností), kde se životnost uváděla pomocí křivek stárnutí nejčastěji pro cyklus výměny v intervalu 8 – 20 tisíc provozních hodin. [6]

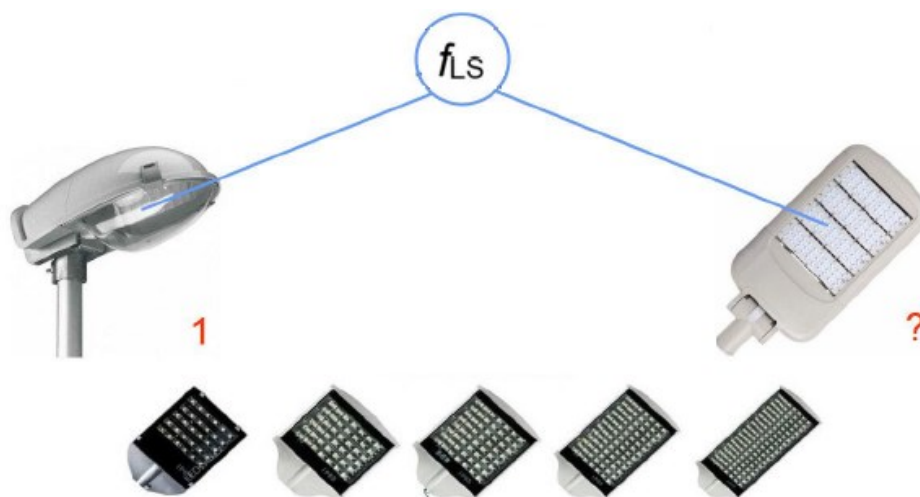
Výrobce LED čipů definuje pokles světelného toku na konci života čipů nebo definuje životnost pro předem danou velikost poklesu světelného toku. Podobně je definována i funkční spolehlivost LED čipů. Pro určování životnosti LED čipů nejsou definovány mezinárodní standardy, avšak nejčastěji jsou akceptovány normy severoamerické světelně-technické společnosti IESNA a to především IES LM-79, LM-80 a TM-21. Životnost LED čipů není možné vzhledem k jejich dlouhé životnosti ověřit měřením a proto se životnostní parametry stanovují na základě akceleračních testů a následné extrapolaci údajů. [6]

Pro LED čipy se používají následující životnostní parametry [7]:

- **Ukazatel poklesu světelného toku (L)** – nám definuje procentuální velikost světelného toku LED čipu na konci jeho života. Tato hodnota je vztažena k počáteční hodnotě světelného toku LED čipu. Nejčastěji je hodnota L rovna 80 resp. 70 (tj. L80, L70). Přesné znění L je Lumen Depreciation Lifetime.
- **Ukazatel spolehlivosti světelného toku (B)** – nám říká kolik procent LED čipů (z celkového počtu všech LED čipů) bude mít světelný tok menší než ukazatel L. Přesné znění B je Lumen Maintenance Lifetime.
- **Ukazatel elektrické spolehlivosti (F)** – nám definuje časový interval po jehož uplynutí dochází k celkovému selhání LED čipu. Je vyjádřen procentuální velikostí vzhledem k počtu všech LED čipů v daném svítidlu. Přesné znění F je Electrical Failure Lifetime.

Parametry L,B,F se musí uvádět společně a to nejčastěji ve tvaru L80 B50 F10, kde čísla značí procentuální velikost ukazatele.

V dosavadní metodice a praxi se funkční spolehlivost světelných zdrojů při volbě udržovacího činitele VO neuplatňovala. Důvod byl již popsán v teoretickém postupu výpočtu udržovacího činitele. Důvodem, proč se u tradičních světelných zdrojů pro veřejné osvětlení (výbojky) neuvažovalo s funkční spolehlivostí světelných zdrojů, byl ten, že výpadek pouze jednoho světelného zdroje ohrozí značně rovnoměrnost osvětlení a nebudou splněny požadavky normy ČSN EN 13201-2. Proto dosavadní publikace CIE 154 složku LSF při výpočtu MF neuvažuje. Avšak s příchodem LED svítidel, kdy svítidlo je složeno z více zdrojů (LED čipů) by se měl tento přístup změnit (viz. Obr. 18). Je nutné počítat s určitým (malým) počtem LED čipů, které předčasně selžou. Selhání LED čipů však nesmí narušit křivku svítivosti svítidla a ohrozit celkovou funkčnost svítidla. [6]



Obr. 18 Srovnání funkční spolehlivosti světelného zdroje výbojkového svítidla s LED svítidlem [6]

Již v úvodu nevratných změn LED svítidel bylo zmíněno, že způsob uvádění životnostních parametrů LED svítidel je značně odlišný od konvenčních světelných zdrojů. Tento způsob, který uvádí životnost pouze pro jednu uzlovou hodnotu představuje zásadní nevýhodu a problém pro současnou metodiku volby udržovacího činitele. U tradičních světelných zdrojů se počítá s pravidelnou výměnou zdroje v horizontu cca 4 let. Čtyři roky provozu odpovídají poklesu světelného toku typické vysokotlaké sodíkové výbojky na hodnotu 0,83 (výbojka Osram Vialox NAV-T SUPER 4Y 50W). Po této době již není efektivní výbojku provozovat. V případě LED, kdy je uvedena pouze jedna hodnota ukazatele poklesu světelného toku (obdoba činitele stárnutí zdroje), která platí pro svítidlo na konci životnosti, není korektní tuto hodnotu dosazovat do výpočtu udržovacího činitele. Důvodem proč tento způsob není korektní je ten, že dochází k zbytečnému podhodnocení (zmenšení) udržovacího činitele. Pro správný výpočet by hodnota 0,8 (která odpovídá poklesu světelného toku LED svítidla na konci životnosti - 50 000 hodin) měla být interpolována pro značně menší interval čistění svítidla. Dodržením tohoto postupu dostaneme značně vyšší hodnotu ukazatele poklesu světelného toku, která již bude vyšší než hodnota u konvenčních výbojových zdrojů. V případě, že bychom tento postup nedodrželi došlo by k značnému podhodnocení činitele poklesu světelného toku LED svítidla na úkor výbojkového svítidla (výbojkové svítidlo by vykazovalo lepší hodnotu činitele poklesu světelného toku). [8]

Již v úvodu nevratných změn LED čipů byla zmíněna kratší životnost LED driverů než samotných LED čipů. Při vytváření nové metodiky volby udržovacího činitele by měl být vytvořen nový

činitel funkční spolehlivosti LED driverů. Tento činitel bude zohledňovat kratší životnost LED driveru a bude určovat interval jeho výměny. [6]

Při začleňování nových životnostních parametrů LED svítidel do nové metodiky volby MF bude nutné rovněž tyto parametry sladit s dosavadními činiteli stárnutí a funkční spolehlivosti.

4.3.2 Problematika volby činitele znečištění svítidel

V úvodu problémových aspektů současných norem pro volbu udržovacího činitele již byla zmíněna problematika volby korektního činitele znečištění svítidla. Normy CIE 154 a s ní související ČSN 36 0455 byly sice vydány v roce 2003 (respektive 2016), ale charakteristické hodnoty pro určení činitele znečištění svítidla (LM) vycházejí z výzkumů z období šedesátých až osmdesátých let 20. století. V důsledku značně zastaralých hodnot pro volbu činitele znečištění svítidla dochází k velkému snížení výsledné hodnoty udržovacího činitele. V nejhorších případech klesne hodnota výsledného MF až na hodnotu 0,6.

Tyto charakteristické hodnoty LM jsou vzhledem k přísnějším požadavkům na emisi škodlivých látek ve venkovním prostředí značně nekorektní. Od 90. let, kdy se začaly používat kategorie emise škodlivých látek Euro, se zpřísnila hodnota na výskyt pevných částic z hodnoty 0,14 g/km (Euro 1) na hodnotu 0,005 g/km (Euro 6). Je tedy zcela nekorektní se opírat o staré výzkumy, když požadavek na výskyt pevných částic se 28krát zpřísnil. Stejně intenzitě provozu tedy bude odpovídat značně nižší prašnost. Proto je tedy nutné aktualizovat hodnoty činitele LM a řádně zvážit výběr stupně krytí svítidla, když jsou emise pevných částic značně nižší.

V současnosti se s aktualizací činitele znečištění svítidla LM vyskytuje mnoho problémů. Nejpodstatnějším problémem je nedostatek naměřených hodnot znečištění svítidla, které je vystaveno různým podmínkám prostředí. Avšak existuje nemalé množství naměřených dat od samotných provozovatelů osvětlovacích soustav VO a výrobců svítidel pro VO, které by bylo možné využít při aktualizaci volby LM. [6]

Druhou možností aktualizace LM je přenechat jeho měření na výrobcích svítidel. Toto měření LM by se mohlo stát doplňujícím měřením k ověřování stupně krytí svítidla IP a muselo by se provést u každého svítidla s rozdílnou konstrukcí. Takto naměřené hodnoty, které by zohledňovaly konstrukci svítidla, okolní podmínky prostředí v místě měření a proudění vzduchu, by byly nejpřesnějšími hodnotami, které by byly korektnější než aktualizované hodnoty tabulky činitele LM v nové směrnici CIE. Avšak musel by být vyspecifikován přesný postup měření abychom zamezili možnost falzifikace naměřených údajů ze strany výrobce. [6]

Jak již bylo popsáno výše, tak hodnoty znečištění prostředí jsou značně zastaralé a je potřeba je aktualizovat.

V současné normě ČSN 36 0455 pro VO jsou definovány tři kategorie prostředí:

- Vysoké znečištění ($> 600 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Střední znečištění ($150 - 600 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
- Nízké znečištění ($\leq 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Hodnota v závorce udává suspenzi prachových částic ve vzduchu. Tyto rozsahy jsou pro dnešní prostředí nepoužitelné, jelikož dnes jsou požadavky daleko přísnější. Dnes je povolen maximální denní limit $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, který smí být překročen maximálně 35 dní v roce. [12]

Dále tyto hodnoty nenavazují a nekorrespondují s normami pro určení vnějších vlivů (respektive i s normami pro určení klimatických podmínek), kterými jsou ČSN EN 60721-3-3 (klimatické podmínky pro vnitřní prostory), ČSN EN 60721-3-4 (klimatické podmínky pro venkovní prostory) a ČSN 33 2000-5-51 (pro určení vnějších vlivů). [9] [10] [11]

Tyto normy slouží při návrhu veřejného osvětlení především v části elektroinstalace, kde je nutno zohlednit veškeré okolní činitele prostředí.

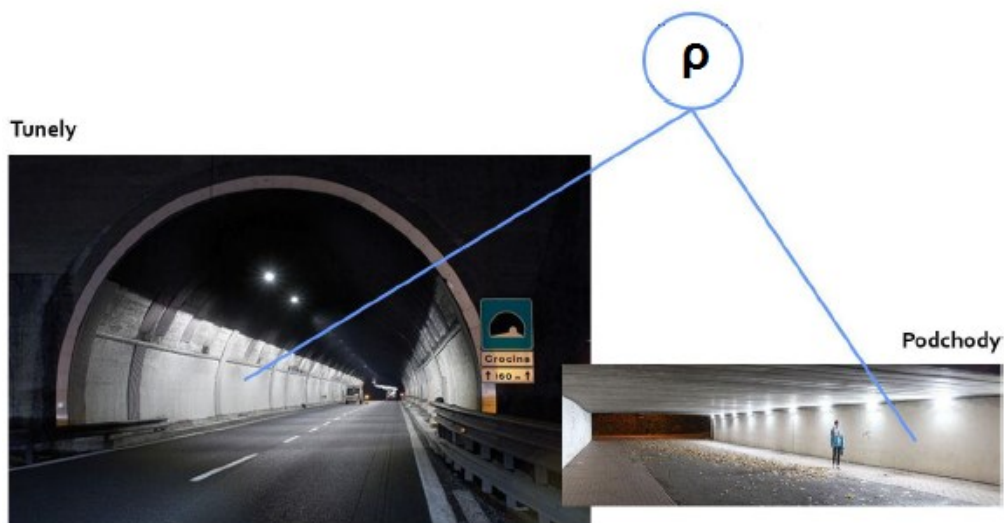
V normě pro vnější vlivy (ČSN 33 2000-5-51) jsou uvedeny kategorie prašnosti prostředí, kterou jsou uvedeny jednak prachovou suspenzí (mg/m^3) a sedimentací (usazováním) na povrchu (mg/m^2) [11]:

- AE4 – Malá prašnost ($10 - 35 \text{ mg}/\text{m}^2$, $5 \text{ mg}/\text{m}^3$)
- AE5 – Střední prašnost ($35 - 350 \text{ mg}/\text{m}^2$, $15 \text{ mg}/\text{m}^3$)
- AE6 – Silná prašnost ($350 - 1000 \text{ mg}/\text{m}^2$, $20 \text{ mg}/\text{m}^3$)

Při vytváření nové směrnice CIE by bylo vhodné vytvořit návaznost na prašnost uvedenou v normě pro vnější vlivy (ČSN 33 2000-5-51). V praxi se znečištění prostředí zjišťuje nejčastěji pomocí měření. Kromě prachu bude nutné určit další znečišťující látky prostředí, které mají neblahý vliv na optickou část svítidla a snižují účinnost chlazení LED zdrojů. Bylo zjištěno, že větší nánosy prachu kromě snížení světelného toku svítidla vedou také k narušení jeho křivky svítivosti, což má ve veřejném osvětlení vzhledem k lineární struktuře osvětlení zásadní význam. [6]

4.3.3 Problematika časové změny odrazných vlastností asfaltu a dalších povrchů ve VO

Při návrhu osvětlovací soustavy VO se uvažuje nejčastěji s odrazností asfaltového povrchu 7%. Asfalt je nejčastěji používaným povrchem pro veřejné komunikace měst a menších obcí (vyjma dálnic a některých vysokorychlostních silnic). Při stárnutí asfaltové komunikace dochází vlivem různých nečistot a strukturálních změn k zvyšování její odrazných vlastností až o 5%. Tato změna není při výpočtu MF zohledněna. I když se zdá být hodnota 5% jako zanedbatelná, tak u větších ploch jako jsou parkoviště, chodníky pro pěší nebo u speciálních aplikací (tunely a podchody – viz Obr. 19), může mít značný vliv. Možné započítání 5% změny odrazu nám umožní snížit mírné překompenzování osvětlovací soustavy v průběhu jejího funkčního života.



