

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

**Energetický audit osvětlovacích soustav veřejného osvětlení
Energy audit of public lighting systems**

2016

Petr Šebesta

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Petr Šebesta**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Energetický audit osvětlovacích soustav veřejného osvětlení**
Energy audit of public lighting systems
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- o Normativní požadavky na veřejné osvětlení
- o Světelné zdroje použitelné ve veřejném osvětlení
- o Svítidla použitelná ve veřejném osvětlení
- o Řízení veřejného osvětlení
- o Rozbor připravované normy EN 13201-5 – Road Lighting – Part 5: Energy Performance in Road Lighting
- o Porovnání energetické náročnosti standardních a moderních osvětlovacích soustav z naměřených a vypočtených hodnot

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
- [4] Manuály k výpočetním programům (Relux, Dialux, WILS)
- [5] www.csorsostrava.cz


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

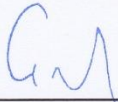
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016





prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

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

V Ostravě dne: 27. dubna 2016


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Tomáši Novákovi, Ph.D za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Náplní této bakalářské práce je zhodnotit energetickou náročnost osvětlovacích soustav veřejného osvětlení. V teoretické části této práce se zabývám normativními požadavky, které jsou na veřejné osvětlení kladeny společně s řadou kvalitativních a kvantitativních parametrů, které jsou rozhodující při volbě svítidla či samotného světelného zdroje. Velký důraz je kladen na výhody použití LED ve veřejném osvětlení. Klíčovou částí této práce je rozbor připravované normy, která posuzuje energetickou náročnost veřejného osvětlení na základě vybraného typu svítidla a zvolené technologie světelného zdroje pro konkrétní realizaci. V praktické části bude tato nová norma aplikována na dvě již realizované soustavy veřejného osvětlení, kde z vypočtených a následně i ověřením z naměřených hodnot bude vyhodnocena výhodnost použití LED pro aplikace ve veřejném osvětlení. V této práci bude také vytvořena univerzální tabulka, která na základě vstupních parametrů dané osvětlovací soustavy vyhodnotí její energetickou náročnost.

Klíčová slova

Veřejné osvětlení, energetická náročnost, účinnost, měrný výkon, normativní požadavky, LED, index podání barev, náhradní teplota chromatičnosti, regulace

Abstract

The subject of this thesis is to evaluate the energy performance of public lighting. The theoretical part of this thesis deals with the normative requirements that are imposed on public lighting together with a number of qualitative and quantitative parameters that are crucial when selecting luminaire or the light source itself. Great emphasis is given on the advantages of using LEDs in street lighting. A key part of this thesis is to analyze upcoming standards, which assesses the energy performance of street lighting based on the selected type of luminaire and light source technology selected for a particular implementation. In the practical part of this thesis, the new standard will be applied to two already existing public lighting systems, where the calculated and subsequent verification of measured values will be evaluated the benefits of using LEDs for applications in public lighting. In this work will be also be created universal table that based on the input parameters of the lighting system evaluates its energy performance.

Key words

Public lighting, energy performance, efficiency, luminous efficiency, normative requirements, LED, color rendering index, correlated color temperature, regulation

Obsah

1	Úvod	1
2	Normativní požadavky na veřejné osvětlení	2
2.1	Výběr tříd osvětlení dle ČSN CEN/TR 13201-1	3
2.1.1	Relevantní oblasti, určování parametrů a technická doporučení	3
2.2	Požadavky kladené na jednotlivé třídy osvětlení dle ČSN EN 13201-2	6
2.3	Výpočet fotometrických parametrů dle ČSN EN 13201-3	8
2.4	Metody měření fotometrických parametrů dle ČSN EN 13201-4	9
3	Světelné zdroje použitelné ve veřejném osvětlení	10
3.1	Základní parametry světelných zdrojů, které mají vliv na energetickou bilanci VO	10
3.2	Kvalitativní parametry světelných zdrojů	11
3.3	Světelné zdroje používané ve veřejném osvětlení	13
3.3.1	Vysokotlaká sodíková výbojka	13
3.3.2	LED	15
3.4	Význam mezopického vidění při výběru náhradní teploty chromatičnosti	19
4	Svítilna použitelná ve veřejném osvětlení	21
4.1	Světelně technické parametry svítidel	21
4.2	Skladba svítidel používaných ve VO	23
4.2.1	Optické části svítidel	23
4.2.2	Elektrotechnické části svítidel	26
4.2.3	Konstrukční části svítidel	27
4.2.4	Ochrana svítidel (Třídy ochrany, IP, IK)	28
4.3	Porovnání komponentů LED svítidla se svítidlem s NAV	30
5	Řízení veřejného osvětlení	31
5.1	Základní principy regulace světelného toku osvětlovací soustav VO	32
5.2	Způsoby řízení osvětlovacích soustav VO	35
5.2.1	Astronomické hodiny	35
5.2.2	Telemanagement – využití přenosu přes GSM a technologie PLC	35
5.3	Určení vhodnosti stmívání osvětlovacích soustav VO	38
6	Rozbor připravované normy EN 13201-5 Energy performance indicators	39
6.1	PDI (Indikátor výkonové hustoty) –Power Density Indicator	40
6.2	AECI (Annual Energy Consumption Indicator)	42
6.3	Režimy řízení VO	43

6.4	Hodnoty ukazatelů PDI a AECI pro standardní osvětlovací soustavy VO	44
6.5	Měrný výkon osvětlovacích soustav VO.....	46
7	Stanovení energetické náročnosti VO na ulici Studentská a Technologická.....	48
7.1	Posouzení kvantitativních a kvalitativních parametrů svítidel a světelných zdrojů	51
7.2	Zatřídění komunikací	57
7.3	Kvantitativní a kvalitativní parametry kladené na třídu osvětlení ME5.....	60
7.3.1	Zhodnocení světelně-technických parametrů pro třídu ME5	61
7.4	Výpočet energetické náročnosti realizovaných soustav VO dle EN 13201-5	63
7.4.1	Výpočet ukazatelů PDI a AECI.....	67
7.5	Zhodnocení energetické náročnosti VO na ulicích Studentská a Technologická	70
8	Závěr.....	73

Seznam použitých symbolů a zkratek

AECI	- Annual Energy Consumption Indicator
DALI	- Digital Addressable Lighting Interface
IK	- Ochrana proti mechanickému poškození
IP	- Stupeň krytí
LED	- Light emitting diode
NAV	- Vysokotlaká sodíková výbojka
PC	- Polykarbonát
PDI	- Power Density Indicator
PELV	- Protected extra-low voltage
PLC	- Power-line communication
PMMA	- Akrylátové sklo
PN	- Polovodičový PN přechod
PWM	- Pulse Width Modulation
RVO	- Rozvaděč veřejného osvětlení
SELV	- Safety extra-low voltage
VO	- Veřejné osvětlení

Seznam obrázků

Obr. 1 Jedna relevantní oblast (pouze jízdní pás)	4
Obr. 2 Dvě relevantní oblasti (navrhujeme odděleně)	4
Obr. 3 Teplota chromatičnosti [4]	12
Obr. 4 Spektrální složení světla vysokotlakých sodíkových výbojek	13
Obr. 5 Čip Bílé LED s fosforovým luminoforem a příklad jejího spektra [4]	15
Obr. 6 Příklad vyráběného LED pásku s RGB čipy a jeho spektra [27]	16
Obr. 7 Závislost světelného toku bílé LED na teplotě [5]	17
Obr. 8 Závislost doby života LED čipu na velikosti pracovní teploty [5]	17
Obr. 9 Poměrné spektrální rozložení NAV a poměrná spektrální citlivost oka [17]	19
Obr. 10 Poměrné spektrální rozložení LED a poměrná spektrální citlivost oka [17]	20
Obr. 11 Úhel clonění svítidla	22
Obr. 12 Křivky svítivosti v polárních souřadnicích svítidla VO	23
Obr. 13 Základní optické prvky pro usměrnění světelného toku [4]	23
Obr. 14 Fasetový reflektor [12]	24
Obr. 15 Svítidlo s možností změny polohy reflektoru [12]	24
Obr. 16 Svítidlo s refraktorovým difuzorem (Fresnelova čočka) [12]	25
Obr. 17 Svítidlo s vypouklým difuzorem [12]	26
Obr. 18 Induktivní předřadník a jeho schéma zapojení s NAV	26
Obr. 19 Elektronický předřadník pro výbojku	27
Obr. 20 Závislost příkonu na velikosti světelného toku [21]	31
Obr. 21 Provedení skupinového rozvaděče (regulátoru) [21]	32
Obr. 22 Fázová regulace sestupné části (AWI) a jednotka fázového regulátoru Intelux NG [24]	33
Obr. 23 Princip PWM regulace (ukázka signálu se střídou 25,50,75%) [23]	34
Obr. 24 Stmívatelný LED driver na bázi konstantního zdroje proudu [25]	34
Obr. 25 Astronomické hodiny [26]	35
Obr. 26 Centralizovaný systém řízení využívající PLC a GSM [21]	37
Obr. 27 Decentralizovaný systém řízení GSM [22]	38
Obr. 28 Režim plného příkonu [11]	43
Obr. 29 Dvouúrovňový režim řízení příkonu [11]	43
Obr. 30 Víceúrovňový režim řízení příkonu [11]	44
Obr. 31 Uspořádání komunikace třídy osvětlení M [11]	45
Obr. 32 Svítidlo na ulici Technologická - Artechnic-Schröder MC12	49
Obr. 33 Svítidlo na ulici Studentská - Philips Luma 1 R3	49
Obr. 34 Znázornění začátků a konců ulic Studentská a Technologická	50
Obr. 35 Vysokotlaká sodíková vábojka (nalevo) a LED modul svítidla Philips Luma (napravo)	51
Obr. 36 Svítidlo Schröder MC12 (nalevo) a svítidlo Philips Luma 1 R3 (napravo)	51
Obr. 37 Konvenční předřadník svítidla MC12	55
Obr. 38 Princip regulace na principu umělé pŕnoci (DynaDimmer by Philips)	56
Obr. 39 Křivky svítivosti Schröder MC12 a Philips Luma 1 R3	56

Seznam tabulek

Tab. 1 Řada tříd osvětlení ME [8].....	6
Tab. 2 Příklad měrných výkonů pro světelné zdroje využívané ve VO.....	11
Tab. 3 Příklad náhradních teplot chromatičnosti pro světelné zdroje ve VO.....	12
Tab. 4 Životnosti světelných zdrojů používaných ve VO.....	13
Tab. 5 Provedení výbojky v závislosti na velikosti příkonu a měrného výkonu pro VO [20].....	14
Tab. 6 Klasifikace svítidel podle rozložení světelného toku [4].....	22
Tab. 7 Porovnání komponentů LED svítidla a svítidla s NAV [28].....	30
Tab. 8 Typické hodnoty ukazatele PDI pro třídu osvětlení M [11].....	45
Tab. 9 Typické hodnoty ukazatele AECI pro třídu osvětlení M [11].....	46
Tab. 10 Srovnání kvantitativních a kvalitativních parametrů - Philips Luma versus Schröder MC12	53
Tab. 11 Určená skupina světelných situací	57
Tab. 12 Doporučený rozsah třídy osvětlení pro skupinu světelných situací B1.....	58
Tab. 13 Doporučení pro výběr z rozsahu tříd osvětlení	58
Tab. 14 Doporučení pro výběr z rozsahu tříd osvětlení	59
Tab. 15 Řada tříd osvětlení ME (v nové normě značeno pouze M).....	61
Tab. 16 Zhodnocení světelně-technických parametrů na základě požadavků normy EN 13201-2.....	61
Tab. 17 Přetřídění komunikace na ulici Studentské na základě snížené inenzity dopravy	66
Tab. 18 Zhodnocení ukazatelů energetické náročnosti VO na ulici Studenstká a Technologická.....	70
Tab. 19 Prezentování velikosti ukazatelů PDI a AECI dle požadavků normy EN 13201-5	72
Tab. 20 Prezentování velikosti ukazatelů PDI a AECI dle požadavků normy EN 13201-5	72

1 Úvod

V dnešní době se řada osvětlovacích soustav veřejného osvětlení nachází na hranici životnosti, či přesluhují již pěknou řádku let. Nabízí se tedy otázka rekonstrukce. Před rekonstrukcí je nutno zvážit současný stav osvětlovací soustavy a zvolit, zda pouze vyměnit stará svítidla za nová, nebo vyměnit celou konstrukci stožáru i se svítidlem. Se zvyšující se hodnotou měrných výkonů aktuálně dostupných LED (až 170 lm/W), stojí vzít v úvahu, zda namísto svítidla s NAV nezvolit úspornější LED svítidla, jelikož v pořizovacích nákladech již není tak velký cenový rozdíl.

Teoretická část této práce se zabývá normativními požadavky, které musí dnešní osvětlovací soustavy veřejného osvětlení splňovat spolu s rozбором kvalitativních a kvantitativních parametrů dnes dostupných světelných zdrojů a svítidel.

Velmi dobrá dostupnost a snižující se cena systémů řízení, nám umožňují značně snižovat náklady na provoz a údržbu veřejného osvětlení. Před samotnou regulací je však nutné provést analýzu intenzity provozu na dané komunikaci, abychom správně nastavili spínací časy jednotlivých regulačních stupňů.

V praktické části této práce je na základě nové normy zhodnocena energetická náročnost dvou osvětlovacích soustav veřejného osvětlení, kde každá z nich používá jinou technologii světelných zdrojů. V praktické části jsou také zhodnoceny kvantitativní a kvalitativní parametry obou svítidel společně se zhodnocením normativních požadavků.

2 Normativní požadavky na veřejné osvětlení

Návrhy osvětlovacích soustav VO se řídí souborem norem ČSN CEN/TR 13201-1 a ČSN EN 13201-(2,3,4), které jsou při navrhování případné modernizace stávající osvětlovací soustavy zásadní a je nutno se jimi řídit.

V případě ČSN CEN/TR 13201-1 se nejedná o normu, ale technickou zprávu, která nám podle základních parametrů (rychlost vozidla, druh uživatel komunikace, prostorového uspořádání a vnějších vlivů) pomáhá vybrat potřebnou třídu osvětlení pro daný úsek komunikace. Jejím hlavním úkolem je bližší specifikace tříd osvětlení uvedené v ČSN EN 13201-2 a poskytuje návod k použití. Nedílnou součástí normy ČSN CEN/TR 13201-1 je i soubor charakteristických parametrů, pomocí něhož silniční správní úřady popisují daný úsek pozemní komunikace. Na základě tohoto popisu je možné vybrat příslušnou třídu osvětlení.

Norma ČSN EN 13201-2 definuje třídy osvětlení na základě fotometrických požadavků, které vycházejí ze zrakových požadavků uživatele pro konkrétní typ pozemní komunikace a jejího okolního prostředí. Tato norma vznikla za účelem usnadnění vývoje a použití výrobků z oblasti světelné techniky pro osvětlení pozemních komunikací a její údržbu v rámci členských zemí CEN. Tato norma blíže specifikuje požadavky dané třídy osvětlení, kterou jsme vybrali na základě technické zprávy ČSN CEN/TR 13201-1.

Norma ČSN EN 13201-3 nám poskytuje návod, jak postupovat při výpočtu funkčních fotometrických parametrů, pomocí nichž jsou definovány jednotlivé třídy osvětlení pozemních komunikací uvedené v normě ČSN EN 13201-2. Abychom mohli vypočítat příslušné fotometrické parametry (např. průměrný jas, polokulovou, poloválcovou a svislou osvětlenost), které konkretizují použití dané třídy osvětlení, musíme si zavést řadu matematických zjednodušení: svítidlo považujeme za bodový zdroj, neuvažujeme zpětné odrazy světla od okolí, nezahrnujeme překážky zabraňující volné šíření světelného toku svítidla do okolí, atd. Nezbytným základem (bez nich nelze parametry stanovit) pro stanovení jasových podmínek dané komunikace (třídy osvětlení ME), případně stanovení jejích parametrů osvětlenosti (třídy S, A, ES a EV), jsou i-tabulky (svítivost svítidla do relevantních směrů) a r-tabulky (popisují odrazné vlastnosti povrchu komunikace). Před finálním výpočtem osvětlenosti, případně jasu povrchu vozovky pro navrhovanou třídu osvětlení, musíme brát v potaz řadu proměnných: orientaci a rotaci svítidla, úhel natočení svítidla a definici výpočtových polí pro stanovení hodnot jasu a osvětlenosti (výpočtové pole jsou definovány zvlášť pro jas a zvlášť pro osvětlenost).

Norma ČSN EN 13201-4 nám radí, jak postupovat při měření osvětlenosti případně jasu komunikace, abychom dosáhli co nejvyšší přesnosti a bylo tak možné naměřené hodnoty porovnat s vypočtenými. Při měření jasu povrchu vozovky je problém dosáhnout vysoké přesnosti měření, protože odrazné vlastnosti povrchu komunikace nejsou v celém prostoru komunikace stejné a ovlivňuje je řada faktorů (např. vlhkost, olejové skvrny na vozovce, opotřebení povrchu), což vede k velkým rozdílům v hodnotách jasů mezi jednotlivými měřicími body, a proto je důležitější porovnat naměřené a vypočtené hodnoty osvětlenosti. Norma nám pomáhá s výběrem luxmetru a jasoměru pro specifické požadavky daného měření a radí jak přístroj správně používat, abychom docílili co nejvyšší přesnosti měření při zohlednění všech možných vlivů (především klimatických).

2.1 Výběr tříd osvětlení dle ČSN CEN/TR 13201-1

Abychom zjistili, jaké třídy osvětlení odpovídá navrhovaný úsek pozemní komunikace, je nutno postupovat podle následujícího postupu, na jehož konci se dozvíme požadavky kladené pro konkrétní třídu osvětlení.

Postup odvození příslušné třídy osvětlení [7]:

1. Nejprve je nutné definovat navrhovaný prostor pozemní komunikace, pro oblast komunikace, která se bude při návrhu zahrnovat a následně podle rychlosti hlavního uživatele, dalších povolených nebo nepovolených uživatelů vybrat z Tabulky světelných situací (viz Příloha č.1 Tab. A) konkrétní typ světelné situace (A1...E2).
2. Pro vybranou skupinu světelné situace použít odpovídající tabulku (pro uvažovaných případ A1 se jedná o Tab. B v příloze č.1).
3. Přesné definování relevantních oblastí, které budeme pro danou světelnou situaci uvažovat. Je třeba zvážit, jak danou oblast komunikace rozdělíme, které části komunikace se budou pro danou světelnou situaci uvažovat a části, které odpovídají jiné skupině světelných situací (chodníky, komunikace pro cyklisty). V případě skupiny světelných situací A1,A2,A3 se nemusí chodníky zahrnovat do relevantní oblasti, jelikož uvažujeme s činitelem osvětlení okolí přilehlého jízdní pásu, který nám chodníky dostatečně osvětlí.
4. Na základě prostorového uspořádání komunikace, vlivu dopravy a vlivů okolí vybereme z Tab. B odpovídající rozsah třídy osvětlení.
5. Pomocí Tab. C (v příloze č. 1), vybereme již konkrétní třídu osvětlení (např. ME3a), na základě výskytu konfliktní oblasti, míry složitosti zorného pole, náročnosti navigace a v poslední řadě podle velikosti okolního jasu.
6. Pro danou třídu osvětlení (např. ME3a-Tab.E), zjistíme pomocí normy 13201-2 požadavky kladené pro námi navrhovaný úsek pozemní komunikace.
7. Použití všeobecných doporučení pro omezení oslnění, dosažení vysoké kvality podání barev a možnostem použití tříd osvětlení v sousedních oblastech.

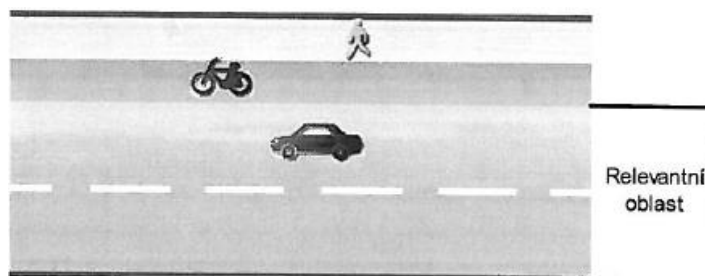
2.1.1 Relevantní oblasti, určování parametrů a technická doporučení

Při návrhu pozemní komunikace je nutné znát přesné požadavky z okruhu určování relevantních oblastí pro danou skupinu světelných situací, charakteristických parametrů a obecně technických doporučení.

Určování relevantních oblastí pro skupinu světelných situací (A1,A2,A3)

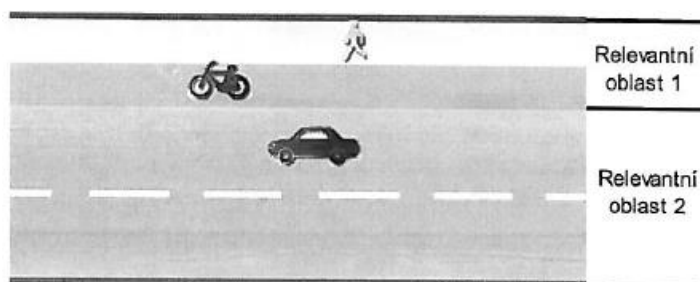
V případě pozemní komunikace, která nemá žádné přidružené pruhy (např. autobusový), přilehlé chodníky nebo komunikace pro cyklisty, je šířka oblasti dána vnějšími okraji jízdního pásu případně obrubníky. Je-li daná komunikace směrově rozdělená, je šířka relevantní oblasti dána šířkou obou jízdních pruhů a středního dělicího pásu (je-li malé šířky). V případě kdy šířka středního dělicího pásu je větší, než dovoluje norma, je nutno uvažovat oba jízdní pásy samostatně. Má-li navrhovaný úsek pozemní komunikace přidružené pruhy či zpevněné krajnice, lze tento úsek řešit odděleně (zvlášť řešíme jízdní pruh a krajnice), nebo uvažujeme daný úsek jako celek. [7]

V případě kdy ke komunikaci přiléhají chodníky nebo komunikace pro cyklisty, existují dvě možnosti řešení. V prvním případě (viz. Obr. 1) uvažujeme pouze jízdní pás (chodníky jsou osvětleny činitelem osvětlení okolí přilehlého jízdní pásu). [7]



Obr. 1 Jedna relevantní oblast (pouze jízdní pás)

Druhou možností (viz. Obr. 2) je uvažovat chodníky a komunikace pro cyklisty samostatně, ty pak navrhujeme podle skupiny světelných situací C1,E1,E2. [7]



Obr. 2 Dvě relevantní oblasti (navrhujeme odděleně)

Určování charakteristických parametrů

Charakteristické parametry nám definují základní požadavky na osvětlení z hlediska prostorového uspořádání, vlivu dopravy a vnějších vlivů (viz. Tab. F v příloze č. 1). Na základě charakteristických parametrů, které určují příslušné silniční správní úřady, vytváříme rozsahy tříd pro každou skupinu světelných situací. [7]

Obecná technická doporučení

Jedná se o soubor technických doporučení, které nám zajistí kvalitu a stálost světelně technických parametrů odpovídajících navržené třídě osvětlení. Řadíme zde: možnosti omezení oslnění, podání barev, použití v noci a sousední oblasti.

Omezení oslnění

Omezení oslnění je nutno vždy splnit. V případě třídy osvětlení ME/MEW je míra oslnění dána prahovým přírůstkem. U tříd osvětlení ostatních kategorií se doporučuje používat třídy clonění a třídy oslnění uvedené v normě EN 13201-2. [7]

Podání barev

Při návrhu je nutno zvážit výběr světelných zdrojů s dostačující velikostí indexu podání barev, který nám zajistí bezpečnou navigaci řidičů a orientaci chodců v daném úseku pozemní komunikace. V městské zástavbě je také požadavek na identifikaci osob a předmětů, za účelem snížení kriminality. [7]

Použití v noci

Hodnoty parametrů definující jednotlivé třídy osvětlení platí pouze za tmy. Tyto parametry se však v průběhu noci a ročního období mohou měnit. V průběhu noci a ročního období dochází ke změnám intenzity dopravy a jasu okolí. V důsledku těchto změn nám vycházejí pro různá časová období rozdílné rozsahy dané třídy osvětlení. Tento problém je možné vyřešit vhodnou regulací hladiny osvětlení, kdy při snížené intenzitě dopravy není potřeba dosahovat navržených hodnot osvětlenosti. [7]

Sousední oblasti

Při návrhu a výběru třídy osvětlení, kde uvažujeme více než jednu relevantní oblast, je nutno dodržet podmínku maximálního rozdílu třídy osvětlení v rozsahu dvou porovnatelných tříd v uvažovaných (sousedních) oblastech. Tabulku definující třídy osvětlení (tabulka porovnávací třídy s požadavkem podélného jasu a třídy s požadavkem vodorovné osvětlenosti) s porovnatelnými hladinami osvětlení, můžeme vidět v příloze (viz. Tab. D). [7]

2.2 Požadavky kladené na jednotlivé třídy osvětlení dle ČSN EN 13201-2

Definice kvantitativních a kvalitativních parametrů, kterými charakterizujeme světelně-technické požadavky dané třídy osvětlení, nalezneme v seznamu použitých zkratek a symbolů

Třídy osvětlení ME/MEW

Tyto třídy osvětlení platí pro řidiče motorových vozidel pohybujících se po pozemních komunikacích střední až vysokou povolenou rychlostí (viz. Tab. 1). Pro přehlednost byly z normy vybrány pouze třídy osvětlení ME, se kterými bude dále pracováno.

Tab. 1 Řada tříd osvětlení ME [8]

Třída	Jas povrchu vozovky pro případ suchého povrchu			Omezující oslnění TI v % ^a	Osvětlení okolí SR ^b
	\bar{L} [cd/m ²] (udržovaná hodnota)	U_0	U_l		
ME1	≥2,0	≥0,4	≥0,7	≤10	≥0,5
...
ME5	≥0,5	≥0,35	≥0,4	≤15	≥0,5
ME6	≥0,3	≥0,35	≥0,4	≤15	neurčeno

^a Zvýšení prahového přírůstku TI o 5 procentních bodů lze připustit v případech, kde jsou použity světelné zdroje s nízkým jasem.

