



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Diplomová práce

Efektivita inteligentních osvětlovacích soustav

Bc. Tomáš Nepivoda

Květen 2018

Vedoucí práce: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Marku Bálskýmu, Ph.D. za odborné vedení. Dále patří poděkování Ing. Tomášovi Sousedíkovi za poskytnutí podkladů průmyslové haly a své rodině a přátelům za podporu během psaní diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Podpis autora práce

Abstrakt / Abstract

V této diplomové práci jsou shrnuty systémy běžně používané k řízení osvětlovacích soustav a vyhodnoceny vhodné oblasti použití. Také byla navržena osvětlovací soustava pro konkrétní průmyslovou halu a vypočítán příspěvek denního osvětlení. Vytvořil jsem uživatelsky jednoduchý software pro výpočet návratnosti investice do inteligentních řídicích systému regulujících výkon svítidel dle aktuální denní osvětlenosti. Vliv regulace svítidel na životnost LED byl podrobněji popsán a posouzen.

Klíčová slova:

LED, DIALux, denní osvětlení, životnost, řídicí systém, osvětlovací soustava, software

In this diploma thesis are summarized systems commonly used to control lightning systems and are evaluated appropriate use cases. Lightning system for concrete industry hall was also designed and daylight fraction was calculated. I created user friendly software for investment return calculation of intelligent lightning systems which regulate lamp power according actual daylight. Light regulation effect for LED lifetime was described in detail and evaluated.

Keywords:

LED, DIALux, daylight, lifetime, control system, lightning system, software

Obsah /

Zadání práce	1	3.3 Stínící technika	17
1 Systémy řízení osvětlovacích soustav komunikující přímo se svítidly	2	4 Návrh osvětlovací soustavy	18
1.1 DALI	2	4.1 Rozbor požadavků	18
1.1.1 Obecný úvod	2	4.2 Výběr vhodných svítidel	19
1.1.2 Vlastnosti DALI	2	4.2.1 Vyrtych DUNKER65-LED	20
1.1.3 Topologie	3	4.3 Stanovení udržovacího činitele	20
1.1.4 Adresování	3	4.3.1 Činitel stárnutí světelných zdrojů	21
1.1.5 Řízení tunable white svítidel	3	4.3.2 Udržovací činitel svítidel	22
1.2 DMX 512	4	4.3.3 Udržovací činitel povrchů	23
1.2.1 Obecný úvod	4	4.3.4 Činitel funkční spolehlivosti světelného zdroje .	23
1.2.2 Vlastnosti DMX 512	4	4.4 Výpočet v programu DIALux .	24
1.2.3 Topologie	5	4.4.1 Modelování osvětlovacího prostoru	24
1.2.4 Adresování	5	4.4.2 Rozmístění svítidel a výpočet světelně technických parametrů	25
1.3 DSI	6	5 Návrh řízení osvětlení	27
1.3.1 Obecný úvod	6	5.1 Denní osvětlení budov	28
1.3.2 Specifikace DSI	6	5.1.1 Osvětlovací systémy denního osvětlení budov	28
1.3.3 Topologie	7	5.1.2 Sdružené osvětlení	28
1.4 Analogové řízení 0 - 10 V	7	5.2 Specifikace řídicího systému ...	29
1.4.1 Obecný úvod	7	5.3 Výpočet denní složky osvětlení	30
1.4.2 Princip a vlastnosti	7	5.4 Energetické a ekonomické vyhodnocení	31
1.4.3 Komunikace se svítidly	8	6 Software pro výpočet návratnosti investice do inteligentní osvětlovací soustavy	34
2 Systémy řízení osvětlovacích soustav komunikující se svítidly přes bránu	9	6.1 Rozbor požadavků	34
2.1 KNX	9	6.1.1 Rozměry, druh a parametry oken	34
2.1.1 Obecný úvod	9	6.1.2 Činitele odrazu světla povrchů místnosti	35
2.1.2 Vlastnosti KNX	9	6.1.3 Využití místnosti	36
2.1.3 Topologie	10	6.1.4 Požadovaná osvětlenost ..	36
2.1.4 Adresování	11	6.1.5 Parametry osvětlovací soustavy	37
2.1.5 Komunikace se svítidly ..	11	6.1.6 Cena elektrické energie ..	37
2.2 EIB	11		
2.2.1 Obecný úvod	11		
2.2.2 Topologie	12		
2.2.3 Adresování	13		
2.2.4 Komunikace se svítidly ..	13		
2.3 Power over Ethernet (PoE)	13		
2.3.1 Obecný úvod	13		
2.3.2 Princip PoE	13		
2.3.3 Vlastnosti	14		
3 Moderní svítidla a stínící technika	16		
3.1 Tunable white svítidla	16		
3.2 RGB svítidla	16		

6.1.7 Investiční náklady	37	8.1 Systémy pro řízení osvětlo-	
6.2 Určení osvětlenosti.....	38	vacích soustav.....	57
6.2.1 Simulace v DIALux.....	38	8.2 Návrh konkrétní osvětlovací	
6.2.2 Společné parametry.....	39	soustavy	57
6.2.3 Polynomiální rovnice	40	8.3 Software pro výpočet ná-	
6.2.4 Nástroj MultiPolyRe-		vratnosti investice do inteli-	
gress	40	gentního řídicího systému	58
6.3 Přepočítání osvětlenosti pro li-		8.4 Posouzení vlivu regulace na	
bovolný čas v roce	41	životnost LED.....	58
6.4 Potřeba svícení.....	42	Literatura	59
6.5 Výpočet spotřeby elektrické		A Tabulka hodnot horizontální	
energie	43	exteriérové osvětlenosti	63
6.6 Software	44		
7 Posouzení vlivu regulace na ži-			
voťnost LED	47		
7.1 Vlastnosti LED	47		
7.1.1 Elektrické vlastnosti	47		
7.1.2 Svítivost LED	48		
7.1.3 Barva vyzařovaného			
světla	49		
7.1.4 Teplota chromatičnosti ..	49		
7.1.5 Elektrický výkon.....	49		
7.1.6 Měrný výkon	50		
7.1.7 Spektrum vyzařované-			
ho světla a index podá-			
ní barev	50		
7.1.8 Životnost	50		
7.2 Teplota LED	51		
7.2.1 Vliv teploty na světelný			
tok	52		
7.2.2 Vliv teploty na elek-			
trické parametry	52		
7.2.3 Vliv teploty na spek-			
trum vyzařovaného			
světla	52		
7.3 Degradace LED	53		
7.3.1 Způsob selhání světelných			
zdrojů	54		
7.3.2 Stárnutí světelných			
zdrojů	54		
7.3.3 Degradace LED vlivem			
teploty.....	54		
7.3.4 Degradace LED vlivem			
elektrického namáhání ...	55		
8 Závěr	57		

Tabulky /

4.1. Požadavky na světeně technické parametry vybraných prostor	19
4.2. Parametry svítidla	20
4.3. Závislost udržovacího činitele svítidla na kategorii svítidla a intervalu čištění	23
4.4. Doporučený interval čištění	23
4.5. Vlastnosti ploch místnosti	24
4.6. Vypočítané hodnoty	26
5.1. Denní složka osvětlení	31
5.2. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 1	32
5.3. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 2	32
5.4. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 3	32
5.5. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 4	33
5.6. Souhrn energetické náročnosti jednotlivých místností	33
6.1. Činitele prostupu světla pro vybrané materiály	35
6.2. Hodnoty činitele znečištění	35
6.3. Činitele odrazu světla	36
6.4. Závislost střední hodnoty osvětlenosti na rozměrech místnosti pro okno o šíři 1 m.....	39
6.5. Závislost střední hodnoty osvětlenosti na rozměrech místnosti pro okno o šíři dle místnosti.....	40
7.1. Závislost barvy LED na chemickém složení	49
A.1. 1	63
A.2. 2	64

Zadání práce



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nepivoda** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **420371**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Inteligentní budovy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Efektivita inteligentních osvětlovacích soustav

Název diplomové práce anglicky:

Savings and efficiency of intelligent lighting systems

Pokyny pro vypracování:

Proveďte analýzu principů, výhod a nevýhod jednotlivých způsobů řízení osvětlovacích soustav. Navrhněte inteligentní řízení konkrétní reálné osvětlovací soustavy. Stanovte úspory elektrické energie v závislosti na řízení osvětlovací soustavy podle udržovacího činitele a úrovně denního osvětlení. Posuďte vliv regulace LED svítidel na jejich živostnost. Vytvořte SW pro stanovení návratnosti investice do inteligentní osvětlovací soustavy s řídicím systémem.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 12454-1 Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory.
- [2] ČSN 73 0580 Denní osvětlení budov.
- [3] J. Habel a kol., Světlo a osvětlování, Praha: FCC Public, 2013.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Marek Bálský, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2018** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce:
do konce letního semestru 2018/2019

Ing. Marek Bálský, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

1

Podpis studenta

Kapitola 1

Systemy řízení osvětlovacích soustav komunikující přímo se svítidly

1.1 DALI

1.1.1 Obecný úvod

DALI (Digital Adresable Lightning Interface) je velmi rozšířený digitální protokol určený k řízení osvětlovacích soustav. Je možné jej použít i pro další prvky domácí automatizace. Mezi jeho výhody patří široká podpora ze strany výrobců a snadná programovatelnost světelných scén. Nachází uplatnění například v kancelářích, divadlech a ve veřejných budovách.

Protokol DALI vznikl v roce 2001, jako základ posloužil protokol DSI (bude popsán dále). Mezi požadavky na jeho podobu patřila nízká cena, jednoduchá instalace, možnost individuálního řízení svítidel, možnost využití zpětné vazby a podpora senzorů a dalšího vybavení. DALI protokol byl standardizován normou IEC 62386 (dostupné také například jako ČSN EN 62386) a IEC 60929. [1] [2]

1.1.2 Vlastnosti DALI

- Norma IEC 60929 – umožňuje kombinaci produktů různých výrobců. Všichni výrobci zastoupeni ve sdružení AG DALI společně usilovali o ověření shody svých produktů s touto normou.
- Rychlost přenosu dat 1200 bit/s – dostatečná pro bezproblémový provoz systému. Logické úrovně na straně přijímače jsou -4,5 V až 4,5 V pro nízkou úroveň, 9,5 V až 22,5 V pro vysokou úroveň
- Manchesterké kódování umožňující detekci chyb přenosu
- Maximální proud – každé zařízení v DALI síti obvykle odebírá maximálně 2 mA. To je třeba vzít v úvahu při volbě napájecího zdroje.
- Omezená velikost systému – systém může obsahovat maximálně 64 jednotek s individuální adresou
- Ovládání pomocí dvou vodičů – lze použít i 2 jednotlivé vodiče, maximální délka je 300 metrů
- Galvanické oddělení datových vodičů – lze řídit i svítidla napájená různými přívody z různých fází
- Není potřeba impedanční přizpůsobení konce vodiče
- Rozsah stmívání obvykle 0,1 % – 100 % , spodní hranice je závislá na výrobcí. Průběh křivky stmívání je standardizován a přizpůsoben logaritmické citlivosti oka.
- Programovatelná doba stmívání – lze nastavit rychlost změny svítivosti
- V případě přerušení přenosu dat je automaticky použito fixní nastavení
- Předdefinování světelných scén – lze nastavit až 16 různých světelných scén
- Možnost připojení k systému řízení budovy pomocí převodníku

- Snadné vytvoření nové konfigurace systému – u instalovaného systému lze snadno změnit konfiguraci funkcí a světelných scén beze změny hardware, například při přeskupení otevřených kanceláří
- Snadná integrace nových komponent – existující osvětlovací soustavu lze kdykoliv snadno rozšířit přidáním nových komponent, pokud je dostatečně dimenzovaný napájecí zdroj a není překročena maximální délka vodiče

[1] [2]

1.1.3 Topologie

DALI je jednoduchá sběrnice, která se může větvit různými směry. Lze použít různé fyzické topologie, například hvězdicovou nebo sběrniceovou topologii. Minimální doporučený průřez vodičů je $1,5 \text{ mm}^2$, maximální proud po sběrnici by neměl překročit 250 mA (standardní odběr je 2 mA na zařízení). Úbytek napětí na vedení by neměl překročit 2 V.

Sběrnice DALI je nezávislá na polaritě datových vodičů, což usnadňuje instalaci a eliminuje chyby. Tyto 2 vodiče zároveň slouží k napájení připojených jednotek. Nominální napájecí napětí je 16 V, což odpovídá logické úrovni 1. Logické úrovni 0 je dosaženo zkratováním napájecího zdroje. Z tohoto důvodu musí být výstupní proud omezen na 250 mA. [3]

Maximální počet zařízení na jedné DALI sběrnici je 64 včetně řídicí jednotky. Toto omezení lze vyřešit použitím modulu pro spojování DALI sítí a libovolně jí tak rozšířit. [4]

Sít' využívající DALI protokol se skládá z těchto částí:

- DALI řídicí jednotka
- Zdroj pro napájení sběrnice
- DALI zařízení (například předřadníky svítidel)
- Kabeláž
- Brány, rozbočovače a routery

[2]

1.1.4 Adresování

Mezi výhody DALI patří flexibilita řešení systému. Na základní úrovni jsou všechna zařízení adresována současně s vysílacími příkazy. Tím je umožněno ovládání osvětlení podobným způsobem, jako analogové řízení 0 – 10 V (bude dále popsáno) bez nutnosti konfigurace jednotlivých zařízení. Pokud řídicí jednotka vyšle příkaz, budou na něj reagovat všechna zařízení stejným způsobem.

Jednoduchou konfigurací lze DALI zařízení přiřadit jednu ze 64 adres. Tím je umožněno individuální řízení, konfigurace a dotazování se jakéhokoliv zařízení v systému.

Lze také využít skupinové adresování. Zařízení může být naprogramováno například tak, aby bylo obsaženo v libovolné kombinaci až 16 možných skupin. Po odeslání příkazu skupině budou adresována pouze zařízení této skupiny. Vzhledem k rozšiřování normy o další zařízení lze očekávat další možnosti adresování.

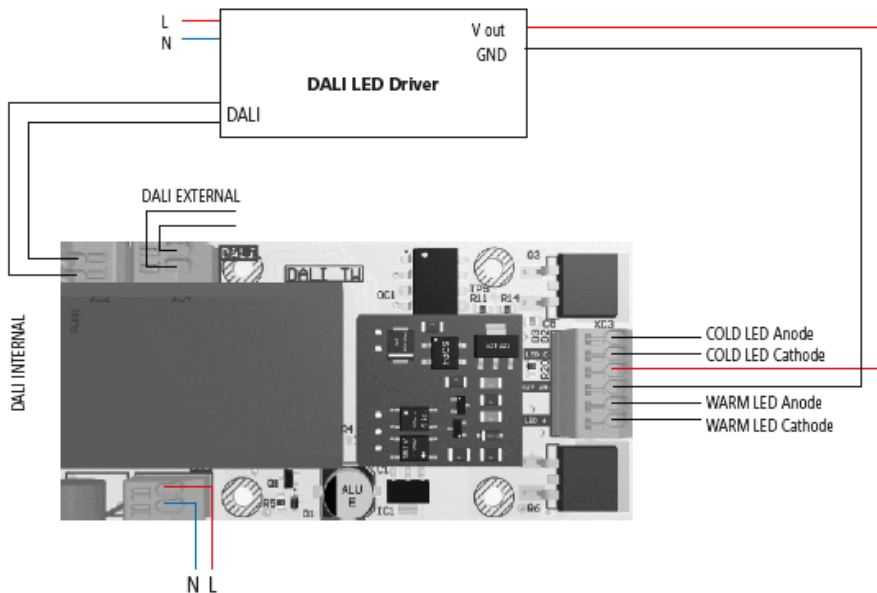
[3] [2]

1.1.5 Řízení tunable white svítidel

Rozšířením předřadníku pro LED svítidla lze prostřednictvím DALI sběrnice řídit i tunable white svítidla (svítidla s nastavitelnou teplotou chromatičnosti vyzařovaného

bílého světla). Rozšiřující modul neslouží jako napájecí zdroj pro svítidlo, pouze komunikuje s LED předřadníkem a přiřazuje jeho výstup příslušným LED.

Použitím tohoto rozšiřujícího modulu a tunable white svítidel narůstá variabilita programování světelných scén. [5] [2]



Obrázek 1.1. Rozšiřující modul umožňující řídit tunable white svítidla. Převzato z [5]

1.2 DMX 512

1.2.1 Obecný úvod

DMX 512 je digitální komunikační protokol určený k řízení jevištních světelných efektů. Přenos probíhá jednosměrně z DMX řídicí jednotky do DMX zařízení. Jedná se o sériový protokol, jehož základem je RS 485. DMX neumožňuje kontrolu chyb přenosu, jedná se tedy o nespolehlivé spojení.

Protokol DMX 512 byl původně určen pouze pro řízení stmívačů, později se jeho použití rozšířilo i na další zařízení jako zrcadlové efekty, výrobníky mlhy a další.

DMX byl vyvinut institucí USITT (United States Institute for Theatre Technology). První verze byla publikována v roce 1986. V roce 1990 prošla zásadní revizí, od které se používá označení DMX 512. Dále byl protokol revidován v letech 1998 a 2004 a byl standardizován normou ANSI E1.11-2004.

DMX protokol je používán s právě jednou DMX řídicí jednotkou a až 32 DMX zařízeními. Řídicí jednotka má pouze výstupní konektor, ostatní zařízení jsou vybavena vstupním i výstupním konektorem. Jednotlivá zařízení jsou modulárně řazena tak, že vstup dalšího zařízení je vždy propojen s výstupem předchozího zařízení. Vstup prvního zařízení je propojen s výstupem řídicí jednotky. V praxi jsou běžné problémy s komunikací. Nejsou však způsobeny DMX protokolem, ale nesprávnou implementací a použitím nevhodných kabelů a nevhodného impedančního přizpůsobení. [6] [2]

1.2.2 Vlastnosti DMX 512

- Použití dvou kroucených párů vodičů

- Standardně používaný 5 pinový XLR konektor. Je možné použít i RJ-45 konektor, ale nesmí být omylem zapojen do Ethernetové sítě, jinak hrozí zničení zařízení.
- Úzká oblast použití, jiné standardy jsou univerzálnější
- DMX přijímač je galvanicky oddělený
- Jednosměrný asynchronní sériový 8 bitový přenos, rychlost přenosu až 250 000 bit/s
- Obnovovací frekvence 30 Hz
- Až 512 kanálů (adres) na řídicí jednotku
- Maximálně 32 zařízení na řídicí jednotku
- DMX port obsahuje vodiče Data1+, Data1-, Data2+, Data2- a stínění. Vodiče Data2+ a Data2- jsou používány výjimečně.

[7] [2]

■ 1.2.3 Topologie

Topologie DMX 512 spočívá v řetězovém spojení jednotlivých zařízení tak, že každé zařízení přijímá data z předcházejícího zařízení (případně z řídicí jednotky) a vysílá data následujícímu zařízení. Této topologii se také říká „Daisy chain“. Specifikace vylučují použití například hvězdicové nebo stromové topologie. Pokud fyzické požadavky systému neumožňují použití řetězové topologie, musí být použity opakovače či rozbočovače signálu.

DMX512 zařízení jsou spojena s řídicí jednotkou kabelem splňujícím standard IEA485, obvykle s impedancí 100 až 120 Ω . Je také dovoleno použít nestíněnou kroucenou dvojlinku UTP cat. 5e. Kabel musí být zakončen impedančním přizpůsobením odpovídajícím charakteristické impedanci kabelu, který bývá většinou zabudován v přijímacím zařízení. [6]

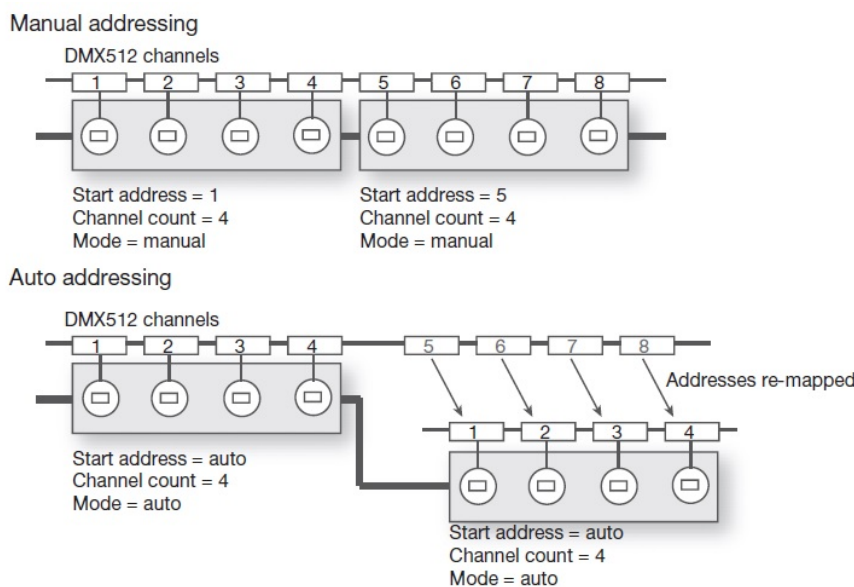
Někteří výrobci používají i 3 pinové XLR konektory (DMX pak využívá pouze 3 vodiče). Takové provedení však může být omylem připojeno k audio zařízení a může dojít k destrukci. [6] [2]

■ 1.2.4 Adresování

Datový proud řídicí jednotky DMX 512 lze chápat jako sekvenci až 512 rámců pro až 512 kanálů. Zprávy mohou být zasílány na všech kanálech, nebo jen těm kde má dojít ke změně. K řízení RGB LED svítidla jsou využívány 3 kanály. Jednou DMX řídicí jednotkou tedy může být teoreticky řízeno až 170 RGB pixelů.