Obr. 19 Vliv změny odrazných vlastností na výpočet MF [6]

4.3.4 Provozní vlivy a udržovací činitel

Provozními vlivy máme namysli takové provozní stavy, které jsou do značné míry předvídatelné. Jedná se například o změny provozních teplot v okolí svítidla, úbytek napětí od zdroje, který se úměrně zvětšuje s rostoucí vzdáleností od zdroje. Tyto změny jsou snadno predikovatelné. Pak jsou zde náhodné změny napětí, které nelze vyhodnotit tak snadno. [6]

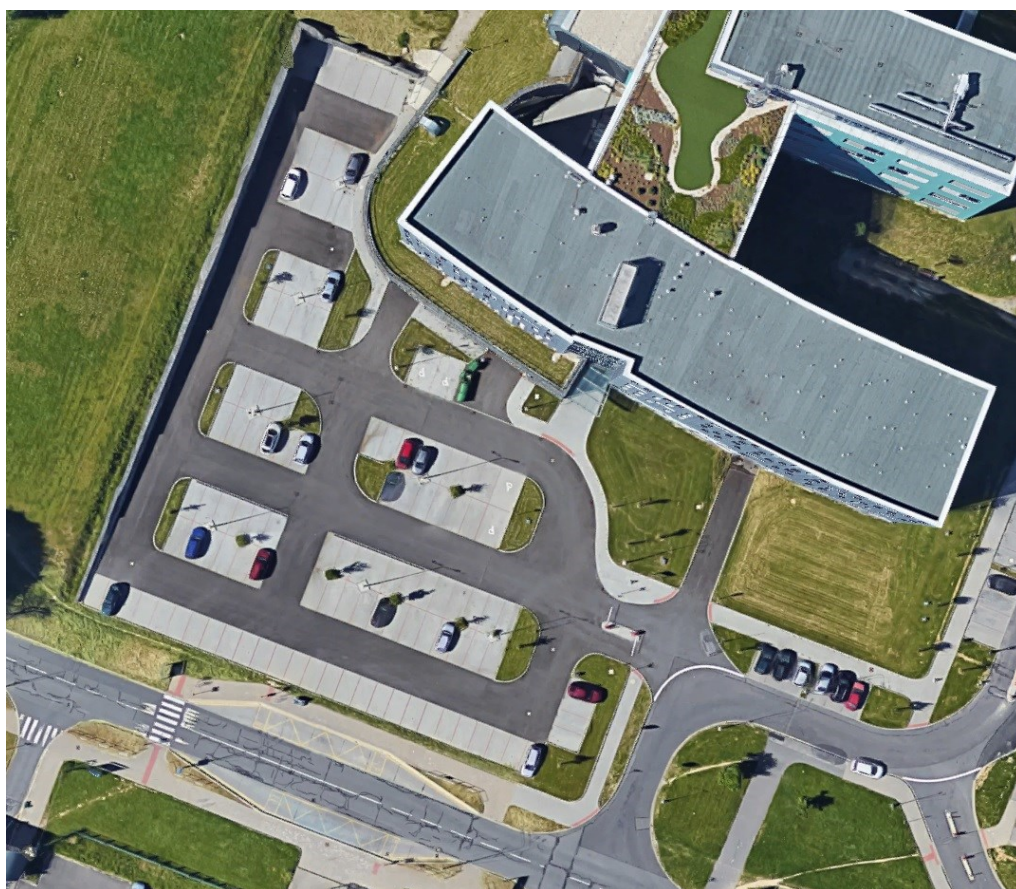
Tyto provozní vlivy nejsou zahrnuty ve výpočtu udržovacího činitele, jelikož primárně nesouvisí s údržbou osvětlovacích soustav. Dokonce nejsou řešeny ani v jiné mezinárodní normě. V nadcházejících letech by tedy bylo velmi dobré vytvořit „provozní činitel“, který se bude v určitých ohledech podobat udržovacímu činiteli, avšak nebude jeho součástí. [6]

5 Variabilní návrh osvětlovací soustavy veřejného osvětlení

V této praktické části diplomové práce bude řešen komplexní návrh nového osvětlení v rámci takzvaného testovacího polygonu parkoviště Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO (viz. Obr. 20). Hlavní záminkou k vytvoření testovacího polygonu na parkovišti FEI bylo vyzkoušet a ověřit inteligentní systém řízení VO, který je součástí takzvaného Smart City.

Pod pojmem Smart City si lze představit komplexní rozšiřující služby VO, které dnešní osvětlovací soustavy VO s konvenčními výbojovými zdroji nemohou nabídnout. Hlavními prioritami Smart City jsou: inteligentní stmívání na základě dat z kamerového systému, šíření Wi-Fi konektivity a dalších datových služeb, využití pro Car to Car communication (modulace nosné informace do světelného toku jdoucího ze svítidla).

Nejzásadnější výhodou Smart City je především systém inteligentního stmívání, který dokáže ušetřit nezanedbatelné množství spotřebované elektrické energie a zvýšit bezpečnost na komunikacích díky aktuálním datům z kamerového systému, které odpovídají konkrétní intenzitě provozu dané komunikace. Se systémem Smart City se přechází s řízením a spínáním z rozvaděčů VO na jednotlivá svítidla, což znamená, že všechna svítidla jsou trvale pod napětím (spínání a regulace je řešena individuálně na každém předřadném přístroji LED svítidla). Tato skutečnost umožňuje šířit například Wi-Fi konektivitu a další podpůrné služby.



Obr. 20 Testovací polygon na parkovišti Fakulty elektrotechniky a informatiky na VŠB-TUO

Ve této kapitole je vyhodnocen komplexní model parkoviště testovacího polygonu FEI, který byl vytvořen ve výpočetním programu Relux Pro. Rozvržení jednotlivých vyhodnocovaných výpočtových ploch můžete vidět na Obr. 21 (návrh přechodu je řešen v jiné práci, avšak pro zhodnocení světelného příspěvku z této oblasti je rovněž započítán do modelu parkoviště).

Všechny úseky (Boos, R2L2, Teceo) jsou nasvětleny pomocí LED svítidel s regulovatelnými předřadnými přístroji. Parkoviště je nasvětleno pomocí 3 ks svítidla Boos Naica, 6 ks svítidla Thorn R2L2, 5 ks svítidla Artechnic-Schreder Teceo a 2 ks přechodového svítidla Artechnic-Schreder Teceo. Celkem tedy 16 svítidel.

Osvětlovací soustava se svítidly Naica je řešena jako jednostranná, soustava se svítidly Thorn jako párová a soustava se svítidly Teceo jako částečně párová (nasvětlena pouze 3 svítidly). Původní osvětlovací soustava, která byla na parkovišti do konce března 2018 byla realizována 18 svítidly Thorn Riviéra (2 svítidla navíc byla umístěna v horním rohu parkoviště – ve výpočtu nového a starého stavu není tato oblast vyhodnocována, ale v modelu jsou fyzicky Riviéry umístěny aby se zvažila velikost světelného příspěvku z této oblasti).

V následujících sekcích jsou zhodnoceny kvantitativní a kvalitativní parametry zvolených svítidel, dále je zhodnoceno nasvětlení plochy parkoviště mezi jednotlivými úseky (roztečemi),



Obr. 21 Poziční rozdělení testovaných svítidel na testovacím polygonu

a v poslední fázi je zhodnocena energetická náročnost dle normy ČSN EN 13201-5. Na testovacím polygonu parkoviště FEI byla rovněž stanovena míra příkonové úspory při stmívání jednotlivých úseků VO.

5.1 Zhodnocení kvantitativních a kvalitativních parametrů testovaných svítidel s původním svítidlem

Pro nasvětlení testovacího polygonu parkoviště FEI byly osloveni tři výrobci svítidel a sice firmy: Thorn Lighting, Boos a Artechnic-Schreder. Byly dodány příslušné příkonové varianty těchto svítidel, aby byly splněny požadavky třídy osvětlení M1 dle normy ČSN EN 13201-2.

Všechna tři svítidla jsou vzhledově velmi podobná a jejich dílenské zpracování je na velmi dobré úrovni. Tyto svítidla se vyznačují shodnou životností LED modulů. Při vyhodnocování světelně-technických parametrů a energetických ukazatelů budeme předpokládat lineární závislost světelného toku na příkonu.

K zhodnocení kvantitativních i kvalitativních parametrů testovaných svítidel bylo přidáno i původní svítidlo Thorn Riviéra, jehož technický stav po 5 letech provozu můžeme vidět na Obr. 22. Přestože po době provozu svítidla (5 let) nebyla provedena pravidelná údržba (čištění), je svítidlo ve velmi dobrém stavu.

Ve výsledném srovnání svítidel lze tedy očekávat značně lepší kvantitativní i kvalitativní parametry testovaných LED svítidel oproti původnímu svítidlu Thorn Riviéra.

Veškeré kvantitativní i kvalitativní parametry svítidel byly vyčteny z katalogových listů jednotlivých výrobců, které lze nalézt na CD disku v příloze č. 1. U svítidla Boos bylo nutné vyčíst parametry z výpočetního programu Relux Pro (příloha č. 2) a ze stránek výrobce Boos. [16]

V testovacím polygonu se nachází také přechodové svítidlo Teceo, to však pro účely této diplomové práce není dále vyhodnocováno.



Obr. 22 Původní svítidlo na testovacím polygonu – Thorn Riviéra



Obr. 23 Svítidlo Boos Naica



Obr. 24 Svítidlo Thorn R2L2



Obr. 25 Svítidlo Artechnic-Schreder Teceo

Tab. 8 Srovnání kvantitativních a kvalitativních parametrů – Naica, R2L2, Teceo, Riviéra

Kvantitativní a Kvalitativní parametry	Svítidlo			
	Naica (Boos)	R2L2 (Thorn)	Teceo (Schreder)	Riviéra (Thorn) – původní sv.
Světelný tok Φ (lm)	20640	11 706	15 410	11 270
Příkon P (W)	167	91	124	170
Měrný výkon sv. η (lm.W ⁻¹)	124	128	124	66
Účinnost svítidla (%)	86	-	86	64,4
Ra (-)	70	70	70	25
Tc (K)	4 000	4 000	4 000	2 000
T(h)	100 000	100 000	100 000	32 000
IP (optiky/sv.)	66/66	66/66	66/66	66/44
IK (-)	10	08	08	07
Třída ochrany (-)	1	1	1 (2)	2

*Pozn. k Tab. 8:

Kvantitativní a kvalitativní parametry svítidla Thorn Riviéra vycházejí z velké části ze zvoleného světelného zdroje, kterým je Osram VIALOX NAV-T SUPER 4Y 150 W (kromě IP, účinnosti svítidla, IK a třídy ochrany – tyto parametry jsou dány konstrukcí svítidla).