^b Toto kritérium lze uplatnit pouze v případě, kde k silniční komunikaci nepřiléhají jiné komunikace s vlastními požadavky

Pozn. k jednotlivým parametrům uvedených v Tab.1:

Jas povrchu komunikace je závislý na osvětlenosti povrchu pozemní komunikace, na jeho odrazných vlastnostech a na poloze pozorovatele. [8]

Průměrný jas (\bar{L}) nám vyjadřuje celkovou úroveň jasu, která působí na řidiče. S rostoucí úrovní jasu, se zrakový výkon zlepšuje na základě zvýšení kontrastní citlivosti, zrakové ostrosti a omezením oslnění. [8]

Celková rovnoměrnost jasu (U_0) představuje obecné měřítko změny jasu a říká nám, jak dobře slouží daný povrch pozemní komunikace jako pozadí pro dopravní značení, předměty a pro ostatní uživatele. [8]

Podélná rovnoměrnost jasu (U_l) představuje měřítko viditelnosti opakujících se vzorců jasných a tmavých polí na komunikaci. Ovlivňuje zrakové podmínky na dlouhých nepřerušovaných úsecích komunikace. [8]

Prahový přírůstek (TI) vyjadřuje míru omezujícího oslnění, jehož zdrojem je samotné svítidlo a jeho velikost závisí na typu svítidla (druhu optiky), na druhu použitého světelného zdroje a na geometrickém uspořádání osvětlovací soustavy. V případě použití nízkotlaké sodíkové výbojky nebo zářivky (zdroje s nízkým jasem) lze za dodržení poznámek pod čarou v Tab. 1 připustit vyšší hodnotu prahového přírůstku. [8]

Činitel osvětlení (SR) okolí se používá jedině v případě, kdy k uvažovanému úseku komunikace nepřiléhají jiné komunikace s vlastními požadavky na osvětlení (např. chodníky nebo stezky). [8]

Posouzení vzhledu osvětlovací soustavy VO a jejího vlivu na životní prostředí

Při návrhu jakékoliv osvětlovací soustavy VO musíme brát v úvahu její vliv na okolní prostředí a jejich uživatele. Při návrhu je pak nutné zohlednit především její vzhled a rozmístění jednotlivých prvků. Musíme rozlišit uživatele komunikace (např. řidič) od pozorovatele, který vnímá danou osvětlovací soustavu s určitým odstupem. [8]

Při zohlednění vzhledu osvětlovací soustavy VO ve dne je nutno brát v úvahu následující faktory [8]:

- výběr způsobu upevnění svítidel,
- vzhled a barva osvětlovacích stožárů,
- proporce a výška stožárů ve vztahu k výšce okolní zástavby, stromů a dalších objektů,
- zohlednění umístění stožárů v historických centrech a ve významných pohledech,
- vzhled, délka a sklon výložníků stožáru,
- sklon svítidel,
- volba svítidel.

Pro dosažení příjemného působení VO v noci je nutno brát v potaz následující faktory [8]:

- barevný tón vyzařovaného světla a jeho podání barev,
- montážní výšku svítidel,
- vzhled svítidla a celé osvětlovací soustavy,
- optické vedení zajišťované přímým světlem svítidla,
- regulace hladiny osvětlení.

Pro omezení světla vyzařovaného do směrů, kde není potřeba nebo je nežádoucí je nutno zohlednit [8]:

- Rušivé působení světla ve vesnicích a příměstských oblastech, které způsobuje narušení dálkových pohledů přes otevřenou krajinu.
- Možnost vniku vyzařované světla do vnitřku přiléhajících objektů.
- Narušení astronomického pozorování způsobené vyzařováním světla do horního poloprostoru.

2.3 Výpočet fotometrických parametrů dle ČSN EN 13201-3

Na základě níže uvedeného postupu lze stanovit příslušné funkční fotometrické parametry, které nám definují jednotlivé třídy osvětlení uvedené v ČSN EN 13201-2. Jednotlivé vztahy pro výpočet osvětlenosti, případně jasu pro konkrétní třídu osvětlení, jsou uvedeny v ČSN EN 13201-3.

Postup výpočtu fotometrických parametrů [9]:

1. **Vstupní fotometrické údaje svítidla** – důležité údaje, které popisují distribuci světelného toku daným svítidlem, patří zde: třída rozložení světelného toku (nejčastěji přímé), velikost světelného toku, křivky svítivosti.
2. **Určení křivek svítivosti daného svítidla (i-tabulka)** – dáno výrobcem, případně se určí měřením. V případě, že chceme stanovit křivku svítivosti svítidla, která se nenachází v měřeném směru, je nutná interpolace, buďto lineární, nebo v případě vyšších úhlů od měřeného směru kvadratická.
3. **Určení odrazných vlastností povrchu (r-tabulka)** – pro třídy osvětlení, kde vychází návrh osvětlení na základě stanovení jasů (pro třídy ME/MEW). I zde se v případě potřeby uplatňuje princip interpolace hodnot.
4. **Výpočet svítivosti v bodě $I(C,\gamma)$** – při konkrétním výpočtu svítivosti v bodě je nutno brát v potaz: orientaci a rotaci svítidla, úhel sklonu při měření a při použití svítidla.
5. **Výpočet osvětlenosti (pro třídy CE, A, S, EV, ES)** – při výpočtu osvětlenosti je nutno zohlednit: úhel dopadu světelného paprsku, součin stárnutí světelného zdroje a udržovací činitel svítidla, počáteční světelný tok všech světelných zdrojů ve svítidle a montážní výšku svítidla. Při výpočtu osvětlenosti i jasu je nutné přesně definovat výpočtové pole.
6. **Výpočet jasů (pro třídu ME/MEW)** – zde musíme zohlednit stejné parametry jako při výpočtu osvětlenosti, s tím rozdílem, že nebereme v úvahu pouze úhel dopadu paprsku, ale také redukovaný součinitel jasu, který se vypočte podle vztahu:

$$r = \frac{L}{E} \cdot \cos^3 \varepsilon \quad (1)$$

kde L/E ... je součinitel jasu q (sr^{-1})

L ... je jas (cd.m^{-2})

E ... je osvětlenost (lx)

ε ... je úhel dopadu paprsku ($^\circ$)

7. **Výpočet fotometrických vlastností** – určují se na základě vypočtené řady hodnot (mřížka hodnot) osvětlenosti a jasů. Jedná se o specifické fotometrické vlastnosti (např. podélná rovnoměrnost, prahový přírůstek, činitel osvětlení okolí), které specifikují světelně-technické požadavky dané třídy osvětlení. Vztahy pro výpočet fotometrických vlastností pro konkrétní třídu osvětlení jsou uvedeny na konci normy ČSN EN 13201-3.

2.4 Metody měření fotometrických parametrů dle ČSN EN 13201-4

Při měření fotometrických parametrů musíme správně nastavit měřicí přístroj a zohlednit všechny možné okolní vlivy (počastí, cizorodé světlo, ustálení parametrů), aby naměřené hodnoty byly co nejpřesnější.

Zohlednění okolních podmínek měření

Před samotným měřením je nutno počítat s dobou náběhu světelného zdroje na jmenovitou hodnotu (závislá na typu použitého světelného zdroje), dále je nutné zohlednit vlhkost, která zhoršuje přesnost měřicího přístroje, okolní teplotu, která má vliv na velikost světelného toku použitého světelného zdroje a povětrnostní podmínky, které mají vliv na polohu svítidla (kývání). Vlhkost způsobuje i změnu velikosti jasu povrchu vozovky. Je nutné počítat i s absorpcí záření v atmosféře. Při měření je také nutné zajistit, aby do výsledků měření nezasahovalo cizorodé světlo. Tento problém nejčastěji řešíme cloněním případně vypnutím. Měření vlhkosti, teploty, elektrického napájecího napětí a geometrických údajů (výška stožáru, rozteč svítidel) řadíme do nefotometrických měření. [10]

Měření osvětlenosti

Osvětlenost měříme luxmetrem zkalibrovaným pro daný účel měření (v případě orientačního měření není kalibrace nutná). Pro zamezení clonění způsobené měřicí skupinou lidí, je vhodné použít luxmetr s dálkovým ovládním. Pro měření svislé a vodorovné osvětlenosti se používá fotometrická hlava pro měření rovinné. Pro měření poloválčové osvětlenosti je nutná speciální hlava. Polokulovou osvětlenost lze změřit i pomocí fotometrické hlavy na rovinnou osvětlenost. V tomto případě měříme nejprve vodorovnou osvětlenost v bodě, na které se podílí všechna svítidla, pak nastavíme polohu fotometrické hlavy tak, aby paprsek svítidla dopadal kolmo na hlavu a bylo možné vyloučit ostatní světlo. [10]

Měření jasu

Měření jasu musíme provádět zkalibrovaným jasoměrem pro daný účel měření. Při měření jasu v jednotlivých bodech, musí být jasoměr schopný omezit celkový úhel měřicího kužele na 2 obloukové minuty ve svislé rovině a 20 obloukových minut ve vodorovné rovině. Měříme-li průměrný jas komunikace jen pomocí jednoho měření, musí být jasoměr vybaven clonami. Úhel pozorování měřicího přístroje musí být $89^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$ vůči normále povrchu. Naměřené hodnoty jasů v jednotlivých měřících bodech mohou být značně rozdílné, díky proměnným odrazným vlastnostem povrchu vozovky. Proto se v praxi častěji porovnávají naměřené a vypočtené hodnoty osvětlenosti, nežli jasů. [10]

3 Světelné zdroje použitelné ve veřejném osvětlení

Při návrhu osvětlovacích soustav veřejného osvětlení se používají dominantně dva světelné zdroje: vysokotlaké sodíkové výbojky a moderní LED zdroje.

U nás nejpoužívanějším zdrojem pro osvětlování komunikací je vysokotlaková sodíková výbojka, jenž je v poslední době nahrazována LED. [1]

Rozhodujícími parametry, které nás při návrhu veřejného osvětlení komunikací z hlediska jeho energetické bilance budou zajímat: měrný výkon η , elektrický příkon P , světelný tok Φ , životnost světelného zdroje T , index podání barev R_a a v neposlední řadě stálost světelně technických parametrů.

Tyto parametry lze rozdělit do dvou kategorií, a sice kvantitativních a kvalitativních, přičemž do kvantitativních lze zařadit první tři jmenované parametry a do kvalitativních patří zbylé tři. [3]

3.1 Základní parametry světelných zdrojů, které mají vliv na energetickou bilanci VO

Nežli si budeme moci věnovat jednotlivým typům světelných zdrojů a jejím hlavním výhodám či nevýhodám, musíme definovat základní světelně technické parametry. Tyto parametry, které zásadně určují energetickou náročnost použitého světelného zdroje, jsou: světelný tok ϕ , měrný výkon η (s tím související příkon). Při výběru světelného zdroje pro danou třídu komunikace, musíme splnit také jeho kvalitativní požadavky (především pak v zastavěných oblastech), kterými jsou: náhradní teplota chromatičnosti T_c , všeobecný index podání barev R_a a životnost světelného zdroje.

Světelný tok ϕ (lm)

Představuje velikost světelné energie, kterou vyzáří světelný zdroj za jednotku času. Jednotkou je lumen. Velikost světelného toku závisí na druhu a typu světelného zdroje. [4]

Konkrétní velikost světelného toku pro daný světelný zdroj můžeme najít na samotném světelném zdroji nebo v katalogu výrobce. [4]

Výrobce světelného zdroje nebo svítidla u vybraných typů určených pro VO, uvádí i velikost světelného toku v závislosti na velikosti příkonu světelného zdroje (pro možnost regulace). U vysokotlaké sodíkové výbojky jsou možné dvě velikosti světelného toku (možná pouze regulace na 100% a 50% příkonu). U LED je možná dynamická regulace příkonu v rozsahu 0-100%. LED nejčastěji regulujeme pomocí pulsně šířkové modulace (PWM).

Měrný výkon η ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)

Měrný výkon lze definovat jako poměr světelného toku (lm) k elektrickému příkonu. Říká nám, s jakou efektivitou je přeměněna elektrická energie na světelnou (kolik světelné energie lze získat z 1 W). [4]

U většiny světelných zdrojů používaných ve veřejném osvětlení je z důvodu úpravy parametrů napájecího napětí (zejména pro výbojky) nutné použít předřadník. Při následném výpočtu měrného výkonu je nutné zohlednit vlastní spotřebu předřadníku, což znamená, že výsledný měrný výkon bude o něco nižší.

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (2)$$

kde η ... měrný výkon ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)

Φ ... světelný tok (lm)

P ... elektrický příkon (W)

Tab. 2 Příklad měrných výkonů pro světelné zdroje využívané ve VO

Druh světelného zdroje	P (W)	Měrný výkon ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)
Vysokotlaká sodíková výbojka	50-70-100 (až 250)	81-130
LED	nejčastěji 40-60	V praxi až 170

3.2 Kvalitativní parametry světelných zdrojů

Náhradní teplota chromatičnosti T_c (K)

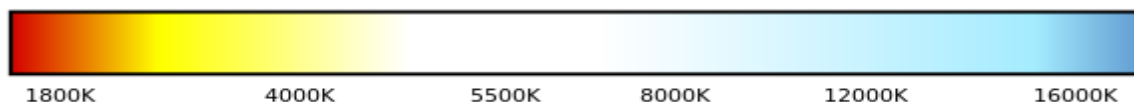
Tento parametr nám vypovídá o barevných vlastnostech daného světelného zdroje. U klasické wolframové žárovky odpovídá teplotě vlákna, pro výbojky používáme označení náhradní teplota chromatičnosti. Je to teplota, která odpovídá ekvivalentnímu světelnému zdroji s podobnou spektrální charakteristikou jako má výbojka. Jednotkou náhradní teploty chromatičnosti je Kelvin. [4]

Existují 3 základní barvy světla, které rozlišujeme pro světelné zdroje na základě velikosti teploty chromatičnosti [4]:

- Teple bílá < 3 300 K
- Bílá 3 300 ÷ 5 000 K
- Denní > 5 000 K

Tab. 3 Příklad náhradních teplot chromatičnosti pro světelné zdroje ve VO

Druh světelného zdroje používaných ve VO	T_c (K)
Vysokotlaká sodíková výbojka	2000 -2150
LED	variabilní



Obr. 3 Teplota chromatičnosti [4]

Všeobecný index podání barev R_a (-)

Vyjadřuje u člověka míru schopnosti rozpoznat věrné podání barev pozorovaného předmětu při daném spektru záření, které světelný zdroj vydává. Index R_a získáme výpočtem průměru indexů čtrnácti zkušebních barevných vzorků. Čím vyšší je hodnota indexu R_a , tím je vjem barevného podání osvětlovaného předmětu lepší. Nejvyšší index podání R_a má žárovka ($R_a=100$ – věrné zobrazení barev jako při denním světle), nejnižší nízkotlaká sodíková výbojka (vyzařují svůj světelný tok na jedné vlnové délce - monochromatické záření) $R_a=0$ tzn. nulové rozeznání barev. [4]

Životnost světelného zdroje (h)

Životnost světelného zdroje je velmi důležitým kvalitativním parametrem, který hraje velkou roli při volbě druhu světelného zdroje, ať již z hlediska cenové návratnosti, nebo stálosti světelně-technických parametrů po celou dobu životnosti daného světelného zdroje.

Životnost světelného zdroje je definována jako doba, po kterou je daný světelný zdroj schopen hospodárně svítit. Nejčastěji ji vyjadřujeme v hodinách. Při provozu světelného zdroje dochází po určitém čase vlivem různých vnitřních procesů ke zkracování životnosti světelného zdroje a s tím souvisejícím změnám světelně-technických parametrů. Životnost světelných zdrojů používaných ve VO viz Tab. 4.[4]

Rozlišujeme dva druhy životnosti:

- Průměrná životnost – průměrná doba života jednotlivých světelných zdrojů osvětlovací soustavy provozované za určitých podmínek. Je to doba, po kterou bude svítit přesně polovina sledovaných světelných zdrojů, to znamená, že 50% světelných zdrojů bude nefunkčních. Závislost úbytku funkčních světelných zdrojů vyjadřuje křivka úmrtnosti. [4]
- Užitečná životnost – doba, za kterou neklesnou světelně-technické parametry na 80% počáteční hodnoty (70% pro LED). [4]

Tab. 4 Životnosti světelných zdrojů používaných ve VO

Druh světelného zdroje	Průměr. životnost (h)	Užit. životnost (h)
Vysokotl.sodík.výbojka	32 000	20 000
LED	50 000 – 100 000	25 000 – 50 000

3.3 Světelné zdroje používané ve veřejném osvětlení

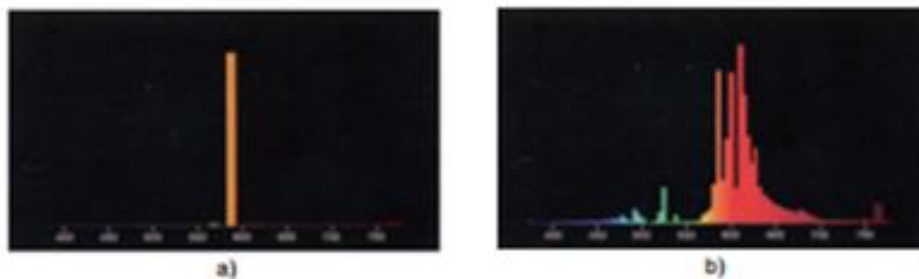
3.3.1 Vysokotlaká sodíková výbojka

Vysokotlaková sodíková výbojka je světelný zdroj, v níž vzniká světlo díky záření převážně sodíkových par. [3]

Je světelným zdrojem, který má dominantní postavení při osvětlování veřejných komunikací ve světě i České republice. Díky své vyšší účinnosti a nižšímu příkonu nahradily starší rtuťové výbojky. První výbojky na bázi sodíkových par byly zkonstruovány v 30 letech 20. století. Jednalo se o nízkotlaké sodíkové výbojky. Nespornou výhodou nízkotlaké sodíkové výbojky je její vysoký měrný výkon η , který přesahuje hodnotu 200 lm.W^{-1} , doba životnosti dosahuje hodnoty až 24 000 hod. I přestože je nízkotlaká sodíková výbojka neúčinnějším umělým světelným zdrojem, její použití ve veřejném osvětlení (v České republice) je omezené. Může za to především nízký index, který je dán jejím úzkým vyzařováním v oblasti vlnových délek 589,0/589,6 nm (Obr. 4), což má za následek znemožnění rozlišovat ostatních barvy mimo žluté spektrum. I přesto se můžeme setkat s tímto světelným zdrojem například ve Francii nebo Belgii, kde se pomocí nízkotlaké sodíkové výbojky osvětlují dálnice, protože u přehledných rovných úseků dálnice neklademe nároky rozlišovat barvy. [2] [3]

U vysokotlakých sodíkových výbojek dosahujeme měrného výkonu až 150 lm.W^{-1} a jejich střední doba života je až 32 000 hodin (závisí na kvalitě pájky). Tato maximální hodnota měrného výkonu závisí především na složení amalgámu sodíku, druhu a tlaku plnicího plynu, geometrických vlastnostech hořáku a v neposlední řadě na příkonu a kvalitě materiálu, z něhož je hořák vyroben. [1] [2]

Při zvyšování tlaku sodíkových par roste jeho spektrální vyzařování v oblasti mimo žluté spektrum, což má za následek zlepšení indexu podání barev. Při dalším zvyšování tlaku, je čím dál více zřetelnější asymetrické rozšiřování spektrálních čar do oblasti dlouhých vln (jsme schopni se dostat na index podání barev přesahující hodnotu $R_a > 85$). Použití těchto sodíkových výbojek s vylepšeným indexem podání barev se ve VO nepoužívá (nahrazujeme LED). Příklad spektra nízkotlaké a vysokotlaké výbojky s odlišnými indexy R_a můžeme vidět na Obr. 4. [1] [3]



Obr. 4 Spektrální složení světla vysokotlakých sodíkových výbojek

Vysvětlivky k Obr. 4:

- a) – Nízkotlaká sodíková výbojka s indexem podání barev $R_a \approx 0$
- b) – Vysokotlaké sodíková výbojka s indexem podání barev $R_a \approx 25$ a náhradní teplotou chromatičnosti $T_c = 2000 K$

Používané typy vysokotlakých sodíkových výbojek ve VO

Náhrada rtuťových výbojek vysokotlakými sodíkovými výbojkami v oblasti veřejného osvětlení přinesla značné energetické úspory (nárůst měrného výkonu). Díky tomuto faktoru je podíl vysokotlakých sodíkových výbojek při osvětlování veřejných komunikací nejvyšší v porovnání s ostatními světelnými zdroji (pozdvolný nástup LED).

Pro veřejné osvětlení se používají vysokotlaké sodíkové výbojky nízkých příkonů v rozmezí 50-250 W. Pro menší obce a vesnice 50-70 W, ve městech do 150 W a na velkých komunikačních tazích 150-250 W. [4]

Příklady provedení výbojek podle velikosti jmenovitého příkonu a měrného výkonu používaných ve veřejném osvětlení můžeme vidět v Tab. 5.

Tab. 5 Provedení výbojky v závislosti na velikosti příkonu a měrného výkonu pro VO [20]

Provedení výbojky	Jmenovité příkony (W)	Měrný výkon (lm.W ⁻¹)
Standardní s čírou válcovou baňkou	50,70,100,150,250	81 až 130
Standardní s eliptickou baňkou s rozptylnou vrstvou a vnitřním startérem	50,70	72 až 84
Standardní s eliptickou baňkou s rozptylnou vrstvou	50,70,100,150,250	77 až 124
Se zvýšeným tlakem xenonu, s čírou válcovou baňkou	50,70,100,150,250	88 až 129
Dvoupatičová s křemennou vnější baňkou	70,150,250	94 až 112

Shrnutí vlastností vysokotlakých sodíkových výbojek

Výhody:

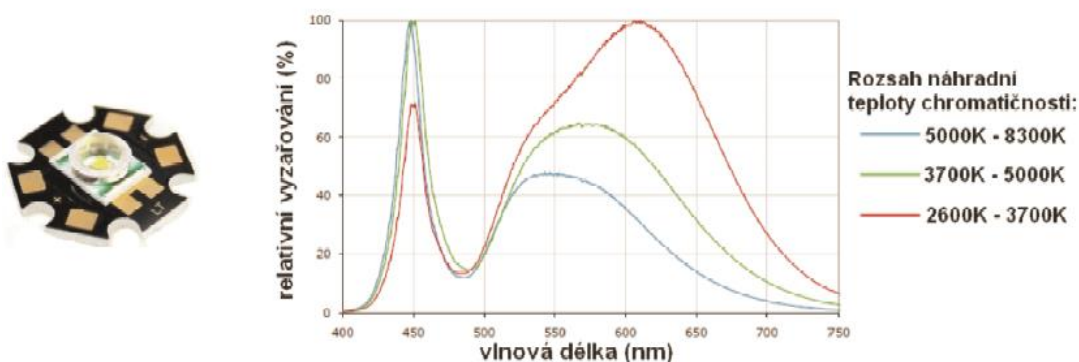
1. Vysoký měrný výkon (až 150 lm.W⁻¹) – u nižších příkonů (zejména pro osvětlování vesnic a menších obcí) v řádu 35-50-70 W je měrný výkon mnohem nižší (max. 93 lm.W⁻¹).
2. Průměrná životnost světelného zdroje až 32 000 h.
3. Spolehlivý provoz a snadná údržba.
4. Nízká pořizovací cena díky velkovýrobě – podle příkonu od 200 do 350 Kč.
5. Malé rozměry hořáku i výbojky (úspora materiálu) – variabilní konstrukce svítidla VO.
6. Velká škála příkonů a měrných výkonů podle druhu použití – normalizovaná řada pro VO 50-70-100-150-250 W.

Nevýhody:

1. Nízký index podání barev R_a (u dnešních sériově vyráběných okolo 20-25).
2. Jde stmívat pouze na 50% světelného toku (při 70% příkonu – horší měrný výkon).
3. Degradace světelného toku již po 4 000 h (maximálně o 10%).
4. Podle příkonu a typu výbojky dochází po 20 000 hodinách provozu k poklesu světelného toku v průměru o 30% (nehospodárny provoz proto cyklus výměny 4 roky).
5. Maximální kolísání napájecího napětí 5% (při překročení se snižuje životnost výbojky).
6. Pro zapálení výboje nutné zapalovací zařízení.
7. V případě opakovaného startu při výpadku energie se snižuje životnost výbojky (teplé zapálení).
8. Maximální světelný tok po 5 minutách od zapálení výboje – u VO nehraje příliš velkou roli.

3.3.2 LED

Světelné diody (zkráceně LED) se díky stále vyššímu rozvoji polovodičové techniky stávají čím dál tím více významnějším světelným zdrojem užívaným ve veřejném osvětlení. V počátku vývoje polovodičových svítivých diod, nebylo možné tento zdroj použít při osvětlování veřejných komunikací, jelikož nespĺňoval řadu kvalitativních a kvantitativních parametrů, které je nutno při osvětlování veřejných komunikací splnit (nízký měrný výkon, malá životnost).



Obr. 5 Čip Bílé LED s fosforovým luminoforem a příklad jejího spektra [4]

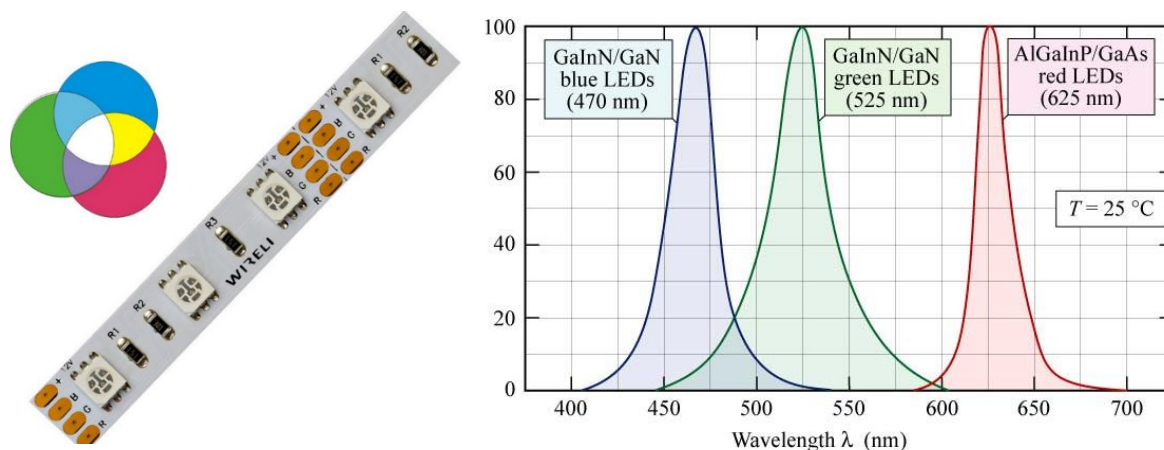
Světelně-technické parametry dnešních LED čipů jsou již srovnatelné s vysokotlakovými sodíkovými výbojkami a v některých ohledech dokonce vysokotlaký sodík předčí (nižší spotřeba energie, vyšší index podání barev R_a , větší možnost regulace velikosti světelného toku, netřeba složitěho návrhu optické části svítidla, vyšší doba životnosti). Všechny tyto výhody oproti NAV mají svá jistá omezení, která vycházejí především podle způsobu provozu LED čipů. Nutno zajistit ideální odvod tepla z oblasti PN přechodu, které je v běžné praxi těžko dosažitelné (snižování životnosti a pokles světelného toku).