Adresace DMX zařízení může být buď manuální, nebo automatická. Při manuálním adresování má každé zařízení rezervované konkrétní kanály, jejichž čísla jsou neměnná.

Při automatickém adresování přijme první zařízení jemu adresovanou zprávu, ostatní zprávy předadresuje a následně pošle dál. Další zařízení stejný proces opakují. Každé zařízení tedy obvykle přijímá zprávy a adresou 1 až n, kde n je počet kanálů potřebný k řízení daného zařízení. [7] [2]



Obrázek 1.2. Adresování DMX 512. Převzato z [7]

1.3 DSI

1.3.1 Obecný úvod

DSI (Digital Serial Interface) je komunikační protokol ve vlastnictví firmy Tridonic (člen skupiny Zumtobel), který vznikl v roce 1991. Dodnes se používá k řízení svítidel, je předchůdcem protokolu DALI.

Digitální stmívatelné předřadníky jsou stmívány a spínány řídicími příkazy. Řídicí příkazy jsou zasílány sériově asynchronně, je využito Manchesterové kódování k eliminaci chyb přenosu. Přijímání datových slov je možné pouze při střídavém provozu. Při jednosměrném provozu nebo při poruše nebudou příkazy vyhodnoceny.

K samotnému přenosu nastavené hodnoty stmívání je použito 8 bitové datové slovo. K využití dodatečných funkcí je možné zasílat 16 bitová datová slova.

Řídicí jednotka může řídit několik digitálních předřadníků. Maximální počet řízených předřadníků závisí pouze na výkonu výstupu řídicích jednotek. [8] [2]

1.3.2 Specifikace DSI

Při přenosu dat je využito Manchesterové kódování, navíc je každý zasílaný bit invertován. Šířka slova 8 bitů odpovídá 256 různým úrovním. Úrovně jsou odstupňovány logaritmicky. Výkon svítidla se tedy zvyšuje exponenciálně, aby byla osvětlenost způsobena citlivostí lidského oka. Aby bylo zajištěno, že všechny jednotky obdržely stejné příkazy, je vhodné po změně hodnoty stmívání řídicí příkaz opakovat. Je možné detekovat chyby způsobené poruchou nebo odpojením svítidla.

Signál přenášený po sběrnici DSI nesplňuje požadavky SELV (safety extra low voltage), proto je navržen v souladu s předpisy pro nízké napětí.

Vlastnosti DSI:

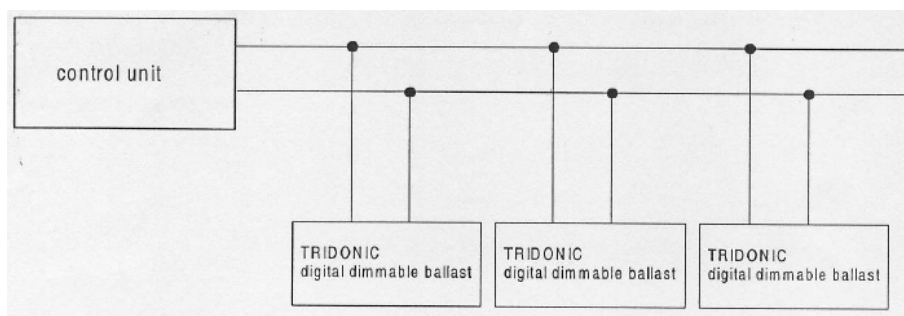
- Maximální délka kabelu 250 m (při specifickém použití k osvětlování tunelů až 500 m)
- Synchronizace každým start bitem
- Přenosová rychlost 600 Bit/s (1200 Bd)

- Vysoká úroveň signálu 12 V, nízká úroveň signálu pod 0,5 V
- Nezáleží na polaritě vodičů, po kterých je přenášén řídicí signál
- Možnost detekce chyb

[8] [2]

1.3.3 Topologie

K přenosu dat je potřeba dvoužilový kabel, doporučuje se kroucený nestíněný kabel o průřezu minimálně $0,5 \text{ mm}^2$. Maximální délka kabelu je 250 m při použití kabelu o průřezu vodiče $1,5 \text{ mm}^2$, v některých případech až 500 m. Jednotlivá zařízení jsou k řídicí jednotce připojena sběrnicově, použití jiných topologií je vyloučeno. Jednotlivé předřadníky nejsou nijak adresovány. Lze použít adresovatelné DALI/DSI konvertory, které mohou řídit DSI předřadníky. [8]



Obrázek 1.3. Topologie DSI. Převzato z [8]

Vzhledem k absenci možnosti adresace jednotlivých předřadníků není protokol DSI vhodný k řízení osvětlovacích soustav s proměnnou barevnou teplotou bílého světla a k řízení RGB svítidel. Řízení dalších prvků automatizace budovy, jako jsou například stínící systémy je prakticky vyloučeno. [2]

1.4 Analogové řízení 0 - 10 V

1.4.1 Obecný úvod

Mezi první systémy určené k stmívání a spínání osvětlení patřilo analogové řízení napětím. Nejrozšířenější variantou je řízení napětím 0 – 10 V, existují však i systémy používající jiné napěťové úrovně, například 1 – 10 V. Svítidla jsou vypnuta při nulovém řídicím napětí, napětí 10 V odpovídá plnému výkonu. Napětím v rozmezí 0 – 10 V lze analogově nastavit libovolný výkon svítidla. Kromě řízení osvětlení lze tímto způsobem řídit i například výkon motoru nebo pozici předmětu, s kterým motor pohybuje (například stínící systémy).

Výstupem ovladače je konstantní stejnosměrné napětí, které odpovídá řízené veličině (obvykle výkonu svítidla). Svítidlo je k ovladači připojeno párem vodičů, napětí je na straně svítidla měřeno na zátěži $20 \text{ k}\Omega$. Vodiče, které jsou využívány k řízení svítidla jsou galvanicky odděleny od silového vedení. [9] [2]

1.4.2 Princip a vlastnosti

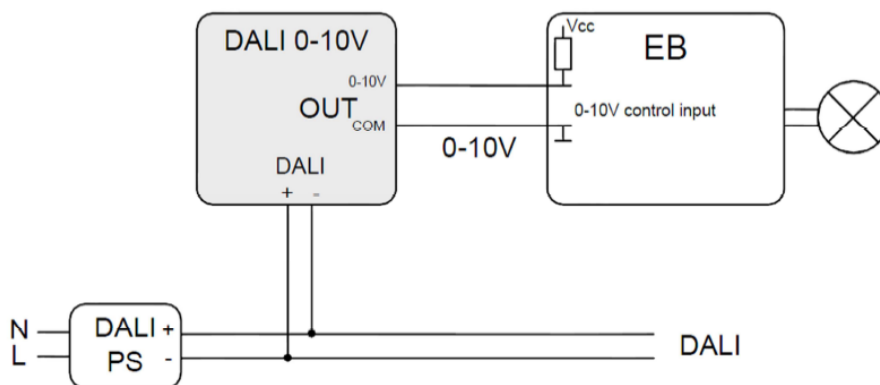
K nastavení napětí lze využít pasivní nebo aktivní ovladače. Pasivní ovladač může být tvořen potenciometrem s hodnotou maximálně $10 \text{ k}\Omega$ a mít výstupní impedanci maximálně $5 \text{ k}\Omega$, aktivní ovladač musí mít výstupní impedanci maximálně 100Ω . Každý

ovladač musí být schopen dodat výstupní proud minimálně 2 mA, což je odběr jednoho ovládaného zařízení. Jedním jednoduchým ovladačem s jedním párem řídicích vodičů lze řídit více svítidel, která je ale možné stmívat pouze všechna na stejnou hodnotu. V takovém případě musí být ovladač schopen dodávat patřičný proud, tedy příslušný násobek 2 mA. K nezávislému řízení více svítidel je nutno použít více párů vodičů. Každý ovladač musí být vybaven blokovací diodou nebo obvodem s obdobnou funkcí, aby se vůči cizímu zdroji napětí choval jako otevřený obvod. Tím je umožněno ovládání svítidla více ovladači. Analogové řízení 0 – 10 V je navrženo tak, aby byla nastavované veličina lineárně závislá na napětí. [9]

Dříve bylo stmívání svítidel napětím 0 – 10 V často používáno k řízení jevištního osvětlení a k řízení osvětlovacích soustav v budovách. V případě jevištního osvětlení bylo analogové řízení z velké části nahrazeno systémem DMX 512, v případě osvětlení budov protokoly DALI a KNX. Novější protokoly na rozdíl od analogového řízení nepotřebují k řízení každého nezávislého svítidla vlastní pár vodičů a poskytují větší variabilitu v případě změny systému. Pro potřeby jednoduchých aplikací se však analogové řízení stále používá, a to především díky jednoduché instalaci, nízkým instalačním nákladům, snadné diagnostice závad a možnosti použití téměř libovolného kabelu. [2]

1.4.3 Komunikace se svítidly

Často používanou variantou je spojení analogově řízeného svítidla se systéme DALI nebo KNX. K tomu je nutné použít převodník, který lze identifikovat a adresovat například v DALI síti. Převodník následně zastává roli analogového ovladače. Takovéto převodníky často umožňují i nastavení lineární nebo logaritmické závislosti analogového napětí na nastavované hodnotě z DALI sítě. [10]



Obrázek 1.4. Připojení svítidla s analogovým předřadníkem k DALI síti přes bránu. Převzato z [10]

Použití analogového řízení v rozsáhlých nových projektech je nevhodné, stejně tak je tento systém nevhodný k řízení jiných zařízení než osvětlovacích soustav a vzhledem k absenci zpětné vazby nelze použít ke sběru a přenosu dat ze senzorů. [2]

Kapitola 2

Systemy řízení osvětlovacích soustav komunikující se svítidly přes bránu

2.1 KNX

2.1.1 Obecný úvod

KNX je protokol vytvořený stejnojmenným sdružením. Jedná se o celosvětový standard vhodný pro různé aplikace v oblasti automatizace budov, například osvětlení, ovládání zásuvek, bezpečnostní systémy, vytápění, větrání, monitorování, řízení domácích spotřebičů a podobně. Tuto technologii lze nasadit jak v nových budovách, tak při rekonstrukci stávajících budov.

Asociace KNX vznikla ze svých předchůdců BatiBUS, European Installation Bus (EIB) a European Home Systems Protocol (EHS). Každá z těchto asociací se původně snažila prosadit v normalizaci a dobýt trh, přičemž každá z nich měla úspěchy v jiné části Evropy. V roce 1999 došlo k založení asociace KNX cvba. KNX protokol je standardizován normami EN 50090 a ISO/IEC 14543. Cílem KNX je především vyvinout jednotnou, cenově dostupnou a stabilní technologii, sjednotit současné elektronické systémy pro budovy do jednoho standardu a rozšířit nabídku na trhu i pro obytné budovy (v současné době většinou pro komerční budovy). [11] [2]

2.1.2 Vlastnosti KNX

KNX je decentralizovaný sběrníkový systém s multi-master provozem. Každé zařízení má vlastní řídicí jednotku. Mezi jeho vlastnosti patří:

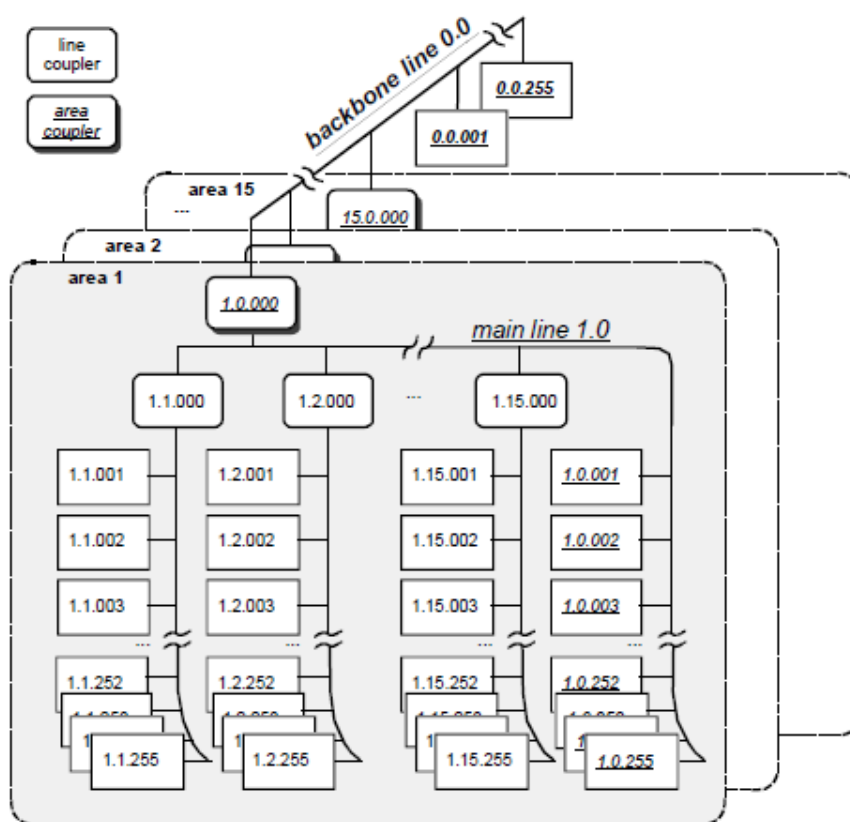
- Podpora několika různých komunikačních médií - jako přenosové médium může KNX využívat kroucený pár (KNX TP) silové vedení (KNX PL), rádiový přenos (KNX RF) a IP/ethernet (KNXnet/IP).
- Možnost připojení k jiným systémům – například se svítidly komunikuje KNX prostřednictvím rozhraní DALI
- Podpora různých režimů konfigurace – nabízené režimy jsou snadná instalace (režim E) a systémová instalace (režim S)
- Jednotný projektový nástroj (software ETS)
- Možnost propojení až 65536 zařízení stromovou topologií
- Možnost skupinového adresování zařízení
- Maximální délka vedení 1000 m, mezi zařízeními nesmí být více než 700 m. Vzdálenost zařízení od napájecího zdroje může být maximálně 350 m, v případě použití dvou a více zdrojů 200 m
- Napájení 24 V, odběr jednoho zařízení je obvykle 10 mA
- Každé zařízení na sběrnici má vlastní řídicí jednotku
- CSMA/CA řízení provozu na sběrnici - mnohonásobný přístup s nasloucháním nosenému signálu a s předcházením kolizím

- Liniové spojky obsahují filtrační tabulku povolených skupinových adres, informace se tedy nemusí šířit po celé síti a nedochází k zahlcení

[11] [2]

■ 2.1.3 Topologie

KNX využívá 16 bit adresní prostor, který dokáže teoreticky pojmout až 65536 účastníků. Jedna linie umožňuje připojit maximálně 255 zařízení. Tyto linie mohou být dále seskupovány do oblastí prostřednictvím hlavní linie. Oblast může být složena maximálně z 16 linií. Páteřní linie může seskupovat až 15 oblastí a jednu linii. Maximální počet připojených zařízení v této stromové topologii (bez adres vyhrazených pro liniové spojky) je tedy $255 \times 16 \times 15 + 255 = 61455$. Kromě limitů logické topologie je třeba dbát i na další omezení, například na maximální délku vodičů a dimenzování napájecích zdrojů.



Obrázek 2.1. Stromová topologie KNX. Převzato z [11]

Linie lze dále dělit až do 4 segmentů, přičemž každý segment může obsahovat maximálně 64 účastníků. Každý segment, každá hlavní linie i každá páteřní linie musí být vybavena odpovídajícím napájecím zdrojem. Napájecí zdroje mají výstupní napětí 24 V a maximální výstupní proud podle varianty 160 mA, 320 mA nebo 640 mA. Každé zařízení (až na některá z hlediska napájení náročnější) odebírá přibližně 10 mA. U nových instalací je obvykle počítáno s 20 % rezervou pro případ budoucího rozšíření. S podobnou rezervou se obvykle počítá i co do počtu účastníků.

Síť využívající KNX protokol se skládá z těchto částí:

- Jednotlivá zařízení
- Napájecí zdroje

- Liniové spojky
- Oblastní spojky
- Kabeláž

[11] [2]

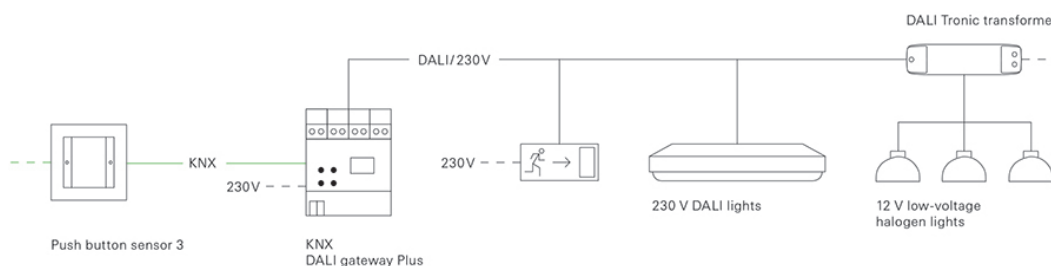
■ 2.1.4 Adresování

Každé zařízení připojené k síti musí mít svou individuální adresu v rozsahu 0.0.1 až 15.15.255, která je přiřazena při konfiguraci systému. Aby mohla zařízení mezi sebou komunikovat, musí být navíc propojena skupinovou adresou.

Liniová nebo oblastní spojka může obsahovat filtrační tabulku skupinových adres, která umožňuje odfiltrování zprávy do jiných linií. V případě, že se vysílací i přijímací zařízení nachází na stejné linii dochází k výraznému snížení komunikace v síti a předchází se jejímu zahlcení. [11] [2]

■ 2.1.5 Komunikace se svítilny

Mezi nejdůležitější zařízení, která chceme prostřednictvím KNX řídit je osvětlení budov. KNX nedokáže komunikovat se svítilny přímo, ale přes bránu prostřednictvím protokolu DALI, který je k tomu přizpůsobený. KNX tak může fungovat jako nadřazený systém DALI sběrnice. Tímto způsobem je umožněno spínání a stmívání, automatické osvětlení, řízení na stálou osvětlenost, časové řízení nebo programování světelných scén. Řízení tunable white a RGB svítidel je možné realizovat tak, jak bylo popsáno u DALI protokolu. [11] [2]



Obrázek 2.2. Připojení svítidel ke KNX. Převzato z [12]

■ 2.2 EIB

■ 2.2.1 Obecný úvod

EIB (European Instalation Bus) je decentralizovaný systém řízení automatizace budov, který byl standardizován v roce 1990 a v roce 1991 byly uvedeny na trh první produkty, které ho využívají. Jedná se o jednoho z předchůdců systému KNX, umožňuje vzájemnou komunikaci různých zařízení různých výrobců. EIB nalezne uplatnění v řízení svítidel, žaluzií, stínící techniky, vytápění, chlazení a zabezpečovací techniky.