Zhodnocení kvantitativních a kvalitativních parametrů svítidel (Tab. 8)

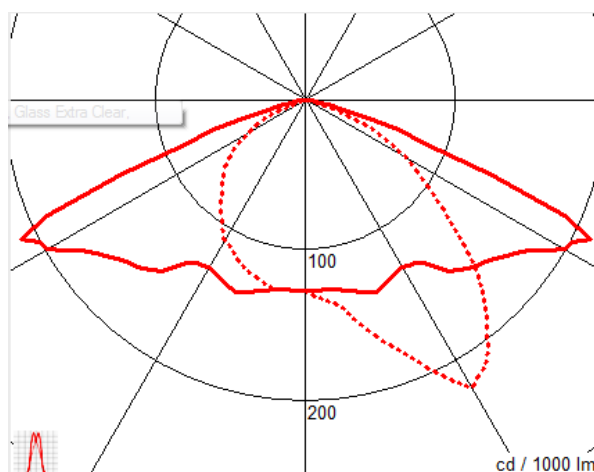
Nejhůře ze srovnání kvantitativních a kvalitativních parametrů vychází původní svítidlo Thorn Riviéra. Svítidlo je osazeno vysokotlakou sodíkovou výbojkou VIALUX, která má slušný měrný výkon 115 lm/W. Výsledný měrný výkon svítidla je ovšem o poznání horší (66 lm/W), a to díky nízké účinnosti svítidla, která je způsobena plochým tvrzeným sklem (kdy paprsky z výbojky neprocházejí kolmo normálou skla) a vysokými činnými ztrátami elektromagnetického předřadníku (20W ztráty). Riviéra má také díky vysokotlakové sodíkové výbojce nízkou užitnou životnost (výměna v intervalu 3-4 let) a nízký index podání barev. Tyto zásadní nedostatky řadí Thorn Riviéru na poslední příčku. Krytí

IP 66/44 i třída ochrany 2 jsou na 5 let staré sodíkové svítidlo velmi dobré (avšak elektrická část je kryta pouze IP44).

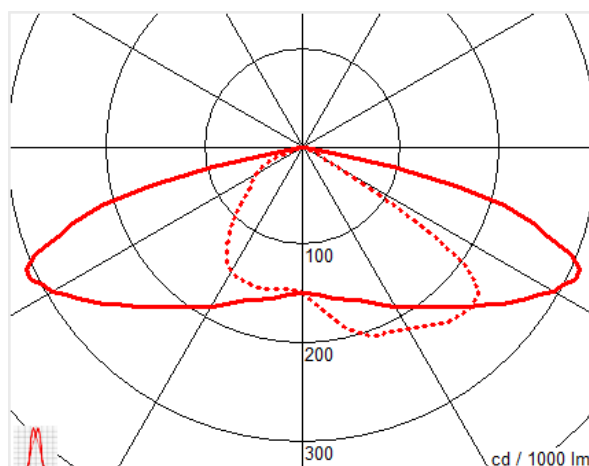
Všechny tři vybrané LED svítidla mají srovnatelné, ne-li totožné kvantitativní parametry. Hodnoty měrných výkonů jsou téměř shodné (Thorn má o 4 lm/W vyšší). Svítidlo Naica disponuje oproti svítidlu R2L2 téměř dvojnásobný světelný tokem. Svítidlo Naica bylo záměrně vybráno s vyšším světelným tokem, jelikož rozteč na úseku Naica je realizována pouze jako jednostranná osvětlovací soustava. Výrobce svítidla R2L2, kterým je Thorn, neudává účinnost optiky.

Kvalitativní parametry (Ra, Tc, T, IP) zvolených LED svítidel jsou totožné. Jediné, v čem se svítidla liší je odolnost vůči nárazům (IK), kterou má nejlepší svítidlo Boos Naica. V případě třídy ochrany nabízejí svítidla Naica a R2L2 stupeň ochrany 1. V případě svítidla Teceo je možnost objednání varianty se stupněm krytí 2 (zesílená izolace).

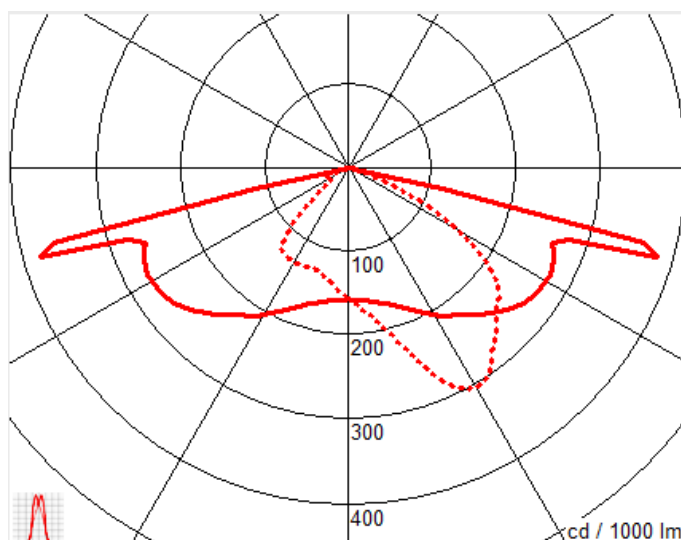
Srovnání křivek svítivosti testovaných svítidel s původním svítidlem



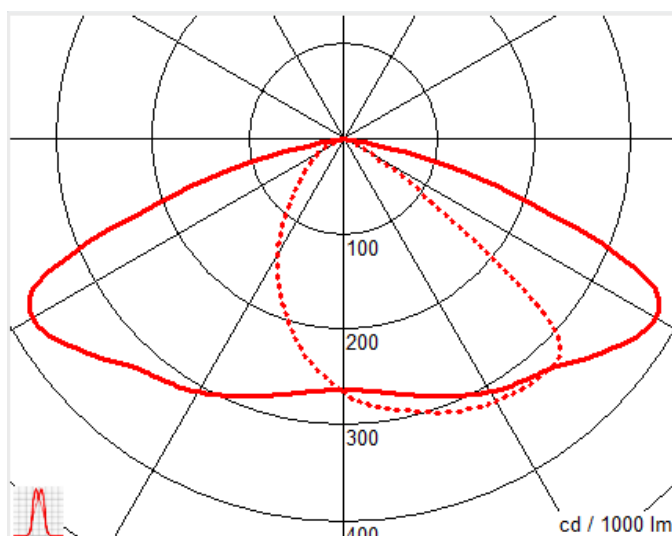
Obr. 26 Křivka svítivosti svítidla Thorn Riviéra – původní svítidlo



Obr. 27 Křivka svítivosti svítidla Boos Naica



Obr. 28 Křivka svítivosti svítidla Artechnic-Schreder Teceo



Obr. 29 Křivka svítivosti svítidla Thorn R2L2

Zhodnocení křivek svítivosti testovaných svítidel s původním svítidlem

Křivka svítivosti původního svítidla Thorn Riviéra představuje tradiční silniční křivku svítivosti, která vyzářuje nejvíce v podélné ose (pro zajištění dostatečného nasvětlení mezi roztečí dvou stožárů). Nutno konstatovat, že svítidlo v rovině C90-C270 vyzářuje poměrně dost před sebe. Při srovnání s novými LED svítidly dosahuje Riviéra značně nižší hodnoty svítivosti v podélné ose, avšak v rovině C90-C270 je na stejné úrovni jako Naica (ovšem Naica má nejnižší vyzářování v rovině C90-C270 ze všech testovaných LED svítidel).

Křivka svítivosti Naicy představuje opět tradiční silniční optiku, která vyzařuje velmi málo před sebe (nejméně z testovaných LED svítidel). Její vyzařování v rovině C0-C180 je v podélném směru nejmenší ze všech testovaných LED svítidel. Nutno tedy konstatovat, že LED svítidlo Naica má nejhorší křivku svítivosti z LED svítidel.

Druhou nejlepší křivku svítivosti má svítidlo Teceo. Nejedná se o tradiční silniční optiku, kterými jsou optiky s označením 5102 či 5103, ale o optiku na velké rozteče a větší šířky komunikace. Tato optika má označení 5098. Optika má velké vyzařování v podélném směru roviny C0-C180 a taktéž v rovině C90-C270 před sebe. Avšak s rozsahem svítivosti optiky od Thornu se toto svítidlo nedá srovnat ani v jedné C rovině.

Jak bylo naznačeno v předchozím odstavci, tak nejvhodnější křivku svítivosti pro nasvětlení plochy testovacího polygonu parkoviště FEI má svítidlo Thorn R2L2. Svítidlo dosahuje nejvyšších svítivosti v obou C rovinách, svítí značně před sebe a je nejvhodnější při použití kamerového systému díky nejvyšší hodnotě vertikální osvětlenosti.

5.2 Výpočet udržovacího činitele pro původní a nové (testované) svítidla na testovacím polygonu parkoviště FEI

Při výpočtu udržovacího činitele osvětlovací soustavy VO je vhodné dodržet následující postup [5]:

1. **Volba svítidla** – Thorn Riviéra 150 W– krytí optické části **IP66** (viz. CD disk - příloha č. 1).
2. **Určení činitele znečištění svítidla** – dle Tab. 9 (z ČSN EN 36 0455) určíme na základě stupně krytí svítidla, pro námi zvolený interval čištění (3 roky), hodnotu činitele znečištění svítidla.

Tab. 9 Hodnoty činitele znečištění svítidla [5]

Stupeň krytí optické části svítidla	Znečištění ovzduší*	Hodnoty činitele znečištění svítidla v závislosti na délce intervalu čištění (roky)				
		1	1,5	2	2,5	3
IP 2x	Malé	0,82	0,8	0,79	0,78	0,78
	Střední	0,62	0,58	0,56	0,54	0,53
	Velké	0,53	0,48	0,45	0,43	0,42
IP 5x	Malé	0,92	0,91	0,9	0,89	0,88
	Střední	0,9	0,88	0,86	0,84	0,82
	Velké	0,89	0,87	0,84	0,8	0,76
IP 6x	Malé	0,93	0,92	0,91	0,9	0,9
	Střední	0,92	0,92	0,91	0,9	0,9
	Velké	0,91	0,9	0,88	0,85	0,83

Pozn. *: Zvoleno střední znečištění ovzduší – oblasti s mírným zdrojem kouře a prachu. Odpovídá střední až velké intenzitě provozu.

Tučným písmem (s šedým pozadím) jsou označeny vybrané parametry, které odpovídají parametrům svítidla.

3. **Určení činitele stárnutí světelného zdroje – vysokotlaká sodíková výbojka Osram VIALOX NAV- T SUPER 4Y 150 W (viz. CD disk - příloha č. 1)** – Hodnota činitele stárnutí světelného zdroje byla určena dle katalogového listu výrobce (viz. CD disk - příloha č. 1). Hodnoty činitele stárnutí světelného zdroje VIALOX NAV-T SUPER 4Y, můžete vidět v Tab. 10. Počítáme s výměnou každé 3 roky (12 000 h) čemuž odpovídá činitel stárnutí světelného zdroje **0,94** (tučně vyznačená hodnota v Tab. 10 na šedém pozadí).

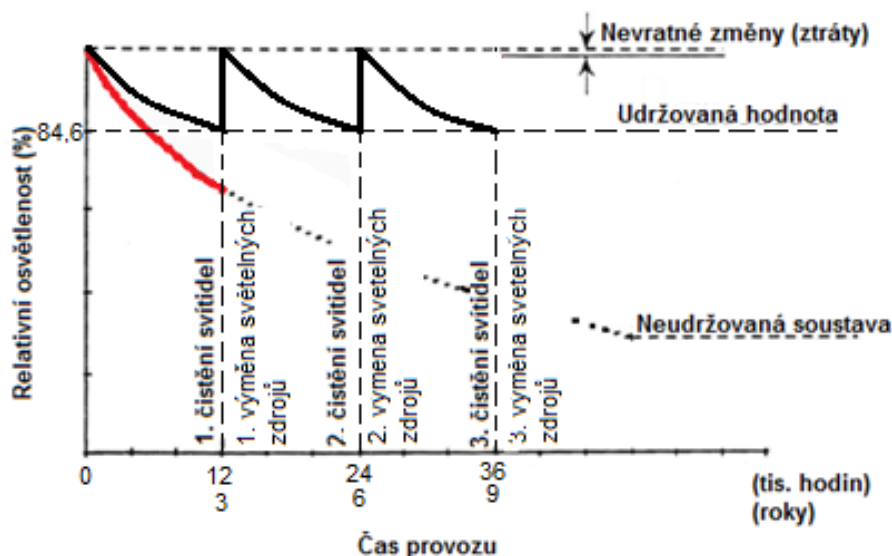
Tab. 10 Hodnota činitele stárnutí světelného zdroje VIALOX NAV-T SUPER 4Y

Typ světelného zdroje	Provozní doba (tisíce hodin)				
	2	4	6	8	12
Vysokotlaká sodíková výbojka 150 W	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94

4. **Výpočet udržovacího činitele** – na základě zjištěných hodnot činitele znečištění svítidla a činitele stárnutí světelných zdrojů vypočítáme dle vztahu (6) hodnotu udržovacího činitele:

$$f_{M(RIVIERA)} = f_{LLM} \cdot f_{LM} = 0,94 \cdot 0,9 = 0,846 \cong 0,85 \quad (6)$$

Výsledný průběh udržovacího činitele svítidla Thorn Riviéra s vysokotlakou sodíkovou výbojkou Osram VIALOX NAV-T SUPER 4Y 150 W můžeme vidět na Obr. 30.