Princip vzniku bílého světla u LED

LED je světelný zdroj, u kterého vzniká spektrum viditelného záření pomocí elektroluminescence při průchodu stejnosměrného proudu polovodičovým přechodem PN v propustném směru. Vyzářované spektrum LED diody je dáno velikostí zakázaného pásu, jehož velikost závisí na druhu použitého materiálu (např GaIn/GaN – bílá LED). [5]

Existují dva způsoby generování bílého světla:

1. RGB čip – mísením monochromatického záření jednotlivých čipů s různou vlnovou délkou docílíme bílé barvy výsledného emitujícího záření. Čím více čipů s různou vlnovou délkou použijeme, tím je index podání barev Ra výsledného bílého světla větší. Tento způsob generování bílého světla se ve veřejném osvětlení nepoužívá a to z toho důvodu, že jednotlivé barvy degradují nerovnoměrně, což má za následek změnu náhradní teploty chromatičnosti a zhoršení indexu podání barev Ra. [4]

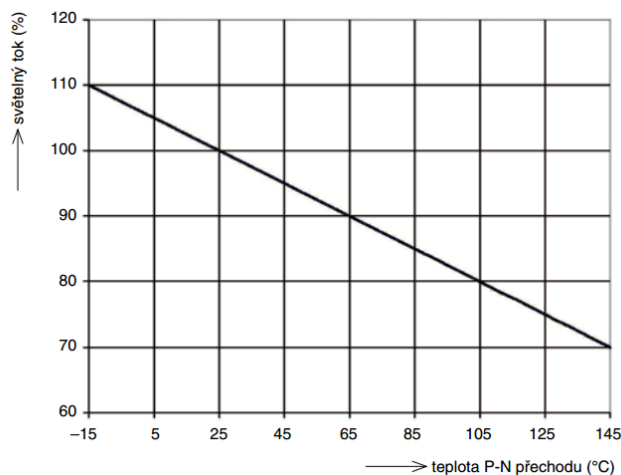


Obr. 6 Příklad vyráběného LED pásku s RGB čipy a jeho spektra [27]

2. Modrá LED s absorbérem (na bázi fosforu – viz Obr. 5) – tento typ LED čipu emituje část světla ve viditelné oblasti s modrým tónem a část spektra, která je v oblasti nízkých vlnových délek neviditelných pro lidské oko, se pomocí fosforu (luminofor) převede na vyšší vlnovou délku ve žlutém spektru. Mísením modré a žluté barvy docílíme, že výsledné záření vycházející z čipu se jeví jako bílé. Vzájemnou úpravou poměru modré a žluté barvy lze měnit náhradní teplotu chromatičnosti, ale také ovlivnit velikost měrného výkonu (se vzrůstající T_c roste) a index podání barev (s klesající T_c roste). [5]

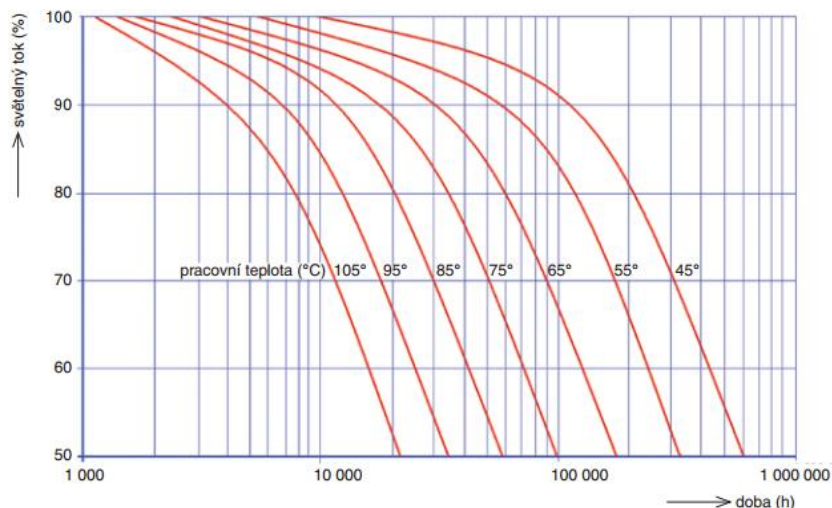
Závislost světelně-technických parametrů na provozních podmínkách LED

Provoz osvětlovacích soustav s LED svítidly má jistá úskalí. Hlavním problémem při provozu LED svítidel v praxi je závislost světelného toku na teplotě. Se zvyšující se teplotou PN přechodu velikost světelného toku lineárně klesá (viz Obr. 7).



Obr. 7 Závislost světelného toku bílé LED na teplotě [5]

V praxi je téměř nemožné docílit ideálního odvodu tepla z oblasti přechodu PN, což má za následek zkrácení životnosti jednotlivých LED čipů. V laboratorních podmínkách uvažujeme s teplotou přechodu okolo 55 °C, v běžném provozu je teplota PN přechodu nejčastěji mezi 80 až 90 °C (vyšší okolní teplota). Závislost doby životnosti na pracovní teplotě LED čipu můžeme vidět na Obr. 8. [5]



Obr. 8 Závislost doby života LED čipu na velikosti pracovní teploty [5]

Podíváme-li se na Obr. 8, můžeme vidět, že při provozu LED čipu při teplotách vyšších než doporučuje výrobce (ideálně okolo 55 °C), dochází k strmější degradaci velikosti světelného toku.

Renomovaní výrobci předních značek vyrábějící světelné zdroje různých typů slibují maximální pokles světelného toku o 25% za 70 000 hodin provozu při dodržení předepsané teploty PN přechodu. Nutno podotknout, že po degradaci světelného toku, je velikost spotřeby elektrické energie stejná.

V dnešní době se u bílých LED čipů, používaných ve VO, dosahuje teoreticky měrných výkonů až 250 lm/W, v praxi jsme schopni dosáhnout s přihlédnutím na pracovní teplotu PN přechodu a teplotu okolí měrného výkonu maximálně okolo 120-170 lm/W.

Výhody a nevýhody LED použitých ve VO

Výhody:

1. Úspora elektrické energie (oproti NAV až 30%).
2. Účinnost svítidla s LED až 90-95%.
3. Měrný výkon až 170 lm/W.
4. Doba životnosti až 100 000 h (při dostatečném chlazení PN přechodu).
5. Lepší index podání barev oproti vysokotlaké sodíkové výbojce.
6. Variabilní teplota chromatičnosti.
7. Okamžitý náběh světelného toku (u VO nemá příliš význam).
8. Maximální vyzařování v oblasti mezopického a skotopického vidění.
9. Směrové světlo (závisí na kvalitě optické části – především difuzoru).
10. Široké možnosti řízení velikosti světelného toku 0-100% (řízením velikostí proudu procházejícího PN přechodem, PWM).
11. Na konci životnosti nedochází k úplné ztrátě světelného toku.

Nevýhody:

1. Závislost světelného toku na okolní teplotě.
2. Doba životnosti závisí na okolní teplotě a kvalitě navrženého chladiče (kvalitě chlazení).
3. Vyšší pořizovací náklady při porovnání s NAV.
4. Po skončení životnosti LED je nutné vyměnit celé svítidlo (existují i svítidla kde lze vyměnit pouze LED modul).
5. Nelze osazovat do starých svítidel (nutná nová konstrukce svítidla).

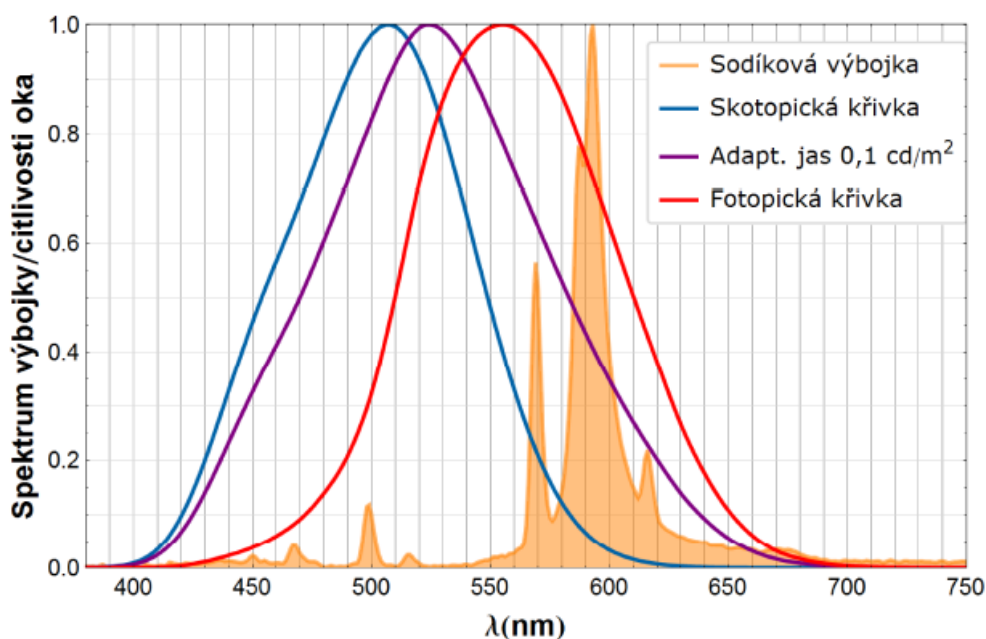
3.4 Význam mezopického vidění při výběru náhradní teploty chromatičnosti

Mezopické vidění

Mezopické vidění nám charakterizuje přechod lidského oka z fotopického vidění (kontrast jasů a barev, z fotoreceptorů se uplatňují čípky), kdy je spektrální citlivost maximální při vlnové délce 555nm (max 683 lm/W) do oblasti skotopické (pouze kontrast jasů, z fotoreceptorů se uplatňují pouze tyčinky), kdy je spektrální citlivost maximální při vlnové délce 507 nm (max 1700 lm/W). Při mezopickém vidění se uplatňují oba typy fotoreceptorů tj. čípky i tyčinky při adaptačních jasech v rozmezí 0,001 až 10 cd/m². Pro konkrétní velikost adaptačního jasu je spektrální citlivost lidského oka odlišná. [15]

Výhoda LED oproti NAV v oblasti mezopického vidění

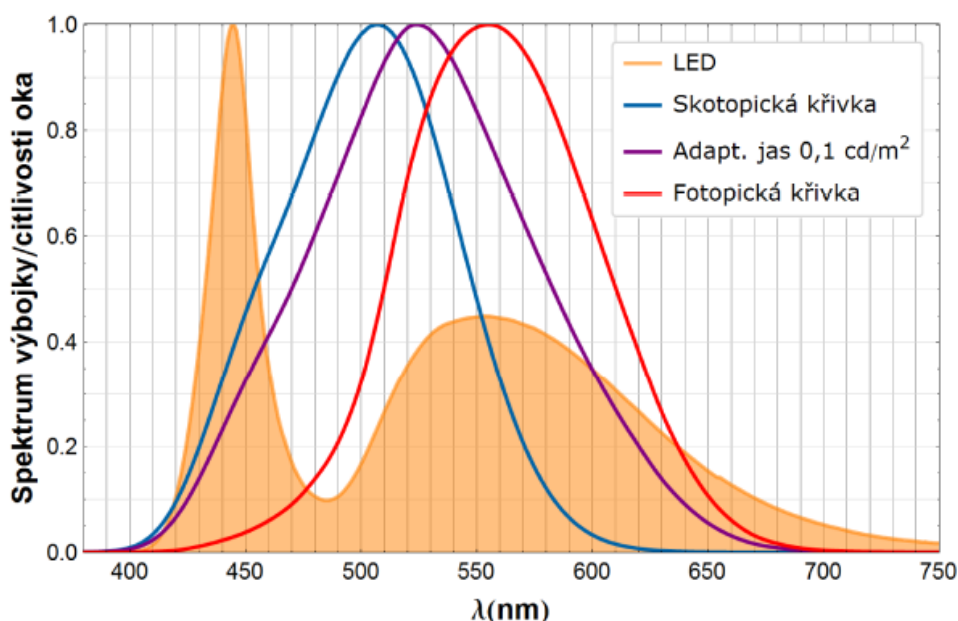
Z Obr. 9 můžeme vidět, že podstatná část spektra vysokotlaké sodíkové výbojky je v oblasti oranžového spektra, což má za následek, že při přechodu do skotopické oblasti je až 50% světelného toku ztracena, díky tomu, že při skotopickém vidění je oko citlivější na oblast vlnových délek okolo 507 nm (v této oblasti je maximum 1700 lm/W v porovnání s fotopickým kde je maximum 683 lm/W).



Obr. 9 Poměrné spektrální rozložení NAV a poměrná spektrální citlivost oka [17]

Výhody ve spektrálním rozložení světla čím dál tím více využívají bílé LED. Jejich spektrum (viz Obr. 10) zasahuje více do oblasti nižších vlnových délek, což při návrhu pro fotopické vidění dovoluje snížit příkon LED až o několik desítek procent (jelikož se podstatná část světelného záření dostane do oblasti nižších vlnových délek. Z hlediska energetické náročnosti by bylo možné vyrobit LED, která by vyzářovala v úzkém spektru 507 nm, což by vedlo k vyššímu měrnému výkonu, avšak

jednalo by se o monochromatický zdroj, jehož index podání barev by se blížil k nule, což z hlediska bezpečnosti provozu a možnosti rozeznání barev není možné aplikovat. [15] [17]



Obr. 10 Poměrné spektrální rozložení LED a poměrná spektrální citlivost oka [17]

Poměr S/P

Tento parametr nám udává poměr mezi skotopickým a fotopickým viděním. Čím vyšší je, tím více je záření z daného světelného zdroje v oblasti nižších vlnových délek. Praktickým měřením bylo zjištěno, že se zvyšujícím se poměrem S/P ($S/P > 1,2$) mají lidé větší pocit bezpečí a také jsou schopni lépe rozeznávat překážky a chodce v periferních oblastech zorného pole. [15]

Volba náhradní teploty chromatičnosti LED podle druhu pozemní komunikace

Pro zastavěné oblasti a centra měst se doporučuje volit náhradní teplotu chromatičnosti 3 000K a méně. Touto teplotou chceme navodit uživateli komunikace pocit klidu a bezpečí. Orientace na zrakovou pohodu (teplé odstíny spektra - viz. Kruithofův diagram). [18]

U vysokorychlostních silnic a dálnic je doporučeno volit nejvyšší teplotu chromatičnosti (v rozmezí 4 000 až 5 000 K) společně s vyšší hladinou osvětlenosti. Cílem je řidiče upozornit na možné překážky. Se zvyšující se teplotou chromatičnosti spolu s vysokým poměrem S/P se uživateli zlepšuje vidění v periferní oblasti (orientace na zrakový výkon). Zlepšení periferního vidění je způsobeno zapojením tyčinek do vnímání – oblast mezopického vidění (tyčinky - vyšší citlivost na kratší vlnové délky). [18]

Pro silnice 2 a 3 třídy se doporučuje volit teplotu chromatičnosti v rozmezí 3 000 až 4 000 K za účelem zbuzení větší pozornosti u řidiče. Je kladen vyšší důraz na zrakový výkon, avšak uživatel komunikace se musí zároveň cítit dobře (pocit bezpečí). [18]

4 Svítidla použitelná ve veřejném osvětlení

Rozhodujícími parametry svítidel, které budeme uvažovat při realizaci návrhu osvětlovací soustavy, které mají vliv na energetickou náročnost daného svítidla, jsou: světelný tok svítidla, účinnost svítidla, jas svítidla, úhel clonění a v neposlední řadě křivky svítivosti, které jsou velmi důležité při zohlednění, v jak velkém prostorovém úhlu vyzařují svítidla svůj světelný tok o určité velikosti.

Svítidlo je elektrický přístroj, jehož soubor konstrukčních, optických a elektrotechnických částí nám zajišťuje připojení daného světelného zdroje k síti a tvoří tak základní prvky osvětlovacích soustav. [4]

4.1 Světelně-technické parametry svítidel

Světelný tok svítidla ϕ_{SV}

Jedná se o světelný tok ϕ_{SV} , jehož parametry jsou optickou částí svítidla upraveny. Světelný tok svítidla je dán rozdílem světelného toku všech zdrojů ϕ_Z ve svítidle a světelného toku ztraceného při jeho optické úpravě ϕ_{ZTR} . [4]

Účinnost svítidla η_{SV}

Účinnost svítidla je dána poměrem světelného toku svítidla ϕ_{SV} ke světelnému toku všech světelných zdrojů ve svítidle ϕ_Z . [4]

$$\eta = \frac{\phi_{SV}}{\phi_Z} \quad (3)$$

kde η ... je účinnost svítidla (-)

ϕ_{SV} ... světelný tok svítidla (lm)

ϕ_Z ... světelný tok všech zdrojů ve svítidle (lm)

V praxi při návrhu osvětlovacích soustav VO a při samotném výběru konkrétního typu svítidla je nutné zohlednit vhodný charakter distribuce světla (křivky svítivosti) pro daný úsek komunikace, abychom předešli situaci, kdy svítidlo s vyšší účinností poskytuje menší osvětlenost povrchu. Vhodným provedením optické části svítidla (široká křivka svítivosti v podélné ose komunikace) můžeme docílit vyšší hodnoty osvětlenosti se svítidlem s nižší účinností, než je tomu u svítidla s vyšší účinností, kde z důvodu špatného návrhu optické části nevyzařujeme světelný tok v požadovaném směru. Při zohlednění správné distribuce světelného toku do požadovaného směru, jsme schopni u běžných svítidel VO osazenými vysokotlakovými sodíkovými výbojkami dosahovat účinností 0,5-0,9 a u moderních LED svítidel (kde není třeba reflektoru) více než 0,95. [4] [12]

Jas svítidla

Je dán podílem svítivosti v daném směru a velikostí průmětu svítící plochy, která je kolmá do roviny uvažovaného směru. Jednotkou je 1 cd.m^{-2} . Chceme-li snížit jas z důvodu oslnění svítidlem v určitém kritickém úhlu pohledu, můžeme to provést použitím difuzorů, nebo vhodně tvarovanou mřížkou. [4]

$$L_y = \frac{I_y}{A \cdot \cos \gamma} \quad (4)$$

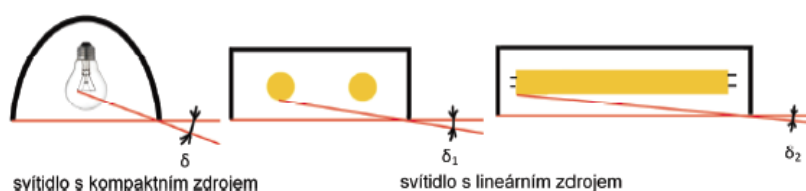
kde I_y ... je svítivost svazku světelných paprsků (svítící plochy) (cd)

A ... je velikost svítící plochy viditelné pozorovatelem (m^2)

γ ... úhel, o který je viděná plocha natočena od kolmice k ose pohledu ($^\circ$)

Úhel clonění δ

Úhel clonění nám udává, do jaké míry konstrukční uspořádání svítidla cloní daný druh světelného zdroje. Je to nejmenší ostrý úhel mezi vodorovnou osou a přímkou, která spojuje okraj svítidla se světelným zdrojem (u výbojky tím myslíme okraj svítidla a povrch baňky výbojky). [4]



Obr. 11 Úhel clonění svítidla

Třída rozložení světelného toku svítidla

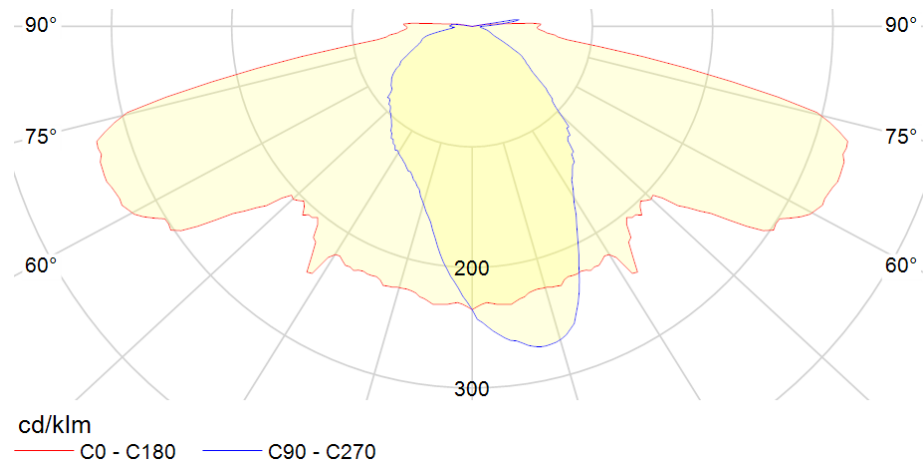
Podle toho jakým směrem svítidla vyzařují svůj světelný tok, je můžeme rozdělit do následujících 5 kategorií (Tab. 6). V praxi, při návrhu osvětlovacích soustav veřejného osvětlení používáme přímé rozložení světelného toku, případně převážně přímé rozložení toku.

Tab. 6 Klasifikace svítidel podle rozložení světelného toku [4]

Třída rozložení světelného toku	Název	$\Phi_{\text{přímý}}/\Phi_{\text{celková}}$
I	Přímé	80 – 100 %
II	Převážně přímé	60 – 80 %
III	Smíšené	40 – 60 %
IV	Převážně nepřímé	20 – 40 %
V	Nepřímé	0 – 20 %

Křivky svítivosti

Vyjadřují směr šíření světelného toku svítidla do okolí. Přesná definice svítivosti říká, jak velký světelný tok se šíří do daného orientovaného prostorového úhlu Ω . Je-li tento úhel velmi malý, dá se říct, že se jedná o svítivost v daném směru. Z těchto křivek si lze vytvořit názornou představu, kam až vyzařované světlo dosahuje a také z něj lze určit například směr maximální svítivosti, nebo úhel clonění. Příklad křivky svítivosti svítidla VO můžeme vidět na Obr. 12. [4]



Obr. 12 Křivky svítivosti v polárních souřadnicích svítidla VO

Při návrhu osvětlovacích soustav VO jsou křivky svítivosti jedním z nejdůležitějších parametrů, které musíme posoudit při výběru konkrétního svítidla, abychom docílili požadované hodnoty osvětlenosti, případně jasu uvažovaného úseku pozemní komunikace a předešli nežádoucímu rušivému světlu.

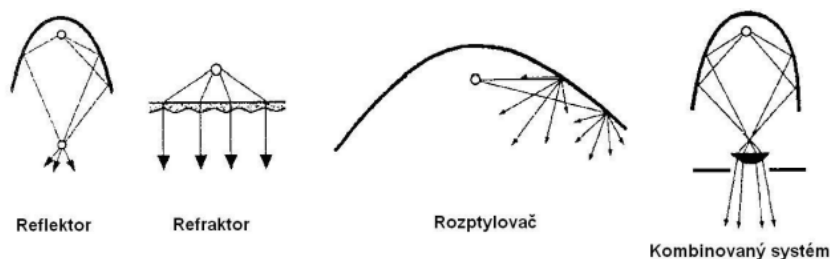
4.2 Skladba svítidel používaných ve VO

Samotné svítidla, které používáme při realizaci návrhu veřejného osvětlení, se skládají ze 3 částí: optické, elektrotechnické a konstrukční.

4.2.1 Optické části svítidel

Optická část svítidla má za úkol usměrnit světelný tok jdoucí ze svítidla do požadovaného směru (křivka svítivosti), dále slouží k filtraci světelného toku a omezení oslnění. Optická část patří k nejdůležitější části celého svítidla, jelikož ovlivňuje zásadně většinu světelně-technických parametrů, především pak účinnost celého svítidla. I pro LED je nutná optická část pro požadované usměrnění světelného toku, avšak v případě LED je nejčastěji implementována na samotný LED chip (světelný zdroj). [4]

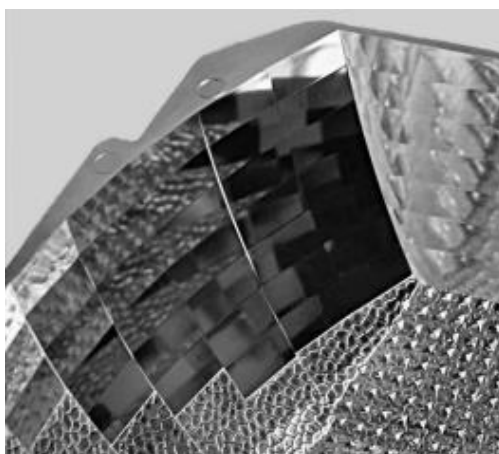
Existují 4 základní optické prvky, které slouží k usměrnění světelného toku do požadovaného směru. Nejpoužívanějšími optickými prvky pro svítidla ve VO je reflektor a rozptylovač. (Obr. 13)



Obr. 13 Základní optické prvky pro usměrnění světelného toku [4]

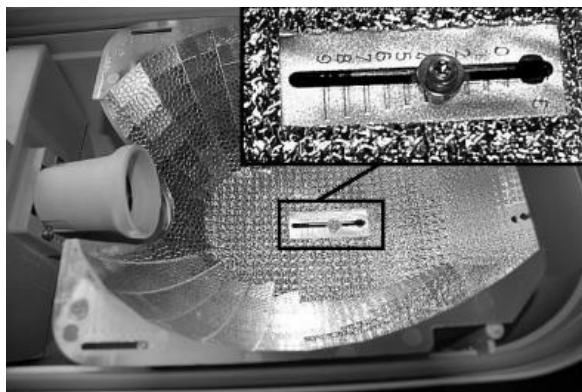
Reflektor

Při návrhu a výrobě svítidla VO pro osvětlování pozemních komunikací se pro směřování světelného toku nejčastěji používá reflektorového (zrcadlového) odrazu. Velikost odraznosti daného reflektoru je závislá na druhu a kvalitě použitého materiálu. Pro reflektory ve VO se používá nejčastěji hliník v několika povrchových úpravách: matovaný, leštěný a plátovaný. V případě matovaného hliníku jsme schopni dosáhnout odraznosti povrchu 55÷60%. U leštěného hliníku jsme schopni dosáhnout odraznosti povrchu 60÷72%. U vysoce čistého plátovaného hliníku se stříbrnou povrchovou úpravou jsme schopni dosáhnout stupně odraznosti až 90%. Při samotné výrobě je také důležité ohlídat přesné tvarování reflektorů (vyšší účinnost svítidla), abychom předešli zpětnému odrazu paprsku na světelný zdroj. Speciálním případem reflektoru je tzv. radiálně fasetovaný (Obr. 14), který je vyroben z plátovaného hliníku, nebo z plastových výlisek s vysokou přesností, na nichž je napařena vysoce odrazná vrstva. Reflektor tohoto typu dosahuje účinnosti přes 95%. [12]



Obr. 14 Fasetový reflektor [12]

U špičkových svítidel je možnost změny polohy reflektoru i samotného světelného zdroje. Změnou polohy reflektoru vůči světelnému zdroji sice snížíme účinnost optické části svítidla (poloha reflektoru je primárně nastavena na max. účinnost), ale na úkor lepší využitelnosti světelného toku (změna křivky svítivosti za účelem lepší osvětlenosti uvažované části pozemní komunikace). Svítidlo s tímto systémem můžeme vidět na Obr. 15. [12]



Obr. 15 Svítidlo s možností změny polohy reflektoru [12]

Refraktor

U refraktoru usměrníme světelný tok pomocí propustných vlastností použitého optického materiálu (na principu lomu světla). Ve srovnání s reflektory dosahují refraktory nižší účinnosti. Tento princip směřování světelného toku lze použít na difuzor svítidla, který tvoří tzv. Fresnelovu čočku (viz Obr. 16). Svítidla s tímto typem difuzoru jsou neúčinnější, avšak v praxi se nepoužívají z důvodu technologické náročnosti výroby (vyšší cena svítidla). Skutečné použití svítidel s refraktory je při osvětlování parků, historických center a náměstí (Svítidlo ve tvaru koule).[3] [12]



Obr. 16 Svítidlo s refraktorovým difuzorem (Fresnelova čočka) [12]

Difuzor (rozptylovač)

Rozptylovače využívají dvojí princip distribuce světelného toku od okolí, a sice podstatnou část světelného toku (až 90%) odrážejí difúzně, u zbytku se jedná o zrcadlový odraz. Difuzor tvoří kryt optické části svítidla, jehož tvar a materiál má značný vliv na účinnost a rozložení světelného toku daného svítidla. [3] [12]

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu difuzorů používaných ve VO je polykarbonát (PC) díky svým výborným optickým vlastnostem, tepelné odolnosti a odolnosti vůči nárazům (vandalům). V praxi je nevýhodou tohoto materiálu, že po cca 3 ÷ 6 letech začíná stárnout (zažloutnutí), zhoršuje se účinnost a je nutná výměna za nový. Druhým nejpoužívanějším materiálem je akrylátové sklo (PMMA), který je oproti PC barevně stálý, avšak není odolný vůči větším nárazům. Další možným materiálem pro výrobu difuzoru je tvrzené sklo. Tvrzené sklo je barevně i teplotně stálé, i přesto se v praxi příliš nepoužívá z důvodu složitější technologie výroby. Hlavním důvodem je obtížné tvarování, je totiž možné vyrobit pouze ploché nebo mírně vypouklé sklo, které má nižší účinnost (z důvodu že záření na sklo nedopadá v normále, ale pod větším úhlem, dochází k průchodu silnější vrstvou skla, zpětným odrazům, které způsobí zvýšení ztrát), nižší vyzařovací úhel a také nižší schopnost optického vedení než svítidlo s vypouklým difuzorem. [12]

Jak již bylo nastíněno v předchozím odstavci, svítidla s vypouklým difuzorem mají vyšší účinnost než svítidla s plochým difuzorem. Proto u současných osvětlovacích soustav veřejného osvětlení s NAV můžeme nejčastěji vidět difuzory vypouklého tvaru (Obr. 17). Tvar vypouklého difuzoru nelze volit libovolně. Je nutné jej zvolit co nejbližše normále vyzařovaného záření (k dosažení maximální

účinnosti). Nejúčinnější tvar difuzoru je tzv. Fresnelova čočka, která tvoří hranoly a směruje světlo do požadovaného směru. V praxi se tento druh difuzoru z důvodu vysoké ceny příliš nepoužívá.