Sběrnice EIB je obvykle realizována jako galvanicky oddělená od napájecí sítě. V některých případech můžou být data přenášena po silovém vedení. [13]

Při zrodu EIB byl kladen důraz na jednoduchost projektování a instalace. K zajištění úspěchu bylo potřeba, aby nároky na odbornost při projektování, instalaci a změnách odpovídaly schopnostem běžného elektroinstalatéra. Dále byly kladeny tyto požadavky:

- Konec vedení nebude vyžadovat impedanční přizpůsobení
- Možnost propojení až 126 větví

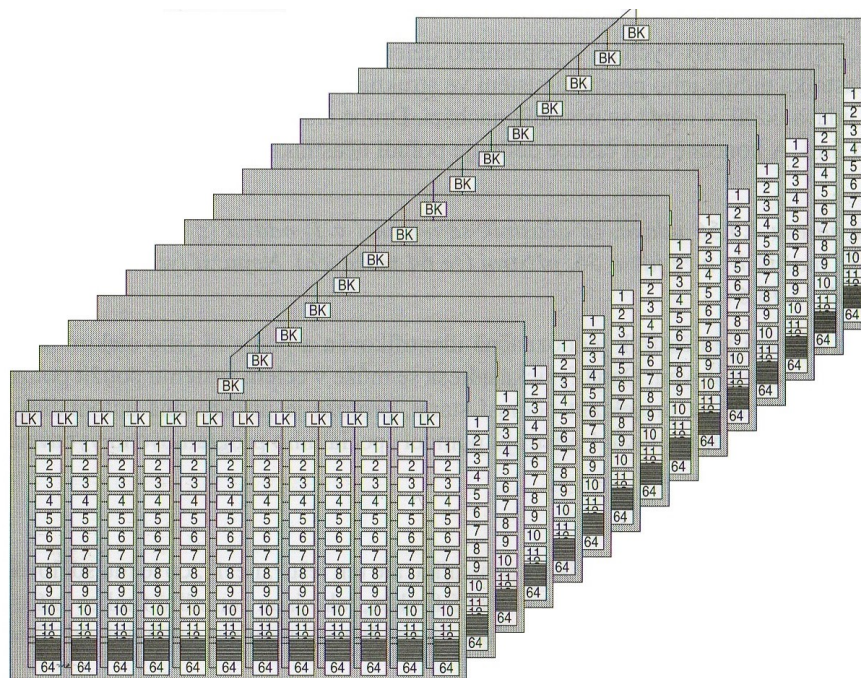
- Až 256 účastníků na každé větvi
- Přenosová rychlost 1200 – 9600 b/s (využívá se horní hranice)
- Symetrický přenos dat
- Délka vedení jedné větve až 500 m (později stanoveno až 1000 m)
- Sběrníkové vedení s přenosem dat po kroucené dvojlince
- Přenos základního pásma bez další modulace
- Přístup k přenosovému médiumu CSMA/CD

Tyto požadavky se později ukázaly jako opodstatněné a systém EIB se dočkal velkého úspěchu. V roce 1998 bylo na trhu více než 4400 produktů využívajících EIB. [14]

V současné době se systém EIB příliš nepoužívá, byl nahrazen systémem KNX. [2]

2.2.2 Topologie

Jednotlivé části systému EIB využívají sběrnicovou topologii. Každá linie může být složena až ze 64 účastníků. Pomocí liniových vazebních členů je možné propojit až 12 linií s hlavní linií a vytvořit tak oddíl. Hlavní linie může obsahovat až 64 účastníků včetně liniových vazebních členů. Oddíly mohou být dále propojeny oddílovými vazebními členy, lze tak vytvořit páteřní sběrnici maximálně o 15 oddílech. K páteřní sběrnici může být připojeno až 64 účastníků včetně oddílových vazebních členů. Celý systém EIB tedy může obsahovat 54 544 účastníků. Pokud by ani to nestačilo, existují další možnosti, jak systém rozšířit. Vzhledem k velkému počtu možných účastníků je systém vhodný i pro rozsáhlé budovy. Aby nedošlo k zahlcení sítě, jsou data filtrována podle adres a nešíří se mimo vybrané linie.



Obrázek 2.3. Topologie EIB. Převzato z [14]

Vazební členy galvanicky oddělují jednotlivé části systému, každá linie tedy musí mít vlastní napájecí zdroj a sběrnice nemůže být uzemněna. Mezi účastníky nesmí být vedení delší než 700 m, aby nedocházelo k nadlimitnímu zpoždění signálu. Žádný účastník nesmí být více než 350 m od napájecího zdroje, aby vlivem úbytku napětí na vedení nekleslo napájecí napětí pod 21 V. Napájecí zdroje musí být alespoň 200 m od

sebe, aby se zabránilo indukci příliš velkého napětí působením dvou zdrojů. K přenosu dat i napájecího napětí je využit stejný pár vodičů. Data jsou tedy modulována na napájecím napětí 24 V.

K instalaci je doporučeno využívat kabel PYCY, YCYM nebo J-Y(ST)Y 2x2x0,5. Napájecí zdroje se obvykle používají s nominálním výstupním proudem 320 mA (s oddělenou tlumivkou) nebo 640 mA (často s integrovanou tlumivkou). [14] [2]

■ 2.2.3 Adresování

Jednotliví účastníci v systému mají přidělenou svou adresu, lze tak při posílání dat určit jejich příjemce. Adresace vychází z fyzické topologie, je tedy tříúrovňová. Tvar adresy je X.Y.Z, kde Z určuje pozici účastníka v linii, Y značí, ve které linii se účastník nachází a X určuje oddíl. Tato adresa účastníka je v systému jedinečná. Její přidělování probíhá automaticky pomocí software při programování jednotlivých účastníků.

Kromě individuální adresy je možné také použít skupinovou adresu. V systému může existovat až 14 hlavních skupin a v každé skupině až 2048 podskupin. Tím lze účastníky seskupovat například podle jejich funkcí a podle systémů, jichž jsou součástí. Přiřazení skupinových adres účastníkům není závislé na fyzickém uspořádání a lze je kdykoliv změnit, což přispívá variabilitě systému v případě úprav. Existuje i třístupňové dělení adresy, kde je možné stejně jako v předchozím případě využít až 14 hlavních skupin, v každé hlavní skupině může být až 8 vedlejších skupin a v každé vedlejší skupině až 256 podskupin. [14] [2]

■ 2.2.4 Komunikace se svítidly

Systém EIB disponuje možností adresování včetně skupinového, je tedy vhodný k vytváření světelných scén. Vzhledem k univerzálnosti je možné jej využít jak k řízení běžných osvětlovacích soustav, tak k řízení sofistikovanějších systémů jako jsou RGB svítidla a svítidla s proměnnou barvou bílého světla. Také je možné ho využít k ovládání stínících soustav a zpracování dat ze senzorů. [2]

■ 2.3 Power over Ethernet (PoE)

■ 2.3.1 Obecný úvod

Technologie PoE (Power over Ethernet) nabízí možnost napájení zařízení s nízkým příkonem prostřednictvím Ethernetového kabelu. Využití nalézá především při rekonstrukci budov, kdy není vhodné přivádět nové kabely a lze využít stávající rozvod Ethernetu. Uplatnění nalézá i v případě nových instalací, a to zejména díky skutečnosti, že lze použít jediný kabel pro přenos dat i pro napájení.

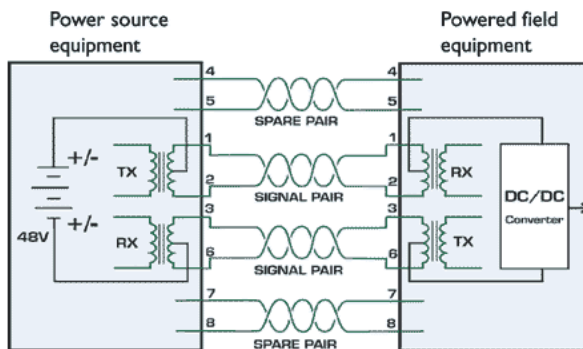
Vzhledem k omezenému výkonu je napájení prostřednictvím Ethernetu vhodné zejména pro Wi-Fi přístupové body, IP kamery a detektory. S rozšiřováním LED technologie jako zdrojů světla se vzhledem k jejich nízkému příkonu nabízí možnost napájet přes Ethernet i osvětlovací soustavy. Oproti jiným řešením přináší úsporu nákladů na instalaci. Úbytky napětí na vedení můžou však způsobit vyšší provozní náklady. [15] [2]

■ 2.3.2 Princip PoE

Technologie Power over Ethernet obvykle využívá k napájení zařízení nevyužité páry vodičů Ethernet kabelu. Standardy Ethernetu 10Base-T a 100Base-TX využívají pouze

2 páry ze 4 dostupných párů vodičů. Stejnoseměrné napájecí napětí nemůže být mezi vodiči jednoho páru. Oba vodiče mají tedy stejný stejnosměrný potenciál a napájecí napětí je vedeno mezi dvěma páry vodičů. K tomuto účelu se obvykle využívají nevyužívané páry, případně mohou být využity páry používané k přenosu signálu. Přenášený signál je pak modulován na napájecím napětí. V případě vyšších výkonových nároků napájeného zařízení mohou být využity obě metody, tedy k napájení budou využity všechny 4 páry vodičů.

Vzhledem k rozmachu 1000BASE-T Ethernetu nelze první popsany způsob použít, protože jsou využity všechny páry vodičů. Přenos napájecího napětí je tedy možný pouze po vodičích, které jsou použity i k přenosu dat. Napájecí napětí je pak injektováno doprostřed vinutí mikro transformátoru, který galvanicky odděluje Ethernet od zbytku zařízení. Stejným způsobem je napájení odebíráno na straně napájeného zařízení. [16] [2]



Obrázek 2.4. Schéma jedné z možností napájení PoE. Převzato z [16]

2.3.3 Vlastnosti

Zařízení pracující s technologií Power over Ethernet využívají k vzájemné komunikaci lokální počítačovou síť. Komunikace nutná k zajištění napájení je řešena analogovou signalizací. Mezi další vlastnosti PoE patří:

- Využití kabelových rozvodů Cat5 nebo Cat6
- Společný kabel pro přenos dat i napájení, který zjednodušuje instalaci
- Přenášený výkon až 15,4 W, PoE+ může poskytnout až 30 W, v budoucnu až 100 W
- Stejnoseměrné napájecí napětí 44 – 57 V
- Použitelná vzdálenost jsou desítky metrů, záleží na kvalitě použitého kabelu

Technologie PoE byla původně vyvinuta pro zařízení jako IP telefony, Wi-Fi přístupové body, IP kamery, zabezpečovací systémy, vzdálené senzory a další elektroniku s velmi malým příkonem. V ranné fázi umožňovala specifikace PoE přenášet pouze jednotky Wattů, potřebný příkon svítidel byl přitom mnohonásobně vyšší. Současná LED svítidla disponují mnohem vyšším měrným výkonem, který se stále zvyšuje. Zároveň novější specifikace PoE disponují takovým přenášeným výkonem, který je pro LED svítidla dostačující. Vzhledem ke komunikačním schopnostem zařízení v LAN síti se nabízí možnost použití světelných scén, regulace jasu svítidel v závislosti na denním osvětlení, regulace tunable white svítidel a RGB svítidel a sběr a přenos dat ze senzorů.

V LAN síti využívající Power over Ethernet se mohou nacházet tato zařízení:

- Řídící jednotka – zařízení, které musí být přímo připojeno do PoE switchu k zajištění správné funkce dalších zařízení
- PoE switch – zařízení zajišťující napájení jednotlivých zřízení a obousměrnou komunikaci

- Přímá zátěž – napájené zařízení připojené Ethernetovým kabelem přímo do switche (svítidla)
- Nepřímá zátěž – napájené zařízení připojené do switche přes přímou zátěž, je přímo spojeno kabelem pouze s přímou zátěží (vhodné pro senzory nebo svítidla s velmi malým příkonem)
- Senzory

[15] [2]

Kapitola 3

Moderní svítidla a stínící technika

Různé druhy zdrojů bílého světla mají rozdílnou teplotu chromatičnosti. Teplota chromatičnosti bílého světla odpovídá teplotě absolutně černého tělesa, které by vyzařovalo světlo s podobným spektrem. Teplota chromatičnosti přirozeného světla se během dne mění v závislosti na úhlu dopadajícího světla a na počasí. Sluneční světlo má tedy v poledne výrazně vyšší teplotu chromatičnosti než při východu či západu slunce. Vnitřní biologické hodiny člověka jsou řízeny světlem, především jeho modrou složkou. Obsah modré složky světla je přímo úměrný teplotě chromatičnosti. Lze tedy konstatovat, že teplota chromatičnosti světla má přímý vliv na lidský organismus. Světlo s vyšší barevnou teplotou podporuje koncentraci a příznivě ovlivňuje produktivitu člověka. Jeho nadměrné dlouhodobé působení může vyvolat až depresivní stavy. V období klidu je naopak vhodné osvětlení s nižší teplotou chromatičnosti. [17]

S nástupem moderních LED svítidel se naskytuje možnost regulovat teplotu chromatičnosti podle denní doby a podle současných potřeb. Zároveň je možné vytvářet světelné scény a lépe kombinovat umělé osvětlení s přirozeným světlem. [2]

3.1 Tunable white svítidla

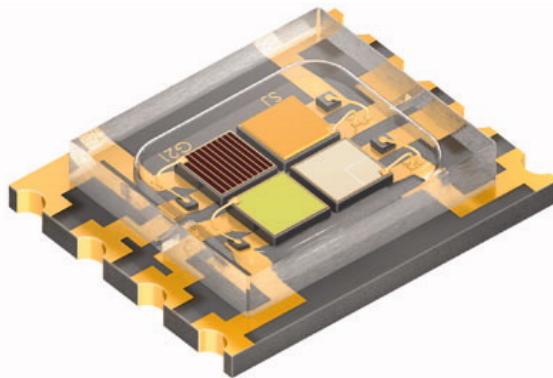
Svítidla s proměnnou barvou bílého světla (označovaná jako tunable white svítidla) obsahují obvykle 2 sady LED světelných zdrojů s různou teplotou chromatičnosti. Míšením světla lze docílit nastavením libovolné teploty chromatičnosti v rozmezí stanoveném teplotou chromatičnosti použitých zdrojů. K tomu je potřeba regulovat výkon každé sady LED zvlášť.

Nejjednodušší tunable white svítidla využívají 2 samostatné linie, například LED pásy. Použité světelné zdroje mívají teplotu chromatičnosti například 2700 K a 6000 K. Tyto teploty chromatičnosti jsou hraniční pro výsledné světlo. Sofistikovanější systémy obsahují oba světelné zdroje na jednom čipu, čímž je zajištěno lepší míchání barev. [18] [2]

3.2 RGB svítidla

Aditivním mícháním červeného, zeleného a modrého světla lze vytvořit téměř libovolnou barvu. Při určitém poměru míchaných složek vznikne světlo bílé barvy o požadované teplotě chromatičnosti. RGB svítidla je možné také využít například k architektonickému a dekorativnímu osvětlení, kde se nabízí prostor pro vytváření barevných světelných scén. RGB svítidla mohou využívat jak samostatné barevné LED, tak kompaktní LED moduly zajišťující mnohem lepší promíchání barevných složek.

Kromě RGB svítidel jsou také často používaná RGBW a RGBA svítidla. RGBW svítidla kromě červené, zelené a modré obsahují i bílou LED, v případě RGBA svítidel je čtvrtou barvou žlutá. Tím je docíleno dosažení lepšího indexu podání barev. [2]



Obrázek 3.1. Modul obsahující červenou, zelenou, modrou a bílou LED. Převzato z [19]

3.3 Stínicí technika

Stínicí technika instalovaná na budově zajišťuje, aby do interiéru nepronikala přímá, případně i difúzní složka slunečního záření. Pojem stínicí technika zahrnuje žaluzie, rolety, markýzy, akční členy a řídicí systémy včetně příslušných senzorů. Stínicí technika výrazně ovlivňuje solární tepelné zisky budovy a využití přirozeného světla. Z tohoto důvodu je vhodné kombinovat řízení stínicí techniky s řízením osvětlovacích soustav.

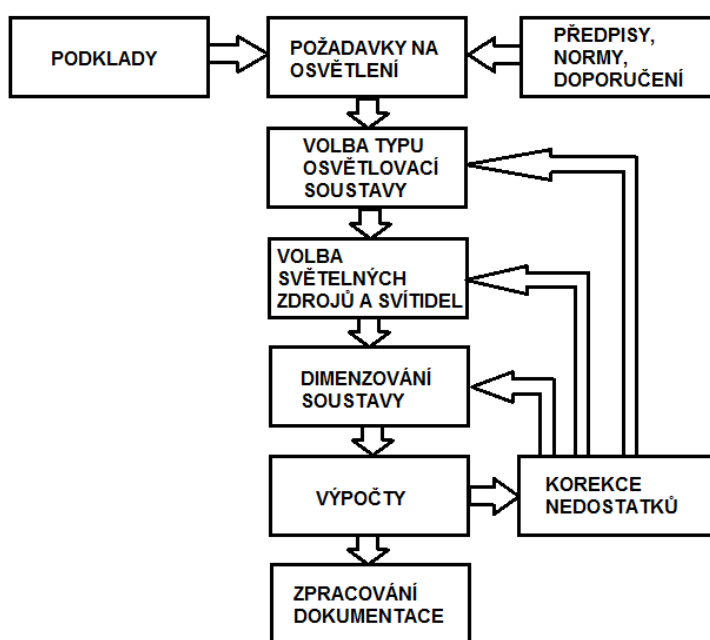
K řízení stínicí techniky je vhodné použít protokol KNX. V něm jsou definovány funkce k řízení pohybu akčních členů a komunikaci se senzory. [11] Z popisovaných systémů lze dále využít EIB, který je však zastaralý a jedná se o předchůdce KNX. Použití protokolů DALI, DMX 512 a DSI není prakticky možné, jsou určeny pouze k řízení svítidel či světelných efektů. Analogové řízení napětím 0 – 10 V není k řízení stínicí techniky vhodné především z důvodu absence zpětné vazby. Využití technologie PoE není k napájení akčních členů vhodné, protože disponuje poměrně malým dostupným výkonem. Lze ji však aplikovat k zajištění napájení senzorů a sběru dat.

Akční členy zajišťují například vytahování a stahování rolet nebo natáčení lamel vnějších žaluzií. Sensory jsou důležité k měření exteriérové osvětlenosti a rychlosti větru. Při vysokých rychlostech větru je potřeba rolety či vnější žaluzie automaticky vytáhnout, aby nedošlo k jejich poškození. Vhodnou kombinací řízení stínicí techniky a osvětlovacích soustav je možné dosáhnout v kontrolní rovině interiéru budovy požadované osvětlenosti se současným zamezením vniku přímé složky slunečního světla a minimalizovat energetickou náročnost osvětlovací soustavy. [2]

Kapitola 4

Návrh osvětlovací soustavy

Návrh osvětlovací soustavy je proces, při němž je na základě podkladů, požadavků investora, norem, předpisů a doporučení vytvořena dokumentace k uvažované soustavě zahrnující výpočty světelně technických veličin. Postup návrhu osvětlovací soustavy je detailně znázorněn vývojovým diagramem. [20]



Obrázek 4.1. Postup návrhu osvětlovací soustavy. [20]

4.1 Rozbor požadavků

Objektem, pro který je navrhována osvětlovací soustava je průmyslová hala pro automobilový průmysl, konkrétně pro výrobu motorů a převodovek. Z toho vyplývají i práce, které budou v osvětlovaném prostoru prováděny. Jedná se o montáž, obrábění a expedici. V tabulce jsou uvedeny požadavky na střední udržovanou osvětlenost, činitele oslnění, index podání barev a rovnoměrnost osvětlení pro vybrané prostory a činnosti dle TNI 36 0451.

Hala je určena pro nepřetržitý provoz, předpokládá se částečné využití denního osvětlení. Lze tedy ve výpočtech uvažovat dobu svícení 7300 hodin ročně [21]. Dále je uvažován předpoklad, že nefunkční světelné zdroje budou okamžitě vyměněny.

Interval údržby ploch místností je 1 rok, je i zadána hodnota udržovacího činitele místnosti 0,98 a specifikace prostředí jako čisté.

V hale jsou primárně 4 místnosti, jejichž výška je 11 m. Požadovaná výška zavěšení svítidel je 7,5 m. Uvnitř jsou umístěny další objekty kancelářského typu s nižší výškou.

Prostory	Um [lx]	UGR	Ra	Uo	Poznámka
Chodby	100	28	40	0,4	Na podlaze, 150 lx při pohybu vozidel
Sklady a zásobárny	100	25	60	0,4	Při trvalé přítomnosti osob 200 lx
Hrubé obrábění	300	22	80	0,6	
Montáž střední	300	25	80	0,6	
Svařování	300	25	80	0,6	
Expedice a balírny	300	25	60	0,6	

Tabulka 4.1. Požadavky na svícení technické parametry vybraných prostor. [21]

Místností uvnitř těchto objektů se tento návrh osvětlovací soustavy netýká, je však třeba brát v úvahu jejich vnější geometrii a vliv na osvětlení. Hala je vybavena střešními světélky k využití denního světla.

Uvnitř jedné z místností je plocha určena pro expedici, kde je nad rámec příslušných norem a doporučení požadovaná střední udržovaná osvětlenost 500 lx. V ostatních prostorech jsou umístěny výpočtové plochy s okrajovou zónou 2 m, které s ohledem na tabulku světelně technických požadavků počítají s hodnotami střední udržované osvětlenosti 300 lx, činitele oslnění 22, indexu podání barev 80 a rovnoměrností osvětlení 0,6.