Obr. 30 Udržovací činitel osvětlovací soustavy VO se svítidlem Thorn Riviéra

V případě určení udržovacího činitele pro LED svítidla se bude postupovat obdobně, avšak je nutno počítat s rozdílným uváděním životnostních parametrů. Všechny tři LED svítidla (Naica, R2L2, Teceo) mají totožný životnostní parametr L90B10. To znamená, že na konci životnosti (100 000 hodin) budou LED čipy svítit na 90% počáteční hodnoty světelného toku, pokud 10% LED čipů z celkového počtu budou pod touto hodnotou (výsledný činitel stárnutí světelného zdroje je potom 0,81). Poté bude možné vypočítat udržovací činitel LED dle vztahu:

$$f_{M(LED)} = f_{LLM} \cdot f_{LM} = 0,81 \cdot 0,9 = 0,729 \cong 0,73 \quad (7)$$

Zhodnocení udržovacího činitele LED svítidel (Naica, R2L2 a Teceo) se svítidlem Thorn Riviéra

Oba svítidla mají vzhledem k identickému stupni krytí totožný interval čištění. Původní výbojkové svítidlo Riviéra má vyšší udržovací činitel díky 3letému intervalu výměny světelného zdroje.

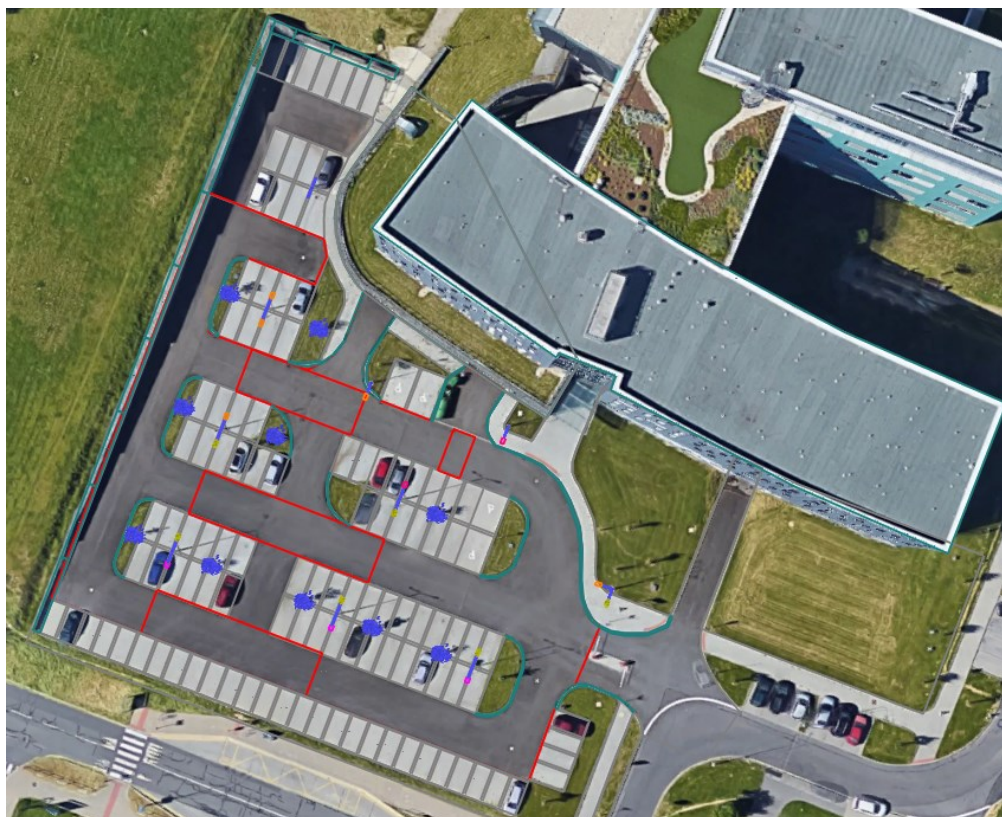
5.3 Zatřídění testovacího polygonu na FEI VŠB-TUO

Jednotlivé rozteče svítidel (Naica, R2L2 a Teceo – viz. Obr. 21) byly dle normy ČSN EN 13201-2 zatříděny do třídy osvětlení **M1**. Relevantní parametry stanovující konkrétní třídu osvětlení byly záměrně vybrány jako nejvyšší, za účelem stmívání testovacího polygonu. Stmívání bude provedeno na třídy osvětlení **M2**, **M3** a **P1** za účelem prokázání energetických úspor a testování použitého řídicího systému. Při stmívání se bere ohled na zachování max. bezpečnosti na komunikaci.

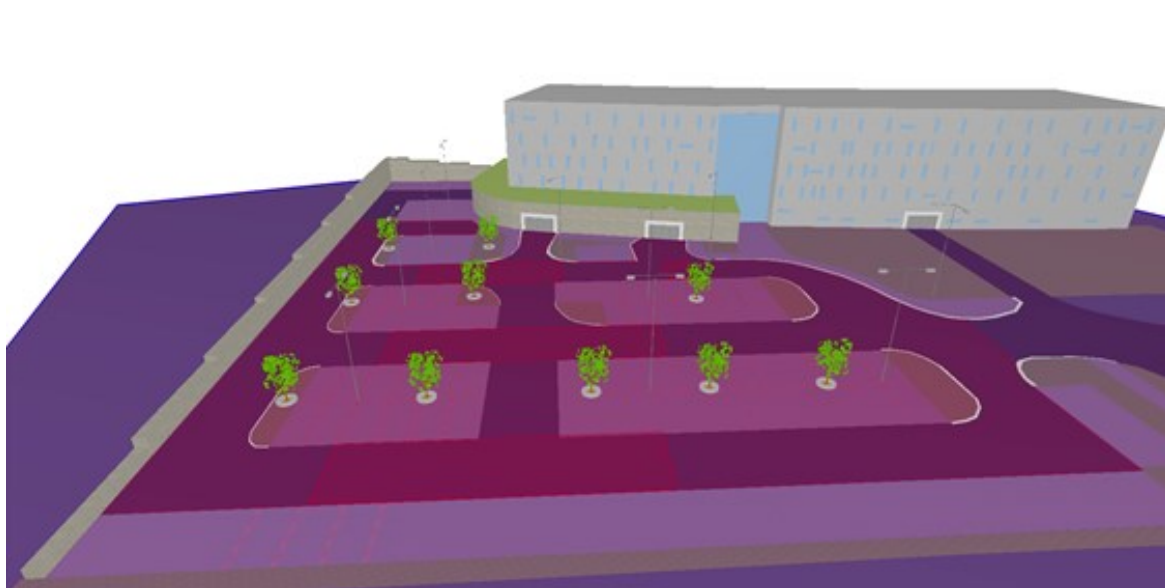
5.4 Světelně-technické výpočty testovacího polygonu na FEI VŠB-TUO

Světelně-technické výpočty byly prováděny ve výpočetním programu Relux Pro. Byl vytvořen komplexní model parkoviště Fakulty elektrotechniky a informatiky, který zohledňuje veškeré odraznosti povrchů. Vyhodnocovací plochy jsou umístěny na asfaltové ploše šířky 6 m vždy mezi roztečemi dvou svítidel (viz Obr. 21). Při výpočtu bylo počítáno pouze s přímou složkou a odrazností asfaltu 7%.

Vymodelovaný prostor můžete vidět na Obr. 31 až 33. Kompletní výpočty lze nalézt na CD disku v příloze č. 2. Na Obr. 31 jsou červenými obdélníky vymezeny výpočtové plochy.



Obr. 31 Situace prostoru parkoviště Fakulty elektrotechniky a informatiky VŠB-TUO



Obr. 32 Model prostoru parkoviště Fakulty elektrotechniky a informatiky



Obr. 33 Nasvětlení prostoru parkoviště FEI pomocí LED svítidel – Pohled 1

5.5 Zhodnocení světelných výpočtů modelu testovacího polygonu parkoviště s požadavky normy ČSN EN 13201-2

Hodnota činitele osvětlení okolí nebyla dle požadavků normy vyhodnocována vzhledem k charakteru prostoru parkoviště. Hodnota podélné rovnoměrnosti nemohla být spočtena vzhledem k definici výpočtového rastru modelu, avšak bude vyhodnocena v části ověření VO v různých režimech provozu měření. Překročení hodnoty prahového přírůstku není vzhledem ke konstrukci LED svítidel možné. Veškeré níže uváděné kvantitativní parametry (jasy) byly stanoveny na základě přílohy č. 2 (viz. CD disk) a byly přepočteny na jasové hodnoty pomocí vztahu:

$$L_m = E_m \cdot q_0 \quad (8)$$

kde L_m ... je průměrná udržovaná hodnota jasu ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$)

E_m ... je průměrná udržovaná hodnota osvětlenosti (lx)

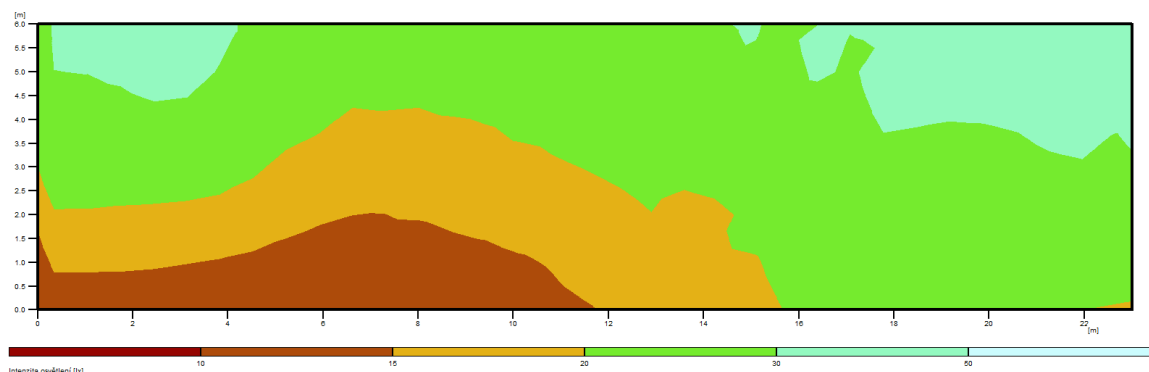
q_0 ... popisuje odrazné vlastnosti asfaltového povrchu (0,07) (-)

5.5.1 Zhodnocení modelu úseku Naica (starý versus nový stav)

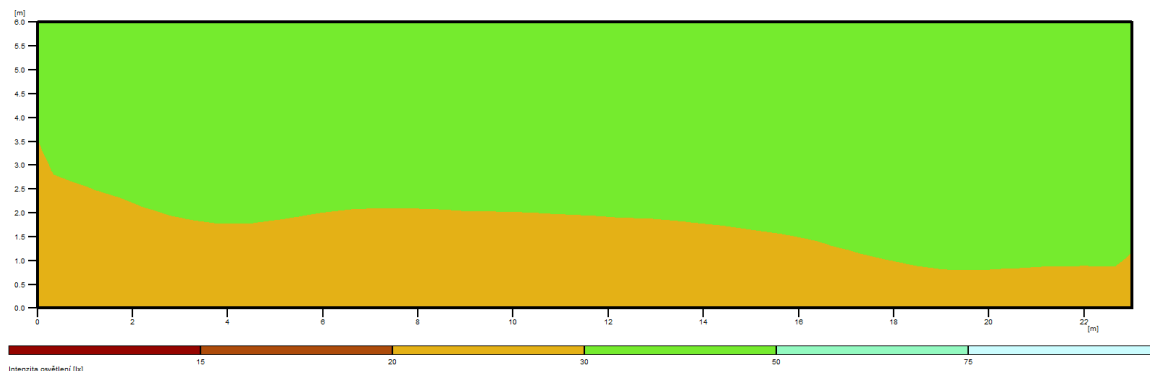
Jedná se o první úsek VO na testovacím polygonu parkoviště FEI, který je nejbližší nemocnici. Tato soustava je realizována jako jednostranná pomocí svítidla Boos Naica. Rozložení osvětlenosti (v pseudobarvách) úseku Naica nového a původního stavu, můžete vidět na Obr. 34 a 35.