Obr. 17 Svítidlo s vypouklým difuzorem [12]

4.2.2 Elektrotechnické části svítidel

Do této části svítidla můžeme zařadit veškerý elektrotechnický materiál počínaje objímkami, svorkovnicemi, kabeláží a v neposlední řadě předřadníky a zdroji pro napájení svítidla. Nejpoužívanějším typem objímky ve VO je objímka závitového typu, nejčastěji E40. V případě LED svítidla není objímka standardizována (nevýhoda). Elektrotechnickou částí, kterou můžeme výrazně ovlivnit energetickou náročnost daného svítidla, je předřadník. Použitím vhodného typu předřadníku pro daný typ světelného zdroje, můžeme výrazně snížit spotřebu elektrické energie daného svítidla.

Předřadníky

Předřadníky jsou velmi důležitou částí konkrétního svítidla. Hlavní funkcí předřadníků je úprava a stabilizace napětí pro daný světelný zdroj a také obstarává potřebnou amplitudu napětí pro zapálení výbojové činnosti. U předřadníků elektronického typu jsme dále schopni eliminovat stroboskopický jev, potlačit rádiové rušení a rovněž pracovat s lepším účínkem. [4]



Obr. 18 Induktivní předřadník a jeho schéma zapojení s NAV

Na Obr. 18 můžeme vidět předřadník induktivního typu a jeho schéma zapojení s NAV. Induktivní předřadník se skládá z: tlumivky, kondenzátoru (kompenzace jalových ztrát) a startéru (tyristor). Tento předřadník se vyskytuje u většiny svítidel VO osazenými NAV. Mezi výhody toho předřadníku patří nízká cena, vysoká spolehlivost (při porovnání s elektronickými). Mezi nevýhody tohoto typu předřadníku patří váha a rozměr, vyšší spotřeba (o cca 10% oproti elektronickému předřadníku), omezená možnost regulace příkonu výbojky (nedokáže eliminovat stroboskopický jev) postupná degradace kondenzátoru, která vede ke zvýšení jalové složky proudu (vyšší ztráty). Při krátkodobém výpadku elektrické energie snižují životnost výbojky opakované pokusy zapálit výboj (i když je výbojka horká).[6]



Obr. 19 Elektronický předřadník pro výbojku

Na Obr. 19 můžeme vidět jeden z typů elektronického předřadníku, který se může vyskytovat u svítidel VO. Elektronické předřadníky odstraňují hlavní nedostatky induktivních předřadníků, které jsme si popsali v předchozím odstavci. Mezi další výhody elektronických předřadníků je možnost stmívat (regulovat příkon), ať již pomocí zabudovaného časovače nebo pomocí dálkové řízení (systém DALI). Elektronický předřadník má pozitivní vliv na životnost světelného zdroje díky měkčímu startu výbojky a také má menší jalové ztráty ($\cos\varphi = 0,8$). Další nespornou výhodou elektronických předřadníků je, že při výkyvu napájecího napětí dokážou udržovat konstantní spotřebu světelného zdroje (nedochází ke ztrátám vlivem přepětí v síti). Nevýhodou elektrického předřadníku je, že se zvyšující se provozní teplotou, klesá jeho životnost. Proto při výběru předřadníku je nutno brát ohled na teplotu uvnitř konstrukce svítidla, při které budeme daný typ předřadníku provozovat. I přes všechny tyto výhody je jejich výskyt ve VO minimální (staré svítidla se starým indukčním předřadníkem), v případě modernizace osvětlovací soustavy se nejčastěji přechází na LED, kde je před světelný zdroj předřazen speciální driver, který řídí velikost příkonu svítidla na principu pulsně šířkové modulace. [6]

Použitím kvalitního a správného předřadníku pro konkrétní typ příkonu svítidla a jeho efektivním řízením v nočních hodinách se sníženým provozem na komunikacích, můžeme výrazně snížit energetickou náročnost provozované soustavy veřejného osvětlení.

4.2.3 Konstrukční části svítidel

Slouží ke spojení všech dílčích částí svítidla do jednoho celku. Konstrukční část upevňuje optiku a světelný zdroj, obsahuje prostor pro instalaci elektrotechnických součástí svítidla (objímka, svorkovnice, předřadník), dále slouží k dostatečnému krytí všech částí (světelný zdroj, optika, elektrotechnické součásti) před vniknutím vody a cizích těles (IP) a také se musí zabránit kontaktu s nebezpečným dotykovým napětím. [3]

U materiálů používaných pro konstrukci svítidel vyžadujeme světelnou stálost, tepelnou stálost, antikorozi vlastností a mechanickou pevnost. Nejdůležitějším požadavkem při běžném provozu svítidla je jeho světelná stálost. Při běžném provozu prochází difuzorem světelné záření a záření v ultrafialovém spektru, které společně s vysokou teplotou a vlhkostí způsobují zažloutnutí nebo vybělení difuzoru, což se negativně projevuje na celkové účinnosti svítidla. Abychom zabránili zažloutnutí svítidla, volíme kvalitní křemenné sklo nebo polyester se sklenými vlákny. Odolnost svítidla proti korozi zajišťujeme vhodným typem povrchové úpravy, a to pozinkováním, poniklováním, pochromováním, kadmiováním, lakováním, emailováním, nanášením umělých hmot, leštěním a eloxováním. Tepelnou a mechanickou stálost svítidla docílíme použitím materiálů, které dobře odolávají teplotním výkyvům a změnám vlhkosti, aniž by byla narušena jejich strukturální integrita. U LED svítidla je velmi důležitý dobrý návrh odvodu tepla z oblasti PN přechodu. Jelikož LED vyzařuje teplo dozadu (na desku plošného spoje) je chladič LED součástí mechanické konstrukce vrchní krycí části svítidla. [3]

Konstrukce svítidla veřejného osvětlení nesmí být příliš složitá, aby byla umožněna jednoduchá možnost údržby a zároveň se docílilo dobré spolehlivosti a životnosti daného světelného zdroje pro získání hospodárného provozu užívané osvětlovací soustavy.

4.2.4 Ochrana svítidel (Třídy ochrany, IP, IK)

Všechny tři typy ochrany je nutno při návrhu konstrukce svítidla brát v úvahu. Z hlediska umístění svítidla veřejného osvětlení hraje významnou roli stupeň ochrany svítidla, který chrání proti úrazu elektrickým proudem (nebezpečné dotykové napětí). Druhým nejdůležitějším typem ochrany je stupeň krytí svítidla, který vyjadřuje míru ochrany před vniknutím cizích těles, dotykem a před vniknutím vody.

Třída ochrany

U svítidel používaných pro osvětlování pozemních komunikací nejčastěji používáme třídu krytí 1, kdy připojujeme vodivé části na ochranný vodič (do země), případně druhou třídu krytí, která má zesílenou nebo dvojitou izolaci, aby se zabránilo nebezpečnému dotyku. Dále existují další dvě třídy, které vyjadřují stupeň ochrany svítidla. Třetí třída má ochranu typu SELV, nebo PELV (na nízké napětí 12V). Třída 0 představuje nulovou ochranu před nebezpečným dotykem (není připojen ochranný vodič). [4]

Stupeň krytí (IPxy)

První znak (x) nabývá hodnot 0-6 a představuje ochranu před vniknutím těles, druhý znak (y) nabývá hodnot 0-8 a představuje ochranu před vniknutím vody. Pro osvětlování pozemních komunikací nejčastěji používáme svítidla se stupněm krytí IP65, které zabraňují průniku prachu a tryskající vody.

Velikost stupně krytí zásadně ovlivňuje životnost světelného zdroje i celého svítidla. Použití svítidel s vysokým stupněm krytí při návrhu osvětlovacích soustav VO provází sice vyšší pořizovací náklady na svítidlo, ale z hlediska provozu přináší významné úspory na údržbu (vyšší stupeň krytí zajišťuje delší čistotu optické části, což přispívá k delšímu udržení světelně-technických parametrů svítidla pro uvažovanou dobu provozu). Použití nekvalitních svítidel s nízkým stupněm krytí v praxi vede k rychlejšímu snížení světelného toku svítidla vlivem znečištění optické části, což má za následek,

že pro uvažovaný úsek pozemní komunikace musíme použít více svítidel (nekvalitní svítidlo vlivem nízkého stupně krytí poskytuje za určitou dobu provozu osvětlovací soustavy menší hodnotu osvětlenosti povrchu). Ve výsledku osvětlovací soustava VO se svítidly s nižším stupněm krytí má vyšší pořizovací i provozní náklady, jelikož je nutné použít více svítidel, aby byla zajištěna minimální osvětlenost povrchu podle normy ČSN EN 13201-2. [4] [12]

Ochrana proti mechanickému poškození (IK)

Velikost čísla za označením IK představuje míru odolnosti proti mechanickému poškození, způsobené nárazem o určité velikosti. Většina svítidel ve VO má stupeň ochrany před mechanickým nárazem v rozsahu 6-8. Pro svítidla volně přístupná se volí ochrana IK10, která svítidlo ochrání před vandalismem. [4]

Volba udržovacího činitele

Velikost udržovacího činitele hraje významnou roli při návrhu osvětlovacích soustav VO. Norma ČSN EN 1301-2, která klade požadavky pro jednotlivé třídy osvětlení, počítá právě s udržovanou hodnotou průměrného jasů nebo osvětlenosti (velikost udržované hodnoty závisí na velikosti udržovacího činitele). V případě nové osvětlovací soustavy VO je průměrná hodnota jasů (osvětlenosti) vyšší než vyžaduje norma, jelikož se neprojeví procesy stárnutí svítidla a samotného světelného zdroje, které respektuje právě udržovací činitel. Velikost udržovacího činitele se odvíjí od velikosti stupně krytí svítidla a závisí na intervalu jeho čištění a i na činiteli stárnutí světelného zdroje (pokles světelného toku – užitečná životnost) a jeho výpadkovosti (střední doba života světelného zdroje).

4.3 Porovnání komponentů LED svítidla se svítidlem s NAV

Skladba svítidla s LED a svítidla s NAV se značně liší. Svítidlo s LED je po konstrukční části jednodušší, avšak z důvodu probíhající certifikace a standardizace výrobních procesů LED svítidel je jejich výrobní cena vyšší než u současných výbojkových svítidel. V průběhu následujících 5 let by se cena LED svítidla měla přiblížit ceně svítidla s NAV.

Tab. 7 Porovnání komponentů LED svítidla a svítidla s NAV [28]

Část svítidla	VO svítidlo s vysokotlakou sodíkovou výbojkou (70 W)	VO svítidlo s LED
Popis	Specifikace	Specifikace
Tělo svítidla	Hliníkové tělo opatřené práškovou barvou. Důraz na krytí IP 65 a vyšší.	Hliníkové tělo opatřené práškovou barvou. Důraz na krytí IP 65 a vyšší. Materiálově obdobně náročné. Pouze vyšší nároky na chladicí plochy.
Optický systém	Vysoce odrazný a přesný hliníkový reflektor v kombinaci s propustným sklem.	Dominantně budou využívány čočky usměrňující světelný tok pomocí prostupu světelného toku na každé LED.
Elektrická část (předřadník)	Elektrická část sestává ze svorkovnice, kompenzačního kondenzátoru, zapalovače, tlumivky a objímky.	Elektrická část sestává ze svorkovnice a elektronického předřadníku.
Světelný zdroj	Vysokotlaká sodíková výbojka	LED modul

Podíváme-li se do Tab. 7, můžeme vidět, že po konstrukční části se svítidla (pomineme-li tvar svítidla) příliš neliší. Avšak v případě LED musíme konstrukční část svítidla upravit pro zajištění dostatečného odvodu tepla z LED modulu. U optické části svítidel je již výraznější změna. U výbojkového svítidla musíme mít přesně tvarovaný vysoce odrazný reflektor (pro získání požadované křivky svítivosti) a difuzor z PC nebo tvrzeného skla. Z důvodu složitějšího směrování světelného toku se dostaneme na účinnost optiky okolo 80%. U LED svítidla je na každou LEDku nanesena čočka, která usměrňuje světelný tok z PN přechodu. Samotné LED svítidlo je pak uzavřeno plochým tvrzeným sklem. Účinnost optické části u LED svítidla se pohybuje okolo 90 - 95%. U elektrické části je opět jednodušší konstrukce u LED svítidla (pouze elektronický předřadník a objímka na LED modul). U svítidla s vysokotlakou sodíkovou výbojkou je navíc potřeba zapalovače a kompenzačního kondenzátoru, které jsou však nejčastěji implementovány do samotné konstrukce konvenčního předřadníku.

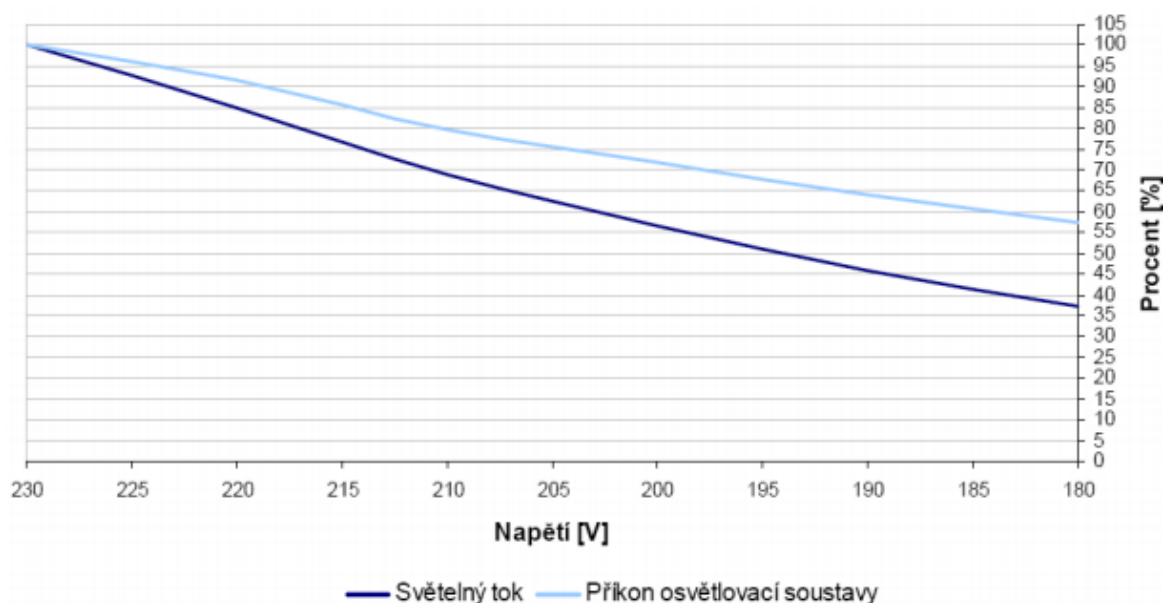
5 Řízení veřejného osvětlení

Správným řízením osvětlovacích soustav VO jsme schopni dosáhnout energetických úspor v rozmezí 30-40%. Výhodné je řídit VO zejména v nočních hodinách se sníženou intenzitou provozu (nejčastěji mezi 23 až 5 hodinou), kdy dochází k poklesu jasu okolí, a proto je možné snížit nároky na osvětlenost povrchu. U osvětlovacích soustav VO se systémy umožňující pokročilý monitoring stavu jednotlivých světelných bodů jsme schopni snížit i nároky na údržbu (např. dle průběhu napětí výbojky lze určit zbývající dobu života).

Velkou výhodou přináší řízení VO při kompenzaci velikosti světelného toku nově navržené osvětlovací soustavy. Při návrhu nové osvětlovací soustavy se počítá s průměrným udržovacím činitelem 0,7, který zahrnuje stárnutí dané soustavy VO (zahrnuje pokles světelného toku vlivem stárnoucího světelného zdroje a svítidla). Z toho vyplývá, že nová soustava poskytuje o 30% vyšší hladinu osvětlenosti, než na kterou je daná komunikace navržena. Proto je výhodné snížit hladinu osvětlenosti na nižší, která odpovídá vypočítané třídě osvětlení, a tím zvýšit životnost světelného zdroje se současným snížením spotřeby elektrické energie v rozsahu 10-15%. [22]

Při návrhu osvětlovací soustavy VO se velice často používají předpokládané parametry, jelikož ty skutečné nejsou zatím známy. Výsledkem je, že navržená soustava VO poskytuje vyšší světelně-technické parametry, než doporučuje norma (soustava je předimenzována). Při použití systému regulace se zpětnou vazbou je možné toto předimenzování kompenzovat a dosáhnout tak další úspory elektrické energie. [22]

Nevýhodou, při regulaci svítidla s NAV, je zhoršení jejího měrného výkonu. Pokles příkonu o 30% odpovídá poklesu světelného toku o 50%. [21]



Obr. 20 Závislost příkonu na velikosti světelného toku [21]

5.1 Základní principy regulace světelného toku osvětlovací soustav VO

Existují tři základní principy řízení velikosti příkonu (světelného toku) svítidla v závislosti na druhu použitého světelného zdroje, jedná se o: amplitudovou regulaci, fázovou regulaci a pulsně šířkovou (PWM). Principy jednotlivých druhů regulace si vysvětlíme v následujících odstavcích.

Amplitudová regulace (pro NAV)

Podstatou amplitudové regulace je změna efektivní hodnoty napětí pomocí změny velikosti amplitudy napětí. Existuje několik možností, jak změnit velikost amplitudy napětí v rozvodech VO. První možností změny amplitudy napětí je pomocí klasického indukčního předřadníku (tlumivka s odbočkami), kde přepínáním mezi jednotlivými odbočkami měníme impedanci tlumivky a tím regulujeme velikost světelného toku. Druhou možností změny amplitudy se provádí za pomoci elektronicky stmívatelného předřadníku. Tento způsob regulace se ve VO příliš nepoužívá, z důvodu malé rozšířenosti elektronických předřadníků (staré soustavy s konvenčními předřadníky). [4]

Nejpoužívanější možností amplitudové regulace v rozvodech VO je za pomoci skupinového rozvaděče VO, který je vybaven autotransfornátorem, nebo transformátorem s odbočkami. Regulační transformátor se zapojuje do série se stávajícím napájecím rozvaděčem a umožňuje buďto více stupňovou, nebo plynulou regulaci příkonu daného úseku VO. Při tomto způsobu regulace je v případě vysokotlaké sodíkové výbojky nutno dodržet podmínku nejnižšího napětí 180V. Při klesnutí pod tuto hodnotu se dostáváme do nestabilní oblasti hoření výboje, která může způsobit nepředvídatelné změny světelného toku (může dojít až k úplnému zhasnutí). Proto při návrhu amplitudové regulace pro daný úsek VO pomocí skupinového rozvaděče, se vychází ze světelně technických parametrů nejvzdálenějšího svítidla soustavy (musí být splněny definované hladiny osvětlenosti nebo jasů pro celý regulovaný úsek), jelikož musíme zahrnout úbytek napětí na vedení, který nesmí překročit 5% napájecího napětí. To znamená, že i poslední svítidlo musí vyhovovat navržené třídě osvětlení se současným splněním podmínky rovnoměrnosti jasů, nebo osvětlenosti. Tento způsob regulace se používá pouze pro vysokotlaké sodíkové výbojky (pro halogenidové výbojky nevhodné – nedefinované změny teplot chromatičnosti). Mezi výhody amplitudové skupinové regulace patří především jednoduchá realizace návrhu regulace VO, nižší pořizovací náklady, správa systému z jednoho místa (off-line nebo on-line). [21] [22]

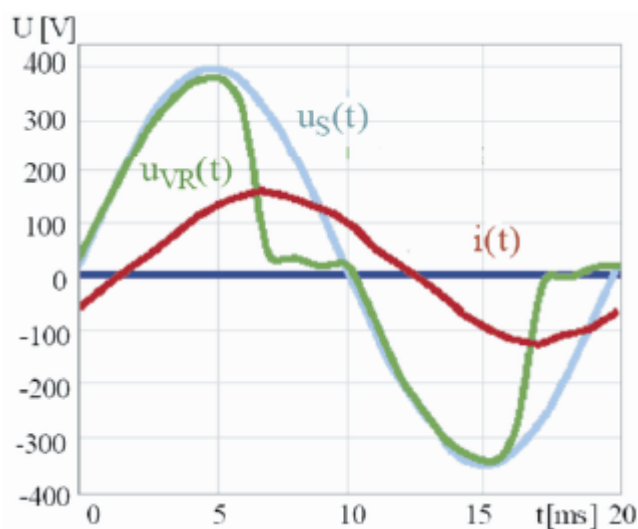


Obr. 21 Provedení skupinového rozvaděče (regulátoru) [21]

Fázová regulace (pro NAV)

I tento způsob regulace příkonu vychází ze změny efektivní hodnoty napětí, avšak u fázové regulace neměníme amplitudu napětí, ale měním vzestupnou (NCWI), případně sestupnou (AWI) část sinusového signálu (viz Obr. 22). V praxi se častěji využívá regulace sestupné části (AWI) sinusového signálu, která je vhodná především pro vysokotlaké sodíkové výbojky. Tento způsob regulace je možné použít i pro halogenidové výbojky, i když v praxi se regulace soustav VO osazenými halogenidovými výbojkami nedoporučuje, z důvodu nedefinovaných změn teplot chromatičnosti v závislosti na velikosti příkonu. [4]

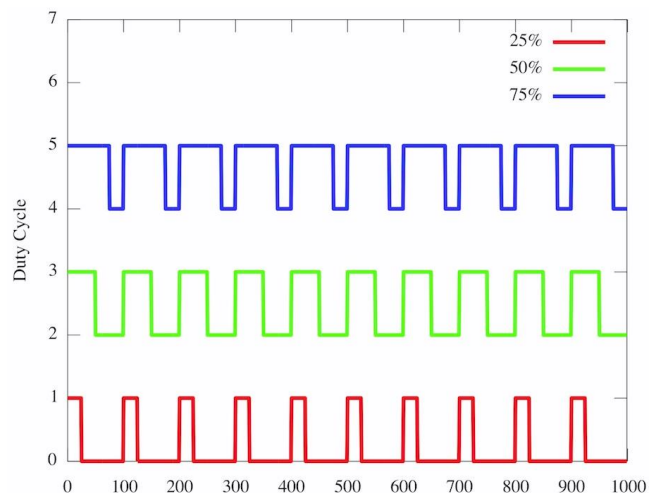
Fázová regulace světelného toku je v praxi realizována za pomoci jednofázového měniče na bázi IGBT tranzistorů, který je nejčastěji součástí elektronického předřadníku. Výhodou tohoto systému je dlouhá životnost, minimální nároky na údržbu a možnost vestavby do stávajících napájecích rozvaděčů. Fázovou regulaci nemusíme řešit individuálně ke každému svítidlu, ale lze ji řešit i skupinově (jako u amplitudové regulace). Existují jednotky fázové regulace s IGBT tranzistory (např. Intelux NG), které nabízejí regulaci soustav VO o příkonu až 9,3kW (viz. Obr. 22) s účinností 0,9. [22] [24]



Obr. 22 Fázová regulace sestupné části (AWI) a jednotka fázového regulátoru Intelux NG [24]

Pulsně šířková modulace (PWM) pro LED

Pulsně šířková modulace reguluje velikost světelného toku pomocí změny střídavy obdélkového signálu. Střída udává poměr mezi 2 úrovněmi signálu (on a off) a vypočítá se jako délka trvání pulsu děleno délkou periody. Se zvyšující se délkou pulsu (viz. Obr. 23) zvyšujeme světelný tok daného LED svítidla. Důležitými parametry u PWM regulace je doba trvání periody (frekvence pulsů) a rozlišení regulace. Frekvence pulsů se nejčastěji volí 50 Hz (síťový kmitočet). V případě, kdyby kmitočet pulsů byl výrazně nižší než 50 Hz, jevílo by se generované světlo LED diodou lidskému oku jako blikající. Rozlišení PWM regulace nám udává, s jakým krokem je možné měnit střidu. U LED svítidel ve VO je vyžadován krok alespoň 2 ms pro síťový kmitočet 50 Hz (regulace příkonu po 10%). [23]



Obr. 23 Princip PWM regulace (ukázka signálu se stídou 25,50,75%) [23]

Tento způsob regulace se používá výhradně jen u LED svítidel. U LED driverů je možné napevno nastavit čas regulace příkonu v době se sníženou intenzitou provozu, nebo lze regulovat příkon on-line, pomocí rozhraní DALI. Skupinová regulace (jako u amplitudové regulace) není v případě PWM možná. Chceme-li regulovat příkon soustav VO s LED svítidly je nutné, aby každé svítidlo bylo osazeno stmívatelným LED driverem. Tyto LED drivery jsou na bázi konstantního zdroje proudu, což znamená, že výstupní proud je konstantní pro různou velikost zátěže (pro rozsah výstupního proudu, který je LED driver schopen dodat). Příklad vyráběného LED driveru pro LED svítidla ve VO je na Obr. 24. LED drivery od společnosti OSRAM dosahují vysoké účinnosti a vyrábějí se v široké nabídce jmenovitých výkonů. [25]



Obr. 24 Stmívatelný LED driver na bázi konstantního zdroje proudu [25]

5.2 Způsoby řízení osvětlovacích soustav VO

V následujících odstavcích si popíšeme základní způsoby, jak lze zajistit řízení příkonu dané osvětlovací soustavy VO. Existuje řada řešení jak řídit VO, od jednoduchého řešení s astronomickými hodinami, až po pokročilé systémy telemanagementu.