Vzhledem k předpokládanému umístění svítidel do obtížně přístupných míst je vyžadována co nejdelší životnost světelných zdrojů. V provozu budou mimo jiné nasazeny stroje s rotujícími částmi. Není tedy přípustné, aby světelné zdroje viditelně blikaly a způsobovaly tak stroboskopický efekt. [20]

4.2 Výběr vhodných svítidel

Prvotním kritériem pro výběr vhodných svítidel je požadavek na jejich umístění. Svítidla musí být závěsná, budou zavěšeny ve výšce 7,5 m (výška haly je 11 m). Další požadavek vychází z požadavku na řízení osvětlovací soustavy. Jako vhodný komunikační protokol jsem zvolil DALI. Protože je cílem celého projektu navrzení normám a požadavkům vyhovující osvětlovací soustavy s ekonomicky úsporným provozem, vybral jsem jako vhodný typ světelného zdroje LED. Svítivé diody (LED) dosahují vysokého měrného výkonu. Navíc mají oproti jiným světelným zdrojům výrazně delší životnost, což ušetří náklady spojené s častější výměnou světelných zdrojů v případě jiných technologií. Obvyklé vlastnosti v dnešní době používaných LED jsou:

- Měrný výkon cca 100 – 160 lm/W (závisí na provozní teplotě a zatížení, s vyšší teplotou a zatížením klesá)
- Životnost 30 000 – 80 000 hodin (silně závisí na provozní teplotě, s vyšší teplotou klesá)
- Teplota chromatičnosti 2700 – 6000 K
- Index podání barev 80
- Provozní teplota cca -40 °C až 80 °C
- Snadná regulovatelnost výkonu

Výška zavěšení 7,5 m umožňuje použití menšího množství velmi výkonných svítidel. Tím lze snížit náklady na instalaci osvětlovací soustavy, údržbu svítidel a řídicí systém. To, jak výkonná svítidla lze použít při dodržení předepsaných parametrů (rovnoměrnost osvětlení, činitel oslnění) bylo experimentálně ověřeno v návrhovém programu DIALux. Podstatná je v tomto ohledu také vyzařovací charakteristika svítidla.

Mezi provozní náklady patří kromě nákladů na elektřinu i náklady na pravidelnou údržbu svítidel spočívající v jejich kontrole a čištění. Z tohoto důvodu jsou vhodná svítidla s vysokou odolností vůči usazování prachu, ideálně s krytím IP5x nebo vyšším. [20]

4.2.1 Vyrtych DUNKER65-LED

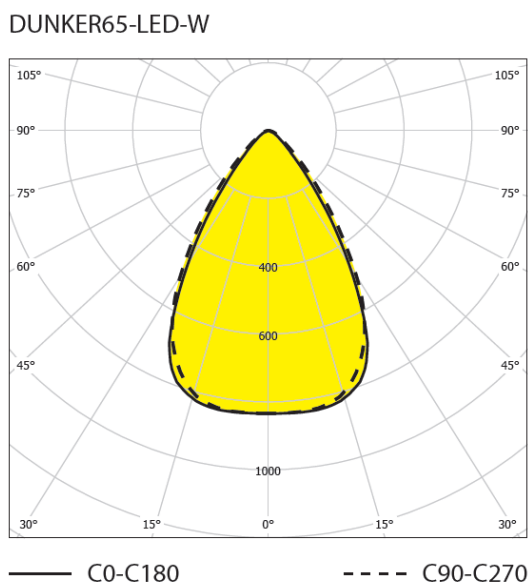
Na základě výše uvedených úvah bylo vybráno svítidlo DUNKER65-LED-W12-20950-4K od výrobce Vyrtych. Svítidlo má tyto parametry:

Světelný tok svítidla	18527 lm
Příkon svítidla	148 W
Teplota chromatičnosti	4000 K
Stupeň krytí	IP 65
Vyzařovací úhel	60°
Životnost LED L50B80	50 000 hodin (při provozní teplotě 35 °C)
Rozměry	1278 x 405 x 70 mm
Provozní teplota	-20 °C až 40 °C

Tabulka 4.2. Parametry svítidla. [22]

Svítidlo je možné na objednávku vybavit DALI předřadníkem.

Mezi důležité parametry patří také jeho vyzařovací charakteristika, která je v tomto případě v obou rovinách téměř shodná. [20]



Obrázek 4.2. Vyzařovací charakteristika svítidla. Převzato z [22]

4.3 Stanovení udržovacího činitele

Vlivem znečištění osvětlovaného prostoru, stárnutí svítidel a dalších faktorů dochází průběžně ke snižování osvětlenosti. Tento projev lze do jisté míry kompenzovat vhodnou údržbou, která zahrnuje pravidelné čištění svítidel, výměnu nefunkčních světelných zdrojů a čištění či obnovu ploch místnosti. Údržbu je potřeba plánovat již ve stádiu projektování soustavy a v návaznosti na ní zajistit dostatečné dimenzování světelných

zdrojů. K údržbě osvětlovací soustavy musí být vytvořeny všechny potřebné podklady, jako montážní postupy či plán údržby.

V průmyslových provozech je výhodné připojovat svítidla tak, aby při individuální údržbě zůstala převážná část osvětlení v provozu. Aby se omezila pravděpodobnost výskytu poruch v obtížně přístupných místech, je výhodné např. předřadníky umístit do snadno přístupných míst.

Míru degradace svítidel a znečištění povrchů určuje udržovací činitel. Ten se skládá z dílčích činitelů reprezentujících jednotlivé vlivy.

[17]

$$MF = LLMF \cdot LMF \cdot RSMF \cdot LSF \quad (4.1)$$

kde

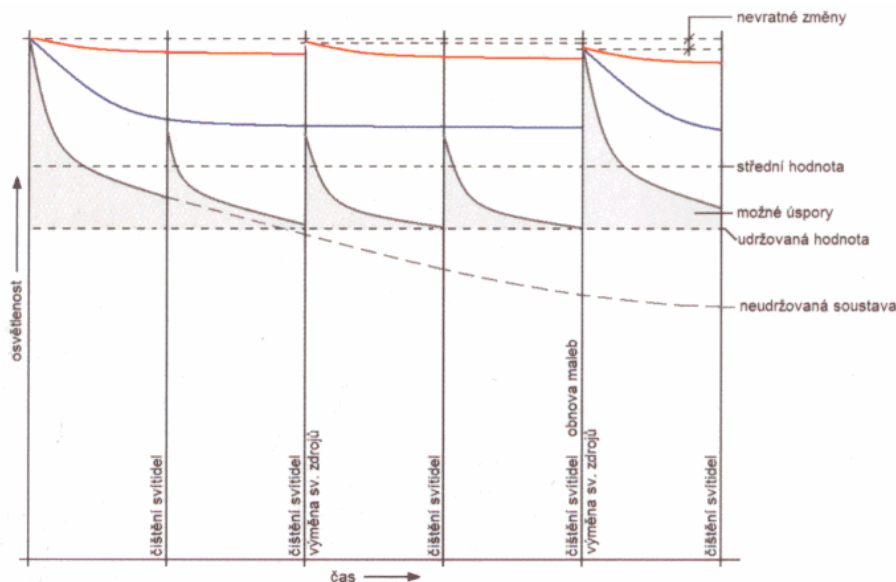
- MF ... Udržovací činitel
- $LLMF$... Činitel stárnutí světelného zdroje
- LMF ... Udržovací činitel svítidla
- $RSMF$... Udržovací činitel povrchů
- LSF ... Činitel funkční spolehlivosti světelného zdroje

[21]

Jinými slovy udržovací činitel říká, na kolik procent původní hodnoty klesne osvětlenost prostoru během provozu osvětlovací soustavy. Příliš nízké hodnoty udržovacího činitele tedy zvyšují energetickou náročnost soustavy.

Dle normy ČSN EN 12464-1 musí být udržovací činitel MF větší než 0,5. [23]

Příklad časového průběhu osvětlenosti udržované soustavy je znázorněn na obrázku. [20]



Obrázek 4.3. Průběh udržovacího činitele. Převzato z [24]

■ 4.3.1 Činitel stárnutí světelných zdrojů

Činitel stárnutí světelných zdrojů popisuje postupné snižování světelného toku, označuje se jako $LLMF$. Závisí především na druhu světelného zdroje, jeho hodnota se obvykle určuje z údajů výrobce.

U LED svítidel je obvykle udávána jejich životnost v hodinách se specifikací ve tvaru LxxByy, kde číslo xx procentuálně vyjadřuje podíl světelného toku světelného zdroje po daném počtu hodin a světelného toku nového světelného zdroje. Číslo yy určuje, kolik procent světelných zdrojů po tomto počtu hodin splňuje tyto podmínky. Tato specifikace je platná při dané teplotě okolního vzduchu.

V případě zde vybraných svítidel je udávána jejich životnost 50 000 hodin L80B10 při 35 °C. Soustava je navrhovaná s intervalem výměny svítidel 6 let a dobou svícení 7300 hodin ročně. Svítidlo bude svítit celkem 43 800 hodin, po této době tedy bude mít více než 80 % původního světelného toku. Teplota prostředí se očekává nižší než 35 °C, což může mít pouze pozitivní vliv na životnost světelných zdrojů (životnost LED se s klesající teplotou prodlužuje). Činitel stárnutí světelných zdrojů tedy bude větší než 0,8. [20]

■ 4.3.2 Udržovací činitel svítidel

Udržovací činitel svítidla charakterizuje pokles světelného toku svítidla vlivem nečistot, usazených za určité období na světelných zdrojích a optických částech svítidel. Míra tohoto poklesu závisí na konstrukci a materiálech svítidla, na jeho poloze a orientaci, povrchové teplotě, proudění vzduchu a na stupni znečištění a charakteru nečistot obsažených ve vzduchu. Obecně platí, že černé nečistoty a prach způsobují Největší ztrátu světla.

Pokles světelného toku lze omezit vhodnou volbou svítidla pro daný charakter prostředí. Ve svítidlech s výstupním otvorem bez krytu a uzavřenou zadní konstrukcí dochází k většímu usazování prachu než ve svítidlech provětrávaných. V provětrávaných svítidlech, kde může proud vzduchu unášet prach a nečistoty otvory v horních částech svítidla ven ze svítidla, nedochází k usazování a hromadění prachu a nečistot na optických částech svítidla a světelných zdrojích. V prostředí s vysokým stupněm znečištění se upřednostňuje použití svítidel s vyšším krytím optických částí, alespoň IP 54.

Odolnost proti usazování prachu a nečistot je ovlivněna také materiálem optických částí a jejich povrchovou úpravou. Například eloxovaný hliník je v porovnání s bílým smaltem odolnější proti usazování nečistot, ale smalt má větší činitel odrazu a snadněji se čistí.

Usazování prachu na optických částech svítidla má rovněž vliv na rozložení svítivosti. Vrstva prachových částic může změnit zrcadlovou plochu na matnou nebo prismatický refraktor na difuzor. [17]

Pro potřeby určení udržovacího činitele se rozlišuje 7 kategorií svítidel. Určují, jak je svítidlo náchylné k usazování prachu na světelných zdrojích a optických částech svítidla.

- A – s necloněným zdrojem
- B – bez horního krytu (přirozené větrání)
- C – s horním krytem (nevětrané)
- D – uzavřené IP2x
- E – chráněné proti prachu IP5x
- F – uzavřené nepřímé (uplight)
- G – s řízenou klimatizací

[21]

Udržovací činitel svítidla je dále závislý na intervalu jejich čištění. Závislost je dána tabulkou.

TNI 36 045 také udává doporučený interval čištění svítidel v závislosti čistoty prostředí (velmi čisté, čisté, normální a špinavé) na kategorii svítidla. Svítidla některých kategorií se vůbec nedoporučuje použít ve špinavém prostředí.

Kategorie	0,5 roku	1 rok	1,5 roku	2 roky	2,5 roku	3 roky
A	0,98	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92
B	0,96	0,95	0,94	0,92	0,91	0,89
C	0,95	0,94	0,93	0,91	0,89	0,87
D	0,94	0,94	0,93	0,91	0,90	0,89
E	0,94	0,96	0,92	0,93	0,92	0,92
F	0,94	0,93	0,91	0,83	0,86	0,85
G	1	1	0,99	0,99	0,98	0,98

Tabulka 4.3. Závislost udržovacího činitele svítidla na kategorii svítidla a intervalu čištění. [21]

Kategorie	Velmi čisté	Čisté	Normální	Špinavé
A	3	3	2	1
B	3	3	1	-
C	3 (2)	3 (2)	1	-
D	3 (2)	3 (2)	1	-
E	3	3	3	2
F	2 (1)	2 (1)	1	-
G	3	3	3	2

Tabulka 4.4. Doporučený interval čištění. [21]

V případě zde navrhované osvětlovací soustavy průmyslové haly se jedná o prostředí čisté. Vybrané svítidlo má stupeň krytí IP 65, splňuje tedy požadavky na prachotěsnost svítidel kategorie E. Dle tabulky je doporučený interval čištění svítidel 3 roky. Pro tyto podmínky tabulka určuje hodnotu udržovacího činitele svítidel 0,92. [20]

4.3.3 Udržovací činitel povrchů

Ke snižování činitele odrazu světla stěn dochází vlivem usazování prachu a jiných nečistot. To má za následek pokles osvětlenosti místnosti vlivem snížení odražené složky světla. Udržovací činitel povrchů místnosti je závislý na činitelích odrazu světla všech stěn, podlahy a stropu místnosti a na rozměrech osvětlované místnosti. Vliv činitele odrazu světla povrchů místnosti se nejvýrazněji projeví v malých místnostech, kde je významná odražená složka světla. V případě velkých místností má vliv minimální. Čistota povrchů místnosti také přispívá k jasové rovnováze.

Vliv postupného snižování činitele odrazu světla povrchů místnosti lze minimalizovat pravidelným čištěním a obnovou povrchů, tedy výmalbou stěn a stropu. Interval obnovy povrchů by měl být kratší v místnostech, jejichž rozměry jsou menší a odražená složka má větší vliv na celkovou osvětlenost. V některých případech je častější obnova povrchů dána příslušnou legislativou pro hygienické požadavky.

[17]

V případě průmyslové haly, pro kterou je zde navrhovaná osvětlovací soustava, je již zadána hodnota udržovacího činitele povrchů 0,98. [20]

4.3.4 Činitel funkční spolehlivosti světelného zdroje

Činitel funkční spolehlivosti popisuje selhávání světelných zdrojů během provozu. Obvykle se stanovuje podle údajů výrobce. V některých případech se stanovuje linearizací

skutečného průběhu tak, že se po dobu $2/3$ životnosti světelného zdroje uvažuje činitel funkční spolehlivosti $LSF = 1$ a poté se předpokládá lineární snižování hodnoty podle vztahu

$$LSF = 2 - 1,5 \frac{t}{t_z} \quad (4.2)$$

Kde t se mění od $2/3 t_z$ do $4/3 t_z$, pro $t = t_z$ je $LSF = 0,5$ a pro $t > 4/3 t_z$ je $LSF = 0$.

[17]

V případě zde navrhované osvětlovací soustavy průmyslové haly je zajištěna okamžitá výměna vadného světelného zdroje, nedochází ke snižování kvantitativních vlastností osvětlovací soustavy. Činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů je pak roven 1. [20]

4.4 Výpočet v programu DIALux

DIALux je profesionální bezplatný software určený k návrhu osvětlovacích soustav a výpočtu světelně technických parametrů. Umožňuje vytvoření 3D modelu osvětlovaných vnitřních i venkovních prostor. Do programu lze importovat soubory s parametry svítidel, které obvykle poskytuje jejich výrobce. [25] [20]

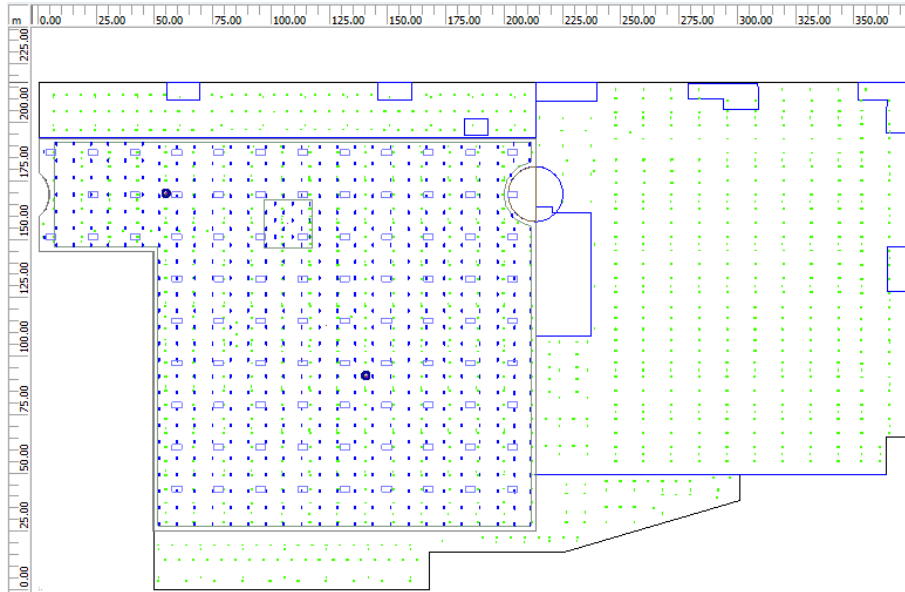
4.4.1 Modelování osvětlovaného prostoru

S programem DIALux lze vytvořit místnosti a specifikovat jejich výšku, tvar půdorysu a délky jednotlivých stěn. V případě potřeby vytvoření složitějších tvarů lze přidat různé prostorové geometrické útvary. V tomto případě byl využit soubor s technickým výkresem půdorysu budovy a jednotlivých místností (*.dwg), který lze importovat do DIALuxu. Na základě importovaného půdorysu byly namodelovány stěny, podle dalších podkladů pak objekty uvnitř haly, okna a střešní světlíky. U veškerých ploch místnosti lze zadat jejich činitel odrazu. Zadané hodnoty jsou:

Typ plochy	Stupeň odrazu [%]
Podlaha	30
Stěny, vnitřní objekty	50
Strop	50

Tabulka 4.5. Vlastnosti ploch místnosti.

Půdorys modelovaného objektu je znázorněn na obrázku.



Obrázek 4.4. Půdorys modelované budovy.

Jelikož nejsou k dispozici veškeré podklady k modelované budově, byl uvažován standardizovaný rozměr světlíku 4,1 x 2,4 m s činitelem prostupu světla 0,6. Činitel prostupu světla výplní oken byl stanoven 0,9. Natočení objektu vůči světovým stranám a zeměpisné souřadnice byly stanoveny z mapových podkladů.

Do jednotlivých místností byly vloženy výpočtové plochy ve výšce 0,75 m s okrajovou zónou 2 m. [20]

4.4.2 Rozmístění svítidel a výpočet světelně technických parametrů

Dolní odhad potřebného světelného toku pro osvětlení jednotlivých místností byl přibližně spočítán ze vztahu

$$\phi = E \cdot S \quad (4.3)$$

kde

- ϕ ... světelný tok [lm]
- E ... Osvětlenost [lx]
- S ... plocha místnosti [m²]

Ve výpočtu byla uvažována intenzita osvětlení 300 lx. Světelný tok jednoho svítidla je 19 545 lm, lze tedy dopočítat dolní odhad počtu svítidel

$$n = \frac{\phi_m}{\phi_s} \quad (4.4)$$

kde

- n ... počet svítidel v místnosti
- ϕ_m ... potřebný světelný tok pro danou místnost
- ϕ_s ... světelný tok svítidla

Vypočítaný počet svítidel byl rovnoměrně rozložen v jednotlivých místnostech a dále byly experimentálně prováděny úpravy polohy a počtu svítidel tak, aby byly splněny požadavky na minimální hodnotu střední udržované osvětlenosti a maximální hodnotu činitele oslnění (UGR).

Číslo místnosti	S [m ²]	fi m [lm]	n [-]
1	29785	8935500	457
2	5421	1626300	83
3	26539	7961700	407
4	5095	1528500	78

Tabulka 4.6. Vypočítané hodnoty.

Vyobrazení jednotlivých místností a světelně technické výsledky jsou uvedeny v samostatném dokumentu výpočet.pdf na příloženém CD. [20]

Kapitola 5

Návrh řízení osvětlení

Řízení osvětlovací soustavy je ovládání nebo regulace jednotlivých svítidel tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. Hlavním důvodem řízení osvětlovací soustavy bývá ekonomičnost provozu. Výkon svítidel lze regulovat například v závislosti na úrovni denního osvětlení, podle aktuálních požadavků na využití osvětlovaného prostoru nebo lze kompenzovat snižování osvětlenosti vlivem stárnutí světelných zdrojů, znečištěním ploch místnosti, znečištěním svítidel a funkčním selháním světelných zdrojů. V minulosti sloužilo řízení osvětlovacích soustav především k přizpůsobení jasů situaci změnou napájecího napětí. V dnešní době slouží řízení především ke snížení provozních nákladů a jsou k tomuto účelu využívány moderní elektronické předřadníky. Systémy řízení osvětlení mohou být propojeny s řízením dalších prvků v budově, jako je stínící technika, vytápění, vzduchotechnika a další. Řízené systémy mohou také vhodně reagovat na přítomnost osob v osvětlovaném prostoru. Mezi požadavky na systém řízení osvětlení patří:

- Komfort řízení – s použitím senzorů a ovládacích prvků umožňuje uživateli pohodlně ovládat osvětlovací soustavu
- Úspora elektrické energie – při optimálním využití světla, sledování přítomnosti osob a regulace výkonu svítidel dle aktuální potřeby umožňuje systém řízení osvětlovací soustavy dosáhnout významných úspor provozních nákladů
- Flexibilita – systém se dokáže přizpůsobit požadavkům uživatele
- Přesnost a funkčnost systému – závisí na kvalitě návrhu, kvalitě použitých senzorů a dalších prvků
- Pořizovací náklady – náklady na pořízení řídicího systému by měly být adekvátní vzhledem k možným úsporám provozních nákladů

Regulovat osvětlovací soustavu lze pomocí spínačů, nebo pomocí stmívačů.