Tab. 11 Zhodnocení světelně-technických parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro úsek Naica

Technologie	Poznámka	Požadované hodnoty dle normy ČSN EN 13201-2 (třída osvětlení M1)	
		Průměrný jas $L(\text{cd}/\text{m}^2)$	Celková rovnoměrnost jasu U_0 (-)
	Požadovaná (udržovaná) hodnota	≥ 2	$\geq 0,4$
NAV (Riviéra)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	1,6	0,51
LED (Naica)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	2,5	0,63



Obr. 34 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Naica – původní stav (Riviéra)



Obr. 35 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Naica – nový stav

Zhodnocení vypočtených hodnot jasů a rovnoměrností pro původní (Riviéra) a nový stav (Naica)

Jak je zřejmé z Tab. 11, tak nový stav se svítidlem Boos Naica podává o 36% lepší hodnotu udržovaného jasu a celková rovnoměrnost je o 12 setin lepší oproti původnímu stavu se svítidlem Riviéra. Vyšší hodnota jasu a rovnoměrnosti nového stavu se svítidlem Naica je získána díky širšímu vyzařování v podélné ose a také vhodnějším natočením svítidel. Vyšší jas je také dán vyšším jasnem okolí, který vytváří sousední rozteč se svítidlem R2L2 (podíl na celkovém jasu úseku Naica z rozteče R2L2 činí 9%). Svítidlo Naica splňuje požadavky třídy osvětlení M1, svítidlo Riviéra nikoliv.

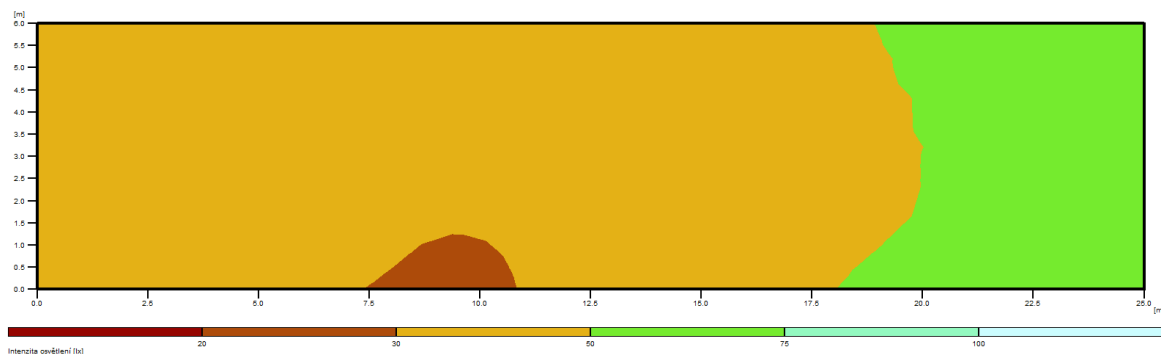
V původním stavu s Thorn Riviérou nebyla svítidla korektně natočena, jelikož výložníky na jednom ze dvou stožárů úseku Naica nebyly natočeny příčně k rovině komunikace, ale podélně. Tato skutečnost vedla k natočení křivky svítivosti jednoho svítidla Thorn Riviéra o 90°, což zapříčinilo nižší hodnotu udržovaného jasu komunikace a nižší hodnotu celkové rovnoměrnosti komunikace U_0 . Původní natočení svítidel Thorn Riviéra na celé ploše testovacího polygonu můžete nalézt v příloze č.2 (CD disk) na půdorysu, který je na straně 21.

5.5.2 Zhodnocení modelu úseku Thorn R2L2 (starý versus nový stav)

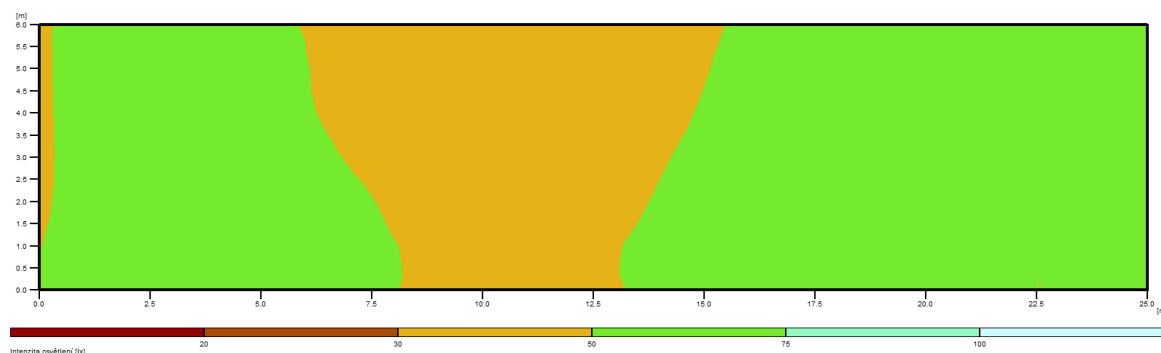
Jedná se o druhý úsek VO na testovacím polygonu parkoviště FEI, který je druhý nejbližší k nemocnici. Tato soustava je realizována jako párová pomocí svítidla Thorn R2L2. Rozložení osvětlenosti (v pseudobarvách) úseku R2L2 nového a původního stavu, můžete vidět na Obr. 36 a 37.

Tab. 12 Zhodnocení světelně-technických parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro úsek R2L2

Technologie	Poznámka	Požadované hodnoty dle normy ČSN EN 13201-2 (třída osvětlení M1)	
		Průměrný jas L (cd/m ²)	Celková rovnoměrnost jasu U_0 (-)
	Požadovaná (udržovaná) hodnota	≥ 2	$\geq 0,4$
NAV (Riviéra)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	2,9	0,69
LED (R2L2)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	3,7	0,85



Obr. 36 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku R2L2 – původní stav (Riviéra)



Obr. 37 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku R2L2 – nový stav

Zhodnocení vypočtených hodnot jasů a rovnoměrností pro původní (Riviéra) a nový stav (Thorn)

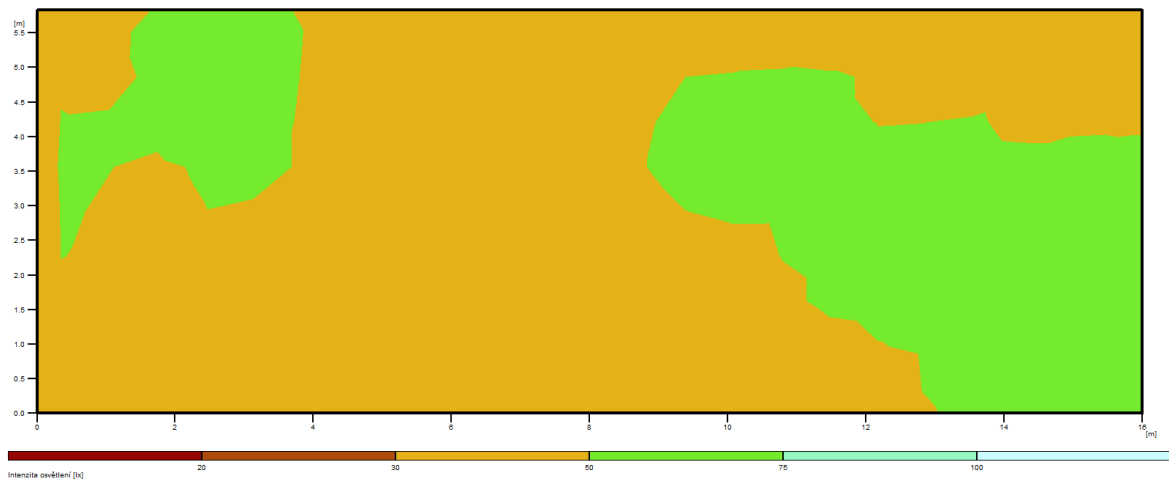
Soustava se svítidly Thorn R2L2 (nový stav) má nejvyšší hodnotu udržovaného jasů ze všech úseků parkoviště a její celková rovnoměrnost je o 16 setin vyšší oproti původní soustavě (Riviéra). Vyšší hodnota jasů a celkové rovnoměrnosti je zapříčiněna především širší křivkou svítivosti svítidla, mírně vyšším světelným tokem svítidla R2L2 a rozdílným natočením svítidel oproti původnímu stavu (viz CD disk - příloha č. 2 – str. 21). K vyšší hodnotě udržovaného jasů nové soustavy rovněž hraje významnou roli velikost příspěvku z okolních soustav, jejichž hodnoty udržovaných jasů jsou také vyšší. Velikost příspěvku z okolních soustav je nezanedbatelných 28%. Velikost příspěvku pro úsek R2L2 je nejvyšší, jelikož se soustava nachází uprostřed nasvětlované plochy parkoviště, tudíž oba úseky (Naica, Teceo) do úseku R2L2 přispívají.

5.5.3 Zhodnocení modelu úseku Schreder Teceo (starý versus nový stav)

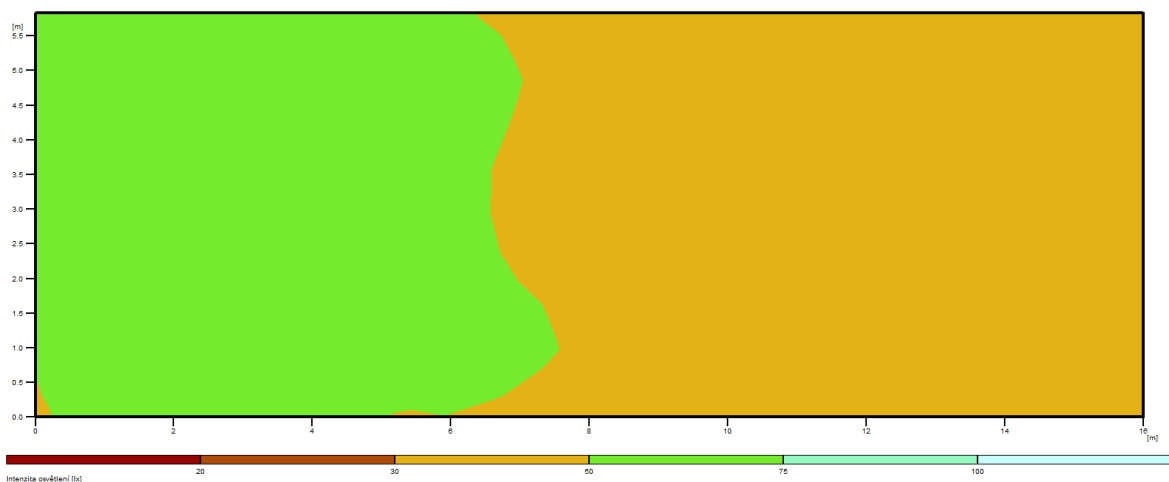
Jedná se o třetí úsek VO na testovacím polygonu parkoviště FEI, který je nejbližší k budově FEI. Tato soustava je realizována jako částečně párová pomocí svítidla Artechnic – Schreder Teceo. Částečně párová proto, že není nasvětlena čtyřmi svítidly, ale pouze třemi. Rozložení osvětlenosti (v pseudobarvách) úseku Teceo nového a původního stavu, můžete vidět na Obr. 38 a 39.

Tab. 13 Zhodnocení světelně-technických parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro úsek Teceo

Technologie	Poznámka	Požadované hodnoty dle normy ČSN EN 13201-2 (třída osvětlení M1)	
		Průměrný jas L(cd/m ²)	Celková rovnoměrnost jasu U ₀ (-)
	Požadovaná (udržovaná) hodnota	≥2	≥0,4
NAV (Riviéra)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	3,4	0,85
LED (Teceo)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	3,5	0,69



Obr. 38 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Teceo – původní stav (Riviéra)



Obr. 39 Rozložení vypočtené udržované osvětlenosti úseku Teceo – nový stav

Zhodnocení vypočtených hodnot jasů a rovnoměrností pro původní (Riviéra) a nový stav (Teceo)

Nová i původní soustava podávají takřka totožné výsledky. Původní soustava (Riviéra) disponuje vyšší celkovou rovnoměrností U_0 , která je zapříčiněna jedním svítidlem, které je u původní soustavy navíc (avšak nachází se za vyhodnocovanou oblastí). Původní soustava je na úseku Teceo realizována 4 svítidly jako párová, kdežto nová soustava pouze 3 svítidly (částečně párová), kvůli prostoru vyhrazenému pro svítidlo osvětlující přechod.