5.2.1 Astronomické hodiny

Nejjednodušším řešením jak spínat daný úsek VO je pomocí astronomických hodin (Obr. 25). Astronomické hodiny mají vnitřní hodiny reálného času a obsahují vnitřní tabulku spínání, kterou lze ještě měnit samostatnou korekcí v rozsahu ± 99 minut. Pomocí vnitřních hodin a tabulky spínání, korigují astronomické hodiny vždy pro každý den v roce časy zapnutí a vypnutí (kompenzují časy východu a západu slunce pro konkrétní období roku). Použití korekce ± 99 minut je výhodné pro postupné zapínání a vypínání jednotlivých úseků VO (výhodné z hlediska postupného zatěžování sítě). Tato korekce se dá nastavit vždy pro konkrétní kanál (úsek VO) zvlášť, avšak je pevná po celé období roku. Astronomické hodiny je možné použít společně se systémy regulace příkonu na bázi amplitudové regulace. [26]



Obr. 25 Astronomické hodiny [26]

5.2.2 Telemanagement – využití přenosu přes GSM a technologie PLC

Jedná se o systémy komplexní správy, zahrnující systémy dálkového spínání, řízení, monitorování provozních a poruchových stavů jednotlivých částí VO. Nejčastěji se telemanagement využívá u rozvaděčů VO vybavených skupinovou regulací (amplitudovou), ale také se začíná používat pro monitoring jednotlivých svítidel VO (vybavené elektronickým předřadníkem – digitální komunikace DALI). Existují dvě struktury systému řízení: centralizovaný systém a decentralizovaný systém.

Centralizovaný systém

Tento systém telemanagementu koncentruje veškeré řídicí a monitorovací funkce do jednoho centrálního dispečerského PC. Provozovateli dané soustavy VO je umožněno provádět spínání jednotlivých částí VO a monitorovat provozní a poruchové stavy. [22]

Možnosti řízení (Centralizovaný systém) [22]:

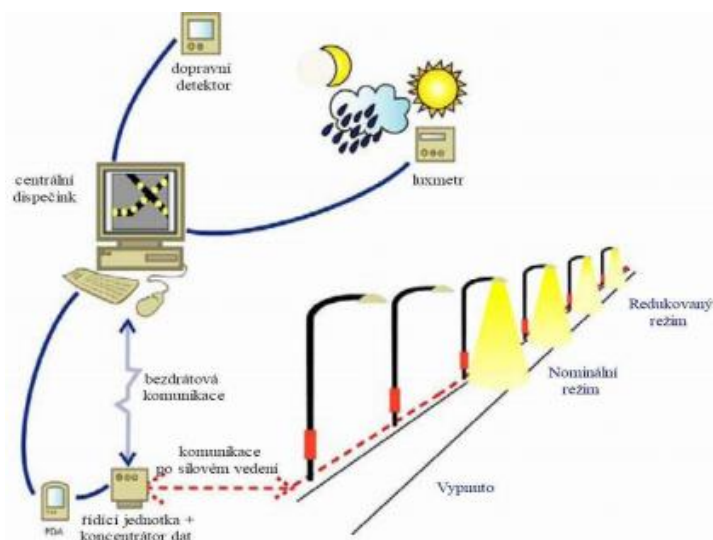
- zapnutí a vypnutí rozvaděče,
- přepnutí rozvaděče do stavu by-pass,
- odečtení elektroměru,
- přepínání režimů spínání,
- informace o stavu spínacích přístrojů (zap/vyp),
- informace o komunikaci radiomodemu,
- informace o neoprávněném stupu do rozvaděče.

Rozšířené možnosti řízení s regulační jednotkou s komunikací (předřadník s DALI) [21]:

- informace o průchodu proudu jednotlivým svítidlem,
- spotřeba elektrické energie danými svítidly,
- provozní hodiny daných svítidel VO (zařazené do společného RVO),
- pokročilé možnosti řízení příkonu svítidla (LED-PWM) – různé regulační režimy.

Telemanagement s centralizovaným systémem řízení, u něhož je každé svítidlo daného úseku VO vybaveno regulační jednotkou (elektronický předřadník s komunikačním rozhraním DALI) umožňuje on-line řízení a monitoring jednotlivých úseků VO. Předřadné přístroje jednotlivých svítidel komunikují přes silové vedení (PLC) s řídicí jednotkou v RVO. Power Line Communication (PLC) funguje na principu namodulování přenosových dat na síťové napětí 230V ve vysokofrekvenčním rozsahu v oblasti 1,6 až 30Mhz. Díky předřadníkům vybavených rozhraním DALI, můžeme měnit a upravovat režim řízení v reálném čase. Z centrálního rozvaděče veřejného osvětlení (RVO), který kromě funkce řídicí jednotky, slouží i jako koncentrátor dat, odcházejí data pomocí radiomodemu do řídicího serveru telemanagementého centra. V telemanagementovém centru se podle aktuální intenzity provozu (dopravní detektor) může regulovat příkon jednotlivých částí VO. [21] [22]

Principiální schéma centralizovaného systému telemanagementu můžeme vidět na Obr. 26. Centralizovaný telemanagement s radiomodemy RAKOM se používá například ve VO měst Brna. [22]



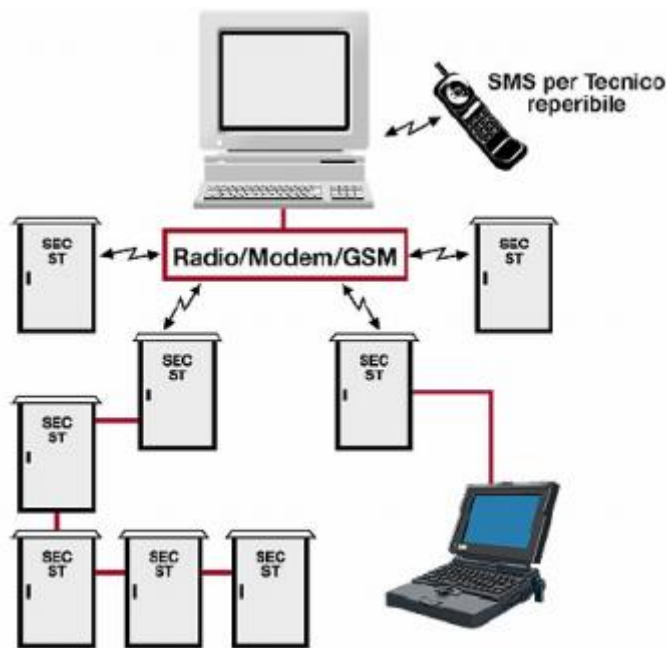
Obr. 26 Centralizovaný systém řízení využívající PLC a GSM [21]

Decentralizovaný systém

U decentralizovaného systému telemanagementu je většina řídicích a monitorovacích funkcí vloženo do jednotlivých rozvaděčů VO. Tento systém může pracovat zcela autonomně, komunikace s řídicím centrem probíhá jen při výskytu poruchových stavů, při potřebě modifikovat program řízení, nebo při stažení záznamu dat. Komunikace s řídicím centrem opět probíhá za pomoci radiomodemu. Principiální schéma decentralizovaného systému můžeme vidět na Obr. 27. [22]

Centrální jednotka umístěna v RVO umožňuje:

- řízení a regulaci daného okruhu VO,
- měření a záznam vstupního a výstupního napětí a proudu v každé fázi,
- výpočet účinníku, činného a jalového výkonu v každé fázi,
- záznam doby provozu,
- monitoring proudu a napětí jednotlivých svítidel – diagnostika poruchy kondenzátoru,
- analýzou napětí daného svítidla lze odhalit dosluhující výbojku.



Obr. 27 Decentralizovaný systém řízení GSM [22]

5.3 Určení vhodnosti stmívání osvětlovacích soustav VO

Chceme-li určit zdali je výhodné stmívat daný úsek VO, musíme vycházet z analýzy intenzity dopravy, jejíž stanovení spadá pod příslušný silniční správní úřad. Ve většině měst a obcí nastává snížený provoz mezi 23 až 5 hodinou ranní a právě v tomto časovém intervalu je vhodné VO stmívat.

Postup pro určení nároků na osvětlení při snížené intenzitě provozu:

1. Analýza intenzity provozu – spadá pod příslušný silniční správní úřad.
2. Přetřídění komunikace na základě snížené intenzity provozu (určení rozsahu třídy osvětlení).
3. Určení příslušné třídy osvětlení na základě velikosti okolního jasu při snížené intenzitě provozu.
4. Snížení jasu/osvětlenosti daného úseku osvětlovací soustavy VO vyhovující předepsané třídě osvětlení, které odpovídá snížená intenzita provozu.
5. Při stmívání musí být dodržena podmínka rovnoměrnosti jasu, nebo osvětlenosti, odpovídající dané třídě osvětlení (Je zakázáno vypínat co druhé svítidlo - z hlediska bezpečnosti a adaptace lidského zraku na změnu jasových podmínek).

6 Rozbor připravované normy EN 13201-5 Energy performance indicators

Cílem této připravované normy (před schválením – final draft) je posoudit energetickou náročnost navrhované nebo již realizované soustavy VO. Pro stanovení energetické náročnosti jsou zde užívány dva ukazatele a sice PDI (Power Density Indicator) a AECI (Annual Energy Consumption Indicator), které musí být vždy užívány společně.

Ukazatele PDI a AECI nám pomáhají stanovit možné energetické úspory pro konkrétní realizaci VO na základě typu použitého svítidla a jeho hlavních parametrů. Avšak chceme-li dosáhnout co jak nejvyšší energetické účinnosti dané osvětlovací soustavy VO, je nutné provést vhodné zařazení komunikace podle normy ČSN CEN/TR 13201-1 pro konkrétní intenzitu dopravy (více tříd osvětlení pro jeden úsek komunikace), abychom docílili osvětlování komunikace jen na požadovanou (nutnou) hladinu osvětlení odpovídající dané třídě osvětlení a konkrétní intenzitě provozu. [11]

Navrhovaný úsek komunikace VO musí vyhovovat především parametrům kladeným pro konkrétní třídu osvětlení uvedenou v normě ČSN EN 13201-2. Vhodným výběrem svítidla lze splnit nároky na: minimální hodnotu jasů (osvětlenosti), rovnoměrnost jasů (osvětlenosti) v podélné ose komunikace, korektní (přesné) směřování světelného toku jen na potřebnou plochu komunikace (v praxi těžko dosažitelné) a současně lze zabránit zbytečnému přesvětlování komunikace. Energetická náročnost jednotlivých soustav VO se značně liší v závislosti na požadavcích dané třídy osvětlení a zvolenému typu svítidla (LED versus NAV).

Vhodným řízením (regulací) osvětlovacích soustav VO, lze značně snížit spotřebu elektrické energie (AECI) pro určité období roku při odpovídající intenzitě dopravy. Při regulaci nesmí být ohrožena bezpečnost provozu (podmínka rovnoměrnosti), což znamená, že regulační stupeň musí vždy odpovídat zařazení komunikace.

Ukazatele PDI a AECI neslouží jak vstupní parametr pro dimenzování rozvodné sítě VO. Pro stanovení dovoleného úbytku napětí musíme vycházet z parametrů svítidel a příkonů řídicích systémů (předřadníků). [11]

Obsahem této normy je i parametr vyjadřující světelnou účinnost (měrný výkon) dané soustavy VO. Tento parametr může posloužit pro porovnání účinnosti stejného úseku VO, avšak realizovaného s jiným typem svítidla. [11]

6.1 PDI (Indikátor výkonové hustoty) –Power Density Indicator

Tento ukazatel nám vyjadřuje energetickou náročnost na metr čtvereční dané komunikace, která splňuje nároky na průměrnou hodnotu osvětlenosti (lx) odpovídající dané třídě osvětlení. Jednotkou PDI je $W \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$. PDI je definován následujícím vztahem [11]:

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\overline{E}_i \cdot A_i)} \quad (5)$$

kde D_p ... je indikátor výkonové hustoty ($W \cdot lx^{-1} \cdot m^{-2}$)

P ... je příkon počítané soustavy VO osvětlující relevantní oblasti (W)

\overline{E}_i ... je průměrná udržovaná osvětlenost povrchu v n relevantních oblastech (lx)

A_i ... je uvažovaná plocha n -oblastí (m^2)

n ... je počet počítaných relevantních oblastí ()

Mění-li se v průběhu noci třídy osvětlení, například z důvodu změn intenzity dopravy, je nutné, aby ukazatel PDI byl počítán pro každou třídu osvětlení (stupeň regulace) zvlášť. Alternativní možností, výpočtu ukazatele PDI pro více tříd osvětlení, je počítat ho jako průměrnou hodnotu během které se mění třídy osvětlení, ať již během noci, nebo v průběhu celého roku. Ukazatelé PDI a AECI musí být vždy prezentovány společně, aby mohla být stanovena energetická účinnost uvažované osvětlovací soustavy VO. [11]

Průměrná horizontální osvětlenost (\overline{E}_i) použitá ve výpočtu PDI

Pro třídy založené na udržované hodnotě průměrné osvětlenosti povrchu (CE, S, ES, EV) by měla být hodnota průměrné osvětlenosti počítána na základě normy EN 13201-3. [11]

Pro třídy osvětlení vycházející z jasových podmínek (ME/MEW) se do výpočetního vztahu za \overline{E}_i dosadí průměrné hodnoty osvětlenosti povrchu počítaných na stejné výpočetní mřížce, která byla použita při výpočtu osvětlenosti v souladu EN 13201-3. [11]

Některé již realizované soustavy VO mohou vykazovat přebytečnou hladinu osvětlenosti, to znamená, že je uvažovaný úsek komunikace osvětlen více, než vyžaduje daná třída osvětlení. Proto je nutné, aby bylo zjištěno, zda je přesvětlování komunikace způsobeno špatným návrhem VO, nebo zda přesvětlování vzniká jako nevyhnutelný důsledek jiných parametrů, které nelze při návrhu VO určit. [11]

Z hlediska energetické účinnosti a ochrany životního prostředí by vypočtená úroveň osvětlenosti jakékoliv osvětlovací soustavy VO neměla překročit úroveň osvětlenosti následující vyšší třídy, aniž by bylo nutné použít jiné konstrukční řešení. [11]

Příkon soustavy (P) použitý ve výpočtu PDI

Při výpočtu PDI se za příkon soustavy VO dosazují příkony veškerých komponentů, a sice příkon světelných zdrojů, předřadníků, přepínačů, spínačů, fotobuněk, které jsou pevně spjaty s počítaným úsekem soustavy VO a zajišťují provoz, případně i regulaci. Výpočet příkonu pro celou soustavu VO nebo jen pro vybraný (reprezentativní) úsek se vypočte podle následujícího vztahu:

$$P = \sum_{k=1}^{n_p} P_k + P_{ad} \quad (6)$$

kde P ... je součet všem příkonů které zajišťují provoz a regulaci VO (W)

P_k ... je provozní (operační) výkon k světelných bodů (světelný zdroj, převodník, spínač, fotobuňka a další komponenty, které jsou pevně spjaty se světelným bodem a jsou nezbytné pro jeho funkci) (W);

P_{ad} ... je celkový provozní výkon jakýchkoliv zařízení, které nejsou zahrnuty v P_k , ale jsou nezbytné pro provoz daného úseku VO (dálkově řízené spínače, přepínače, centralizované regulátory světelného toku...) (W);

n_p ... je počet světelných bodů spjatých s osvětlovací soustavou VO nebo s jejím úsekem

V případě, kdy je ukazatel PDI počítán pouze pro část komunikace, by celkový provozní výkon P_{ad} měl být úměrně závislý počtu svítidel, které osvětlují daný úsek komunikace na celkovém počtu svítidel napájených ze zařízení reprezentující P_{ad} . [11]

Je-li na dané soustavě VO uplatňována regulace světelného toku (změna třídy osvětlení), je nutné, aby příkon soustavy byl vypočítán zvlášť pro každý stupeň regulace. Je-li u dané soustavy uplatňována kompenzace poklesu světelného toku po dobu životnosti světelného zdroje, je nutné, aby příkon svítidla byl vypočten jako průměrná hodnota těchto proměnlivých příkonů za dobu provozu svítidla. [11]

Při výpočtu PDI jen pro reprezentativní část pozemní komunikace VO s klasickým uspořádáním a typickou roztečí svítidel, je nutné, aby byl příkon počítán jako suma příkonů všech svítidel a další zařízení (např. předřadníky), které jsou uvnitř a na okraji výpočtového pole reprezentativní části, v souladu s ČSN EN 13201-3. Do výpočtu příkonu nesmí být zahrnuty jiná zařízení, která se nepodílejí na osvětlování komunikace, i když jsou připojeny na stejnou distribuční síť. [11]

Plocha (A_i) uvažovaných oblastí použitých ve výpočtu PDI

Plocha, která se používá pro výpočet PDI musí být identická s plochou pro výpočet světelných parametrů navrhované komunikace dle normy EN 13201-3. [11]

Plochy osvětlené činitelem osvětlení okolní (SR) se nezapočítávají do výpočtu PDI. [11]

6.2 AECI (Annual Energy Consumption Indicator)

Roční spotřeba elektrické energie (AECI) je závislá na [11]:

- době provozu osvětlovací soustavy VO,
- třídě osvětlení pro každý režim provozu (regulační režimy),
- účinnosti instalovaných svítidel, které poskytují nezbytné osvětlení pro každé období provozu,
- způsobu jak systém řízení osvětlení sleduje změny ve vizuálních podmínkách uživatele,
- parazitní spotřebě energie osvětlovacích zařízeních během doby kdy osvětlení není potřeba.

Pro srovnání a monitoring energetické náročnosti osvětlovacích zařízeních musí ukazatel spotřeby energie vzít v úvahu roční akumulovanou spotřebu energie, i když skutečné potřeby na osvětlení se mohou v průběhu roku měnit, z důvodu [11]:

- změny délky dne a noci během ročního období,
- změny povětrnostních podmínek vliv na vizuální potřeby (suchá nebo mokrá vozovka),
- změny v intenzitě dopravy během noci,
- změny v použití daného úseku VO (zavřené, využití pro pěší během festivalu).

Roční spotřebu elektrické energie vypočteme pomocí následujícího vztahu:

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j \cdot t_j)}{A} \quad (7)$$

kde D_E ... je ukazatel roční spotřeby elektrické energie pro osvětlovací soustavu VO (Wh.m⁻²)

P_j ... je provozní příkon spojený s daným časem provozu (W)

t_j ... je doba provozu daného regulačního stupně s danou velikostí příkonu (P_j) (h)

A ... je velikost plochy osvětlené stejným svítidlem (m²)

m ... je počet period s rozdílným provozním příkonem (-)

Stejně jako u ukazatele PDI i tady pokud je řízen příkon svítidla, aby po čas životnosti světelného zdroje dodával konstantní světelný tok, se spotřeba energie vypočte jako průměrná hodnota energie spotřebované během předpokládané doby života světelného zdroje. [11]

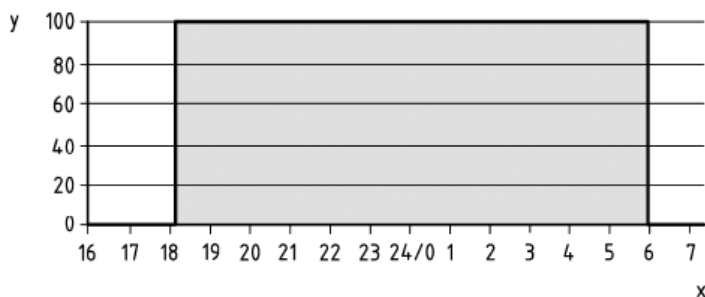
6.3 Režimy řízení VO

V příloze této normy jsou i režimy řízení, které umožňují regulovat hladinu osvětlenosti na základě požadavků uživatelů (intenzity provozu), s přihlédnutím k technickým možnostem řízení (dané použitým světelným zdrojem). Dnešní soustavy VO lze regulovat buďto na hladinu 50% světelného toku (platí pro sodíky), které odpovídá 70% velikost příkonu. V případě LED lze regulovat velikost světelného toku v rozsahu 0-100%, avšak z hlediska bezpečnosti a zatřídění dané komunikace se příkon snižuje maximálně na 30-25% původní velikosti světelného toku.

Zapínací a vypínací časy umělého osvětlení v průběhu roku závisejí především na zeměpisné šířce a na místním klimatu. Je vhodné, aby jednotlivé hladiny řízení (v průběhu dne a noci) byly sladěny s ubývajícím (respektive přibývajícím) hladinou osvětlenosti během západu (respektive východu) slunce a rovněž byly splněny požadavky na osvětlenost komunikace dané normou EN 13201-2. [11]

Režim plného příkonu

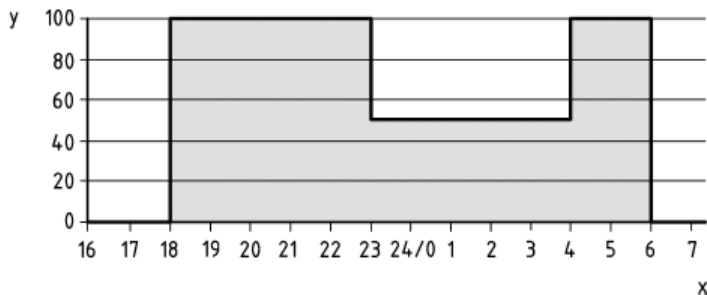
Tento režim řízení se používá u starých soustav VO vybavených pouze jednoduchými spínači (hodinami). Svítidla po celou dobu provozu během každé noci pracují na plný příkon (viz. Obr. 28). [11]



Obr. 28 Režim plného příkonu [11]

Dvouúrovňový režim

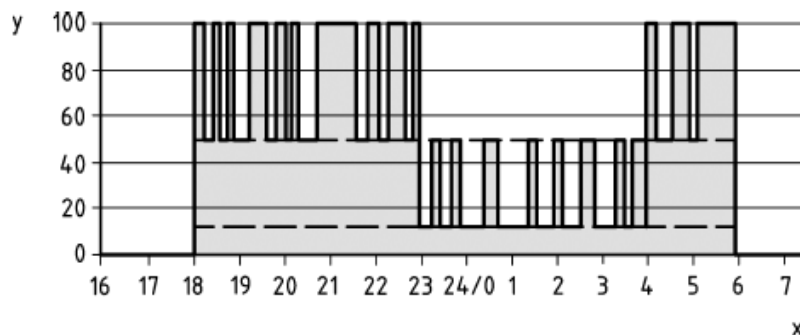
U tohoto režimu řízení se reguluje VO na dvě hladiny osvětlenosti (50 a 100%), které trvají různě dlouho (na základě analýzy intenzity dopravy). Tento režim se používá u vysokotlakých sodíkových výbojek (je možné regulovat jen na 50% nebo 100% hladinu osvětlenosti). Daná úroveň řízení musí opět odpovídat dané třídě osvětlení uvedené v ČSN EN 13201-2.



Obr. 29 Dvouúrovňový režim řízení příkonu [11]

Víceúrovňový režim řízení s detektory pohybu

U moderních soustav VO s detektory pohybu, lze v reálném čase měnit hladinu osvětlenosti na základě změny intenzity provozu. Tento režim řízení je ze všech režimů řízení nejvíce hospodárný, jelikož komunikace je osvětlena vždy jen na nezbytnou hladinu osvětlenosti. Jednotlivé špičky (viz Obr. 30) odpovídají časům se zvýšenou intenzitou provozu a jejich opakování není periodické. Pro přesné určení velikosti AECI (pro soustavu VO s tímto režimem řízení), je nutné stanovit předpokládanou délku jednotlivých hladin osvětlenosti po čas roku. [11]



Obr. 30 Víceúrovňový režim řízení příkonu [11]

Pozn. k Obr. 28-30:

x – je doba provozu (h)

y – je úroveň hladiny osvětlenosti (%)

V Obr. 30 značí spodní přerušovaná čára hranici bezpečnosti, pod kterou se nesmí regulovat.

6.4 Hodnoty ukazatelů PDI a AECI pro standardní osvětlovací soustavy VO

Hodnoty ukazatelů PDI a AECI závisí na mnoha faktorech a to například na: aktuální třídě osvětlení, uspořádání soustavy, šířce vozovky, typu světelného zdroje, kvalitě optiky a pozice lampy ve svítidle. Režimy řízení mohou značně snížit hodnotu ukazatele AECI. I když jednotlivé soustavy VO splňují světelně-technické požadavky, které jsou kladeny na daný úsek komunikace, může být energetická náročnost dané soustavy značně odlišná (např. v závislosti na typu použitého svítidla a jeho účinnosti). Čím nižší jsou ukazatele PDI a AECI tím je nižší energetická náročnost dané soustavy VO. [11]

Hodnoty ukazatelů PDI a AECI jsou založeny na výpočtech optimalizovaných soustav VO pro odlišné kombinace rozdělení komunikace, tříd osvětlení, světelných zdrojů a typů svítidel užívaných v současné praxi. Hodnoty ukazatelů by neměli být brány jako benchmarky, ale mají vytvořit představu o absolutních hodnotách ukazatelů pro konkrétně realizovanou soustavu VO a jak lze docílit snížení energetické náročnosti (např. použitím svítidla s vyšší účinností). [11]

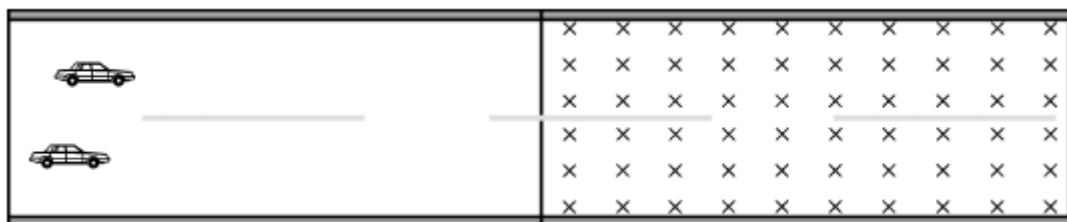
Při výpočtu ukazatelů PDI a AECI je stanoveno několik předpokladů:

- šířka chodníků a travnatých pásů je rovna 2 metrům,
- udržovací činitel má velikost 0,8 pro všechny typy světelných zdrojů a svítidel,
- odrazné vlastnosti povrchu jsou dány kategorií R3,
- instalovaná výška svítidel je v rozsahu 5 až 12 metrů,
- rozteč svítidel je v rozsahu 20 až 60 metrů (s krokem 1 metru),
- svítidla nejsou nakloněna,
- přesah ramena svítidla je v rozsahu 0 až 2 metrů (s krokem 0,5 metru),
- roční doba provozu je 4000 hodin.