- Regulace pomocí spínačů – Jedná se o starší způsob regulace osvětlovací soustavy, přesto může přinést významné úspory provozních nákladů. Jednotlivá svítidla, případně části svítidel nebo celé skupiny svítidel lze spínat například vypínačem nebo senzorem přítomnosti osob. Nevýhodou tohoto způsobu je nemožnost plynulé regulace.
- Regulace pomocí stmívačů – Moderní způsob řízení osvětlení. Umožňuje plynule regulovat skupiny svítidel či jednotlivá svítidla v závislosti na okolních podmínkách a aktuální potřebě. Možné úspory provozních nákladů jsou obvykle vyšší než v případě regulace pomocí spínačů. Nevýhodou je vhodnost pouze pro některé typy světelných zdrojů.

[26] [20]

5.1 Denní osvětlení budov

Jedním z hlavních požadavků návrhu osvětlení je zraková pohoda uživatelů budovy. Návrhem lze docílit přístupu světla do místnosti a vytvořit tak zrakovou pohodu, tedy vhodné podmínky pro činnost konanou ve vnitřním prostoru.

Denní osvětlení je vhodné především s ohledem na jeho biodynamiku, protože řídí biologické hodiny organismu. Teplota chromatičnosti denního světla, které se v průběhu dne mění, ovlivňuje hladiny hormonů způsobující ospalost, únavu či bdělost. Pravidelný cyklus přirozeného osvětlení je důležitý i pro zdraví člověka.

Světlo je nositelem informace při provádění zrakového úkonu. Jeho množství a kvalita ovlivňuje správnost rozpoznávání předmětů a vytváření úsudku. Pro různé zrakové úkony jsou předepsány různé požadavky na intenzitu osvětlení, rovnoměrnost osvětlení a index podání barev. Hlavními důvody využití denního světla jsou:

- Zdravotní
- Ekonomický
- Ekologický

V nově navrhovaných budovách musí mít vyhovující denní osvětlení tyto prostory:

- Obytné místnosti domů a bytů
- Ložnice a pokoje pro dlouhodobé obývání a rekreaci
- Denní místnosti zařízení pro předškolní výchovu
- Učebny škol, s výjimkou speciálních poslucháren
- Vyšetřovny a lůžkové místnosti zdravotnických zařízení
- Místnosti pro oddech a jídelny určené pro uživatele prostorů bez denního světla

[27] [20]

5.1.1 Osvětlovací systémy denního osvětlení budov

Denní světlo lze využít různými osvětlovacími systémy, které se dělí podle způsobu prostupu světla do interiéru budovy. Je tvořeno patřičnými průhlednými či průsvitnými otvory. Druhy osvětlovacích systémů jsou:

- Boční – světlo proniká do interiéru okny, která jsou umístěna v obvodových stěnách mé střeše k osvětlení podkrovních místností.
- Horní – Světlo proniká do interiéru světlíky umístěnými na střeše objektu, případně mohou být využity světlovody. Tento osvětlovací systém je účinnější než boční osvětlení, ale bude u něj problematické zajištění požadované rovnoměrnosti osvětlení.
- Kombinovaný – Využívá horní i boční osvětlení. Doporučuje se především v případech, kdy předmět zrakové činnosti má velké rozměry. Jeho použití je omezené.

[27] [20]

5.1.2 Sdružené osvětlení

Sdružené osvětlení je kombinací denního a umělého osvětlení. Je vytvářeno záměrně tam, kde denní osvětlení samostatně nedokáže zajistit požadované parametry osvětlení. Z hlediska biologických účinků na člověka není sdružené osvětlení rovnocenné denním osvětlením, je však vhodnější než čistě umělé osvětlení.

Využití sdruženého osvětlení v novostavbách, kde je požadováno umělé osvětlení lze pouze v odůvodněných případech, například pokud použití pouze denního osvětlení

neumožňuje konstrukce budovy nebo provoz uvnitř osvětlované budovy. U rekonstrukcí budov je možné použít celkové sdružené osvětlení pouze tam, kde původní čistě denní osvětlení nevyhovovalo požadavkům a použitím sdruženého osvětlení dojde ke zlepšení světelně technických parametrů.

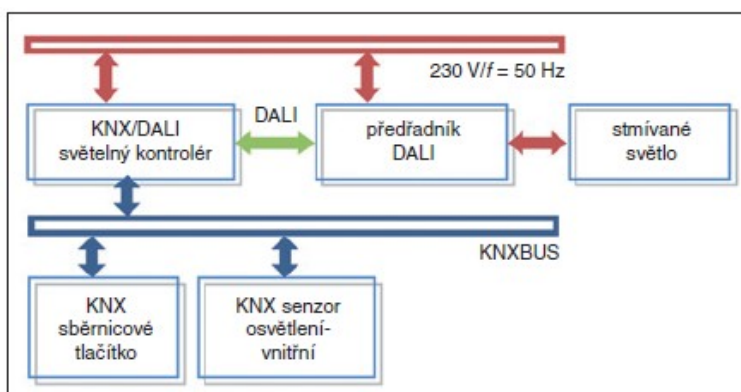
Návrh sdruženého osvětlení by měl být takový, aby využíval denní světlo v co nejvyšší míře a umožňoval co nejehospodárnější provoz umělé osvětlovací soustavy. U bočních oken by měl být zachován vizuální kontakt s okolním prostředím, obvykle se tedy volí průhledné výplně. V případě světlíků na střeše budovy je vhodné použití matných materiálů, které způsobí alespoň částečný rozptyl přímé složky slunečního světla.

Při návrhu sdruženého osvětlení by měl být také brán ohled na tepelné vlastnosti objektu, především na tepelnou stabilitu během letního období a na energetickou náročnost během topné sezóny.

[27] [20]

5.2 Specifikace řídicího systému

Vybraná svítidla mohou být vybavena rozhraním DALI, které umožňuje jejich řízení. Nevýhodami této sběrnice při použití ve velkých osvětlovacích soustavách jsou omezení na maximálně 64 zařízení na jedné sběrnici a maximální délku sběrnice 300 m. Proto je nutné, aby byly skupiny svítidel spojeny do menších DALI sítí a přes bránu připojeny k jinému, nadřazenému systému. Vhodným nadřazeným systémem je KNX. Umožňuje mimo jiné připojení senzorů osvětlenosti a dalších prvků automatizace budovy. Sestavení sběrnic je znázorněno na obrázku.



Obrázek 5.1. Blokové schéma sestavení komponent. Převzato z [28]

Při volbě rozhraní DALI/KNX je v tomto případě vhodné upřednostnit zařízení s více kanály, i za cenu většího omezení počtu zařízení na jednotlivý kanál, než je dáno specifikací DALI. V případě použití DALI/KNX rozhraní s možností připojení 64 zařízení na kanál by byla sběrnice limitována především maximální délkou vedení. Maximální počet připojitelných svítidel by tak nebyl ani zdaleka využit. Pro tuto aplikaci je vhodné použití osminásobného rozhraní DALI/KNX od ABB. Každý kanál je fyzicky samostatná sběrnice umožňující připojit 16 zařízení. Lze tak připojit celkem 128 svítidel a ani v případě navržené osvětlovací soustavy nebude limitem délka sběrnic.



Obrázek 5.2. Osmikanélové KNX/DALI rozhraní. Převzato z [29]

K řízení osvětlovací soustavy je důležitá zpětná vazba poskytovaná senzory osvětlení. Lze je připojit přímo do systému KNX bez nutnosti použití bran. Jejich počet, stejně jako počet potřebných DALI/KNX bran bude specifikován při návrhu řídicích algoritmů.

Řídicí systém bude dále doplněn o ovládací prvky, napájecí zdroje, vizualizaci a další. [20]

5.3 Výpočet denní složky osvětlení

Jednotlivé místnosti uvažované výrobní haly jsou vybaveny kombinovaným osvětlovacím systémem, výrazně však převládá horní osvětlení pomocí světlíků umístěných na střeše budovy. S využitím programu DIALux byla vypočítána denní složka osvětlení pro 21. března 11 hodin při zatažené obloze. Toto datum se obvykle využívá k posuzování oslunění obytných budov, zde byl využit pro jeho „průměrnost“ v rámci roku vzhledem k osvětlenosti a pro názornou demonstraci výsledků.

Systém denního osvětlení této haly neumožňuje samostatně zajistit požadovanou osvětlenost, jedná se tedy o sdružené osvětlení.

Na základě výsledků byl pro každou místnost vypočítán činitel denní osvětlenosti dle vztahu

$$D = \frac{E_{INT}}{E_{EXT}} \quad (5.1)$$

kde

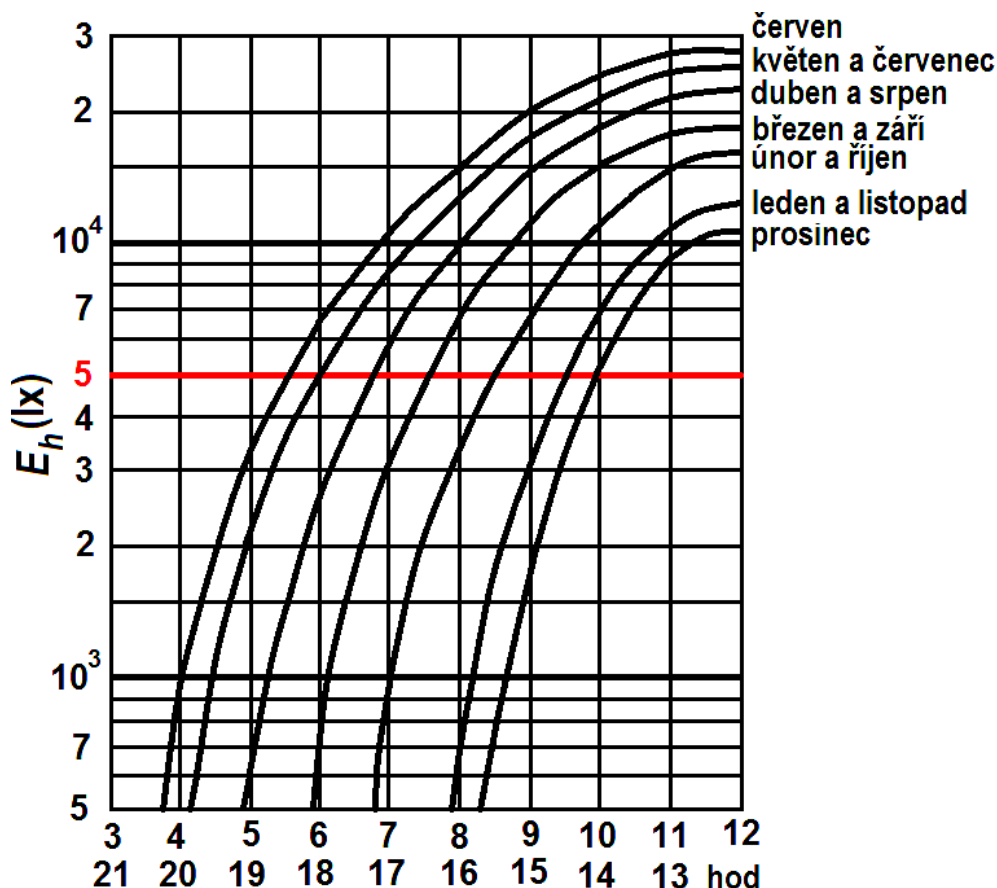
- D .. Činitel denní osvětlenosti
- E_{INT} ... Osvětlenost kontrolní roviny místnosti
- E_{EXT} ... Osvětlenost horizontální exteriérové roviny

Uvažovaná horizontální exteriérová osvětlenost byla 17 500 lx. Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce.

Protože je horizontální exteriérová osvětlenost v průběhu dne i roku proměnná, výpočet pro jeden konkrétní čas v roce nestačí. Průměrné hodnoty horizontální exteriérové osvětlenosti v průběhu roku byly získány z grafu.

	S Eint [lx]	D [%]
Místnost 1	135	0,77
Místnost 2	170	0,97
Místnost 3	154	0,88
Místnost 4	229	1,31

Tabulka 5.1. Denní složka osvětlení.



Obrázek 5.3. Závislost horizontální exteriérové osvětlenosti na měsíci v roce a denní době.
Převzato z [30]

Na základě těchto údajů a vypočítaného činitele denní osvětlenosti byly spočítány pro každou místnost hodnoty osvětlenosti kontrolní roviny. Hodnoty byly spočítány pro každou hodinu v rámci dne a každý měsíc v rámci roku. Porovnáním s požadovaným hygienickým minimem 300 lx (menší plocha v místnosti 3 s požadovanou osvětleností 500 lx zde nebyla uvažována) byla vypočítána potřebná umělá složka osvětlenosti. [20]

5.4 Energetické a ekonomické vyhodnocení

Měrný výkon LED čipů se při nižším výkonu nepatrně zvyšuje, zůstává však nezměněna fixní složka příkonu svítidla. Měrný výkon celého svítidla lze při stmívání tedy považovat za přibližně konstantní. S využitím tohoto předpokladu bylo možné spočítat minimální potřebný příkon osvětlovací soustavy k dosažení požadované hladiny osvětlenosti pro jakoukoliv hodinu v roce, tedy i minimální možnou roční spotřebu

a maximální možnou úsporu elektrické energie oproti stavu, kdy by svítidla nebyla regulována.

V následujících tabulkách je uveden ve Watech potřebný příkon osvětlovací soustavy dané místnosti pro jednotlivé měsíce v roce a pro jednotlivé hodiny v rámci dne (4 – 20). V ostatních hodinách není nikdy k dispozici denní složka osvětlení, počítá se tedy s maximálním příkonem (hodnota je stejná, jako např. v prosinci ve 4 hodiny).

		červen	květen červenec	duben srpen	březen září	únor říjen	leden listopad	prosinec
4	20	83200,18	85396	85396	85396	85396	85396	85396
5	19	78149,81	80784,79	84078,51	85396	85396	85396	85396
6	18	73538,59	74416,92	79686,88	83858,93	85396	85396	85396
7	17	62339,93	69366,54	72440,69	78808,55	83419,77	85396	85396
8	16	52458,76	59046,21	63437,84	70025,29	77930,23	83858,93	85396
9	15	41479,68	48067,13	52458,76	61242,03	70464,45	78808,55	81663,11
10	14	34892,24	39283,87	45871,32	52458,76	62339,93	70025,29	74416,92
11	13	26108,97	30500,6	39283,87	46969,22	52458,76	61242,03	65414,08
12		26108,97	30500,6	37088,05	45871,32	37088,05	59046,21	61242,03

Tabulka 5.2. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 1.

		červen	květen červenec	duben srpen	březen září	únor říjen	leden listopad	prosinec
4	20	16612,1	17168	17168	17168	17168	17168	17168
5	19	15333,53	16000,61	16834,46	17168	17168	17168	17168
6	18	14166,14	14388,5	15722,66	16778,87	17168	17168	17168
7	17	11331,05	13109,93	13888,19	15500,3	16667,69	17168	17168
8	16	8829,502	10497,2	11609	13276,7	15277,94	16778,87	17168
9	15	6050,003	7717,703	8829,502	11053,1	13387,88	15500,3	16222,97
10	14	4382,304	5494,103	7161,803	8829,502	11331,05	13276,7	14388,5
11	13	2158,704	3270,504	5494,103	7439,753	8829,502	11053,1	12109,31
12		2158,704	3270,504	4938,204	7161,803	4938,204	10497,2	11053,1

Tabulka 5.3. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 2.

		červen	květen červenec	duben srpen	březen září	únor říjen	leden listopad	prosinec
4	20	67232,26	69264	69264	69264	69264	69264	69264
5	19	62559,24	64997,34	68044,95	69264	69264	69264	69264
6	18	58292,58	59105,28	63981,47	67841,78	69264	69264	69264
7	17	47930,69	54432,27	57276,71	63168,77	67435,43	69264	69264
8	16	38787,84	44883,07	48946,56	55041,79	62356,07	67841,78	69264
9	15	28629,12	34724,35	38787,84	46914,82	55448,14	63168,77	65810,04
10	14	22533,89	26597,38	32692,61	38787,84	47930,69	55041,79	59105,28
11	13	14406,91	18470,4	26597,38	33708,48	38787,84	46914,82	50775,13
12		14406,91	18470,4	24565,63	32692,61	24565,63	44883,07	46914,82

Tabulka 5.4. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 3.

		červen	červenec	duben srpen	březen září	únor říjen	leden listopad	prosinec
4	20	13446,7	14060	14060	14060	14060	14060	14060
5	19	12036,12	12772,08	13692,02	14060	14060	14060	14060
6	18	10748,2	10993,51	12465,43	13630,69	14060	14060	14060
7	17	7620,379	9582,93	10441,55	12220,11	13508,03	14060	14060
8	16	4860,542	6700,434	7927,028	9766,92	11974,79	13630,69	14060
9	15	1794,056	3633,948	4860,542	7313,731	9889,579	12220,11	13017,39
10	14	0	1180,759	3020,65	4860,542	7620,379	9766,92	10993,51
11	13	0	0	1180,759	3327,299	4860,542	7313,731	8478,995
12		0	0	567,4616	3020,65	567,4616	6700,434	7313,731

Tabulka 5.5. Příkon osvětlovací soustavy v místnosti 4.

Místnost	Roční spotřeba regulované soustavy [kWh]	Roční spotřeba neregulované soustavy [kWh]	Roční úspora [kWh]
Místnost 1	682124	748069	65944
Místnost 2	131531	150392	18861
Místnost 3	540990	606753	65763
Místnost 4	100445	123166	22721
Celkem	1455089	1628379	173289

Tabulka 5.6. Souhrn energetické náročnosti jednotlivých místností.

Celková roční úspora 173 289 kWh je pouze teoretická za předpokladu ideálního využití denního světla. Další výrazných úspor lze dosáhnout snížením příkonu osvětlovací soustavy z počátku jejího provozu a vždy po provedení údržby. Kompenzovalo by se tím předdimenzování soustavy podle udržovacího činitele. [20]

Kapitola 6

Software pro výpočet návratnosti investice do inteligentní osvětlovací soustavy

Poslední dobou dochází k rozmachu systémů pro řízení inteligentních osvětlovacích soustav, které dokáží regulovat výkon svítidel podle exteriérové osvětlenosti a slibují značné úspory elektrické energie a tím i financí. Ne vždy je však nasazení takovýchto systémů výhodné, protože samy o sobě představují velkou investici. Potenciální zákazník si obvykle vlastními silami nedokáže spočítat, jakou úsporu pro něj inteligentní řídicí systém představuje a nedokáže stanovit návratnost investice. Může pak s vidinou úspor investovat do rekonstrukce osvětlovací soustavy a instalace inteligentního řídicího systému. Investice v mnoha případech může několikanásobně přesáhnout možnou úsporu za celou dobu životnosti zařízení. V opačném případě může provozovatel osvětlovací soustavy odmítat investice do rekonstrukcí osvětlovacích soustav a inteligentních řídicích systémů kvůli obavám z vysokých investičních nákladů. Zároveň však provozuje zastaralé nehospodárné osvětlovací soustavy.

Pomůckou pro takového potenciálního investora může být uživatelsky jednoduchý software, do kterého zadá tyto údaje:

- Rozměry osvětlované místnosti
- Rozměry, druh a parametry oken
- Činitele odrazu světla povrchů místnosti (stěn, stropu a podlahy)
- Využití místnosti
- Požadovaná osvětlenost
- Parametry původní a případné nové osvětlovací soustavy
- Cena elektrické energie
- Náklady spojené s investicí do inteligentního řídicího systému, případně celé nové osvětlovací soustavy

Výstupem software bude roční spotřeba elektřiny původní soustavy, roční spotřeba inteligentně řízené soustavy a návratnost uvažované investice.

6.1 Rozbor požadavků

6.1.1 Rozměry, druh a parametry oken

Při průchodu světla osvětlovacím otvorem se velikost světelného toku zmenšuje v závislosti na materiálu zasklení, vlivem neprůsvitných částí konstrukce okna a vlivem znečištění zasklení oken. K dalším ztrátám světla může dojít stíněním konstrukcemi posuzované budovy nebo jiným v interiéru trvale instalovaným zařízením. Zmenšení světelného toku se charakterizuje činitelem prostupu světla, který je definován jako poměr prošlého světelného toku a světelného toku dopadajícího. [26]

V tabulce jsou uvedeny hodnoty činitele prostupu světla pro vybrané materiály, které připadají v úvahu pro výplně osvětlovacích otvorů. Uvedené hodnoty platí pro prostup světla ve směru kolmém k rovině zasklení.