5.5.4 Zhodnocení nejlepšího úseku VO modelu testovacího polygonu parkoviště FEI

Nejlepším úsekem testovacího polygonu parkoviště FEI je úsek Thorn R2L2. Nejlepší výsledek byl dosažen díky mírně vyššímu světelnému toku svítidel R2L2, které úsek nasvětlují a také díky vyšším světelným příspěvkům z úseků Naica a Teceo, které celkem činí rekordních 28%. Při stmívání jednotlivých úseků bude nutno zvážit přepočítání velikosti tohoto příspěvku (pro úsek Thorn R2L2), který se bude značně měnit. Tento přepočítání je nutné provést, abychom vždy zaručili dodržení požadavků konkrétní třídy osvětlení dle ČSN EN 13201-2 pro jednotlivé úseky testovacího polygonu.

5.6 Zhodnocení energetické náročnosti modelu testovacího polygonu parkoviště dle ČSN EN 13201-5

Energetická náročnost byla vyhodnocena podle ukazatele energetické náročnosti PDI (ukazatel příkonové hustoty – výpočet viz CD disk příloha č. 3), který byl vypočten podle následujícího vztahu:

$$D_p = \frac{P}{(\overline{E_i} \cdot A_i)} \quad (9)$$

kde P ... je příkon svítidla zasahující do relevantní oblasti (W)

$\overline{E_i}$... je průměrná udržovaná hodnota horizontální osvětlenosti (lx)

A_i ... je velikost osvětlované plochy (m^2)

5.6.1 Zhodnocení energetické náročnosti úseku Naica (starý versus nový stav)

Tab. 14 Zhodnocení energetické náročnosti VO dle normy ČSN EN 13201-5 pro úsek Naica

Technologie	Hodnota výkonové hustoty PDI a velikost úspory oproti původním stavu	
	PDI($mW \cdot lx^{-1} \cdot m^2$)	Úspora (%)
NAV (Riviéra)	53,8	35,7
LED (Naica)	34,6	

Zhodnocení energetické náročnosti úseku Naica

Na základě udržovaných hodnot jasů z Tab. 11 byla stanovena energetická úspora oproti původní soustavě (Riviéra) na 35,7% (při provozu obou soustav na jmenovitý příkon). Vzhledem k mnohem vyšší hodnotě udržovaného jasu nové soustavy je vypočtená energetická úspora poměrně značná. V následující kapitole číslo 6 bude tato úspora prověřena daty z reálného měření původní i nové soustavy.

5.6.2 Zhodnocení energetické náročnosti úseku Thorn (starý versus nový stav)

Tab. 15 Zhodnocení energetické náročnosti VO dle normy ČSN EN 13201-5 pro úsek R2L2

Technologie	Hodnota výkonové hustoty PDI a velikost úspory oproti původním stavu	
	PDI(mW.lx ⁻¹ .m ⁻²)	Úspora (%)
NAV (Riviéra)	54,1	57,6
LED (R2L2)	22,9	

Zhodnocení energetické náročnosti úseku Thorn

Na základě udržovaných hodnot jasů z Tab. 12 byla stanovena energetická úspora oproti původní soustavě (Riviéra) na 57,6% (při provozu obou soustav na jmenovitý příkon). Vzhledem k mnohem vyšší hodnotě udržovaného jasu nové soustavy a vyššímu příspěvku z okolních soustav, je vypočtená energetická úspora ze všech úseků testovacího polygonu nejvyšší. V následující kapitole číslo 6 bude tato úspora prověřena daty z reálného měření původní i nové soustavy.

5.6.3 Zhodnocení energetické náročnosti úseku Teceo (starý versus nový stav)

Tab. 16 Zhodnocení energetické náročnosti VO dle normy ČSN EN 13201-5 pro úsek Teceo

Technologie	Hodnota výkonové hustoty PDI a velikost úspory oproti původním stavu	
	PDI(mW.lx ⁻¹ .m ⁻²)	Úspora (%)
NAV (Riviéra)	55	28,4
LED (Teceo)	39,4	

Zhodnocení energetické náročnosti úseku Teceo

Na základě udržovaných hodnot jasů z Tab. 13 byla stanovena energetická úspora oproti původní soustavě (Riviéra) na 28,4% (při provozu obou soustav na jmenovitý příkon). I když dle dat z Tab. 13 poskytují soustavy srovnatelné hodnoty udržovaných jasů, tak v případě nového stavu je svítidlo Teceo méně energeticky náročnější (124W u LED versus 170W u Riviéry). Tato skutečnost

vede k vypočtené velikosti energetické úspory 28,4%. V následující kapitole číslo 6 bude tato úspora prověřena daty z reálného měření původní i nové soustavy.

5.6.4 Zhodnocení velikosti ukazatele PDI u jednotlivých roztečí nového stavu

Nejllepší hodnotu ukazatele energetické náročnosti PDI vykazuje úsek se svítidly Thorn R2L2. Tento úsek disponuje nejmenším poměrem udržované hodnoty jasů k příkonu svítidla. Dle vypočtených hodnot je tento úsek energeticky nejefektivnější a to hlavně díky skvělým parametrům svítidla R2L2 a díky vyšším hodnotám světelných příspěvků z okolních úseků (Naica a Teceo).

6 Ověření veřejného osvětlení v různých režimech provozu měřením

Měření umělého osvětlení bylo prováděno na suché vozovce, svítidla byla v provozu minimálně 30 minut a v době provozu byla všechna svítidla zahořena. Kompletní naměřené hodnoty lze nalézt na CD disku – příloha č. 3. Pro vypočtené velikosti udržovacích činitelů (0,85 pro NAV, 0,73 pro LED) byly stanoveny velikosti korekčních činitelů za účelem stanovení přesné hodnoty udržovaného jasu (osvětlenosti):

$$E_m = E_A \cdot c_M = E_A \cdot \frac{f_{M,P}}{f_{M,A}} \quad (10)$$

kde E_m ... je udržovaná hodnota naměřené osvětlenosti (lx)

E_A ... je naměřená (skutečná) hodnota osvětlenosti (lx)

c_M ... je korekční činitel udržovacího činitele (-)

$f_{M,P}$... je projektovaný udržovací činitel, který platí pro soustavu na konci života (-)

$f_{M,A}$... je udržovací činitel, který platí pro soustavu v čase měření (-)

Naměřené udržované hodnoty osvětleností byly následně přepočteny na udržované hodnoty jasu podle vztahu:

$$L_m = E_m \cdot q_0 \quad (11)$$

kde L_m ... je průměrná udržovaná hodnota jasu (cd.m⁻²)

E_m ... je průměrná udržovaná hodnota osvětlenosti (lx)

q_0 ... popisuje odrazné vlastnosti asfaltového povrchu (0,07) (-)

6.1 Ověření světelně-technických parametrů původního stavu (Riviéra)

Jelikož na původní osvětlovací soustavě (Riviéra) nebyla provedena za 5 let provozu pravidelná údržba, byla velikost korekčního činitele vypočtena na 1.

Tab. 17 Zhodnocení naměřených parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro původní stav

Technologie	Poznámka	Požadované hodnoty dle normy ČSN EN 13201-2 (třída osvětlení M1)		
		Průměrný jas L (cd/m ²)	Celková rovnoměrnost jasu U ₀ (-)	Podélná rovnoměrnost jasu U _l (-)
	Požadovaná (udržovaná) hodnota	≥2	≥0,4	≥0,7
NAV (Riviéra)	Naměřená (udržovaná) hodnota pro úsek Naica	2,1	0,55	0,56
	Naměřená (udržovaná) hodnota pro ús. R2L2	3,2	0,67	0,55
	Naměřená (udržovaná) hodnota pro ús. Teceo	3,8	0,8	0,85

Zhodnocení světelně-technických naměřených hodnot pro původní stav (Riviéra)

Veškeré naměřené hodnoty udržovaných jasů a celkových rovnoměrností jsou vyšší než hodnoty vypočtené v modelu polygonu pomocí programu Relux Pro (viz data v Tab. 11, 12 a 13). V případě úseků Naica je naměřená hodnota vyšší o 24% oproti vypočtené v programu Relux Pro, u úseku R2L2 je to 9% a v případě úseku Teceo je vyšší o 11%. Při přepočtu jasů na osvětlenosti je osvětlenost úseku Naica 30 lx, úseku R2L2 46 lx a úseku Teceo 54 lx. Všechny úseky splňují požadavky třídy osvětlení M1 dle ČSN EN 13201-2.

Nižší vypočtené hodnoty udržovaných jasů jsou dány především zastaralým způsobem určování činitele znečištění svítidla (při výpočtu MF), jehož specifické hodnoty vycházejí z výzkumů z 60 let 20 století (viz kapitola 4.3 problémové aspekty současných norem). Tyto hodnoty jsou zbytečně nízké, což sráží výslednou velikost udržovacího činitele. V případě, že by hodnota činitele znečištění svítidla byla o 10% vyšší, vyšly by naměřené a vypočtené hodnoty pro úseky R2L2 a Teceo shodně. U úseku Naica by byla naměřená hodnota pořád o 14% vyšší v důsledku vyššího okolního jasu z přilehlé komunikace od nemocnice, která nebyla ve výpočetním modelu polygonu uvažována.

6.2 Ověření světelně-technických parametrů nového stavu (LED svítidla – Boos, Thorn, Schreder)

Pro nový stav (LED svítidla) je hodnota korekčního činitele rovna hodnotě projektovaného MF (tj. 0,73).

Tab. 18 Zhodnocení naměřených parametrů dle normy ČSN EN 13201-2 pro nový stav

Technologie	Poznámka	Požadované hodnoty dle normy ČSN EN 13201-2 (třída osvětlení M1)		
		Průměrný jas L (cd/m ²)	Celková rovnoměrnost jasu U ₀ (-)	Podélná rovnoměrnost jasu U ₁ (-)
	Požadovaná (udržovaná) hodnota	≥2	≥0,4	≥0,7
LED	Naměřená (udržovaná) hodnota pro úsek Naica	2,4	0,67	0,74
	Naměřená (udržovaná) hodnota pro ús. R2L2	3,2	0,84	0,77
	Naměřená (udržovaná) hodnota pro ús. Teceo	3,1	0,8	0,69

Zhodnocení světelně-technických naměřených hodnot pro nový stav (LED svítidla)

Veškeré úseky nového stavu (Naica, Thorn, Teceo) splňují požadavky třídy osvětlení M1 dle ČSN EN 13201-2. Nutno podotknout, že veškeré úseky jsou přesvětleny (Teceo a Thorn velmi přesvětleny), tudíž by bylo vhodné snížit výkon svítidel a snížit udržovanou hladinu jasu na požadavky třídy osvětlení M1 (původní soustava toto nastavení příkonů neumožňovala). Nejnižší je osvětlenost úseku Naica, která je 34 lx, pak následuje Teceo s 44 lx a nejvyšší hodnotu podává Thorn 46 lx. Úseky nového stavu Naica a Thorn podávají lepší hodnoty udržovaných jasů a rovnoměrností než úseky původního stavu se svítidly Riviéra. V případě úseku nového stavu Teceo jsou hodnoty horší než u původního stavu (jak u jasů, tak rovnoměrností). Tato skutečnost je způsobena tím, že v původním stavu (Riviéra) nasvětlovalo tutéž plochu o jedno svítidlo více, to se nacházelo bezprostředně za výpočetní plochou úseku Teceo.

U úseků nového stavu (kromě Teceo) jsou podélné rovnoměrnosti jasu vyšší než u původního stavu s Riviérou. Vyšší podélné rovnoměrnosti jsou dány především vhodnějším natočením svítidel nového stavu, které jsou natočeny příčně k ose komunikace, kdežto u svítidel Riviéra byly natočeny podélně s osou. Tato skutečnost vedla u Riviéry k tomu, že nebyla správně směřována křivka svítivosti, a tudíž výsledná podélná rovnoměrnost byla horší. Horší podélná rovnoměrnost u úseku Teceo (v porovnání s původním stavem) je způsobena absencí jednoho svítidla (původní úsek nasvětlovali 4 svítidla, teď již jen 3).