Uspořádání svítidel je obvykle jednostranné, v případě komunikací s širší vozovkou se volí svítidla naproti sobě s konstantní roztečí. Pro každý výpočet je optimalizace geometrie soustavy zaměřena především na rozteč svítidel, za účelem dosažení co jak největší osvětlené plochy jak je to jen možné a mít tak ukazatele energetické náročnosti co jak nejmenší. [11]

Hodnoty ukazatelů PDI a AECI byly stanoveny na základě vyráběných svítidel na počátku roku 2014. [11]

Příklad typických hodnot ukazatelů PDI a AECI pro třídu osvětlení M (ME)



Obr. 31 Uspořádání komunikace třídy osvětlení M [11]

Tab. 8 Typické hodnoty ukazatele PDI pro třídu osvětlení M [11]

Třída osvětlení	Šířka vozovky (m)	Typy světelného zdroje				
		Rtuť	Halogenid	Sodík elip.	Sodík válc.	LED
		mW.lx ⁻¹ .m ⁻²	mW.lx ⁻¹ .m ⁻²	mW.lx ⁻¹ .m ⁻²	mW.lx ⁻¹ .m ⁻²	mW.lx ⁻¹ .m ⁻²
M1	7		45		34 - 41	25 - 32
M2	7	100	50		31 - 40	24 - 27
M3	10	85	42	43	31 - 32	25 - 27
	8	83	42	40	30 - 33	27
	7	84	47	40	34 - 38	23 - 25
	6	103	51	43	40 - 44	25 - 28
M4	7	90	60	41-47	34 - 42	23
M5	7	86	30	47	38 - 45	24
	6	89	34	53	41 - 51	28
	5	97	41		53	38
	4	116	48		65	46
M6	7	85	37		45 - 49	20 - 27

Tab. 9 Typické hodnoty ukazatele AECI pro třídu osvětlení M [11]

Třída osvětlení	Šířka vozovky (m)	Typy světelného zdroje				
		Rtuť	Halogenid	Sodík elip.	Sodík válc.	LED
		kWh.m ⁻²	kWh.m ⁻²	kWh.m ⁻²	kWh.m ⁻²	kWh.m ⁻²
M1	7		5		4-5,3	3-3,8
M2	7	10,8	4,6		3,2-4,2	2,4-2,5
M3	10	6	3,4	3	2,3	1,6
	8	6	3,4	3	2,2-2,4	1,6
	7	6	3,6	2,8-3,1	2,5-2,6	1,5
	6	7	3,9	3,2	2,7-2,8	1,6
M4	7	5	3,1	2,3-2,5	1,8-2,4	1,1
M5	7	3,2	0,9	1,7	1,1-1,6	0,8
	6	3,4	1	2	1,2-1,7	0,9
	5	3,6-4,0	1,2		1,5-1,8	1
	4	4,1	1,5		1,7-2,3	1,3
M6	7	1,9	0,6		0,2-1,2	0,4-0,5

6.5 Měrný výkon osvětlovacích soustav VO

Měrný výkon dané instalace VO lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$\eta_{inst} = C_L \cdot f_M \cdot U \cdot R_{LO} \cdot \eta_{ls} \cdot \eta_P \quad (8)$$

kde η_{inst} ... je měrný výkon dané soustavy VO (lm.W⁻¹)

C_L ... je korekční faktor pro třídy osvětlení založené na jasu

f_M ... je udržovací činitel (MF)

U ... je činitel využití

R_{LO} ... je účinnost optické části svítidla (poměr vystupujícího toku k toku světelného zdroje)

η_{ls} ... je účinnost světelného zdroje použitého ve svítidle (lm.W⁻¹)

η_P ... je účinnost svítidel použitých v dané instalaci VO

Účinnost světelného zdroje by měla být ověřena reálným měřením v terénu (pro danou soustavu VO). Hodnota udržovacího činitele by měla být stejná jako při výpočtu průměrné osvětlenosti povrchu (v souladu s EN 13201-3). [11]

Výpočet korekčního faktoru

V případě kdy se minimální požadavky na jednu či více relevantních oblastí vyjadřují v součiniteli povrchu vozovky, může být schopnost soustavy vytvářet jas relativně vysoká nebo nízká a to z důvodu odlišnosti od průměrné hodnoty součinitele jasu povrchu vozovky Q_0 (obvykle $0,07 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$), nebo z důvodu jisté směrovosti osvětlení. Korekční faktor se vypočte podle následujícího vztahu [11]:

$$C_L = \sum_{i=1}^n (\bar{E}_{i,\min} \cdot A_i) / \phi_A \quad (9)$$

kde $\bar{E}_{i,\min}$... je minimální požadovaná hodnota průměrné osvětlenosti

A_i ... je plocha na které je požadována průměrná hodnota osvětlenosti

ϕ_A ... je velikost světelného toku dopadajícího na osvětlovanou plochu

Pro oblasti A_i , kde návrh osvětlení vychází z minimálních hodnoty jasu, se minimální požadovaná hodnota průměrné osvětlenosti vypočte pomocí (kde 0,07 vyjadřuje nejpoužívanější míru odraznosti povrchu dané komunikace) [11]:

$$\bar{E}_{i,\min} = \bar{L}_{i,\min} / 0,07 \quad (10)$$

Výpočet činitele využití

Činitel využití je definován jako poměr světelného toku dopadajícího na relevantní oblast k sumě individuálních toků svítidel dané soustavy VO. [11]

$$U = \frac{\phi_A}{n_{lu} \cdot \phi_{ls} \cdot R_{LO}} \quad (11)$$

kde ϕ_A ... je světelný tok dopadající do relevantní oblasti (lm)

ϕ_{ls} ... je světelný tok emitovaný ze světelného zdroje (lm)

n_{lu} ... je počet svítidel v dané instalaci VO

R_{LO} ... je účinnost optiky svítidla

Účinnost svítidel v dané instalaci VO (snižují ji ztráty v předřadníku)

V případě LED svítidla se počítá s celkovou světelnou účinností (není dána účinnost LED ani optiky).

$$\eta_P = P_{ls} / P \quad (12)$$

kde P_{ls} ... je příkon světelného zdroje uvnitř svítidla (W)

P ... je celkový příkon svítidla (zahrnuje předřadník) (W)

7 Stanovení energetické náročnosti VO na ulici Studentská a Technologická

Cílem praktické části této bakalářské práce je posoudit energetickou náročnost dvou realizovaných soustav veřejného osvětlení nacházejících se v těsné blízkosti kampusu Vysoké školy Báňské – Technické univerzity v Ostravě. Jedná se o ulice: Studentskou, která je realizována moderními LED svítidly od firmy Philips (Obr. 33) a ulici Technologickou, která je osvětlena svítidly značky Artechnic-Schröder (Obr. 32) s vysokotlakými sodíkovými výbojkami.

Zhodnocení energetických úspor použitím LED svítidel při osvětlování pozemních komunikací provedu na základě nové normy EN 13201-5, jejíž rozbor jsem zpracoval v teoretické části této práce. Jedná se o zcela novou normu, která nabyde platnosti v druhém pololetí roku 2016. Jelikož ještě norma EN 13201-5 nenabyla platnosti a ještě nikdo s ní nepracoval (vyjma autora normy - doc. Gašparovský, kterému bych chtěl poděkovat za poskytnutí finálního návrhu normy), vytvořil jsem v tabulkovém procesoru Excel univerzální tabulku, pomocí které lze vyhodnotit energetickou náročnost jakékoliv osvětlovací soustavy VO nacházející se v Ostravě (v případě použití odlišných regulačních stupňů, je nutné tabulku mírně upravit). Celý postup výpočtů ukazatele AECI na ulicích Studentská a Technologická můžete vidět v příloze č. 5. Po zavedení normy EN 13201-5 mohou Ostravské komunikace a.s. nebo například firma PTD Muchová s.r.o. (a jiné Ostravské firmy) za pomoci této tabulky vyhodnotit energetickou náročnost stávajících soustav VO a stanovit velikost úspory použitím LED svítidel pro danou komunikaci. Dle teoretických předpokladů by kvalitativní a kvantitativní parametry použitých LED svítidel (Philips Luma) měli v mnoha ohledech předčít parametry svítidla s NAV (Schröder MC12). Mým cílem je stanovit, zda tomu tak skutečně je, případně jak moc se jednotlivé kvantitativní a kvalitativní parametry od sebe liší. Na základě vypočtených (projektovaných) a naměřených hodnot zhodnotím velikost ukazatelů energetické náročnosti (PDI a AECI podle EN 13201-5) a stanovím procentuální úsporu elektrické energie použitím regulačních režimů v době se sníženou intenzitou provozu.

Cílem je také zhodnotit zda jsou splněny všechny světelně-technické parametry, které na uvažované komunikace klade třída osvětlení ME5 (stejná třída osvětlení jak pro Studentskou ulici tak Technologickou). Zhodnocení světelně-technických parametrů provedu na základě vypočtených a naměřených hodnot (zhodnotím, jak moc se liší od výpočtu). Za zpracování světelného výpočtu ulice Studentská děkuji Ing. Aleně Muchové a za naměřené hodnoty ulice Studentská děkuji Ing. Richardu Balejovi. Zpracovaný světelně-technický výpočet ulice Studentská (LED svítidla Philips Luma) můžete vidět v příloze č. 3 a naměřené hodnoty můžete vidět v příloze č. 4. Světelně-technický výpočet komunikace na Technologické ulici, jehož výpočet jsem provedl ve výpočetním programu Relux, můžete vidět v příloze č. 3. Měření osvětlenosti komunikace na Technologické jsem provedl dne 13. 4. 2016 a jeho zpracování opět můžete vidět v příloze č. 4. Provedu také zařazení komunikace na základě normy ČSN CEN/TR 13201-1 a její revize, která nabyde platnosti v druhém pololetí tohoto roku. Srovnám oba dva způsoby zařazení a zhodnotím, který z nich je jednodušší a rychlejší. Lze očekávat, že vypočtené a naměřené hodnoty průměrného udržovaného jasu se budou od sebe lišit a to jednak z důvodu vyššího jasu okolí (Technologický park Ostrava) a z důvodu nekonzistentních odrazných vlastností povrchu komunikace (nečistoty a vyjeté koleje zvyšují odrazné vlastnosti asfaltového povrchu). Na základě výkladu normy EN 13201-5 lze očekávat, že ukazatelé PDI a AECI budou nižší u LED svítidel a to jednak z důvodu vyššího měrného výkonu světelného zdroje, mírně vyšší účinnosti

optické části svítidla a vyššímu udržovacímu činiteli. Vypočtená velikost ukazatele AECI (pro LED) ať již pro naměřené, nebo vypočtené hodnoty bude zcela jistě nižší, než hodnota kterou udává norma EN 13201-5, jelikož na Studentské ulici je použit regulační režim po čas snížené intenzity provozu.

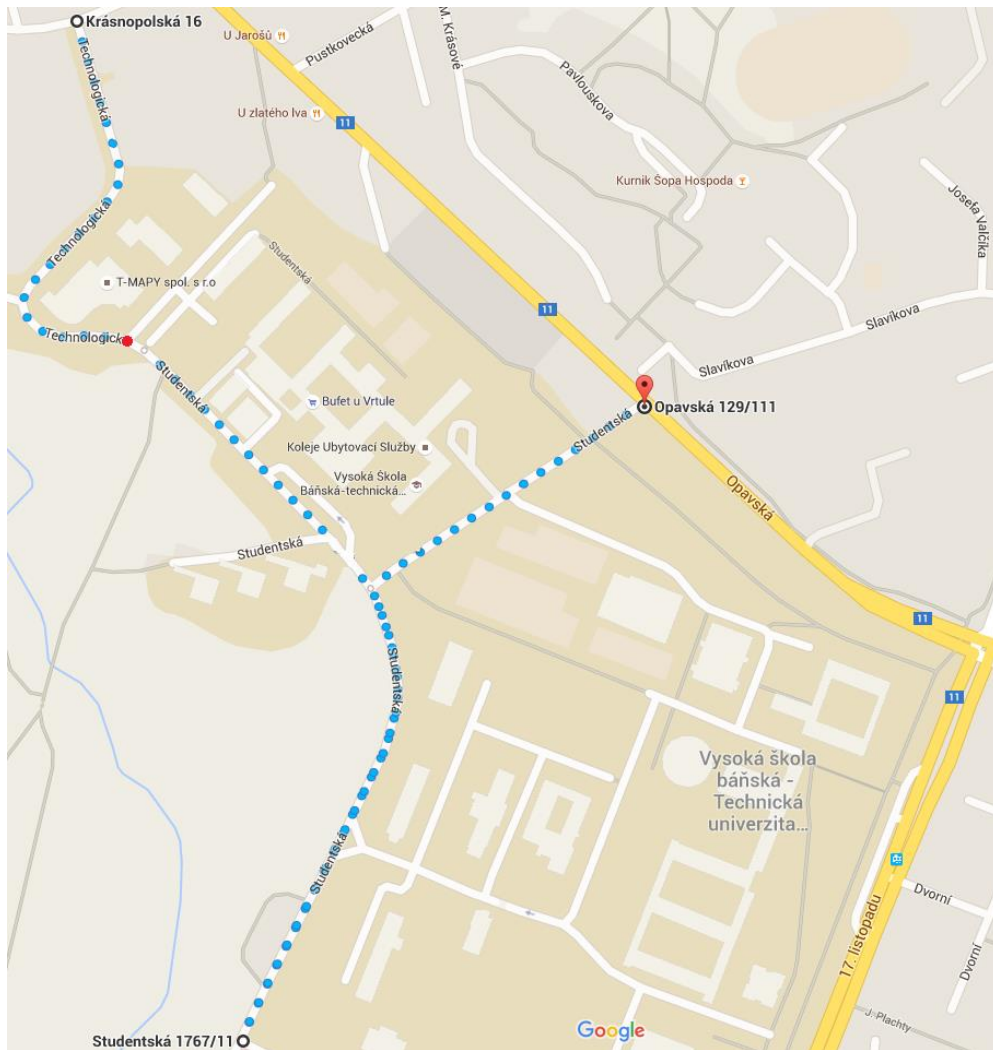


Obr. 32 Svítidlo na ulici Technologická - Artechnic-Schröder MC12



Obr. 33 Svítidlo na ulici Studentská - Philips Luma 1 R3

Znázornění začátků a konců ulic Studentská a Technologická můžeme vidět na mapě Obr. 34 (červený bod znázorňuje začátek ulice Technologické – sodíkové svítidla)



Obr. 34 Znáornění začátků a konců ulic Studentská a Technická

7.1 Posouzení kvantitativních a kvalitativních parametrů svítidel a světelných zdrojů

V této kapitole posoudím na základě získaných teoretických poznatků, který typ světelného zdroje a svítidla má lepší kvalitativní a kvantitativní parametry. Na Obr. 35 můžeme vidět, jak vypadá vysokotlaká sodíková výbojka a LED modul svítidla Philips Luma. Celou konstrukci použitých svítidel můžeme vidět na Obr. 36.



Obr. 35 Vysokotlaká sodíková vábojka (nalevo) a LED modul svítidla Philips Luma (napravo)



Obr. 36 Svítidlo Schröder MC12 (nalevo) a svítidlo Philips Luma 1 R3 (napravo)

Výpočet kvantitativních parametrů svítidel a světelných zdrojů z katalogových listů výrobců (tj. OSRAM a Philips)

Z katalogových listů světelných zdrojů (viz příloha č 2) obou výrobců (tj. Osram a Philips), jsem vypočetl měrné výkony zdrojů. V těchto katalogových listech je uveden jednak jmenovitý světelný tok, tak i příkon světelného zdroje (u LED svítidla Philips Luma není uveden světelný tok zdroje, proto byl převzat z výpočetního programu od firmy Philips – lighting reality – viz příloha č. 3). Účinnost optické části svítidla Schröder MC12 byla převzata z výpočetního programu Relux, kde po nahrání LDT souboru se společně s křivkou svítivosti svítidla zobrazila i jeho účinnost (viz příloha č. 3). Účinnost optiky LED svítidla Philips Luma musela být dopočítána (výrobce jí neuvádí) na základě velikosti světelného toku LED zdroje (7 000 lm), kde jsme touto hodnotou podělili součin měřeného výkonu svítidla (123 lm.W⁻¹ – viz katalogový list - příloha č. 2) a jeho příkonu. U svítidla Schröder MC12 (s NAV) byl použit standardní 70 W elektromagnetických předřadníků, jehož činné ztráty činí 12,4 W (viz příloha č. 2)

Měrný výkon použitých světelných zdrojů

$$\eta_{LED} = \frac{\phi_Z}{P} = \frac{7000}{48} = 145,883 \text{ lm.W}^{-1} \approx 146 \text{ lm.W}^{-1} \quad (13)$$

$$\eta_{NAV} = \frac{\phi_Z}{P} = \frac{6600}{71} = 92,958 \text{ lm.W}^{-1} \approx 93 \text{ lm.W}^{-1}$$

$$\frac{\eta_{NAV}}{\eta_{LED}} = \frac{93}{146} \cdot 100 = 63,7\%$$

Výpočet účinnosti optické části LED svítidla Luma (Schröder MC 12 převzat z LDT souboru)

$$\eta_{optiky(LED)} = \frac{\eta_{svítidla(LED)} \cdot P}{\phi_Z} \cdot 100 = \frac{123 \cdot 49}{7000} \cdot 100 = 86,1\% \quad (14)$$

Výstupní světelný tok svítidla

$$\phi_{svítidla(LED)} = \eta_{optiky(LED)} \cdot \phi_Z = 0,861 \cdot 7000 = 6027 \text{ lm} \quad (15)$$

$$\phi_{svítidla(NAV)} = \eta_{optiky(NAV)} \cdot \phi_Z = 0,82 \cdot 6600 = 5412 \text{ lm}$$

Měrný výkon svítidla

$$\eta_{svítidla(LED)} = \frac{\phi_{svítidla(LED)}}{P} = \frac{6027}{49} = 123 \text{ lm.W}^{-1} \quad (16)$$

$$\eta_{svítidla(NAV)} = \frac{\phi_{svítidla(NAV)}}{P} = \frac{5412}{83,4} = 64,89 \text{ lm.W}^{-1} \approx 65 \text{ lm.W}^{-1}$$

$$\frac{\eta_{svítidla(NAV)}}{\eta_{svítidla(LED)}} = \frac{65}{123} \cdot 100 = 52,9\%$$

Tabulka vyhodnocení kvantitativních a kvalitativních parametrů světelných zdrojů a svítidel

Tab. 10 Srovnání kvantitativních a kvalitativních parametrů - Philips Luma versus Schröder MC12

Kvantitativní a Kvalitativní parametry	Světelný zdroj		Svítidlo	
	LED	NAV	LED	NAV
Světelný tok (lm)	7 000	6 600	6027	5412
Příkon (W)	48	71	49	83,4
Měrný výkon (lm.W ⁻¹)	146	93	123	65
Účinnost optiky (%)	-	-	86,1	82
Ra (-)	70	25	Souhlasí se světelným zdrojem	
Tc (K)	4 000	2 000	Souhlasí se světelným zdrojem	
T(h)	100 000	20 000	Souhlasí se světelným zdrojem	
IP (optiky+sv.)	-	-	66/66	66/44
IK ()	-	-	09	08
Třída ochrany ()	-	-	2	1

Vyhodnocení kvantitativních a kvalitativních parametrů světelných zdrojů (Pozn. k Tab. 10)

Podíváme-li se do Tab. 10, můžeme vidět, že přestože LED dodává o 400 lm větší světelný tok nežli NAV, je příkon vysokotlaké sodíkové výbojky o 23 W vyšší (48 W versus 71 W). Účinnost přeměny elektrické energie u LED je o 53 lm.W⁻¹ vyšší v porovnání s NAV (93 lm.W⁻¹ versus 146 lm.W⁻¹). Velikost měrného výkonu NAV je na 63,7% vůči velikosti měrného výkonu LED (měrný výkon NAV je o 36,3% nižší v porovnání s LED). Tato hodnota není zanedbatelná a hovoří jednoznačně ve prospěch LED, jelikož hodnota měrného výkonu sodíkových výbojek nižších výkonových řad ani zdaleka nedosahuje teoretického maxima 150lm.W⁻¹ (viz teoretická část práce).

Z hlediska kvalitativních parametrů (Ra, Tc, T) je na tom z dané dvojice světelných zdrojů lépe LED. V případě LED zdroje (viz Tab. 10) můžeme vidět, že díky vyzařování v široké oblasti viditelného spektra je jeho index podání barev 70. Vysoký index podání barev se hodí v případě křižovatky mezi ulicí Studentskou a Technologickou a křižovatkou mezi ulicí Studentskou a Opavskou. V okolí těchto křižovatek lze předpokládat složitější náročnost navigace a také jsou kladeny vyšší nároky na pozornost řidiče, proto je vyšší míra věrnějšího rozpoznání barev vítána. V případě Technologické ulice, kde index podání barev NAV dosahuje pouze 25, by vyšší míra rozpoznání věrného podání barev v případě křižovatky s ulicí Krásnopolskou a četnějšího výskytu parkovacích aut byla vítanou změnou.

Náhradní teplota chromatičnosti, je u obou zdrojů značně odlišná. U LED je 4 000 Kelvinů, u sodíkové výbojky 2 000 K. V tomto ohledu již neplatí, že vyšší teplota chromatičnosti v případě LED je výhodnější než u sodíkové výbojky. U ulice Studentské, kterou z velké části obklopuje les, je vyšší teplota chromatičnosti vítána, jelikož vzbuzuje u řidiče vyšší pozornost a zvětšuje periferní oblast vidění. Tento fakt se opírá o teoretické poznatky, které jsem popsal v kapitole význam mezopického vidění při výběru náhradní teploty chromatičnosti. Na ulici Technologická, která je osazena sodíkovými výbojkami s nízkou teplotou chromatičnosti (2 000 K) je volba nižší teploty chromatičnosti dobrou volbou. Vezme-li v potaz areál Technologického parku a přilehlého areálu vysokoškolských kolejí, kde

se nachází více chodníků s vyšším pohybem osob (v porovnání se Studentskou), je teplejší odstín bílého světla vhodnější, jelikož chceme navodit uživateli Technologické ulice pocit klidu a bezpečí. Vyšší teplota chromatičnosti na Technologické ulici není vhodná, jelikož se zde nevyskytují rychle projíždějící vozidla a také intenzita provozu z přilehlých kancelářských budov není nikterak vysoká.

Největší výhodou LED oproti vysokotlaké sodíkové výbojce je její životnost. Výrobce LED (firma Philips) deklaruje životnost LED modulu 100 000 h, kde na konci této doby bude velikost světelného toku dosahovat 80% počáteční hodnoty přitom 90% světelných zdrojů (tj 43 LED ze 48) bude na konci této doby stále svítit. Vezme-li v potaz roční provozní dobu VO, která činí cca 4 100 hodin, je možné provozovat námi používaný LED modul téměř 25 let (v případě přehřívání LED modulu se výrazně zkracuje životnost). Velkou výhodou je, že v případě poruchy je možné vyměnit pouze LED modul namísto výměny celého svítidla. Vysokotlaká sodíková výbojka je schopna hospodárně svítit pouze 20 000 h (pokles světelného toku na 80%). Po této době není z hospodárného hlediska výhodné výbojku provozovat (i když v praxi se provozuje i po této době). Střední doba života tohoto zdroje je 32 000h. Při dané míře výpadkovosti zdroje a jeho užitečné životnosti 20 000 hodin, kterou uvádí výrobce (Osram – viz příloha č. 2), je vhodné provádět cyklus výměny za nový světelný zdroj po 4 letech provozu.

Zhodnocení kvantitativních a kvalitativních parametrů svítidel (Pozn. k Tab. 10)

Podíváme-li se na účinnosti svítidel (účinnosti optik) můžeme vidět, že účinnost Philips Luma 1 R3 je jen o 4,1% vyšší než u svítidla Schröder MC12. Mezi účinnostmi optických částí svítidel již není tak propastný rozdíl jako u měrných výkonů světelných zdrojů. Účinnost optických částí běžných LED svítidel dosahují hodnoty až 95%. V případě Lumy je účinnost optiky pouze 86,1%. Nižší účinnost optiky způsobuje především ploché tvrzené sklo, jelikož světelné paprsky dopadají na normálu roviny skla pod větším úhlem a dochází ke zvýšení počtu odražených paprsků do vnitřní konstrukce svítidla (zpětný odraz – vyšší ztráty). Avšak výhodou tvrzeného skla je jeho barevná stálost (lepší barevné vlastnosti než u svítidla Schröder MC12). Na účinnosti optické části svítidla se také velmi podílí samotný světelný zdroj (LED chip) na němž je nanesena čočka, která plní funkci refraktoru (implementace optické části na samotný světelný zdroj). Neskutečně velkou výhodou u Lumy je, že si výrobce nechal standardizovat patici LED modulu (nazývá jej LEDGINE) a každý rok nabízí inovované LED moduly do stávajících svítidel Luma. U těchto inovovaných LED modulů nabízí vyšší měrné výkony samotných LED zdrojů společně s vylepšenou účinností optiky (vylepšení čočky). U našeho svítidla Philips Luma je označení R3, které nám říká, že se jedná již o třetí vylepšenou verzi LED modulu LEDGINE. Při koupi celého svítidla je ve svítidle osazena poslední nejúčinnější verze LEDGINE s největší dostupnou účinností optiky a největším možným měrným výkonem. V průběhu několika let provozu VO s těmito svítidly (Philips Luma) nebrání nic vlastnímu komunikaci k vylepšování účinnosti stávajících svítidel Philips Luma (jsme akorát omezeni velikostí modulu, kterou lze do svítidla dát – větší modul nelze).

U svítidla Schröder MC12, je z důvodu širší distribuce světelného toku do všech směrů okolo baňky, nutné mít vhodně tvarovaný reflektor pro získání žádané křivky svítivosti. Z toho důvodu není vhodné použít pro difuzor svítidla ploché tvrzené sklo, jelikož by paprsky nedopadaly kolmo na hranu difuzoru a docházelo by částečně k zpětným odrazům dovnitř svítidla (výrazně nižší účinnost optiky). Proto u svítidla Schröder MC12 byl použit vypouklý difuzor z polykarbonátu, jehož nízká světelná stálost (po 3-6 letech začíná žloutnout) vede ke snižování účinnosti optické části svítidla.

V důsledku vysokých činných ztrát na konvenčním elektromagnetickém předřadníku a nižší účinnosti optické části svítidla Schröder MC12 je měrný výkon tohoto svítidla pouze na 52,9% hodnotě v porovnání s Philips Luma (123 lm.W^{-1} versus 65 lm.W^{-1}). Výstupní světelný tok svítidla Schröder MC12 je o 615 lm menší v porovnání s Philips Luma.

Obě svítidla (v případě Schröderu MC12 jen u optiky) nabízejí stupeň krytí IP66, který zajišťuje ochranu před nebezpečným dotykem jakkoliv malým předmětem, zařízení je také prachotěsné a je odolné proti intenzivně tryskající vodě. U Schröderu MC12 je krytí elektrické části zajištěno pouze stupněm krytí IP44, který zajišťuje ochranu před vniknutím cizích těles o průměru 1 mm a větších a stříkající vodou. V důsledku nižšího stupně krytí elektrické části svítidla Schröder MC12, je při světelném výpočtu volen nižší udržovací činitel (0,8). Philips Luma nabízí vyšší mechanickou odolnost (IK09 – 10 J), oproti svítidlu Schröder MC12 (IK08 – 5 J). Svítidlo Schröder MC 12 nabízí třídu ochrany pouze na zem (třída 1), u Luma je dvojitá izolace (třída 2).

Předřadný přístroj svítidla Schröder MC12 (viz. příloha č. 2)

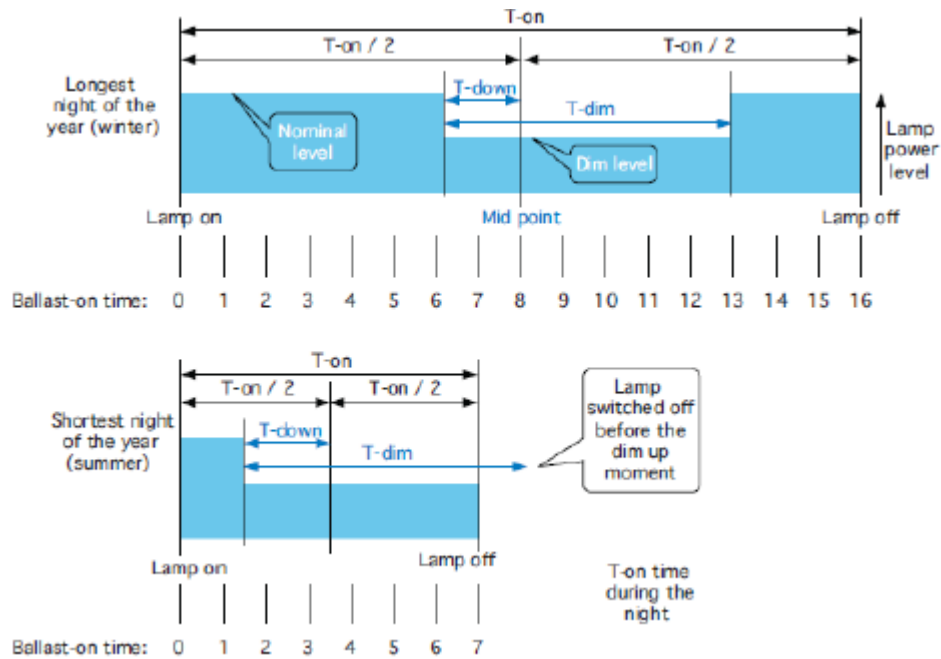
U svítidla Schröder MC12 je použit konvenční (elektromagnetický) 70 W předřadník, jehož činné ztráty činí 12,4 W. Celkový příkon jednoho svítidla s 70 W výbojkou je tedy 83,4 W.