Druh materiálu	Činitel prostupu světla	Druh materiálu	Činitel prostupu světla
Čiré tabulové sklo 3 až 4 mm	0,92	Determální skla	0,35 až 0,70
Surové sklo (nevzorované)	0,88	Reflexní skla	0,55 až 0,65
Vzorované sklo 2	0,85 až 0,90	Skleněné tvárnice jednovrstvé	0,85 až 0,89
Drátové sklo 6 až 7 mm	0,60 až 0,80	Skleněné tvárnice dvouvrstvé	0,55 až 0,62
Mdlé sklo	0,75 až 0,80	Skleněné příčky jednovrstvé	0,86
Laminát se skelným vláknem	0,35 až 0,85	Skleněné příčky dvouvrstvé	0,80
Akrylát čirý	0,85 až 0,92	Záclony	0,50 až 0,75
Akrylát rozptýlný	0,60 až 0,80		

Tabulka 6.1. Činitele prostupu světla pro vybrané materiály. [31]

Další veličinou ovlivňující vstup světla je činitel prostupu světla vlivem stínění neprůsvitnými konstrukcemi osvětlovacího otvoru. Při použití tohoto činitele je pak možné ve výpočtech používat rozměry celých osvětlovacích otvorů, není nutné počítat plochu prosklených částí.

Činitel znečištění popisuje pohlcení a odraz světla způsobený nečistotami na povrchu průsvitných částí. Výsledný činitel znečištění se získá jako součin činitelů znečištění na vnější a na vnitřní straně. V případě, že světlo prochází více materiály a je více povrchů náchylných na znečištění se výsledný činitel znečištění stanoví jako součin všech těchto činitelů. Hodnoty činitele znečištění jsou uvedeny v tabulce. [xq-IISAZLhhrmQtD0]

Druh osvětlovacího otvoru	Sklon zasklení osvětlovacího otvoru	Znečištění vzduchu	Činitel znečištění na vnější straně	Činitel znečištění na vnitřní straně
svislý	90 °	malé	0,95	0,95
		střední	0,90	0,85
		velké	0,85	0,65
šikmý	45 °	malé	0,80	0,95
		střední	0,70	0,90
		velké	0,60	0,80
vodorovný	0 °	malé	0,70	0,95
		střední	0,60	0,90
		velké	0,50	0,80

Tabulka 6.2. Hodnoty činitele znečištění. [31]

6.1.2 Činitele odrazu světla povrchů místnosti

Významnou roli v osvětlenosti vnitřního prostoru představuje činitel odrazu světla jednotlivých povrchů v interiéru. Je závislý na druhu materiálu a na barevném provedení. Jeho zjištění je možné provést výpočtem z údajů naměřených jasometrem. Další, méně přesnou možností je stanovení hodnoty činitele odrazu povrchu na základě jeho barvy pomocí vzorníku, případně určit podle typu materiálu.

Při výpočtu průměrné hodnoty je potřeba započítat i činitel odrazu světla osvětlovacích otvorů, jehož hodnota bývá velmi nízká. Orientační hodnoty činitele odrazu světla běžných povrchů jsou stanoveny v tabulce. [32]

6.1.5 Parametry osvětlovací soustavy

Parametry původní, případně i nové osvětlovací soustavy je myšlena především jejich spotřeba energie při dodržení požadované osvětlenosti srovnávací roviny. U neregulovatelných osvětlovacích soustav je podstatný jejich nominální příkon. V případě regulovatelných osvětlovacích soustav jde o takový příkon, který zajistí požadovanou osvětlenost při vyloučení vlivu denního osvětlení, nemusí jít nutně o nominální příkon.

V obecnější rovině jde o měrný výkon svítidel (jednotka světelného toku vztahovaná na jednotku příkonu) a celkový světelný tok potřebný k osvětlení daného prostoru.

Do příkonu regulovatelné osvětlovací soustavy je nutné zahrnout také příkon inteligentního řídicího systému, který v případě malých instalací nemusí být zanedbatelný.

6.1.6 Cena elektrické energie

Cena elektrické energie výrazně ovlivňuje provozní náklady osvětlovací soustavy i řídicího systému a tím i výši možných finančních úspor. Investice, která se v konkrétní budově s konkrétní cenou elektřiny může vyplatit může být pro stejný prostor s jinou cenou elektřiny nevýhodná.

Cena elektřiny se skládá z těchto složek:

- Regulovaná část
- Neregulovaná část
- Daně

Regulovanou část ceny elektřiny stanovuje Energetický regulační úřad, je nezávislá na distributorovi. Její složky jsou:

- Poplatek za rezervovaný příkon
- Poplatek za distribuované množství elektřiny
- Poplatek za systémové služby
- Příspěvek na obnovitelné zdroje
- Poplatek operátorovi trhu s elektřinou
- Poplatek za podporu výkupu elektřiny z decentrální výroby

Neregulovaná část je závislá na dodavateli elektřiny, její složky jsou:

- Platba za odebranou elektřinu
- Pevná cena za měsíc

Daně jsou stanoveny státem, jsou to tyto:

- Daň z přidané hodnoty (DPH)
- Daň z elektřiny

[33]

6.1.7 Investiční náklady

Náklady spojené s investicí do inteligentního řídicího systému, který umožňuje regulovat výkon, a tedy i příkon svítidel podle aktuální osvětlenosti jak vnitřního prostoru, tak horizontální exteriérové roviny mohou často finančně převyšovat možné energetické úspory. Je proto nutné vždy zvážit, zda je taková investice smysluplná. Z pohledu nákladů vycházejí lépe velké kancelářské komplexy, kde je cena celého řídicího systému osvětlení budovy rozložena do mnoha místností. Vhodným kritériem pro dělení nákladu je uvažování plochy osvětlovaných místností dle vztahu

6.2.2 Společné parametry

Jelikož je v univerzálním nástroji pro výpočet osvětlenosti obtížné posuzovat vliv zastínění budovy, budou uvažovány pouze nezastíněné budovy. S ohledem na komplikovanost modelu přímého slunečního světla, jeho interakci s případnými zanedbanými přepážkami a předpokládaného použití stínící techniky neznámých parametrů je v modelu uvažována rovnoměrně zatažená obloha. Další výhodou tohoto zjednodušení je i zanedbatelná závislost výsledků na orientaci budovy a uvažované místnosti vůči světovým stranám. Simulacemi v programu DIALux bylo ověřeno, že při změně orientace se výsledné hodnoty změni o méně než 1 %. Mezi další výhody patří nezávislost činitele denní osvětlenosti na datu a čase.

Předpokládaná poloha posuzované budovy je v České republice, konkrétně byla pro potřeby simulace uvažována Praha se zeměpisnými souřadnicemi 50,10 stupňů severní šířky a 14,40 stupňů východní délky. Simulace byly prováděny s výchozím nastavením data a času, což je 21. března 2018 10:28.

Program má být určen především pro místnosti bytového a kancelářského typu, bude tedy uvažováno pouze boční denní osvětlení. Další parametry pro prvotní simulace byly nastaveny takto:

- Činitel odrazu světla pro strop 0,7
- Činitel odrazu světla pro stěny 0,5
- Činitel odrazu světla pro podlahu 0,2
- Uživatelská úroveň ve výšce 0,85 m
- Výška místnosti 2,8 m
- Výška okenního parapetu 1,2 m
- Výška oken 1,25 m
- Šířka oken byla volena dvojnásobek, 1 m a rozměr odpovídající šířce místnosti. U všech kombinací rozměrů místnosti byla provedena simulace pro oba případy. Okno bylo vždy v horizontálním směru umístěno uprostřed stěny.
- Činitel prostupu světla sklem pro difúzní světlo 0,9
- Činitel údržby 0,8
- Činitel rozčlenění oken 0,85

Závislost střední hodnoty osvětlenosti na šířce a hloubce místnosti je uvedena v tabulkách pro obě varianty stanovení šíře oken.

Šířka	Hloubka										
	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	11 m	12 m
2 m	468	361	296	235	194						
3 m	375	269	206	166	139	120					
4 m	291	208	159	129	109	94	82				
5 m	237	168	131	106	89	77	68	61			
6 m	200	143	111	90	76	66	58	51	46		
7 m		124	96	78	66	57	50	45	40	37	
8 m			85	69	59	51	44	39	36	33	30
9 m				61	52	45	40				
10 m					47	41	35				
11 m						37	33				
12 m							30				

Tabulka 6.4. Závislost střední hodnoty osvětlenosti E_m [lx] na šířce a hloubce místnosti pro okno o šíři 1 m.

Jako vhodný ukazatel byl vybrán MAE, neboli střední absolutní chyba. Ta je definována vztahem

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad (6.2)$$

kde

- n ... Počet bodů
- y .. Skutečné hodnoty
- x .. Hodnoty modelu

[34]

Údaje o polynomiální rovnici obsažené v datové struktuře jsou obtížně uchopitelné, její vyjádření lze získat zadáním příkazu

```
PolynomialFormula=reg.PolynomialExpression
```

Experimentálně byly měněny maximální stupně jednotlivých proměnných tak, aby bylo dosaženo vysoké přesnosti modelu (nízké hodnoty střední absolutní odchylky) a aby byly stupně jednotlivých proměnných co nejnižší. Počet členů polynomu se zvyšujícím se stupněm proměnných enormně narůstá.

V případě zde hledaného polynomu byla sekvence příkazů

```
reg=MultiPolyRegress(A,B,5,[5 3 2 1 2 1 1], 'figure')
PolynomialFormula=reg.PolynomialExpression
```

Získaný polynom stačí už pouze upravit pro potřeby výpočetního software. Výsledný polynom je uveden v elektronické příloze.

6.3 Přepočítání osvětlenosti pro libovolný čas v roce

Všechny simulace byly provedeny s nastavením času 10:28 a data 21. března. S výhodou můžeme využít fakt, že pro zde předpokládané situace je činitel denního osvětlení v čase konstantní. Je tedy možné aplikovat přepočítání na libovolný čas a datum.

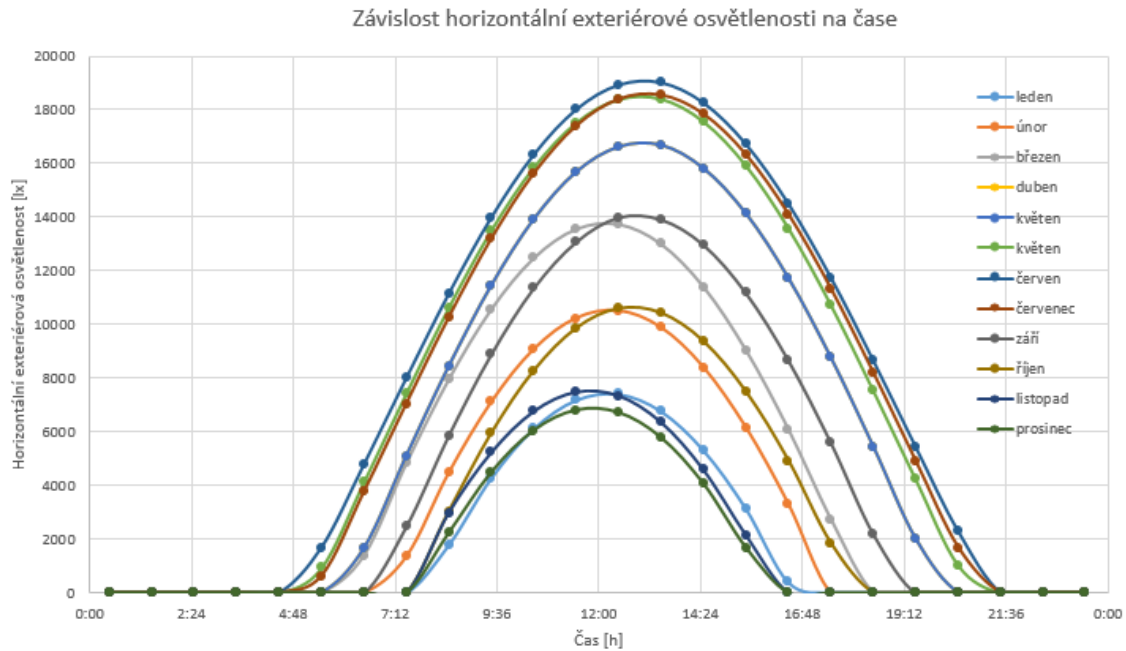
Při výpočtu úspory elektrické energie osvětlovací soustavy průmyslové haly byl použit graf, ze kterého byly odečítány hodnoty osvětlenosti s velkou nepřesností. Bylo tedy potřeba získat přesnější hodnoty.

Software DIALux disponuje vhodným modelem, ze kterého lze získat potřebná data. Lze to provést prostřednictvím simulací. Byla tedy vytvořena venkovní světelná scéna, kde byly nastaveny tyto parametry:

- Poloha Praha (50,10 stupňů severní šířky a 14,40 stupňů východní délky)
- Rovnoměrně zatažená obloha
- Žádné stínící překážky

Čas a datum byly nastavovány tak, aby na základě hodnot získaných v předchozích simulacích bylo možné snadno provést přepočítání. Byl tedy nastavován datum 21. března pro každý měsíc a čas 28 minut pro každou hodinu. Celkem bylo provedeno $24 \times 12 = 288$ simulací denního světla, podstatný údaj získaný z výsledků simulace byla horizontální exteriérová osvětlenost. Použité datum má také tu výhodu, že pokrývá letní a zimní slunovrat a přibližně i jarní a podzimní rovnodennost. Časy a data simulací a jejich výsledná horizontální exteriérová osvětlenost jsou uvedeny v tabulce v příloze.

Lepší představu o závislosti hodnot horizontální exteriérové osvětlenosti dává graf.



Obrázek 6.1. Závislost horizontální exteriérové osvětlenosti na čase.

Viditelné posuny podobných křivek po vodorovné čase odpovídající 1 hodině jsou způsobeny posunem letního a zimního času, který je ve všech simulacích uvažován.

Získané hodnoty lze použít jako podklad pro přepočítání denní složky uvnitř místností pro libovolný měsíc a libovolnou hodinu dle vztahu

$$E_{INT} = \frac{E_{INT0} E_H}{E_H} \quad (6.3)$$

kde

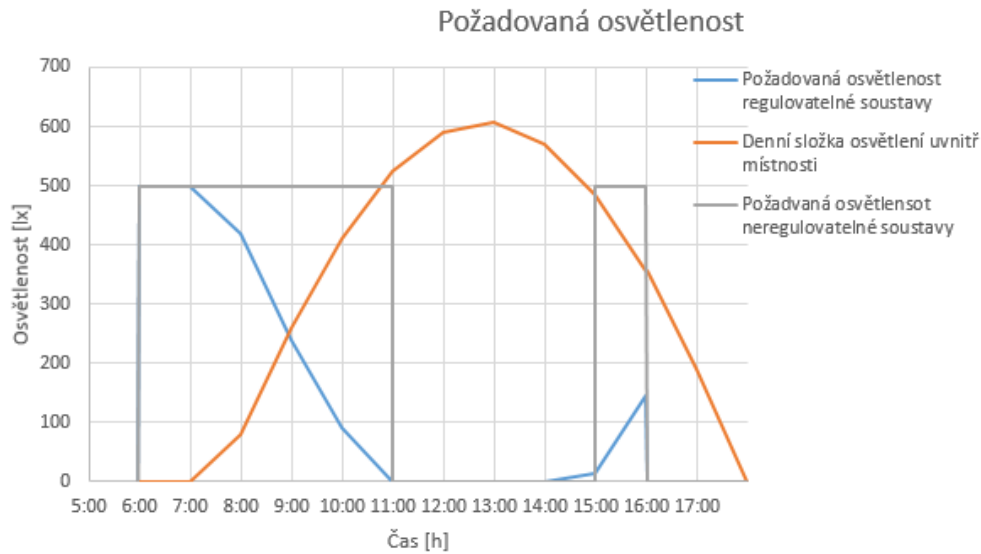
- E_{INT} ... Denní složka osvětlenosti vnitřní srovnávací roviny v požadovaném čase [lx]
- E_{INT0} ... Denní složka osvětlenosti vnitřní srovnávací roviny 21. března v 10:28 [lx]
- E_H ... Osvětlenost horizontální exteriérové roviny v požadovaném čase [lx]
- E_{H0} ... Osvětlenost horizontální exteriérové roviny 21. března v 10:28 [lx]

6.4 Potřeba svícení

Na základě získaného přepočtu denní složky osvětlení, požadované osvětlenosti a využití místnosti lze vypočítat potřebu svícení. V případě neregulovatelné osvětlovací soustavy musí být svítidla v provozu vždy, kdy je místnost využívána a denní světlo nedokáže plně pokrýt požadavky na osvětlenost. Pro potřeby výpočtu budu předpokládat, že v případě, kdy je úroveň denní složky světla v místnosti dostatečná na pokrytí nároků, uživatel osvětlovací soustavu vypne a zapne jí opět při poklesu osvětlenosti pod požadovanou hodnotu.

V případě regulovatelné soustavy bude ve výpočtech uvažován předpoklad, že díky regulaci výkonu svítidel bude celková osvětlenost v místnosti (denní i umělá složka) právě taková, jako požadovaná hodnota. Vyšší hodnoty osvětlenosti budou pouze v případě, že půjde pouze o denní složku.

Pro danou místnost se spočítá časová závislost světelného toku svítidel. Příklad jejího průběhu je znázorněn na obrázku.



Obrázek 6.2. Požadovaná osvětlenost.

6.5 Výpočet spotřeby elektrické energie

Na základě znalosti potřeby svícení a nominálního příkonu osvětlovací soustavy lze vypočítat roční spotřebu elektrické energie. V případě neregulovatelné osvětlovací soustavy stačí vynásobit počet hodin svícení nominálním příkonem svítidel. U regulovatelných osvětlovacích soustav je příkon časově proměnný. Závislost světelného toku svítidla na příkonu svítidla je často obtížně získatelná, ne vždy je uvedena v katalogovém listu svítidla. Protože software pro výpočet spotřeby elektrické energie musí být univerzální a z pohledu uživatele co nejjednodušší, bude uvažována lineární závislost. Skutečná závislost světelného toku svítidla na příkonu svítidla se navíc od lineární příliš neliší. Aktuální příkon bude vypočítán podle vztahu

$$P_{AKT} = \frac{P_{NOM} E_{SVAKT}}{E_{NOM}} \quad (6.4)$$

kde

- P_{AKT} ... Aktuální příkon [W]
- P_{NOM} ... Nominální příkon [W]
- E_{SVAKT} ... Aktuální potřeba svícení [lx]
- E_{NOM} ... Osvětlenost při nominálním příkonu svítidel [lx]

Roční spotřeba elektrické energie se pak spočítá podle vztahu

$$Q_a = \frac{365}{12} \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{24} P_{AKTij} T_{ZAK} \quad (6.5)$$

kde

- Q_a ... Roční spotřebovaná energie [Wh]
- P_{AKT} ... Aktuální příkon [W]

Šířka místnosti:	5	m
Hloubka místnosti:	6	m
Výška místnosti:	2,8	m
Plocha oken:	6,25	m ²
Činitel prostupu světla zasklením:	0,9	
Činitel odrazu světla stěn:	0,5	
Činitel odrazu světla stropu:	0,7	
Koeficient odrazu podlahy:	0,2	
Užívání od:	8	h
Užívání do:	17	h
Užívání - dny v týdnu:	5	dni
Užívání - měsíce:		
leden:	<input checked="" type="checkbox"/>	
únor:	<input checked="" type="checkbox"/>	
březen:	<input checked="" type="checkbox"/>	
duben:	<input checked="" type="checkbox"/>	
květen:	<input checked="" type="checkbox"/>	
červen:	<input checked="" type="checkbox"/>	
červenec:	<input checked="" type="checkbox"/>	
srpen:	<input checked="" type="checkbox"/>	
září:	<input checked="" type="checkbox"/>	
říjen:	<input checked="" type="checkbox"/>	
listopad:	<input checked="" type="checkbox"/>	
prosinec:	<input checked="" type="checkbox"/>	
Požadovaná osvětlenost:	500	lx
Příkon původní soustavy:	140	W
Příkon nové soustavy:	140	W
Cena 1 kWh elektrické energie:	4,20	Kč
Investiční náklady:	2000	Kč

Obrázek 6.3. Formulář pro zadávání údajů.

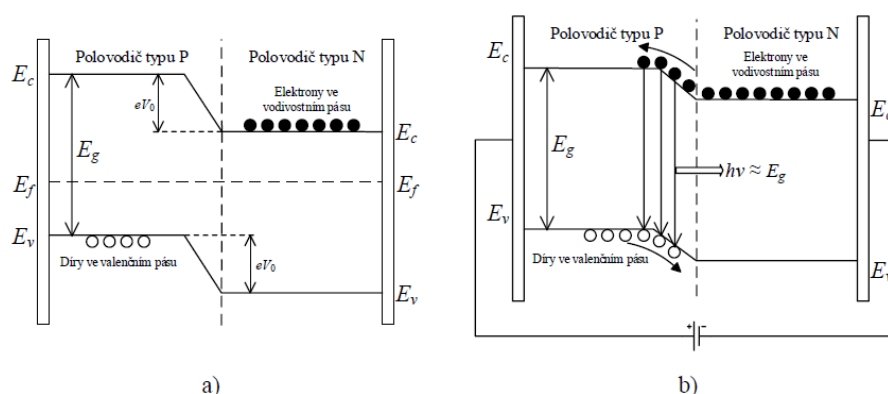
Formulář má předvyplněné defaultní hodnoty. V případě, že uživatel aplikace nezná hodnoty některých parametrů, může se inspirovat předvyplněnými hodnotami (jedná se o vcelku běžné hodnoty). Nejprve je požadováno zadání rozměrů osvětlované místnosti. Dále je požadována plocha oken (včetně neprůsvitných částí), činitel prostupu světla zasklením a činitele odrazu jednotlivých ploch místnosti. Užíváním místnosti od - do jsou myšleny časy začátku a konce pobytu osob uvnitř místnosti. Dále lze specifikovat, kolik dní v týdnu a které měsíce v roce je místnost využívána. Požadovaná osvětlenost vyplývá z příslušných norem pro daný účel místnosti, obvyklé hodnoty jsou 300 lx nebo 500 lx. Příkonem nové soustavy je myšlena hodnota v době, kdy je místnost osvětlována bez využití denního světla. Cena za jednotku elektrické energie je závislá na smlouvě s distributorem, v tomto software nelze rozlišovat mezi různými tarify. Investičními náklady jsou myšleny náklady na inteligentní řídicí systém (případně celou osvětlovací soustavu) nebo podíl nákladů připadající na danou místnost.