Srovnáme-li naměřené udržované hodnoty nového stavu z Tab. 18 s vypočtenými udržovanými hodnotami modelu polygonu z programu Relux Pro (Tab. 11, 12 a 13), můžeme vidět, že naměřené udržované hodnoty jsou mírně nižší. Nižší hodnoty mohou být způsobeny chybným odečítáním hodnot při měření či částečným stíněním čidla luxmetru. Nižší naměřené hodnoty pro nový stav mohou být rovněž způsobeny rozdílnou spektrální citlivostí luxmetru na vyšší teploty chromatičnosti LED svítidel, která je 4 000 Kelvin.

6.3 Ověření energetické náročnosti dle ČSN EN 13201-5 z naměřených hodnot

Na základě naměřených hodnot z Tab. 17 a Tab. 18 byla vyhodnocena energetická náročnost dle ukazatele PDI mezi novým a původním stavem a byla vyčíslena procentuální úspora.

Tab. 19 Zhodnocení energetické náročnosti dle normy ČSN EN 13201-5

Technologie	Úsek VO	Srovnání energetické náročnosti nové a původní osvětlovací soustavy dle normy ČSN EN 13201-5		
		PDI nový stav(mW.lx ⁻¹ .m ⁻²)	PDI původní stav(mW.lx ⁻¹ .m ⁻²)	Úspora (%)
LED vs NAV	úsek Naica	35,9	40,5	11,5
	úsek R2L2	26,2	49,6	47,3
	úsek Teceo	43,8	48,8	10,3

Zhodnocení energetické náročnosti z naměřených hodnot mezi původním (Riviéra) a novým (LED) stavem

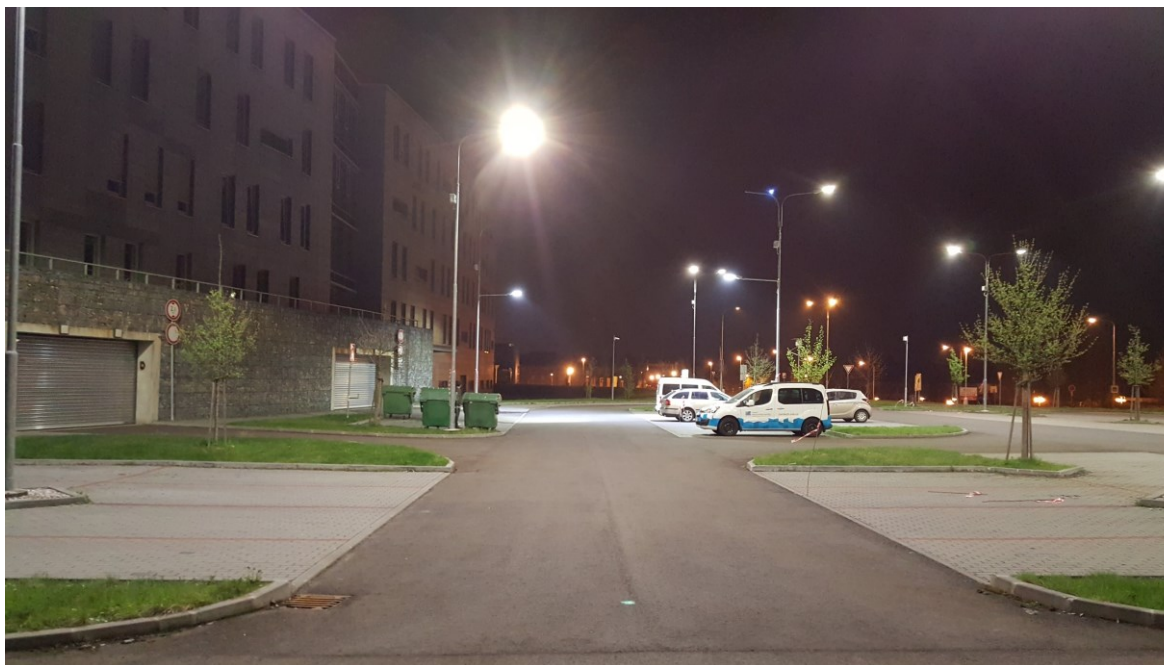
Na základě vyhodnocení ukazatele příkonové hustoty na metr čtvereční komunikace vychází jako nejméně náročný úsek se svítidly R2L2. Nejlepší výsledek je dosažen díky poměrně značnému přisvitu z okolních úseků (28% osvětlenosti tvoří svítidla z úseků Naica a Teceo) a díky mírně vyššímu měrnému výkonu svítidla R2L2. Vyhodnotíme-li velikost úspory, která byla vyhodnocena z naměřené hodnoty osvětlenosti (jasu), tak úsek R2L2 dosahuje úspory 47,3% oproti původnímu stavu (Riviéra).

Druhým úsekem s největší úsporou oproti původnímu stavu je úsek Naica, s 11,5% úsporou a úsekem s nejmenší úsporou je úsek Teceo s 10,3%. Oba tyto úseky mají zákonitě větší ukazatel PDI, jelikož přisvit z okolních oblastí není tak vysoký jako v případě úseku R2L2. U úseku Naica je 9% osvětlenosti tvořeno přisvitem z vedlejší oblasti, u úseku Teceo je to 7%. Tyto hodnoty nejsou ani z jedné třetiny tak velké jako u oblasti R2L2.

Srovnáme-li všechny hodnoty PDI nového stavu, potažmo jejich procentuální úsporu oproti původnímu stavu z vypočtených hodnot v programu Relux Pro (Tab. 14, 15 a 16), můžeme vidět, že velikosti procentuálních úspor jednotlivých úseků z naměřených hodnot jsou značně nižší.

Tyto nižší hodnoty procentuálních úspor PDI pro naměřené hodnoty jsou způsobené především zastaralou metodikou volby udržovacího činitele. Jak již bylo popsáno v kapitole 6.1, tak hodnota činitele znečištění svítidla by měla být vyšší o 10%. Což by způsobilo, že hodnoty energetických náročností PDI v Tab. 14, 15, 16 pro původní stav (z vypočtených hodnot) by byly nižší a s nimi i jejich procentuální úspora oproti novému stavu. Po této korekci by se procentuální úspory z Tab. 14, 15, 16 přibližovali těm v Tab. 19.

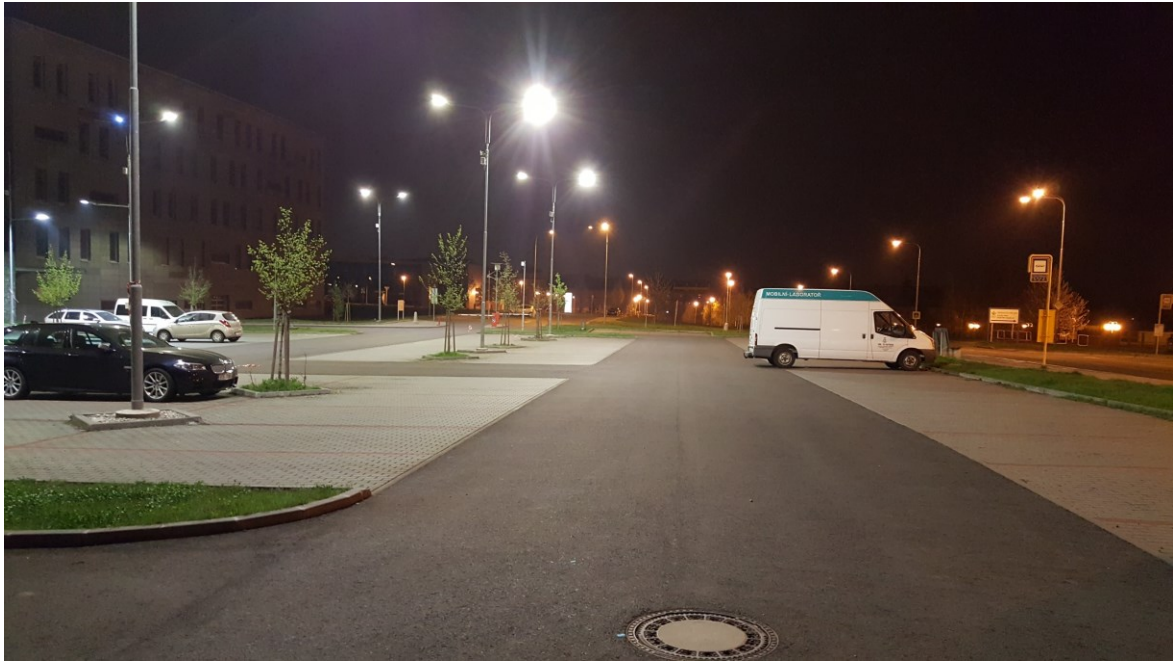
6.4 Fotky nového stavu na testovacím polygonu parkoviště FEI



Obr. 40 Fotografie nového stavu – úsek Teceo (v pozadí přechod pro chodce)



Obr. 41 Fotografie nového stavu – úsek R2L2



Obr. 42 Fotografie nového stavu – úsek Naica



Obr. 43 Fotografie celkového pohledu na nový stav testovacího polygonu - parkoviště FEI

7 Vyhodnocení výhodnosti řízení veřejného osvětlení

Na základě naměřených hodnot z Tab. 17 a 18 byly stanoveny příkony pro jednotlivé úseky pro případ stmívání na třídy osvětlení M1, M2, P1, M3 (viz. CD disk - příloha č. 3). Tyto příkony jsou vyjádřeny jako procentuální velikost jmenovitého příkonu jednoho svítidla. Pro názornost bylo do Tab. 20 a 21 zahrnuto i původní svítidlo Riviéra, které neumožňovalo regulaci příkonu. V Tab. 20 jsou uvedeny příkony svítidel v případě stmívání pouze jedné rozteče. V Tab. 21 jsou uvedeny příkony svítidel pro případ stmívání všech roztečí.

V případě, že bychom snížili osvětlenost (jas) nového stavu na hladinu osvětlenosti (jasu) původního stavu, dostali bychom tutéž procentuální úsporu ukazatele PDI, kterou můžeme vidět v Tab. 19. Jen v případě úseku Teceo není možné osvětlenost snížit na hladinu osvětlenosti původního stavu, jelikož původní stav poskytoval vyšší hodnotu osvětlenosti (úsek Teceo nasvětlovalo jedno svítidlo navíc).

Tab. 20 Příkonová náročnost nového stavu při stmívání pouze 1 rozteče (% příkonu 1 svítidla)

Technologie	Úsek VO	Jmenovitý příkon P (W)	Srovnání příkonové úspory (%) při stmívání na vybrané třídy osvětlení dle ČSN EN 13201-2			
			Příkon pro M1 (% z P)	Příkon pro M2 (% z P)	Příkon pro P1 (% z P)	Příkon pro M3 (% z P)
LED	Původní stav (Riviéra)	170	Nelze regulovat			
	úsek Naica	167	84,7	63,6	44,5	42,4
	úsek R2L2	91	61,6	46,2	32,3	30,8
	úsek Teceo	124	64,6	48,5	33,9	32,3

Tab. 21 Příkonová náročnost nového stavu při stmívání všech roztečí naráz (% příkonu 1 svítidla)

Technologie	Úsek VO	Jmenovitý příkon P (W)	Srovnání příkonové úspory (%) při stmívání na vybrané třídy osvětlení dle ČSN EN 13201-2			
			Příkon pro M1 (% z P)	Příkon pro M2 (% z P)	Příkon pro P1 (% z P)	Příkon pro M3 (% z P)
LED	Původní stav (Riviéra)	170	Nelze regulovat			
	úsek Naica	167	89,6	66,3	45,8	43,6
	úsek R2L2	91	81,2	56,4	37	35,1
	úsek Teceo	124	68	50,3	34,8	33,1

Tab. 22 Procentuální rozdíl příkonů svítidel pro případ stmívání jedné rozteče a všech roztečí

Technologie	Úsek VO	Procentuální rozdíl příkonů při stmívání všech roztečí v provnání s příkony při stmívání pouze jedné rozteče VO			
		Rozdíl příkonu M1 (%)	Rozdíl příkonu M2 (%)	Rozdíl příkonu P1 (%)	Rozdíl příkonu M3 (%)
LED	úsek Naica	4,9	2,7	1,3	1,2
	úsek Thorn	19,6	10,2	4,7	4,3
	úsek Teceo	3,4	1,8	0,9	0,8

Tab. 23 Procentuální úspora příkonů svítidel nového stavu oproti svítidlu původ. stavu (Riviéra)

Technologie	Úsek VO	Procentuální úspora příkonů svítidel nového stavu při stmívání v porovnání se svítidlem původ. stavu (Riviéra)			
		Úspora příkonu M1 (%)	Úspora příkonu M2 (%)	Úspora příkonu P1 (%)	Úspora příkonu M3 (%)
LED	úsek Naica	12	34,9	55	57,2
	úsek Thorn	56,5	69,8	80,2	81,2
	úsek Teceo	50,4	63,3	74,6	75,9

Zhodnocení příkonové náročnosti z naměřených hodnot nového stavu (LED) při stmívání na třídy osvětlení M1, M2, P1, M3

Podíváme-li se na hodnoty z Tab. 20, můžeme vidět, že procentuální velikosti jmenovitých příkonů svítidel pro jednotlivé třídy osvětlení jsou značně nižší oproti původnímu stavu. Největší pokles příkonu je opět u úseku R2L2 vzhledem k jeho vysokému přísvisu z okolních úseků Naica a Teceo. Nejmenší poklesy (úsporu) příkonu poskytuje úsek Naica, jelikož se nachází na okraji parkoviště a přísvisit do této oblasti z okolního úseku R2L2 je velmi malý.