Obr. 37 Konvenční předřadník svítidla MC12

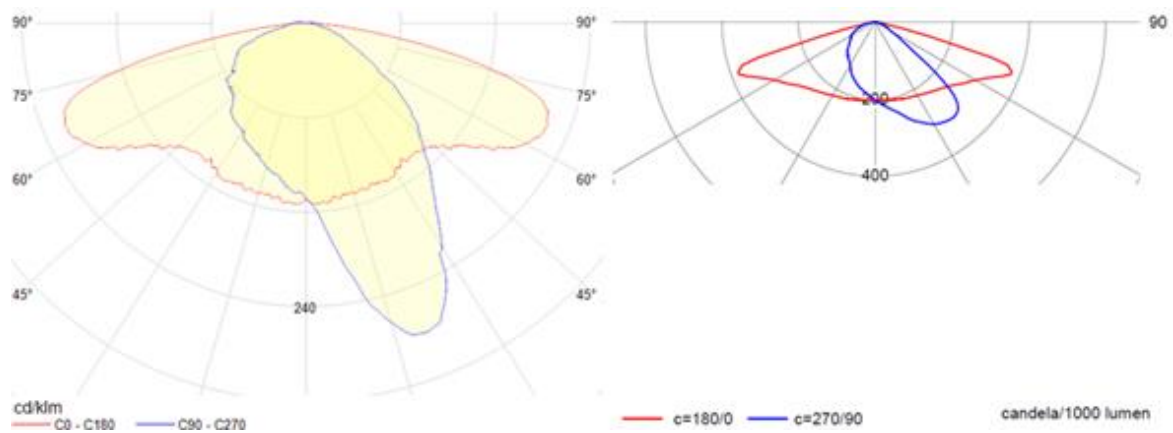
Předřadný přístroj svítidla Philips Luma (Dynadimmer)

Svítidlo Philips Luma je vybaveno elektronickým předřadníkem s digitálním rozhraním DALI. Předřadník je možné řídit v režimu on-line nebo off-line. Na ulici Studentské je použit off-line řídicí režim, kdy do každého předřadníku byly individuálně nahrány stejné regulační režimy pro celé období roku. Předřadník funguje na principu umělé půlnoci, kdy první 3 dny nereguluje, ale měří délku provozu (pro stanovení odchylek mezi jednotlivými dny), následně pro každý den v roce na základě délky předchozí noci přepočítává délky jednotlivých regulačních režimů (se zkracující se nocí ořezává regulační režimy u východu a západu slunce). V případě, že nastane větší změna v délce provozního času pro daný den (změna na letní čas), předřadník přestane regulovat a pro následující dva dny měří délku provozu (opět stanovuje velikost odchylky). Princip regulace můžeme vidět také na Obr. 38.



Obr. 38 Princip regulace na principu umělé púnoci (DynaDimmer by Philips)

Zhodnocení křivek svítivosti (Luma 1 R3 versus Schröder MC12)



Obr. 39 Křivky svítivosti Schröder MC12 a Philips Luma 1 R3

Na první pohled se křivky svítivosti od sebe příliš neliší. Opak je však pravdou. Křivka svítivosti LED svítidla Philips Luma má mnohem vyšší hodnoty svítivosti ve všech směrech (především pak v rovině C90-C270). Má mnohem širší vyzařovací charakteristiku. Philips Luma dosahuje v rovině C0-C180 v podélné ose svítivosti až 400 cd/1000 lm, což je mnohem vyšší hodnota než u svítidla Schröder MC12 (odhadem okolo 240 cd/1000 lm). Proto lze předpokládat, že podélná rovnoměrnost i celková rovnoměrnost jasu bude u LED svítidla vyšší, než u svítidla Schröder MC12.

7.2 Zatřídění komunikací

Komunikace na Studentské a Technologické budou zatříděny pomocí platné normy ČSN EN/TR 13201-1 a její revize, která vyjde v platnost v druhém pololetí roku 2016. Obě komunikace (na Studentské i Technologické) mají stejné vstupní parametry (požadavky-viz níže), proto výsledná třída osvětlení bude shodná pro obě ulice. Zatřídění bude provedeno oběma způsoby, abychom mohli zhodnotit, který způsob zatřídění je snazší a rychlejší.

Je dána komunikace s následujícími parametry:

- uživatelé komunikace: motorová doprava (včetně pomalých vozidel), cyklisté a chodci,
- rychlost hlavního uživatele: 30 až 60 km/h,
- převládající počasí: suché,
- komunikace není směrově rozdělena,
- není použito stavební opatření ke zklidnění dopravy,
- 2 křižovatky na kilometr,
- intenzita silničního provozu: více jak 7 tisíc vozidel za den,
- nejedná se o konfliktní oblast,
- běžná složitost zorného pole,
- běžná náročnost navigace,
- parkující vozidla se v uvažované oblasti nevyskytují,
- malý jas okolí,
- běžná intenzita cyklistického provozu.

Pomocí těchto parametrů a dodržení následujícího postupu, odvodíme třídu osvětlení pro danou komunikaci:

- a) **V prvním kroku provedeme definici relevantní oblasti a určení příslušné skupiny světelných situací pro námi navrhovaný úsek komunikace.** Rozhodli jsme se, že za relevantní oblast budeme uvažovat pouze šířku jízdního pásu. Osvětlení přilehlého chodníku, který slouží pro cyklisty a pěší, zajistí činitel osvětlení okolí, který nám zajistí dostatečné osvětlení. Na základě rychlosti hlavních uživatelů, která je mezi 30 až 60 km/h a dalších povolených uživatelů jsme určili příslušnou skupinu světelných situací B1 (viz. Tab. 11).

Tab. 11 Určená skupina světelných situací

Typická rychlost hlavního uživatele km/h	Druh uživatelů v relevantní oblasti			Skupiny světelných situací
	Hlavní uživatel	Další povolený uživatel	Nepovolený uživatel	
> 30 ≤ 60	Motorová doprava Velmi pomalá vozidla	Cyklisté Chodci		B1
	Motorová doprava Velmi pomalá vozidla Cyklisté	Chodci		B2

- b) Na základě prostorového uspořádání komunikace a intenzity silničního provozu určíme příslušný rozsah třídy osvětlení (viz Tab. 12).

Tab. 12 Doporučený rozsah třídy osvětlení pro skupinu světelných situací B1

Převládající počasí	Stavební opatření ke zklidnění dopravy	Hustota křižovatek	Náročnost navigace	Intenzita provozu (počet vozidel za den)					
				< 7 000			≥ 7 000		
		počet křižovatek/km		←	o	→	←	o	→
Suché	Ne	< 3	Běžná	ME6	ME5	ME4b	ME5	ME4b	ME3c
			Větší než běžná	ME5	ME4b	ME3c	ME5	ME4b	ME3c
		≥ 3	Běžná	ME5	ME4b	ME3c	ME4b	ME4b	ME3c
			Větší než běžná	ME4b	ME3c	ME2	ME3c	ME3c	ME2
	Ano			Výběr jako výše, ale v místě s opatření ke zklidnění dopravy se použije o jeden stupeň vyšší hladina jasu					
	Vlhké			Výběr jako výše, ale s uplatněním tříd MEW					

- c) Na základě určeného jasu okolí již určíme konkrétní třídu osvětlení (viz Tab. 13)

Tab. 13 Doporučení pro výběr z rozsahu tříd osvětlení

Konfliktní oblast	Složitost zorného pole	Parkující vozidla	Jas okolí					
			Malý		Střední		Velký	
			Intenzita cyklistického provozu		Intenzita cyklistického provozu		Intenzita cyklistického provozu	
			Běžná	Velká	Běžná	Velká	Běžná	Velká
Ne	Běžná	Nevyskytují se	←	o	←	o	o	o
		Vyskytují se	o	→	o	→	→	→
	Velká	Nevyskytují se	o	o	o	o	o	o
		Vyskytují se	o	o	→	→	→	→
Ano								

- d) Určení požadavků pro vybranou třídu osvětlení ME6 (viz 13201-2) a dodržení obecných technických doporučení (omezení oslnění, podání barev...)

Poznámka:

Vybrané parametry v Tab. 11-13 jsou označeny **tučně**.

Zatřídění Studentské a Technologické ulice podle připravované technické zprávy TR 13201-1

V létě tohoto roku vyjde v platnost nová verze technické zprávy ČSN CEN/TR 13201-1, která dost podstatně usnadňuje výběr tříd osvětlení. Jelikož hlavní náplní této bakalářské práce je výpočet a porovnání energetické náročnosti osvětlovacích soustav na základě připravované normy EN 13201-5 na Studentské (LED svítidla) a Technologické ulici (Sodíková svítidla), je nutno uvést i tento nový způsob výběru třídy osvětlení, jelikož nová norma EN 13201-5 používá již tento nový způsob značení tříd (např. namísto MEx používá jen označení Mx).

Tab. 14 Doporučení pro výběr z rozsahu tříd osvětlení

Parametr	Možnosti	Popis		Váha V_w	Vybráno V_w
Konstrukční rychlost nebo rychlostní limit	Velmi vysoká	$v \geq 100$ km/h		2	
	Vysoká	$70 < v < 100$ km/h		1	
	Střední	$40 < v \leq 70$ km/h		-1	-1
	Pomalá	$v \leq 40$ km/h		-2	
Intenzita dopravy		Dálnice a víceproudé vozovky	Dvouproudé vozovky		
	Vysoká	> 65 % z max kapacity	> 45 % z max kapacity	1	1
	Střední	35 % - 65 % z max kapacity	15 % - 45 % z max kapacity	0	
	Nízká	< 35 % z max kapacity	< 15 % z max kapacity	-1	
Struktura dopravy	Smíšená s vysokým podílem nemotorové			2	
	Smíšená			1	1
	Pouze motorová			0	
Směrově rozdělená komunikace	Ne			1	1
	Ano			0	
Hustota křižovatek		Křižovatek na km	Křižovatek, vzdálenost mezi mosty, km		
	Časté	> 3	< 3	1	
	Méně časté	≤ 3	≥ 3	0	0
Parkující vozidla	Vyskytují se			1	
	Nevyskytují se			0	0
Okolní jas	Vysoký	výkladní skříně, světelné reklamy, sportoviště, nádraží, skladové areály		1	
	Střední	normální situace		0	
	Nízký			-1	-1
Náročnost navigace	Velice obtížná			2	
	Obtížná			1	
	Snadná			0	0
				Suma V_w	1
				M=6-Suma V_w	M5

Porovnání starého a nového způsobu zatřídění komunikace

Podíváme-li se na nový způsob zatřídění, působí přehledněji, ale hlavně je snadnější a rychlejší. Na rozdíl od staršího způsobu zatřídění, se v tom novém nemusíme pohybovat postupně ve třech tabulkách, ale vše je zpracováno do jedné tabulky, kde pomocí součtu váhy V_w , který závisí na velikosti vybraných parametrů (viz. Tab. 14), lze odečtením součtu této váhy od čísla 6 dostat odpovídající třídu osvětlení, která odpovídá zvoleným kritériím (parametrům).

Ve staré normě jsme pomocí tabulky světelných situací určili příslušný rozsah třídy osvětlení na základě rychlosti hlavního uživatele a další povolených či nepovolených uživatelů. V nové normě (ČSN CEN/TR 13201-1), která brzy vyjde v platnost tomu tak již není. V novém výkladu této normy je u každé třídy osvětlení (ME, CE, S, P,...) konkrétně specifikováno pro jakého uživatele a pro jakou oblast je možné tuto třídu použít a pak jen stačí na základě výše zmíněného systému vah V_w vybrat pro daný úsek komunikace odpovídající třídu osvětlení.

Lze předpokládat, že v budoucnu se bude používat již tento nový způsob. V dalších částech této práce, kdy bude nutné komunikaci z důvodu regulace přetřídít, bude použit již tento nový způsob.

7.3 Kvantitativní a kvalitativní parametry kladené na třídu osvětlení ME5

Zatříděné komunikace na Studentské i Technologické ulici mají následující kvantitativní a kvalitativní parametry (viz. Tab. 15). A sice průměrný jas vozovky musí být roven nebo větší než $0,5 \text{ cd/m}^2$ (vyšší hodnota přispívá k lepší kontrastní citlivosti a zrakové ostrosti). Míra omezujícího oslnění (TI) by neměla přesahovat 15% (závisí na optice svítidla a na geometrickém uspořádání osvětlovací soustavy). V našem případě budeme posuzovat i činitel osvětlení okolí, jelikož ke komunikaci přilehlá chodník, který není osvětlen a proto chceme zajistit alespoň minimální osvětlenost pro zajištění bezpečnosti osob pohybujících se po tomto chodníku.

Kvalitativní požadavky zvolených svítidel (podrobněji v kapitole 7.1) by měly splňovat požadavek na barevný tón vyzařovaného světla, kde v případě Studentské ulice bychom měli volit studenější odstín bílé (4 000 K) pro vzbuzení dodatečné pozornosti u řidiče (přispívá k lepšímu perifernímu vidění), u Technologické volíme teplejší odstín (2 000 K), jelikož se jedná o zastavěnou oblast s větším pohybem osob. Svítidla by měla poskytovat dostačující index podání barev a zároveň by měly mít co nejnižší nároky na údržbu (životnost svítidla). Rovněž celková rovnoměrnost jasu U_0 by měla být rovna nebo větší než 0,35 a podélná rovnoměrnost by měla být rovna nebo větší než 0,4

Tab. 15 Řada tříd osvětlení ME (v nové normě značeno pouze M)

Třída	Jas povrchu vozovky pro případ suchého povrchu			Omezující oslnění	Osvětlení okolí
	\bar{L} [cd/m ²] (udržovaná hodnota)	U_0	U_l	TI v % ^a	SR ^b
ME1	≥2,0	≥0,4	≥0,7	≤10	≥0,5
...
ME5	≥0,5	≥0,35	≥0,4	≤15	≥0,5
ME6	≥0,3	≥0,35	≥0,4	≤15	neurčeno

^a Zvýšení prahového přírůstku TI o 5 procentních bodů lze připustit v případech, kde jsou použity světelné zdroje s nízkým jasem.

^b Toto kritérium lze uplatnit pouze v případě, kde k silniční komunikaci nepřiléhají jiné komunikace s vlastními požadavky

7.3.1 Zhodnocení světelně-technických parametrů pro třídu ME5

Na základě vypočtených a naměřených hodnot (viz příloha č. 2 a příloha č. 3) jsme stanovili, zda osvětlovací soustavy na Studentské a Technologické vyhovují požadavkům třídy osvětlení ME5. Z vypočtených a naměřených hodnot jsme vytvořili srovnávací tabulku obou komunikací (viz. Tab. 16)

Tab. 16 Zhodnocení světelně-technických parametrů na základě požadavků normy EN 13201-2

Technologie	Srovnání naměřených a vypočtených hodnot	Požadavek normy EN 13201-2 pro námi uvažované komunikace (ME5)				
		Průměrný jas (cd/m ²)	Celková rovnoměrnost jasu (-)	Podélná rovnoměrnost jasu (-)	Prahový přírůstek (%)	Činitel osvětlení okolí (-)
	Požadovaná (udržovaná) hodnota	≥0,5	≥0,35	≥0,4	≤15	≥0,5
LED (Studentská)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	0,6	0,77	0,7/0,83	8,92	0,82
	Naměřená (udržovaná) hodnota	0,726	0,446	0,32/0,4	-	-
NAV (Technologická)	Vypočtená (udržovaná) hodnota	0,73	0,74	0,78/0,86	9	0,6
	Naměřená (udržovaná) hodnota	1	0,56	0,56/0,53	-	-

Pozn. k Tab. 16:

1. Pro vypočtené hodnoty ulice Studentská byl zvolen udržovací činitel (MF) 0,9 (viz. Příloha č. 3). Pro naměřené hodnoty byl MF zvolen také 0,9, jelikož se jedná o novou osvětlovací soustavu, která není v provozu ani jeden rok.
2. Pro vypočtené hodnoty ulice Technologická byl pro výpočet v Reluxu zvolen udržovací činitel 0,8, a pro naměřené hodnoty byl zvolen 0,9 (jelikož je soustava stará téměř 10 let)

Studentská (LED svítidla)

Podíváme-li se do Tab. 16, můžeme vidět, že všechny vypočtené hodnoty ulice Studentské (pomocí lighting reality – viz v příloze č. 3) vyhovují požadavkům třídy osvětlení ME5. Jsou splněny jak kvantitativní tak i kvalitativní parametry. Vypočtený činitel osvětlení okolí je o dost vyšší, než vyžaduje norma. V našem případě je vyšší činitel osvětlení okolí vltán, jelikož ke komunikaci přiléhá chodník který není osvětlen. U naměřených hodnot (viz. Příloha č. 4) nebyla splněna všechna kritéria. Musím upozornit, že všechny naměřené hodnoty byly roznásobeny udržovacím činitelem, který odpovídá stáří soustavy. Roznásobení MF je nutné jelikož norma uvádí vždy udržované hodnoty (počítá se stárnutím soustavy). V případě naměřených hodnot podává LED svítidlo vyšší průměrný udržovaný jas v porovnání s vypočtenými hodnotami. Tuto skutečnost, lze přičíst vyššímu jasu okolí a ostatním neznámým proměnným, které nelze při výpočtu pevně stanovit. Z naměřených hodnot vychází celková rovnoměrnost jasu nižší, než z vypočtených hodnot, avšak splňuje požadavek normy. Nižší hodnotu celkové rovnoměrnosti lze přičíst nekonzistentním odrazným vlastnostem povrchu vozovky (opotřebený asfaltový povrch). Podélná rovnoměrnost jasu z naměřených hodnot v jízdním pruhu blíže svítidlu nespĺňuje požadavek třídy osvětlení ME5. Tento parametr by šel zvýšit změnou náklonu svítidla do té míry, než by vyhovoval požadavkům ME5, avšak za cenu vyššího oslnění. Na závěr je nutno podotknout, že je komunikace mírně přesvětlena.

Technologická (NAV svítidla)

Všechny vypočtené hodnoty u Technologické ulice splňují požadavky ME5 (zpracování výpočtu naleznete v příloze č. 3). U naměřených hodnot můžeme vidět, že hodnota průměrného udržovaného jasu (roznásobena MF) je dvojnásobná, než je požadavek třídy osvětlení ME5. Komunikace je silně přesvětlena (odpovídá vyšší třídě ME3). Měli bychom zvážit regulaci na 50% světelného toku (jediná možná – viz teorie NAV) v době se sníženou intenzitou dopravy (22 - 4 hodiny), nebo zvážit regulaci po celou dobu provozu. Druhá možnost nezohledňuje zvýšenou intenzitu dopravy do 22 hodiny, a proto bychom měli raději volit první variantu. Regulací snížíme příkon svítidla o 30%, avšak zhoršíme měrný výkon světelného zdroje (70% příkonu odpovídá 50% světelného toku). Nutno podotknout, že celková rovnoměrnost jasu a podélné rovnoměrnosti jasu (pro Schröder MC12) vyšly z naměřených hodnot mírně vyšší než u Philips Luma. Vyšší hodnoty rovnoměrností jasů lze přičíst lepšímu vycentrování polohy svítidla (náklon a orientace).

Porovnání světelně-technických parametrů Studentské a Technologické z naměřených hodnot

Na základě velikosti parametrů z Tab. 16 lze konstatovat, že kvantitativní i kvalitativní parametry Technologické ulice (Schröder MC 12) jsou na tom lépe, než u Studentské ulice (Philips Luma). Vyšší hodnota průměrně udržovaného jasu na Technologické ulici je dána menší roztečí svítidel (25 m) a vyšším jasnem okolí (geometrické uspořádání soustavy viz příloha č. 3). Jelikož na Studentské je větší rozteč svítidel (39,7 m), je samozřejmé, že naměřená hodnota průměrného udržovaného jasu bude nižší (avšak převyšuje vypočtenou hodnotu). Z důvodu menších roztečí mezi svítidly Schröder MC12 (Technologická ulice) jsou i kvalitativní parametry na Technologické ulici vyšší než na Studentské, jelikož na menší ploše se tolik neprojeví nekonzistentní odrazné vlastnosti povrchu vozovky a také křivky svítivosti se na menších roztečích více překrývají. V následující kapitole bude zhodnocena energetická náročnost obou soustav na základě velikosti průměrného udržovaného jasu (osvětlenosti), osvětlené plochy a příkonu svítidel. Lze předpokládat, že svítidla Schröder MC12 budou vykazovat

vyšší energetickou náročnost (i když mají vyšší průměrný udržovaný jas), jelikož osvětlovaná plocha mezi těmito svítidly je značně menší společně s vyšším spotřebou svítidla (83,4W versus 49W).

7.4 Výpočet energetické náročnosti realizovaných soustav VO dle EN 13201-5

V následujících odstavcích bude uveden názorný postup výpočtu ukazatelů PDI a AECI (celý výpočet AECI viz příloha č. 5) hodnotících energetickou náročnost VO.

Postup výpočtu PDI (platí jak pro Studentskou tak i Technologickou, příklady výpočtů viz 7.4.1)

1. Nejprve bylo nutné získat vstupní data pro výpočet (tj. průměrná horizontální osvětlenost, příkon celého systému svítidla a velikost osvětlované plochy). Hodnoty průměrné udržované horizontální osvětlenosti byly přepočteny z vypočtené a naměřené hodnoty průměrného udržovaného jasu (viz příloha č. 3 a příloha č. 4) dle následujícího vztahu:

$$E_{hm} = \frac{L_m}{q_0} \quad (17)$$

kde L_m ... je průměrná udržovaná hodnota jasu

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

Příkony svítidel byly převzaty z katalogových listů (viz příloha č. 2) a zahrnují celkovou spotřebu svítidla (i s činnými ztrátami). Velikost osvětlované plochy jsem vypočetl:

$$A = a \cdot b \quad (18)$$

kde a ... je rozteč mezi dvěma svítidly

b ... je šířka komunikace

2. V následujícím kroku byly dosazeny vypočtené a naměřené hodnoty průměrné udržované horizontální osvětlenosti společně s plochou a příkonem svítidla do vztahu pro výpočet PDI:

$$D_p = \frac{P}{(\bar{E}_i \cdot A_i)} \quad (19)$$

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

\bar{E}_i ... je průměrná udržovaná hodnota horizontální osvětlenosti (lx)

A_i ... je velikost osvětlované plochy (m²)

Výpočet PDI byl počítán pro referenční oblast mezi dvěma svítidly a proto se počítá pouze s jednou plochou (avšak z důvodu odlišných roztečí na jednotlivých komunikacích, se plocha musel počítat dvakrát) a jednou hodnotou průměrné udržované horizontální osvětlenosti. Musím upozornit na skutečnost, že při výpočtu ukazatele PDI mezi roztečí dvou svítidel se zadává příkon pouze jednoho svítidla, jelikož příspěvek obou svítidel zasahuje i do vedlejší oblasti).

Hodnota ukazatele PDI (pro LED) pro jakkoliv velký příkon bude stejná, jelikož je předpokládán konstantní měrný výkon světelného zdroje. U svítidla s NAV tomu tak není (s regulací se měrný výkon zdroje zhoršuje).

3. Vyhodnocení velikosti ukazatele PDI, jsem provedl na základě velikosti ukazatele PDI z normy EN 13201-5 pro třídu osvětlení ME5 s šířkou komunikace 7 metrů (velikost ukazatele pro třídy osvětlení ME viz str. 45).

Pozn. k výpočtu PDI:

Nutno zmínit, že při světelně-technickém výpočtu obou komunikací nebyly splněny následující předpoklady, na základě kterých byla určena typická velikost ukazatelů PDI (viz. výklad normy str. 45). I když nedodržení těchto předpokladů nijak výrazně neovlivní velikost PDI, je nutné si uvést, co nebylo dle normy EN 13201-5 zcela dodrženo.

Při světelně-technickém výpočtu obou svítidel byla zvolena nižší hodnota odrazných vlastností asfaltového povrchu R2, namísto R3. V případě volby R3 (jak je tomu u typických hodnot PDI v normě EN 13201-5) bychom dostali mírně vyšší hodnoty průměrného udržovaného jasu, což by vedlo k nižšímu ukazateli PDI. Dále při výpočtu komunikace na Studentské byl zvolen vyšší udržovací činitel 0,9 (v normě je zvolen 0,8 pro všechny typy svítidel), jelikož svítidlo poskytuje vysoký stupeň krytí (IP66) s minimálními nároky na údržbu.

Postup výpočtu AECI (celý postup výpočtu jednotlivých regulačních režimů viz příloha č. 5)

1. Nejprve bylo potřeba zjistit, jaké regulační režimy jsou na daných komunikacích použity. Na ulici Technologická není použita žádná regulace (po celé období roku jede tato soustava na 100% příkon). Na Studentské ulici tomu tak není. Jsou zde použity následující regulační režimy:

Od zapnutí → 22 hodin: 100% příkon svítidla

22 hodin → 23 hodin: 75% příkon svítidla

23 hodin → 4 hodin: 50% příkon svítidla

4 hodin → 5 hodin: 75% příkon svítidla

5 hodin → vypnutí: 100% příkon svítidla

2. Na Technologické je postup výpočtu ukazatele AECI jednoduchý. Z časů občanských soumraků, které byly odečteny pro každý den v roce ze serveru www.timeanddate.com (pro Ostravu), byla určena délka provozu VO pro každý den v roce. V případě Technologické byla délka provozu pro danou noc pouze dosazena do vztahu:

$$D_E = \frac{(P_j \cdot t_j)}{A} \quad (20)$$

kde P_j ... je provozní příkon spojený s daným časem provozu (W)

t_j ... je doba provozu daného regulačního stupně (P_j) (h)

A ... je velikost plochy osvětlené stejným svítidlem (m^2)

U výpočtu ukazatele AECI pro Technologickou, kdy po celý rok soustava pracuje na jmenovitý příkon, byl postup v bodě 2, proveden pro všech 366 dní v roce. (neplatí pro regulační režimy).

3. U Studentské je výpočet AECI, z důvodu použitých regulačních režimů, značně složitější. U regulačních režimů zap → 22 h, 4 h → 5 h a 5 h → vypnutí, bylo třeba propočítat pro každý den v roce délku těchto regulačních režimů. V případě regulace mezi 22 až 23 hodinou, 23 až 4 hodinou ránní se do provozu neprojeví změna východů a západů slunce (změna délky noci), a proto se mohly dané délky provozu (1h pro 75% P, 5 h pro 50% P) pro každý den v roce pouze vynásobit patřičnou velikostí příkonu (75% a 50% P) a tuto hodnotu podělit plochou A. U regulačních režimů (zap → 22 h, 4 h → 5 h a 5 h → vypnutí) bylo nutné pro získání délky provozu (pro daný den) konkrétního regulačního režimu odečíst čas kdy regulační režimy končí od času občanského soumraku (viz příloha č. 4).
4. Regulačnímu režimu 23 h → 4 hodina ránní odpovídají snížené požadavky na průměrný jas. Komunikaci je nutno přetřídit (viz níže v Tab 17).
5. Pro analýzu dosažitelných úspor na Technologické ulici byla vypracována možnost regulace svítidel Schröder MC12 v čase 22 h až 4 hodiny ránní. Komunikaci bylo nutné opět přetřídit (viz Tab. 17).