Po zadání a kontrole všech parametrů můžeme kliknout na tlačítko „Výpočet“. Zobrazí se vypočítaná roční spotřeba elektrické energie původní osvětlovací soustavy a soustavy s inteligentním řídicím systémem. Dále se zobrazí vypočítaný počet let, za který se vrátí investice vlivem úspor elektrické energie. Všechny výstupní hodnoty jsou zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Tlačítkem „Zpět“ se lze vrátit k zadáva-

Kapitola 7

Posouzení vlivu regulace na životnost LED

Světlo emitující dioda (LED) je polovodičová součástka, která vyzařuje viditelné záření na principu elektroluminiscence. Při průchodu elektronu přes polovodičový přechod je uvolněno nekoherentní záření. Na obrázku je znázorněn pásový diagram PN přechodu.



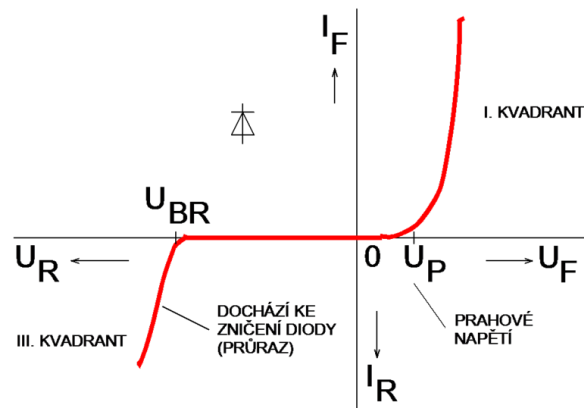
Obrázek 7.1. Pásový diagram. Převzato z [37]

Energie eV_0 brání přestupu elektronů mezi jednotlivými polovodiči. Při přivedení napětí dojde ke snížení hodnoty energie eV_0 a elektrony mohou přecházet z polovodiče typu N do polovodiče typu P. K přechodu děr z polovodiče typu P do polovodiče typu N dochází v mnohem menší míře. Při následné rekombinaci párů elektron - díra mezi valenční (E_v) a vodivostní (E_c) vrstvou poblíž polovodičového přechodu dochází k vyzáření energie ve formě fotonu. Energie vyzářeného fotonu přibližně odpovídá šířce zakázaného pásu E_g . Protože jsou fotony vyzařovány v různých směrech, je potřeba, aby struktura LED umožnila vyzáření fotonu a aby nebyl pohlcen materiálem polovodiče. Proto musí být polovodič typu P co možná nejužší, případně lze použít materiál s heterogenní strukturou. [37]

7.1 Vlastnosti LED

7.1.1 Elektrické vlastnosti

Světlo emitující dioda (LED) má podobnou voltampérovou charakteristiku jako běžná usměrňovací dioda. Oproti běžným diodám se liší především úbytek napětí v propustném směru, který je v závislosti na barvě emitovaného světla v rozmezí 1,8 V až 3,7 V. Liší se také průrazné závěrné natětí, které bývá řádově v jednotkách až desítkách Voltů. LED jsou obvykle dimenzovány na proud procházející v propustném směru od několika desítek po několik stovek mA. Voltampérová charakteristika LED je zobrazena na obrázku.



Obrázek 7.2. Voltampérová charakteristika diody. Převzato z [38]

Uvedenou voltampérovou charakteristiku lze popsat Schockleyho rovnicí:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eU_D}{nkT}} - 1 \right) \quad (7.1)$$

kde

- I ... elektrický proud [A]
- I_0 ... saturační (nasycený) proud [A]
- U_D ... difúzní napětí [V]
- n ... emisní koeficient
- e ... elementární náboj elektronu
- k ... Boltzmannova konstanta
- T ... teplota přechodu [K]

7.1.2 Svítivost LED

Svítivost je veličina, která definuje prostorovou hustotu světelného toku. Její jednotkou je 1 kandela (cd), která je součástí soustavy základních jednotek SI. Je možné ji stanovit pouze pro bodový zdroj světla. Tedy pro zdroj, jehož plocha je zanedbatelná vzhledem ke vzdálenosti kontrolního bodu. Svítivost světelného zdroje se obvykle v různých směrech liší. Svítivost světelného zdroje je rovna poměru elementárního světelného toku dopadajícího v elementárním prostorovém úhlu

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (7.2)$$

kde

- I ... svítivost [cd]
- Φ ... světelný tok [lm]
- Ω ... prostorový úhel [sr]

Při znalosti svítivosti ve všech prostorových úhlech je možné stanovit fotometrickou křivku svítivosti. Ta patří k základním optickým charakteristikám LED. Na základě této charakteristiky je možné stanovit i světelný tok světelného zdroje. [17]

Barva	Vlnová délka [nm]	Úbytek napětí [V]	Chemické složení či provedení
Infračervená	nad 760	pod 1,63	GaAs, AlGaAs
Červená	610 - 760	1,63 - 2,03	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP
Oranžová	590 - 610	2,03 - 2,1	GaAsP, AlGaInP, GaP
Žlutá	570 - 590	2,1 - 2,18	GaAsP, AlGaInP, GaP
Zelená	500 - 570	1,9 - 4	GaP, AlGaInP, AlGaP, InGaN, GaN
Modrá	450 - 500	2,48 - 3,7	ZnSe, InGaN, SiC, Si
Fialová	400 - 450	2,76 - 4	InGaN
Ultrafialová	pod 400	3 - 4,1	InGaN, AlGaN
Růžová	Více typů	3,3	Modrá LED s luminoforem
Purpurová	Více typů	2,48 - 3,7	Modrá a červená LED s luminoforem
Bílá	Široké spektrum	2,8 - 4,2	Modrá LED s luminoforem

Tabulka 7.1. Závislost barvy LED na chemickém složení. [39]

7.1.3 Barva vyzařovaného světla

Jednou z hlavních odlišností světlo emitujících diod od konvenčních světelných zdrojů je vyzařování světla v úzkém barevném spektru. Barva vyzařovaného světla závisí na chemickém složení příměsí v polovodičovém přechodu. Chemická složení různých barevných LED, úbytky napětí v propustném směru a rozsahy vlnových délek jsou uvedeny v tabulce.

Jak je již uvedeno v tabulce, nejpoužívanější bílá LED je ve skutečnosti modrá LED s vrstvou luminoforu, který část modrého světla mění na světlo o jiných vlnových délkách. Alternativní možností získávání bílého světla je aditivní míchání modrého, zeleného a červeného světla.

7.1.4 Teplota chromatičnosti

Běžné teplotní zdroje světla mají definovanou teplotu chromatičnosti. Teplota chromatičnosti je rovna teplotě absolutně černého tělesa, jehož záření má stejnou chromatičnost jako uvažované záření. Jednotkou teploty chromatičnosti je 1 kelvin (K).

Světlo emitující diody nejsou teplotním zdrojem světla, spektrální složení vyzařovaného světla neodpovídá vyzařování černého tělesa. Křivka spektrálního složení vykazuje prudké změny, je možné jí pouze přibližně popsat náhradní teplotou chromatičnosti. Náhradní teplota chromatičnosti je určena jako teplota absolutně černého tělesa, jehož bod v diagramu pro určení teploty chromatičnosti je nejbližší bodu uvažovaného světelného zdroje.

Pojem teplota chromatičnosti či náhradní teplota chromatičnosti je relevantní pouze v případě zdrojů bílého světla. Náhradní teplota chromatičnosti LED světelných zdrojů se pohybuje přibližně v rozmezí 2700 K až 7000 K, výjimečně i více. [17]

7.1.5 Elektrický výkon

Elektrický výkon LED je dán součinem úbytku napětí a procházejícího proudu. Obvykle je limitován schopností pouzdra odvádět teplo. Zatěžování světlo emitující diody vyšším než maximálním povoleným proudem (tedy i výkonem) výrazně zkracuje její životnost. Je potřeba brát v úvahu, že ve formě světla se vyzáří jen minimální část elektrického výkonu a zbytek je převeden na teplo.

7.1.6 Měrný výkon

Měrný výkon je důležitým kvalitativním parametrem nejen LED, ale i jiných světelných zdrojů. Je definován jako poměr světelného toku a elektrického výkonu, tedy

$$\eta = \frac{\Phi}{P} \quad (7.3)$$

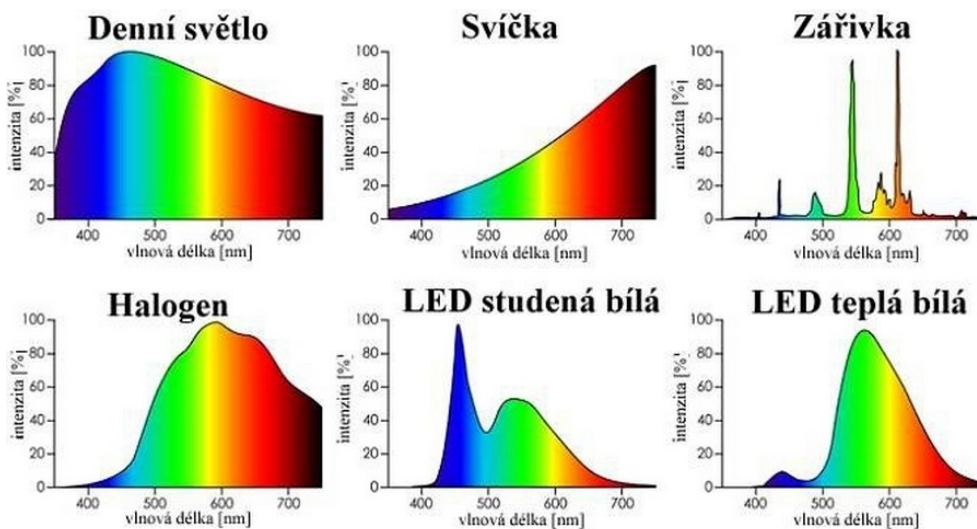
kde

- η ... Měrný výkon [lm/W]
- Φ ... Světelný tok [lm]
- P ... Elektrický výkon [W]

Měrný výkon v současnosti produkovaných LED světelných zdrojů se obvykle pohybuje v rozmezí 80 – 160 lm/W. Laboratorní prototypy bílých LED dosahují měrného výkonu i více než 300 lm/W. [40]

7.1.7 Spektrum vyzařovaného světla a index podání barev

Schopnost pozorovatele správně rozpoznávat barvy pozorovaných předmětů je ovlivněna spektrálním složením světla, kterým jsou předměty osvětleny. Jinými slovy jde o zastoupení jednotlivých barev v pozorovaném spektru. Porovnání spektra LED světelných zdrojů oproti jiným světelným zdrojům včetně denního světla je znázorněno na obrázku.



Obrázek 7.3. Spektra světelných zdrojů. Převzato z [41]

Ze spektrální charakteristiky světelného zdroje lze výpočtem stanovit index podání barev. Značí se R_i , rozsah hodnot je od 0 do 100. Index podání barev má za následek prakticky „černobílé“ vidění, index podání barev 100 odpovídá přirozenému slunečnímu světlu. Obvyklou hodnotou indexu podání barev LED je 80. Index podání barev se také často označuje zkratkou CRI (Colour Resolution Index).

7.1.8 Životnost

Životnost světlo emitujících diod je určena jako doba svícení, po které klesne vyzařovaný světelný tok pod požadovanou hodnotu. Ta bývá určena jako procentuální část původního světelného toku. Obvykle se za životnost považuje doba, kdy světelný tok

klesne pod 70 % původní hodnoty, není to však pravidlem. Někteří výrobci k definici životnosti používají hranici například 50 % či 80 % původního světelného toku, případně jich uvádějí více. Také bývá stanoveno, kolik procent světelných zdrojů má po dané době dané procento původního světelného toku. Obvyklé značení životnosti světelných zdrojů bývá ve tvaru

$$LxxByy$$

kde

- *xx* ... Procentuální podíl světelného toku světelného zdroje po uvedeném počtu hodin a nového světelného zdroje
- *yy* ... Procentuální podíl světelných zdrojů splňující dané požadavky

Obvyklým případem definice životnosti bývá L70B50. Tedy že se po uvedeném počtu hodin předpokládá, že 50 % světelných zdrojů dosahuje minimálně 70 % původního světelného toku. Obvyklý udávaný počet hodin bývá v případě levných světelných zdrojů pro domácnosti (včetně oblíbených LED „žárovek“) kolem 20 000 až 30 000 hodin. V případě kvalitních průmyslových svítidel bývá jejich životnost 50 000 hodin i více.

Kromě kvality samotných LED čipů má na životnosti led světelných zdrojů vliv především provozní teplota. Rozdíly v udávaných životnostech různých svítidlech jsou způsobeny především různě dimenzovanému chlazení. Na teplotu LED čipů má také významný vliv teplota prostředí, ve kterém je svítidlo provozováno. Tento důležitý údaj je však ve specifikacích poskytovaných výrobcem svítidla často opomíjen. Přitom Provozní teplota LED může ovlivnit životnost i řádově. Vliv teploty na životnost světlo emitujících diod bude dále podrobněji popsán.

7.2 Teplota LED

Jak už bylo uvedeno, teplota světlo emitujících diod má významný vliv nejen na životnosti. Rozsah povolených provozních teplot je podobný jako u jiných polovodičových součástek, přibližně od -40 °C do +90 °C.

Polovodičový přechod diody je zahříván procházejícím proudem. I když je LED studený zdroj světla s relativně vysokou účinností, většina elektrického výkonu je přeměněna na teplo. Dle [Jakovenko] je účinnost dnešních bílých LED přibližně 30 %, 70 % elektrického výkonu je tedy nutné ve formě tepla odvést do okolního prostředí. Výsledná teplota je závislá na ztrátovém výkonu, způsobu chlazení a na teplotě okolního prostředí. Teplotu polovodičového přechodu LED je možné vypočítat podle vztahu:

$$T_J = T_A + P(R_{JC} + R_{CH} + R_{HA}) \quad (7.4)$$

kde

- T_J ... teplota PN přechodu [K]
- T_A ... teplota okolního prostředí [K]
- P ... výkon odváděný ve formě tepla [W]
- R_{JC} ... tepelný odpor mezi PN přechodem a pouzdrem LED [K/W]
- R_{CH} ... tepelný odpor mezi pouzdrem LED a chladičem [K/W]
- R_{HA} ... tepelný odpor mezi chladičem a okolním prostředím [K/W]

Je na výrobci svítidla, aby se náležitě vypořádal s odvodem tepla a zajistil tak přijatelnou provozní teplotu LED a tím i jejich dlouhou životnost. Projektant nebo provozovatel osvětlovací soustavy může teplotu polovodičového přechodu LED ovlivnit umístěním svítidla, teplotou prostředí, a především regulací svítidel. Regulace výkonu svítidel na nižší, než nominální hodnotu má kromě snížení vyzařovaného světelného toku a snížení spotřeby elektrické energie za následek snížení ztrátového výkonu, který je potřeba odvést ve formě tepla.

7.2.1 Vliv teploty na světelný tok

Světelný tok je jedním ze základních parametrů pro hodnocení vlastností LED. Kromě elektrického výkonu má na světelný tok světlo emitující diody vliv také teplota PN přechodu. Obecně se vzrůstající teplotou klesá vyzařovaný světelný tok. Rozdíl světelného toku relativně dobře chlazené LED při teplotě PN přechodu 50 °C a špatně chlazené LED s teplotou PN přechodu 100 °C je přibližně 12 %. S ohledem na zvýšení aktuálního světelného toku nemá tedy příliš velký význam snižování provozní teploty na co nejnižší hodnotu, protože tento vliv není příliš velký. Výrobní náklady chladiče, který by dokázal LED světelný zdroj při pokojové teplotě okolního prostředí uchládit na 50 °C či méně, by byly příliš vysoké vzhledem k možným úsporám a nejednalo by se o náklady účelně vynaložené. [37]

7.2.2 Vliv teploty na elektrické parametry

Teplota polovodičového přechodu ovlivňuje voltampérovou charakteristiku diody, tedy i LED. Při dodržení konstantní hodnoty procházejícího proudu se se vzrůstající teplotou snižuje úbytek napětí v propustném směru. Míra poklesu tohoto napětí je dána teplotně-napěťovým koeficientem, jehož hodnota je u polovodičových součástek obvykle záporná.

Při buzení světelných zdrojů založených na LED technologii konstantním proudem má rostoucí teplota za následek mírný pokles odebíraného výkonu. Tento vliv je však prakticky nevýznamný. Změna úbytku napětí s teplotou je významná především z hlediska možnosti využití pro měření teploty polovodičového přechodu. Problémem však zůstává fakt, že i teplotně-napěťový koeficient se s rostoucí teplotou mění. Je potřeba vždy uvažovat hodnoty teplotně-napěťového koeficientu pro danou teplotní oblast, případně teplotně-napěťový koeficient uvažovat jako nelineární funkci. Při teplotách PN přechodu nad 60 °C se teplotně napěťový koeficient stává téměř konstantním. [37]

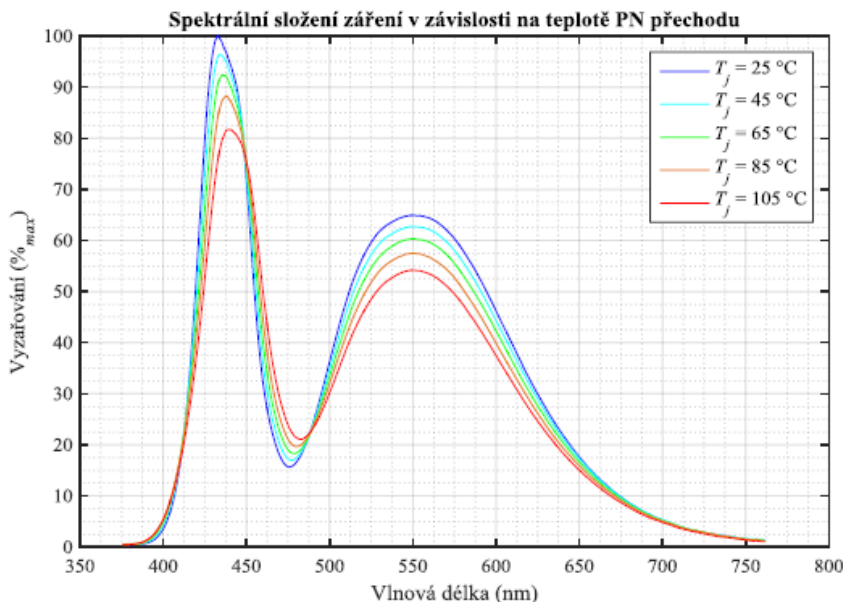
Vliv teploty PN přechodu na úbytek napětí v propustném směru je vzhledem k pracovní oblasti voltampérové charakteristiky LED jedním z důvodů, proč není vhodné napájet LED konstantním napětím a obvykle se používá zdroj konstantního proudu nebo alespoň zdroj konstantního napětí se sériově připojeným rezistorem.

7.2.3 Vliv teploty na spektrum vyzařovaného světla

Základním kvalitativním kritériem pro hodnocení světlo emitujících diod je spektrum vyzařovaného světla. Obecně se předpokládá jeho neměnnost při různých provozních podmínkách, což ale ne vždy platí. Vlivem nejen vysoké teploty, ale i elektrického namáhání může docházet k zužování zakázané oblasti PN přechodu, jejíž šířka přímo ovlivňuje vlnovou délku vyzařovaného světla. V případě bílých LED, tedy modrých InGaN LED s vrstvou luminoforu tak může dojít k malému posunu celého spektra do oblasti s jinou vlnovou délkou. [42]

Vlivem změny teploty polovodičového přechodu nedochází jen k posunu vyzařovaného spektra, ale je při posuzování LED vhodné také uvažovat změny poměrů mezi

dominantními vrcholy vyzařovaného spektra a hodnoty v lokálním minimu mezi nimi. Ke změnám distribuce spektra dochází nejen vlivem změny teploty PN přechodu, ale také vlivem teplotně závislých fyzikálních změn vrstvy luminoforu. Příklad teplotní závislosti vyzařovaného spektra je znázorněn na obrázku. [37]



Obrázek 7.4. Spektrální složení záření v závislosti na teplotě PN přechodu. Převzato z [37]

Popsané změny ve spektrální distribuci světla ovlivňují výsledný index podání barev, jehož hodnota se s rostoucí teplotou zvyšuje. Na rozdíl od jiných parametrů má tedy rostoucí teplota na index podání barev pozitivní vliv.