V Tab. 21 jsou vyjádřeny příkony pro stmívání všech úseků nového stavu najednou. Můžeme si povšimnout, že se zde situace podstatně mění. Největší poklesy příkonu už nemá úsek R2L2, ale úsek Teceo. Tato skutečnost je dána především tím, že při stmívání všech roztečí se zmenšují příspěvky z úseků Naica a Teceo do úseku R2L2, a v tomto důsledku je poté nutné navýšit příkon úseku R2L2 tak, aby byly dosaženy potřebné hodnoty osvětlenosti (jasů) pro třídy osvětlení M1, M2, P1, M3 dle ČSN EN 13201-2.

V Tab. 22 je vyjádřen rozdíl příkonů při stmívání pouze jednoho úseku a všech úseků. Můžeme vidět, že největší rozdíl příkonu je u úseků R2L2 v důsledku snižování světelného příspěvku z úseků Naica a Teceo. Tento rozdíl příkonu u úseku R2L2 je značný a v žádném případě ho nelze zanedbat. Zanedbání tohoto rozdílu by vedlo k nesplnění požadavků konkrétní třídy osvětlení. Druhý největší

rozdíl příkonů má úsek Naica. Tento rozdíl příkonů není tak znatelný, jelikož velikost světelného příspěvků z vedlejšího úseku R2L2 je velice malá. Téměř zanedbatelný rozdíl příkonů má úsek Teceo, jehož udržovaná osvětlenost je nejméně ovlivňována okolními úseky.

V Tab. 23 je vyjádřena procentuální úspora příkonů svítidel nového stavu při stmívání vzhledem k jmenovité hodnotě příkonu svítidla původního stavu (Riviéra). Původní svítidlo neumožňovalo regulaci příkonu potažmo světelného toku. Podíváme-li se na hodnoty v Tab. 23, můžeme vidět, že při stmívání na jednotlivé třídy osvětlení je procentuální úspora vzhledem k příkonu původního svítidla (Riviéra) opravdu značná. Největší úspory opět dosahuje úsek R2L2, jelikož má největší světelný příspěvek z okolních úseků. Pro třídu M3 je tedy výsledná příkonová úspora úseku R2L2 rekordních 81,2%. Druhou nejvyšší příkonovou úsporu má úsek Teceo, jehož světelný příspěvek je značně nižší než u úseku R2L2 a proto je úspora o 5,3% menší než u úseku R2L2 (úspora Teceo oproti Riviéře – 75,9%). Nejmenší příkonovou úsporu oproti svítidlu původního stavu má úsek Naica. Úsek Naica má oproti úseku R2L2 úsporu menší o 24%. Tento velký rozdíl je způsoben velmi malým světelným příspěvkem do oblasti Naica z okolních úseků. V tomto důsledku je nutné zvednout příkon svítidla Naica tak, abychom splnili požadavky konkrétní třídy osvětlení dle ČSN EN 13201-2.

8 Závěr

Tato diplomová práce měla několik cílů. Cílem teoretické části bylo prohloubit problematiku LED svítidel a rozebrat možné nové trendy. Velký důraz byl kladen na volbu udržovacího činitele. Teoretickým rozбором udržovacího činitele VO, byly zjištěny dva zásadní problémy. A sice, že nerespektuje přísnější nároky na čistotu ovzduší, což se negativně odráží na velikosti činitele znečištění svítidla, a že nerespektuje rozdílné uvádění životnosti LED svítidel. Tyto skutečnosti sráží hodnotu udržovacího činitele LED svítidla pod hodnotu výbojkového svítidla, což se negativně projeví na výsledné udržované hodnotě světelného výpočtu.

V praktické části této práce bylo provedeno komplexní zhodnocení testovacího polygonu parkoviště FEI jednak ze světelně-technické stránky, ale i ze stránky energetické.

Zhodnocením nových LED svítidel na testovacím polygonu bylo zjištěno, že LED svítidla mají navzájem velmi srovnatelné parametry (měrný výkon, životnost, index podání barev) a značně předčí původní svítidlo parkoviště, kterým bylo Thorn Riviéra (s vysokotlakou sodíkovou výbojkou). Thorn Riviéra má oproti LED svítidlům mnohem nižší měrný výkon v důsledku mírně nižšího měrného výkonu vysokotlaké sodíkové výbojky a mnohem nižší účinnosti svítidla. LED svítidla mají vzhledem k Riviéře také mnohem vyšší životnost světelného zdroje. Avšak svítidlo Riviéra má velmi dobré konstrukční vlastnosti (stupeň krytí), což ho řadí do stejné kategorie intervalu údržby jako LED svítidla.

Praktickým výpočtem udržovacího činitele bylo zjištěno, že v důsledku podhodnocení činitele znečištění svítidla dochází k znatelnému snížení velikosti udržovacího činitele. Jelikož není stanoven nový postup pro výpočet udržovacího činitele LED svítidel, byl udržovací činitel stanoven na základě součinu parametru L90B10, což vedlo k snížení výsledného MF LED svítidel pod úroveň sodíkového svítidla Thorn Riviéra. V budoucnu by se měla problematika volby MF pro LED svítidla vyřešit a přinést vyšší hodnoty výsledného udržovacího činitele pro LED svítidla.

Světelně-technickými výpočty v programu Relux Pro bylo zjištěno, že nová LED svítidla na testovacím polygonu podávají lepší hodnoty osvětleností a rovnoměrností oproti původnímu stavu. Tato skutečnost je způsobena především lepšími měrnými výkony nových svítidel a jejich rozdílným natočením. Dále bylo zjištěno, že pro úsek R2L2, který se nachází uprostřed testovacího polygonu, hraje zásadní vliv na jeho celkové osvětlenosti velikost světelných příspěvků z okolních úseků VO.

Vyhodnocením energetických náročností z vypočtených hodnot bylo zjištěno, že svítidla nového stavu v důsledku vyšších osvětleností a nižších příkonů vykazují mnohem nižší energetickou náročnost. Tato náročnost nemohla být vyhodnocena dle charakteristických hodnot normy ČSN EN 13201-5, jelikož v případě energetické náročnosti testovacího polygonu hrály zásadní vliv velikosti světelných příspěvků z okolních úseků VO.

Měřením původní osvětlovací soustavy (s Riviérou) testovacího polygonu FEI bylo zjištěno, že soustava ve skutečnosti podávala lepší naměřené udržované hodnoty osvětleností než u světelně-technického výpočtu. Tento fakt je způsoben podhodnocenou (sníženou) hodnotou udržovacího činitele v důsledku nekorektní velikosti činitele znečištění svítidla, která nerespektuje přísnější nároky na čistotu ovzduší.

Měřením nové osvětlovací soustavy bylo zjištěno, že naměřené udržované hodnoty jsou nižší než ty vypočtené v programu Relux Pro. Příčina nižších naměřených hodnot může být způsobena jednak chybami při měření (špatné odečty, stínění čidla luxmetru) či rozdílnou spektrální citlivostí luxmetru na vyšší teplotu chromatičnosti LED svítidel (4 000 K).

Vypočtené úspory u energetických ukazatelů vyšly u naměřených hodnot nižší než u vypočtených. Na této skutečnosti se opět podílí nekorektní velikost činitele znečištění svítidla, která nerespektuje přísnější požadavky na čistotu ovzduší.

V poslední části této práce je navrženo stmívání nového stavu testovacího polygonu parkoviště FEI. Zde je možné vidět velkou výhodu LED svítidel oproti konvenčnímu výbojovému svítidlu a tou je možnost dynamického stmívání na základě požadavků intenzity provozu a okolního jasu. Navržená soustava na polygonu umožňuje na základě dat z kamerového systému vyhodnotit situaci podle hodnoty intenzity provozu a přizpůsobit hodnotu osvětlenosti (jasů) dané intenzitě provozu, která odpovídá požadavkům normy ČSN EN 13201-2. Tento způsob řízení nám přináší zaručené energetické úspory (ve srovnání s původním stavem, který neumožňoval regulaci) a zvýšení bezpečnosti provozu. Praktickými výpočty stmívání testovacího polygonu bylo zjištěno, že při stmívání nesmíme opomenout změnu velikosti světelných příspěvků z okolních úseků. Jejich zanedbání by vedlo k nedodržení požadavků normy ČSN EN 13201-2.

Použitá literatura

- [1] *Energetický audit osvětlovacích soustav veřejného osvětlení*. Ostrava, 2016. Bakalářská práce. VŠB-TUO. Vedoucí práce Doc. Ing. Tomáš Novák Ph.D.
- [2] Colour transitions in road lighting. In: *Proceedings of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017*. Jeju South Korea: Commission internationale de leclairage CIE Central Bureau, 2017, s. 143-149. ISBN 978-3-901906-95-4.
- [3] Determination of road lighting automation strategies considering driving safety based on visibility concept. In: *Proceedings of the Conference on "Smarter Lighting for Better Life" at the CIE Midterm Meeting 2017*. Jeju South Korea: Commission internationale de leclairage CIE Central Bureau, 2017, s. 277-283. ISBN 978-3-901906-95-4.
- [4] TNI 36 0451. *Údržba vnitřních osvětlovacích soustav*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [5] ČSN 36 0455. *Osvětlení pozemních komunikací - doplňující informace*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [6] Návrh aktualizácie metodiky na určenie udržiavacieho činiteľa pre vnútorné aj vonkajšie osvetľovacie sústavy. In: *Proceedings of the 22nd international conference*. 1. Bratislava: Slovenská svetelnotechnická spoločnosť, 2017, s. 278-290. ISBN 978-80-972865-0-7. ISSN 9788097286507.
- [7] *TM-21-11*. 1. USA: Illuminating Engineering Society of North America, 2011.
- [8] *Katalog vysokotlakých rtuťových výbojek* [online]. Praha: OSRAM, 2016 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: http://www.osram.cz/osram_cz/produkty/svetelne-zdroje/vysoce-intenzivni-vybojky-hid/rtutove-vybojky-pro-otevrena-a-uzavrena-svitidla/hql/index.jsp
- [9] ČSN EN 60721-3-4. *Klasifikace podmínek prostředí: Část 3: Klasifikace skupin parametrů prostředí a jejich stupňů přísnosti - Oddíl 4: Stacionární použití na místech nechráněných proti povětrnostním vlivům*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [10] ČSN EN 60721-3-3. *Klasifikace podmínek prostředí: Část 3: Klasifikace skupin parametrů prostředí a jejich stupňů přísnosti - Oddíl 3: Stacionární použití na místech chráněných proti povětrnostním vlivům*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [11] ČSN 33 2000-5-51. *Elektrické instalace nízkého napětí - Část 5-51: Výběr a stavba elektrických zařízení - Všeobecné předpisy*. Ed. 3. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [12] Poléťavý prach PM10, PM2,5, PM1,0. *Čisté nebe* [online]. Ostrava: Čisté nebe, - [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <http://www.cistenebe.cz/stav-ovzdusi-na-ostravsku/slovnicek-pojmu/13-poletavy-prach-pm10-pm25-pm10>
- [13] Experimental Investigation of the Correlation between Power Consumption and Luminous Flux of LED Luminaires in Adaptive Road Lighting. In: *Proceedings of the LUX Europa 2017 European Lighting Conference*. Ljubljana: Lighting engineering society of Slovenia, 2017, s. 131-136. ISBN 978-961-93733-4-7.

- [14] Spínání a jištění LED osvětlení. *Tzbinfo* [online]. Praha: tzbinfo, 2017 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/osvetleni/15829-spinani-a-jisteni-led-osvetleni>
- [15] Katalog svítidla Voltana. *Artechnic-Schreder* [online]. Praha: Artechnic-Schreder, 2017 [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://www.technic-schreder.cz/produkty/voltana?tech=1>
- [16] Katalog svítidla boos Naica. *Boos* [online]. Moscow: boos, 2017 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.booslight.com/products/naica/#n1>