Pozn. k výpočtu AECI:

Celý postup výpočtu AECI pro Philips Luma i Schröder MC12 (pro 1 a 2 květen 2016) můžete vidět na str. 68. Celý výpočet AECI je v příloze č. 5.

U LED svítidla Philips Luma první 3 dny neprobíhá regulace (viz. princip předřadníku Dynadimmer na str. 55).

Typické hodnoty ukazatelů AECI neplatí pro regulační režimy (typická hodnota ukazatele AECI v normě EN 13201-5 odpovídá 100% příkonu daného svítidla). V důsledku toho bude hodnota ukazatele AECI na Studentské mnohem nižší než uvádí norma.

Velikost AECI pro neregulovaný režim provozu může být mírně vyšší než v normě EN 13201- 5, jelikož pro oblast Ostravských komunikací (na základě časů občanských soumraků) vyšla celková (roční) doba provozu 4079 hodin (o 79 hodin více než v normě).

Přetřídění komunikace na základě snížené intenzitě dopravy (z důvodu regulace)

Tab. 17 Přetřídění komunikace na ulici Studentské na základě snížené inenzity dopravy

Parametr	Možnosti	Popis		Váha V_w	Vybráno V_w
Konstrukční rychlost nebo rychlostní limit	Velmi vysoká	$v \geq 100$ km/h		2	
	Vysoká	$70 < v < 100$ km/h		1	
	Střední	$40 < v \leq 70$ km/h		-1	-1
	Pomalá	$v \leq 40$ km/h		-2	
Intenzita dopravy		Dálnice a víceproudé vozovky	Dvouproudé vozovky		
	Vysoká	> 65% z max kapacity	> 45% z max kapacity	1	
	Střední	35% - 65% z max kapacity	15% - 45% z max kapacity	0	0
	Nízká	< 35% z max kapacity	< 15% z max kapacity	-1	
Struktura dopravy	Smišená s vysokým podílem nemotorové			2	
	Smišená			1	1
	Pouze motorová			0	
Směrově rozdělená komunikace	Ne			1	1
	Ano			0	
Hustota křižovatek		Křižovatek na km	Křižovatek, vzdálenost mezi mosty, km		
	Časté	> 3	< 3	1	
	Méně časté	≤ 3	≥ 3	0	0
Parkující vozidla	Vyskytují se			1	
	Nevyskytují se			0	0
Okolní jas	Vysoký	výkladní skříně, světelné reklamy, sportoviště, nádraží, skladové areály		1	
	Střední	normální situace		0	
	Nízký			-1	-1
Náročnost navigace	Velice obtížná			2	
	Obtížná			1	
	Snadná			0	0
				Suma V_w	0
				M =6-Suma V_w	M6

Z přetřídění na základě snížené intenzity provozu nám vyšla třída osvětlení M6. Třída osvětlení M6 má stejné kvalitativní parametry, avšak vyžaduje nižší hodnotu průměrného jasu (tj. $0,3 \text{ cd/m}^2$). Budeme-li uvažovat s konstantním měrným výkonem LED chipu (v reálu bude vyšší), bude hodnota průměrného jasu splněna.

7.4.1 Výpočet ukazatelů PDI a AECI

Příklad P_{ad} byl při výpočtu ukazatelů PDI a AECI zanedbán jelikož je pro mnou počítaný referenční úsek zanedbatelný.

Příklad výpočtu ukazatele PDI

Studentská

- Výpočet velikosti osvětlované plochy (velikost rozteče můžete vidět v příloze č. 3)

$$A = a \cdot b = 37,9 \cdot 7 = 277,9 \text{ m}^2 \quad (21)$$

- Z vypočtené hodnoty osvětlenosti (pro všechny regulační režimy nabývá stejné hodnoty – konstantní měrný výkon LED)

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\overline{E}_i \cdot A_i)} = \frac{49}{8,571 \cdot 277,9} = 20,572 \text{ mW.lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (22)$$

- Z naměřené hodnoty osvětlenosti (pro všechny regulační režimy nabývá stejné hodnoty – konstantní měrný výkon LED)

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\overline{E}_i \cdot A_i)} = \frac{49}{10,371 \cdot 277,9} = 17 \text{ mW.lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (23)$$

Pozn. k výpočtům:

Hodnota příkonu svítidla Philips Luma byla převzata z katalogového listu, který můžete vidět v příloze č. 2. Průměrné hodnoty udržované osvětlenosti viz příloha č. 3 a č. 4. Vypočtená plocha je rovna součinu rozteče mezi dvěma svítidly (39,7 m) a šířky komunikace (7 m).

Technologická

- Výpočet velikosti osvětlované plochy (velikost rozteče viz příloha č. 3)

$$A = a \cdot b = 25 \cdot 7 = 175 \text{ m}^2 \quad (24)$$

- Z vypočtených hodnot osvětlenosti (příkon 100 %)

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\overline{E}_i \cdot A_i)} = \frac{83,4}{10,429 \cdot 175} = 45,697 \text{ mW.lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (25)$$

- Z vypočtených hodnot osvětlenosti (příkon 70 %)

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\overline{E}_i \cdot A_i)} = \frac{0,7 \cdot 83,4}{5,2145 \cdot 175} = 63,975 \text{ mW.lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (26)$$

- Z naměřených hodnot osvětlenosti (příkon 100 %)

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\overline{E}_i \cdot A_i)} = \frac{83,4}{14,398 \cdot 175} = 33,1 \text{ mW.lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (27)$$

- Z naměřených hodnot osvětlenosti (příkon 70 %)

$$D_p = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\overline{E}_i \cdot A_i)} = \frac{0,7 \cdot 83,4}{7,199 \cdot 175} = 46,34 \text{ mW.lx}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \quad (28)$$

Pozn. k výpočtům:

Hodnota příkonu svítidla Artechnic Schröder MC12 byla převzata z katalogových listů světelného zdroje a předřadníku, které můžete vidět v příloze č. 2. Průměrné hodnoty udržované osvětlenosti můžete vidět v příloze č. 3 a č. 4. Vypočtená plocha je rovna součinu rozteče mezi dvěma svítidly (25 m) a šířky komunikace (7 m).

Příklad výpočtu ukazatele AECI pro květen 2016

Studentská (pro 2. květen 2016)

- Pro použité regulační stupně – aktuální stav (viz příloha č. 5 – druhý řádek Tabulky 1)

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j \cdot t_j)}{A} = \frac{(49 \cdot 1,6 + 36,75 \cdot 1 + 24,5 \cdot 5 + 36,75 \cdot 1 + 49 \cdot 0,083)}{277,9} = 1,002 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2}$$

- Pro případ kdyby LED svítidlo po celou dobu provozu operovalo na 100 % příkon (viz příloha č.5 – první řádek druhého sloupce zap-vyp)

$$D_E = \frac{P_j \cdot t_j}{A} = \frac{(49 \cdot 8,683)}{277,9} = 1,531 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \quad (30)$$

Technologická (pro 1. květen 2016)

- Svítidlo Artechnic Schröder pracuje na 100 % příkon – aktuální stav (viz příloha č.5 – první řádek prvního sloupce zap-vyp)

$$D_E = \frac{P_j \cdot t_j}{A} = \frac{(83,4 \cdot 8,683)}{175} = 4,138 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \quad (31)$$

- Velikost AECI pro případ kdyby mezi 22 až 4 hodinou ranní byla regulace na 70 % příkon (viz příloha č. 5 – první řádek posledních třech sloupců zprava)

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m (P_j \cdot t_j)}{A} = \frac{(83,4 \cdot 1,6 + 58,38 \cdot 6 + 83,4 \cdot 1,083)}{175} = 3,28 \text{ Wh} \cdot \text{m}^{-2} \quad (32)$$

Poznámka v k výpočtům AECI (viz Příloha č. 5):

Jednotlivé časy občanských soumraků museli být převedeny na formát v desetinném místě, jelikož pro získání délky provozu jednotlivých regulačních režimů bylo nutné odečítat spínací časy právě od občanských soumraků, které byly převedeny do desetinného čísla. Převod časů z formátu (hh:mm:ss) nebyl do tabulky uveden, jelikož by tabulka byla natolik velká, že by ji nebylo možné vytisknout na formát A4. V příloze č. 5 jsou uvedeny výpočty ukazatele AECI (pro Schröder MC12 – Tab. 2 a Philips Luma – Tab. 1 a druhý sloupec Tabulky 2) pouze pro měsíc květen, jelikož obsah práce je natolik rozsáhlý, že by nebylo vhodné vkládat do přílohy všech 12 měsíců (princip výpočtu AECI je stejný, jen se přepočítává od jiných časů občanských soumraků). Při výpočtů AECI pro Philips Luma bylo nutné brát délku provozu z předchozího dne (viz. princip předřadníku Dynadimmer na str. 55).

Sečtením ukazatele AECI za jednotlivé měsíce (viz Tabulka 3 v příloze č. 5) dostaneme roční spotřebu elektrické energie ve $\text{Wh} \cdot \text{m}^{-2}$, kterou bylo nutné podělit 1 000 (pro získání $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$), abychom velikost ukazatele mohli porovnat s velikostí ukazatele z normy EN 13201-5. Byla vypočtena i velikost ukazatele AECI pro případ, kdyby na Studentské ulici nebyla uplatňována regulace (po celý čas provozu 100 % příkon). Taktéž byla stanovena velikost ukazatele AECI pro Technologickou, kdybychom stmívali mezi 22-4 h na 70% velikost jmenovitého příkonu. Tyto výpočty byly zpracovány pro určení úspory elektrické energie díky použitým režimům stmívání. Na závěr bude zhodnocena procentuální úspora ve spotřebě elektrické energie mezi regulovatelným svítidlem Philips Luma a neregulovatelným Schrédrem MC12 (současný stav řízení).

7.5 Zhodnocení energetické náročnosti VO na ulici Studentská a Technologická

V Tab. 18 můžete vidět velikost ukazatelů energetické náročnosti PDI a AECI dle EN 13201-5. Splňuje-li svítidlo požadavek na energetickou náročnost odpovídající dané třídě osvětlení (ME5), jsou ukazatelé PDI a AECI rovny nebo nižší hodnotě z normy EN 13201-5.

Tab. 18 Zhodnocení ukazatelů energetické náročnosti VO na ulici Studentská a Technologická

Technologie	Kritéria normy EN 13201-5		Srovnání ukazatelů PDI a AECI na základě EN 13201-5 pro námi uvažované komunikace (ME5)			
			S regulací	Bez regulace	ÚSPORA (%)	Hodnota z normy
LED (Studentská)	PDI (mW.lx ⁻¹ .m ⁻²)	vyp.	20,57		-	24
		nam.	17			
	AECI (kWh.m ⁻²)		0,53	0,72	26	0,8
NAV (Technologická)	PDI (mW.lx ⁻¹ .m ⁻²)	vyp.	63,98	45,7	-	38-45
		nam.	46,34	33,1		
	AECI (kWh.m ⁻²)		1,63	1,94	16,2	1,1-1,6
LED/NAV	AECI (kWh.m ⁻²)		0,53	1,94	72,7	-

Z Tab. 18 je jasné vidět, že se potvrdili teoretické poznatky o účinnostech aktuálně dostupných LED svítidlech, jelikož velikost ukazatele PDI u LED svítidla Philips Luma je ještě nižší, než udává norma EN 13201-5. Nižší hodnota ukazatele PDI je dána především vysokým měrným výkonem LED modulu (146 lm.W⁻¹), relativně vysokou účinností optiky LED modulu a nízkými ztrátami elektronického předřadníku. Lze očekávat, že v průběhu několika let poroste hodnota měrného výkonu (v praxi dosažitelná) až na hodnotu 170 lm.W⁻¹, tudíž hodnota plošné výkonové hustoty (PDI) bude ještě nižší, než tomu je u dnes dostupných LED svítidlech. Můžeme vidět, že hodnota plošné výkonové hustoty vypočtená z naměřených hodnot osvětlenosti je ještě nižší, než z projektovaných (vypočtených) hodnot. Tento fakt je dán především vyššími odraznými vlastnostmi asfaltového povrchu (starší vozovka obsahuje více nečistot, její povrch je světlejší tudíž je její odraznost vyšší v porovnání s novým povrchem vozovky), teplotní závislostí světelného toku na teplotě LED modulu (v případě měření lze předpokládat téměř ideální teplotu PN přechodu). Nižší hodnota ukazatele PDI pro ulici Studentskou je dána i vyšším jasnem okolí. Pro svítidlo Philips Luma, lze tedy říci, že z hlediska nároků na plošnou výkonovou hustotu na metr čtvereční komunikace předčí konkurenční výrobky ostatních firem. Jediné v čem by se měla Luma vylepšit je její účinnost optiky (čočky) na samotném LED modulu. Každý rok vydává Philips nové verze LED modulu (LEDGINE) s vyšší účinností optických čoček a vyšším měrným výkonem, které lze osadit do stávajících svítidel (v řádu několika let výhodně vyměnit starý modul za modul s účinnější optikou). Díky použitému režimu řízení příkonu, který můžeme použít při snížené intenzitě provozu (od 22 hodin do 4 hodiny ranní), je hodnota ukazatele roční spotřeby elektrické energie o 26% nižší v porovnání s provozem na jmenovitou hodnotu příkonu (100% P). I v případě režimu 100% příkonu po celý rok provozu je splněn požadavek na velikosti ukazatele AECI (který je opět mírně nižší než v normě).

V případě svítidel na ulici Technologické (Schröder MC12) je jejich energetická náročnost značně vyšší v porovnání s ulicí Studentskou. Nejprve musíme upozornit na fakt, že soustava je téměř 10 let stará a tehdejší svítidla nedosahovali tak vysokých měrných výkonů jako ty dnešní (i když u svítidel s NAV již bylo dosaženo maximum měrného výkonu). Proto jsou hodnoty ukazatelů plošné výkonové hustoty a roční spotřeby elektrické energie vyšší než udává norma EN 13201-5. Musím také připomenout závěry ze zhodnocení světelně-technických parametrů pro třídu osvětlení ME5. Jelikož je v oblasti Technologického parku vyšší jas okolí, převyšuje naměřená hodnota jasu dvojnásobně požadavek normy. Proto je velikosti ukazatele PDI značně nižší pro naměřené hodnoty osvětlenosti. Hodnota ukazatele PDI pro regulaci na 70% příkonu, je značně vyšší než pro 100% P, jelikož s regulací sodíkové výbojky rapidně klesá její měrný výkon. Pro vypočtené hodnoty osvětlenosti je velikost ukazatele PDI pro 100% velikost příkonu mírně vyšší než hodnota z normy EN 13201-5 a pro 70 % velikost příkonu (z vypočtených hodnot) značně převyšuje hodnotu z normy (z důvodu rapidního snížení měrného výkonu NAV). Jelikož je jas komunikace dvojnásobný, než vyžaduje třída osvětlení ME5, vypočetl jsem procentuální úsporu ve spotřebě elektrické energie, kdybychom použili regulaci na 70% velikost příkonu mezi 22 až 4 hodinou ranní. Celková úspora oproti režimu plného příkonu by byla 16,2%. Ve srovnání s LED to není tak značná úspora, jelikož u LED je možná regulace v širším rozsahu příkonů (na 100, 75, 50%). I tak bychom měli vzít regulaci na Technologické v úvahu, jelikož pro naměřené hodnoty osvětlenosti bude téměř splněn požadavek na velikost ukazatele PDI. Je naprosto zbytečné, aby po čas snížené intenzity provozu byl průměrný udržovaný jas Technologické ulice dvojnásobný, než vyžaduje norma ČSN EN 13201-2.

Pro ukázkou byla vypočtena procentuální úspora elektrické energie mezi regulovaným Philipsem Lumou (použity stávající regulační režimy) a neregulovaným Schrédrem MC12. Množství úspor použitím LED technologie dosahuje 72,7%. Úspora spotřebované elektrické energie je díky použitým regulačním stupňům a vyššímu měrnému výkonu LED svítidla velmi značná. Z toho vyplývají výhodnost regulace LED svítidel.

V Tab. 19 a 20 můžete vidět velikostí ukazatelů PDI a AECI pro Studentskou a Technologickou ulici jak je navrhuje prezentovat norma EN 13201-5. Společně s velikostmi ukazatelů je zde možné vidět délku jednotlivých regulačních stupňů za celý rok provozu VO.

Tab. 19 Prezentování velikosti ukazatelů PDI a AECI dle požadavků normy EN 13201-5

Příkon svítidla LUMA pro jednotlivé regulační režimy					
Regulační časy	zap→22:00	22:00→23:00	23:00→04:00	04:00→05:00	05:00→vyp
Příkon svítidla (W)	49	36,75	24,5	36,75	49
Dodatečný příkon (W)					
Velikost osvětlené plochy (šířka komunikace x rozteč mezi dvěma svítidly)					
	1. Relevantní oblast	2. Relevantní oblast	3. Relevantní oblast	4. Relevantní oblast	5. Relevantní oblast
Plocha (m ²)	277,9	-	-	-	-
Vypočtená osvětlenost (lx)	8,571	-	-	-	-
Délka jednotlivých regulačních režimů za celý rok					
	zap→22:00	22:00→23:00	23:00→04:00	04:00→05:00	05:00→vyp
Provozní doba za rok (h)	1170,075	366	1830	323,0755	388,908
Velikost ukazatelů energetické náročnosti – PDI a AECI					
	100% P	75% P	50% P	75% P	100% P
PDI (W.lx ⁻¹ .m ⁻²)	20,57				
AECI (Wh.m ⁻²)	0,53				

Tab. 20 Prezentování velikosti ukazatelů PDI a AECI dle požadavků normy EN 13201-5

Příkon svítidla Schröder pro jednotlivé regulační režimy					
Regulační časy	zap→vyp	zap→22:00	23:00→04:00	04:00→vyp	-
Příkon svítidla (W)	83,4	83,4	58,38	83,4	-
Dodatečný příkon (W)					
Velikost osvětlené plochy (šířka komunikace x rozteč mezi dvěma svítidly)					
	1. Relevantní oblast	2. Relevantní oblast	3. Relevantní oblast	4. Relevantní oblast	5. Relevantní oblast
Plocha (m ²)	175	-	-	-	-
Vypočtená osvětlenost (lx)	10,429	-	-	-	-
Délka jednotlivých regulačních režimů za celý rok					
	zap→vyp	zap→22:00	22:00→04:00	04:00→vyp	-
Provozní doba za rok (h)	4079	1170,075	2196	712,33	-
Velikost ukazatelů energetické náročnosti – PDI a AECI					
	100% P	70% P	-	-	-
PDI (W.lx ⁻¹ .m ⁻²)	45,7	63,98	-	-	-
AECI (Wh.m ⁻²)	1,94	1,63	-		

8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat energetickou náročnost současných osvětlovacích soustav veřejného osvětlení.

V jednotlivých kapitolách byly rozebrány parametry, které mají zásadní vliv na energetickou bilanci dané soustavy veřejného osvětlení.

V praktické části této práce byla vyhodnocena energetická náročnost na základě připravované normy EN 13201-5. Z dílčích závěrů na stranách 62,70,71 lze konstatovat, že světelně-technické parametry současných svítidel osazenými LED diodami ve většině případů předčí parametry svítidel s vysokotlakovými sodíkovými výbojkami.

Z hlediska kvalitativních parametrů (celková rovnoměrnost, podélná rovnoměrnost) jsou na tom stále mírně lépe svítidla s NAV. Avšak u dalších kvalitativních parametrů (životnost světelného zdroje, index podání barev) jsou na tom výrazně lépe LED svítidla.

Na energetické náročnosti zkoumaných osvětlovacích soustavách se nejvíce projevila velikost měrného výkonu světelného zdroje, účinnost optických částí svítidla a velikost činný ztrát předřadného přístroje. Vylepšili-li parametry optických částí LED svítidel, lze očekávat, že jeho parametry předčí svítidla s NAV ve všech směrech. Již současné LED svítidla dosahují vysokých měrných výkonů (až $170 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$), kterému vysokotlaké sodíkové výbojky nižší výkonových řad nemohou konkurovat.

Vyšší pořizovací náklady za LED svítidlo se v řádu několika let navrátí díky značné úspoře elektrické energie. Předřadné přístroje současných LED svítidel přináší široké možnosti řízení po čas snížené intenzity provozu a dosáhnout tak ještě vyšší úspory elektrické energie ve srovnání s NAV svítidlem.

Za vlastní přínos v této práci považuji:

Zpracování stručnějších a jednodušších postupů zařídění komunikací a výpočtu fotometrických parametrů.

Za svůj přínos také považuji stanovení energetické náročnosti osvětlovacích soustav na Studentské a Technologické z mého zpracování výpočtu a měření. V oblasti vyhodnocení energetické náročnosti na základě EN 13201-5 považuji za svůj přínos vytvoření univerzální tabulky v Excele, která slouží na výpočet ukazatelů PDI a AECl.

Použitá literatura

- [1] SOKANSKÝ, Karel a Tomáš NOVÁK. *Snižování energetické náročnosti venkovních osvětlovacích soustav*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010, 145 s. ISBN 978-80-248-2481-9.
- [2] Světelné zdroje - vysokotlaké sodíkové výbojky. *Časopis Světlo* [online]. 2009, **2009**(3), 3 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39197.pdf>
- [3] SOKANSKÝ, Karel a Tomáš NOVÁK. *Dominantní vlivy ovlivňující spotřebu elektrické energie osvětlovacích soustav* [online]. Ostrava, 2007, 10.11.2007 [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: http://csorsostrava.cz/publikace/dominantni_vlivy_2007.pdf. VŠB-TUO
- [4] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9
- [5] LED ve veřejném osvětlení - skutečnost versus mýty. *Časopis světlo* [online]. 2009, **2009**(6), 2 str. [cit. 2015-12-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40228.pdf>
- [6] Jak účinně spořit elektrickou energii ve veřejném osvětlení bez nutnosti vypínání služby VO? *E-light.cz* [online]. Brno: A-LIGHT, 2012 [cit. 2016-01-21]. Dostupné z: <http://www.e-light.cz/zprava/stmivatelne-elektronicke-predradniky-pro-verejne-osvetleni/>
- [7] ČSN CEN/TR 13201-1. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 1: Výběr tříd osvětlení*. Vyd. 2. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [8] ČSN EN 13201-2. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Požadavky*. Vyd.2. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [9] ČSN EN 13201-3. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 3: Výpočet*. Vyd. 2. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [10] ČSN EN 13201-4. *Osvětlení pozemních komunikací - Část 4: Metody měření*. Vyd. 2. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [11] EN 13201-5. *Energy performance indicators*. FINAL DRAFT. Praha: CEN, 2015.
- [12] MAIXNER, Tomáš, Tomáš NOVÁK, František DOSTÁL a Karel SOKANSKÝ. *Metodické pokyny pro obnovu, provoz a údržbu VO* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: http://www.csorsostrava.cz/publikace/Metodicke_pokyny_pro_obnovu_provoz_a_udrzbu_verejneho_osvetleni.pdf
- [13] Porovnání 62W LED svítidla a 70W svítidla s vysokotlakou sodíkovou výbojkou v praxi. *Časopis Světlo* [online]. 2011, 2011(5), 3 str. [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44732.pdf>
- [14] Parametry Svítidla Kyro 1 LED. *Enika* [online]. Praha: enika.cz, 2015 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: <http://www.enika.cz/cz/osvetlovaci-technika/verejne-osvetleni/kyro-1-led.html?PHPSESSID=f81f0a8f6589117d4bf01376053e1773>

- [15] HABEL, Jiří a Petr ŽÁK. Vliv spektrálního složení záření zdrojů na subjektivní vjem pozorovatelů v podmínkách VO. In: *O SVĚTLE* [online]. Praha: O SVĚTLE, 2014 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: <http://www.osvetle.cz/index.php/filtr/profesional/48-ostatniprofesional/807-vliv-spektralniho-slozeni>
- [16] HABEL, Jiří a Petr ŽÁK. Význam mezopického vidění pro praxi. *Časopis Světlo* [online]. 2007, 2007(6), 3 str. [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36187.pdf>
- [17] DAVID, Tomáš. Osvětlování komunikací v oblasti mezopického vidění [online]. Praha, 2015 [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61684/F3-DP-2015_Tomas-David_Osvetlovani_komunikaci_v_podminkach_mezopickeho_videni.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT.
- [18] NOVOTNÝ, Jan a Petr ŽÁK. Teplota chromatičnosti ve veřejném osvětlení. In: *Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení* [online]. Praha: Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení, 2015 [cit. 2016-01-10]. Dostupné z: <http://www.srvo.cz/news/doporucene-teploty-chromaticnosti-pro-svitidla-verejneho-osvetleni/>
- [19] Kruithof curve. *Wikipedia* [online]. USA: Wikipedia, 2015 [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kruithof_curve
- [20] Osram katalog sodíkových výbojek. *OSRAM*[online]. 2015: OSRAM, 2015 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: http://www.osram.cz/osram_cz/produkty/svetelne-zdroje/vysoce-intenzivni-vybojky-hid/vysokotlake-sodikove-vybojky-for-open-and-enclosed-luminaires/index.jsp
- [21] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK a Tomáš MAIXNER. *Potenciál energetických úspor veřejného osvětlení v ČR* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: http://www.csorsostrava.cz/publikace/Potencial_energetickych_ustor_VO_v_CR.pdf
- [22] Ovládací systém VO, zapínací místa RVO. In: *Artmetal-CZ* [online]. Brno: Artmetal-CZ, 2014 [cit. 2016-01-15]. Dostupné z: http://www.artmetal-cz.com/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky/za%C5%99%C3%ADzen%C3%AD%20vo/Ovl%C3%A1dac%C3%AD%20syst%C3%A9m%20VO_zap%C3%ADnac%C3%AD%20m%C3%ADsta.pdf
- [23] Controlling LED brightness using PWM. In: *Waiting for friday* [online]. USA: Waiting for friday, 2010 [cit. 2016-02-15]. Dostupné z: http://www.waitingforfriday.com/index.php/Controlling_LED_brightness_using_PWM
- [24] Ovládání veřejného a slavnostního osvětlení. *Spolek veřejně prospěšných služeb* [online]. Brno: DAT-mo LUX s.r.o, 2007 [cit. 2016-02-29]. Dostupné z: www.svps.cz/v_doc/VOaSO.doc
- [25] Osram - elektronické předřadníky pro LED. *OSRAM* [online]. Praha: OSRAM, 2015 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: http://www.osram.cz/osram_cz/produkty/elektronika/elektronicke-predradniky-pro-led-moduly-a-stmivace/venkovni-ep-pro-led-moduly/konstantni-proud-stmivateln/optotronic/index.jsp

[26] Astrohodiny. *Astrohodiny* [online]. Olomouc: Astrohodiny, 2015 [cit. 2016-03-05].
Dostupné z: <http://www.astrohodiny.cz/>

[27] *Reddit* [online]. USA: Reddit, 2010 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z:
<https://www.reddit.com/>

[28] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK a Jaroslav ŠNOBL. *Využití nových technologií ve veřejném osvětlení města Ostrava*. Ostrava, 2011. Studie. VŠB-TUO Ostrava.