7.3 Degradace LED

Při navrhování osvětlovacích soustav založených na LED technologii musí brát projektanti v potaz činitel stárnutí světelných zdrojů a funkční spolehlivost světelných zdrojů podobně, jako když navrhují osvětlovací soustavu s konvenčními světelnými zdroji. Je ale problematické najít srovnatelné údaje. Projektanti navíc potřebují další informace k předvídání životnosti LED v různých provozních podmínkách. Byla navržena řada technik pro předvídání životnosti LED, jejich výsledky ale nejsou dostatečné pro vytvoření jasného a jednoznačného popisu použitelného pro navrhování osvětlovacích soustav. Potřebnými informacemi pro projektanty osvětlovacích soustav jsou:

- Způsob selhání světelných zdrojů
- Definice doby použitelnosti
- Stárnutí světelných zdrojů

Definování doby použitelnosti světelných zdrojů umožňuje projektantům splnit požadavky zákazníků na:

- Minimální požadovanou osvětlenost
- Interval výměny světelných zdrojů
- Investiční náklady
- Provozní náklady

7.3.1 Způsob selhání světelných zdrojů

Konvenční zdroje světla obvykle vykazují malou změnu světelného toku, dokud nedojde k jejímu funkčnímu selhání. Ve velkých osvětlovacích soustavách každé funkční selhání snižuje světelný tok celé soustavy. Obvykle je minimální úroveň osvětlenosti stanovena závaznými normami. Ta může být pak nastavena podle požadavků uživatele nebo podle normami daných hygienických limitů platných pro daný prostor. Pokud hladina osvětlenosti klesne pod stanovenou minimální hodnotu, je nutné provést zásah do osvětlovací soustavy. Jedná se o nákladný proces zahrnující administrativní režii a práci montážních pracovníků zajišťující výměnu světelných zdrojů. Náklady spojené s výměnou světelných zdrojů mohou v některých případech i mnohonásobně převyšovat náklady na pořízení světelných zdrojů.

LED světelné zdroje nemají tendenci k funkčnímu selhání, namísto toho postupně klesá vyzařovaný světelný tok. Užité životnosti LED je extrémně dlouhá a mnohdy i překračuje životnost svítidla jehož je součástí. V případě velkých instalací může v závislosti na životnosti svítidel dojít tímto postupným snižováním světelného toku k poklesu osvětlenosti pod normami stanovené hodnoty. Nicméně je interval výměny světelných zdrojů tak dlouhý, že se při použití LED technologie celkové náklady na provoz osvětlovací soustavy snižují.

Při návrhu osvětlovacích soustav využívající žárovky či výbojky uvažují projektanti celkovou osvětlenost, minimální osvětlenost, předpokládanou úmrtnost světelných zdrojů, požadovanou životnost a provozní podmínky svítidel.

V závislosti na instalaci mohou konvenční předřadníky nastavovat provozní napětí světelných zdrojů. Snižování provozního napětí snižuje vyzařovaný světelný tok, ale také prodlužuje životnost světelného zdroje. Pro srovnatelné řízení LED světelných zdrojů konstruktéři navrhují regulátory proudu a ochranné obvody pro kontrolu teploty. Regulací prodloužená životnost světelných zdrojů může přinést významné úspory nákladů pro provozovatele osvětlovací soustavy. [43]

7.3.2 Stárnutí světelných zdrojů

Nedávný rozmach používání světelných zdrojů poskytuje projektantům nové údaje o životnosti LED světelných zdrojů. Funkční selhání světelných zdrojů je výjimečné, namísto toho vyzařovaný světelný tok v průběhu času klesá. Tento jev je označován jako stárnutí světelných zdrojů. [43]

7.3.3 Degradace LED vlivem teploty

Velmi výrazný vliv nejen na měrný výkon LED, ale především na jejich životnost má teplota polovodičového přechodu. Dlouhodobým působením tepla vzrůstá v PN přechodu počet nezářivých rekombinací na úkor zářivých rekombinací. Tyto změny jsou způsobeny teplotně závislými chemickými reakcemi.

Některé metody testování LED s cílem odhadnout jejich životnost využívají i pouhou degradaci PN přechodu vlivem působení vysoké teploty, přičemž testovaná LED není nijak elektricky namáhána. Provedeným testováním při teplotách vysoko nad doporučenými provozními hodnotami lze v relativně krátkém čase dosáhnout degradace původního měrného výkonu na 50 %. Doba, za jakou k patřičné degradaci dojde lze popsat rovnicí

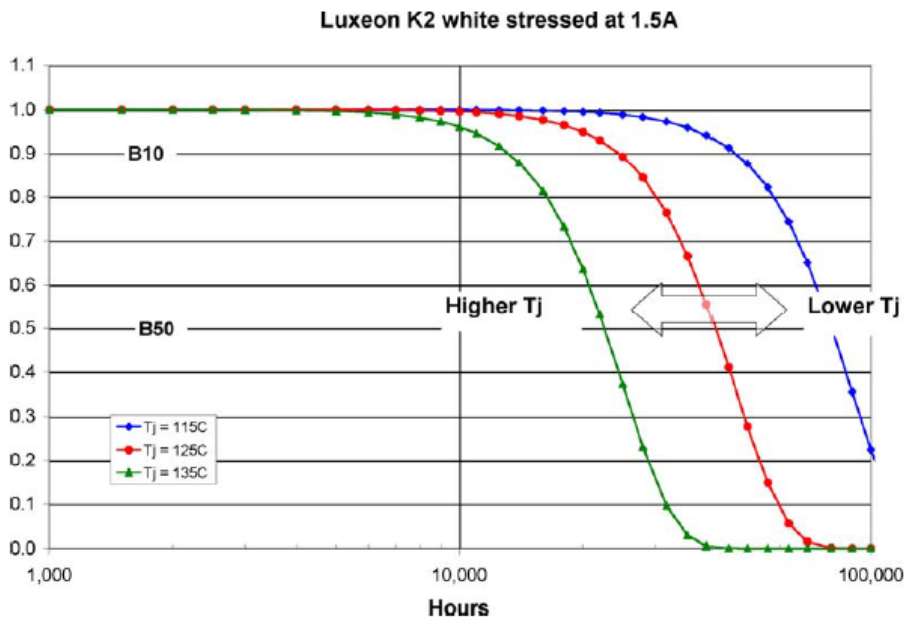
$$t_f = \frac{50\%}{Ae^{\frac{-E_a}{k_B T}}} \quad (7.5)$$

kde

- t_f ... Očekávaná životnost LED
- A ... konstanta charakterizující degrační mechanismus a testovací podmínky
- T ... Teplota PN přechodu [K]
- k_B ... Boltzmannova konstanta [eV/K]
- E_a ... Aktivační energie [eV]

Provedením experimentů lze z výše uvedeného vztahu získat hodnotu aktivační energie, kterou lze pak využít pro výpočet životnosti při jiných tepelných podmínkách. [44]

Příklad vlivu tepelného namáhání konkrétní LED na její životnost je znázorněn na obrázku.



Obrázek 7.5. Vliv teploty na životnost LED. Převzato z [43]

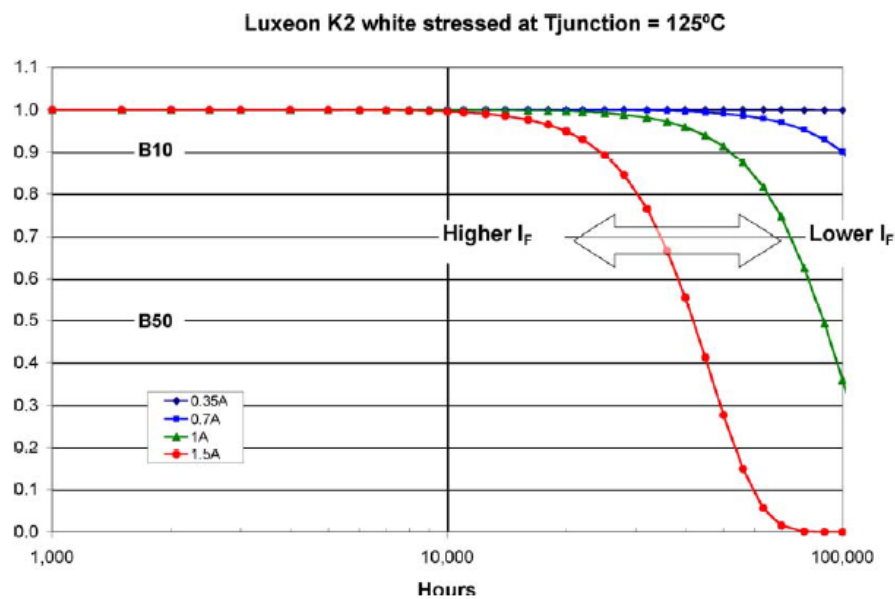
Graf udává na svislé ose poměr vyzařovaného světelného toku nové LED a led po daném počtu hodin. Na vodorovné ose je počet hodin. V grafu jsou vyneseny hodnoty pro různé teploty PN přechodu. Z grafu je patrné, že teplota polovodičového přechodu má zásadní vliv na životnost LED. Závislost poklesu životnosti na teplotě není lineární, při vzrůstu teploty o 10 °C klesá životnost přibližně o polovinu.

7.3.4 Degradace LED vlivem elektrického namáhání

Podobně jako tepelné namáhání má vliv na životnost i velikost procházejícího proudu. Vliv elektrického namáhání na životnost se obvykle testuje odděleně od vlivu teploty, testují se tedy LED s různým procházejícím proudem při stejné teplotě PN přechodu.

Podobným způsobem, jako při tepelném namáhání, lze na základě experimentů počítat potřebné parametry a odhadovaný vliv na životnost i při namáhání procházejícím proudem. [44]

Příklad vlivu proudového namáhání LED na životnost při konstantní teplotě PN přechodu je znázorněn na obrázku.



Obrázek 7.6. Vliv elektrického namáhání na životnost LED. Převzato z [43]

Graf udává na svislé ose poměr vyzařovaného světelného toku nové LED a LED po daném počtu hodin proudového namáhání. Na vodorovné ose je počet hodin. V grafu jsou vyneseny hodnoty pro různé hodnoty procházejícího proudu. Z grafu je patrné, že velikost procházejícího proudu má ještě větší vliv na degradaci PN přechodu a tím i životnost LED než tepelné namáhání.

Kapitola 8

Závěr

8.1 Systémy pro řízení osvětlovacích soustav

Porovnáním vybraných systémů používaných k řízení osvětlovacích soustav byly shrnuty jejich přednosti a nevýhody. Nejstarší z uvedených systémů a zároveň jediný zástupce analogových systémů se k účelům řízení složitějších soustav jeví jako zcela nevhodný, protože umožňuje pouze jednosměrnou komunikaci. Nelze tak realizovat zpětnovazební řízení. Navíc vyžaduje samostatný pár vodičů pro každé samostatné svítidlo (případně barevný kanál svítidla), což by v případě rozsáhlých instalací představovalo vedení velmi početného svazku vodičů.

Mezi digitální systémy pouze s jednosměrným přenosem řídicích instrukcí patří protokol DMX 512. Ten je obvykle používán i v kombinaci s RGB svítidly a pohyblivými akčními členy, neumožňuje však diagnostiku připojených zařízení.

V případě potřeby řízení systémů zajišťující pouze osvětlení bez dalších prvků automatizace budov je vhodné použití protokolu DALI. Sběrnice na něm založena může obousměrně komunikovat přímo s předřadníky svítidel, odpadá tak investice do převodníků. Sběrnice DALI dokáže adresovat pouze 64 zařízení, toto omezení lze obejít připojením do jiného nadřazeného systému (například KNX) nebo použitím zařízení určeného k propojení sběrnic.

K řízení systémů obsahujících kromě svítidel i jiná zařízení, například stínící techniku se nabízí KNX, který umožňuje řízení veškeré domácí automatizace. Systému KNX je velmi podobný jeho předchůdce EIB, který však již má oproti KNX mnohem menší podporu výrobců hardware.

Jednou z hlavních motivací použití systémů řízení osvětlovacích soustav je úspora elektrické energie. K optimalizaci příkonu svítidel je vhodné použití fotocitlivých senzorů a zároveň možnost návazného řízení stínící techniky. Dobře navržený systém je pak schopen zužitkovat příspěvek denního světla, aniž by docházelo k oslnění osob pobývajících uvnitř budovy. Z popisovaných možností je k programování světelných scén nevhodnější protokol DALI, k řízení komplexnějších systémů obsahující i stínící techniku pak jeho kombinace s protokolem KNX.[2]

8.2 Návrh konkrétní osvětlovací soustavy

Na základě podkladů byl vytvořen model budovy, ve které byla dle požadavků navrhována osvětlovací soustava. V průběhu návrhu musel být několikrát změněn typ svítidel, jako vyhovující bylo nakonec vybráno svítidlo DUNKER65-LED-W12-20950-4K. Záměrně byla v návrhu umístěna všechna svítidla stejná, aby se předešlo problémům s různorodostí a přehlédnutím rozdílů. Byl stanoven udržovací činitel, jehož hodnota je 0,72. Navržená osvětlovací soustava plně vyhovuje zadaným požadavkům a příslušným normám. V programu DIALux byl vytvořen dokument se světelně technickými výsledky a podrobnostmi návrhu jednotlivých osvětlovacích soustav.

K výpočtu denní složky osvětlení bylo potřeba v modelu vytvořit okna a světlíky. Byly použity standardizované rozměry světlíků 4,1 x 2,4 m s roztečí 18 m v podélném i příčném směru, dokumentace o skutečném stavu nebyla k dispozici. Dále byl spočítán číselník denní osvětlenosti a byla odhadnuta denní složka osvětlení pro každou hodinu v roce. Porovnáním příkonu neregulované soustavy s minimálním příkonem odpovídajícím regulaci podle denního světla byla spočítána potenciální roční úspora energie. Byla provedena úvaha o podobě řídicího systému.[20]

8.3 Software pro výpočet návratnosti investice do inteligentního řídicího systému

V programu DIALux bylo simulováno více než 250 různých místností. Na základě výsledků simulací byla sestavena polynomiální rovnice, která slouží jako univerzální nástroj pro výpočet denní osvětlenosti. V oblasti simulovaného rozsahu hodnot a jejich blízkém okolí tato rovnice poskytuje poměrně přesné výsledky, odchylky osvětlenosti spočítané touto rovnicí a osvětlenosti získané simulací v programu DIALux jsou řádově v jednotkách lx. Při výrazném odchýlení od simulovanému rozsahu hodnot poskytuje model velmi nepřesné a nepoužitelné výsledky, což je dáno podstatou náhrady funkce polynomiálním rozvojem. Rozsah zadávaných hodnot je tedy omezen.

Následně byla s použitím dalších simulací v programu DIALux získána tabulka hodnot horizontální exteriérové osvětlenosti pro každou hodinu každého 21. dne v měsíci. S využitím těchto hodnot je přepočítávána hodnota osvětlenosti místnosti získané pomocí polynomiální rovnice. Pro danou místnost je pak počítán potřebná výkon svítidel k zajištění požadované osvětlenosti. Všechny simulace a výpočty uvažují rovnoměrně zataženou oblohu, není uvažována přímá složka denního světla. K použití tohoto předpokladu bylo využito skutečnosti, že přímá složka denního světla je obtížně využitelná a často potlačena stínící technikou.

Výše uvedené výpočty jsou prováděny ve vytvořeném software, který má podobu webové aplikace. Ta byla vytvořena s ohledem na uživatelskou jednoduchost a univerzálnost. Jejím výstupem je zhodnocení úspor a návratnosti investice do inteligentního řídicího systému. Na uživateli aplikace je, aby na základě vypočítané návratnosti zhodnotil smysluplnost investice a porovnal jí s předpokládanou životností systému.

8.4 Posouzení vlivu regulace na životnost LED

Kromě úspor elektrické energie ovlivňuje regulace výkonu svítidel i životnost LED čipů. Byl posuzován vliv teploty a vliv elektrického namáhání na životnost LED. Oba tyto faktory mají výrazný vliv, se snižující se teplotou nebo snižujícím se elektrickým namáháním se životnost exponenciálně prodlužuje. Oba tyto faktory spolu interagují, teplota LED je totiž závislá na procházejícím elektrickém proudu.

Prodloužení životnosti LED vlivem snížení výkonu svítidel je tak výrazné, že obvykle bude limitujícím faktorem životnost elektronického předřadníku svítidla. Snížení výkonu svítidla o desítky procent může prodloužit životnost LED i několikanásobně. Přesný vliv regulace na životnost konkrétních LED je obtížné stanovit, závisí mimo jiné na provozních teplotních podmínkách a na obtížně dostupných údajích o vlastnostech konkrétních čipů.

Literatura

- [1] *The DALI guide* [online]. 3-1. London: Artistic Licence [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: <http://www.artisticlicence.com/WebSiteMaster/User%20Guides/the%20dali%20guide.pdf>
- [2] NEPIVODA, Tomáš. *Analýza principů, výhod a nevýhod různých řídicích systémů pro řízení osvětlovacích soustav*. 2017. Projekt 1. ČVUT FEL. Vedoucí práce Ing. Marek Bálský, Ph.D.
- [3] *DALI Manual* [online]. Frankfurt nad Mohamem, Německo: DALI, 2001 [cit. 2017-04-21]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20130627012349/http://www.dali-ag.org:80/c/manual_gb.pdf
- [4] Break the limit - unlimited number of DALI devices on the DALI bus. *Niko-Servodan* [online]. [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: http://www.nikoservodan.com/unlimited_dali-devices
- [5] *DALI TW MODULE TYPE 6 - iLumTech* [online]. ILUMTECH, 2015 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.ilumtech.eu/portfolio/dali-tw-6/>
- [6] *Information and facts about DMX 512 protocol* [online]. DMX 512, 2017 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.dmx-512.com/>
- [7] Lumenhub. *WHAT IS DMX512?* [online]. 2016 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://lumenhub.com/fundamentals-of-dmx512/>
- [8] *DSI specifikace*. 1999.
- [9] *0 to 10V Analog Control Protocol* [online]. 2009 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.epanorama.net/documents/lights/0to10v.html>
- [10] *DALI to 0-10V Interface Datasheet*. Lunatone Industrielle Elektronik, 2015. Art. Nr. 86458508-AN.
- [11] *KNX Association* [online]. KNX Association, 2012 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.knx.org/>
- [12] *KNX DALI gateway Plus for the KNX system* [online]. [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://www.gira.com/en/gebaeudetechnik/systeme/knx-eib-system/knx-produkte/gateways/knx-dali-gateway.html>
- [13] *European Installation Bus - KUNBUS GmbH* [online]. [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <https://www.kunbus.com/european-installation-bus.html>
- [14] TOMAN, Karel. a Kunc JOSEF. *Systémová technika budov: elektroinstalace podle standardu EIB*. Praha: FCC PUBLIC, 1998. ISBN 80-901-9854-6.
- [15] TUENGE, Jason a Michael POPLAWSKI. *PoE Lightning System Emergy Reporting Study Part 1*. Pacific Northwest National Library, 2017.
- [16] Princip činnosti Power Over Ethernet. *Vývoj.HW.cz* [online]. 2004 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/produkty/ethernet/princip-cinnosti-power-over-ethernet.html>

- [17] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [18] Tunable-white LEDs. *Two-minute explainer* [online]. 2017 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: <http://luxreview.com/article/2016/05/two-minute-explainer-tunable-white-leds>
- [19] OSRAM OSTAR Stage. *OSRAM Opto Semiconductors* [online]. [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: https://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/led-light-emitting-diodes/osram-ostar/osram-ostar-stage/index.jsp
- [20] NEPIVODA, Tomáš. *Řízení osvětlovací soustavy průmyslové haly*. 2018. Projekt 2. ČVUT FEL. Vedoucí práce Ing. Tomáš Sousedík.
- [21] TNI 36 0451. *Údržba vnitřních osvětlovacích soustav*. 2006.
- [22] *Katalog DUNKER65-LED*. Vyrtych.
- [23] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Český normalizační institut.
- [24] *Údržba osvětlovacích soustav - opomíjený zdroj úspor* [online]. 14.2.2007 [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3891-udrzba-osvetlovacich-soustav-opomijeny-zdroj-uspor>
- [25] *DIALux - DIAL* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <https://www.dial.de/en/dialux/>
- [26] SOKANSKÝ, Karel. *Inteligentní řízení osvětlovacích soustav vnitřního osvětlení* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: http://www.csorsostrava.cz/publikace/inteligentni_ridici_systemy%20-%202003.pdf
- [27] BOŠOVÁ, Daniela. *Denní osvětlení budov: TP 1.8.8*. Praha: pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2016. Metodické a technické pomůcky k činnosti autorizovaných osob. ISBN 978-80-87438-70-1.
- [28] *Zvýšení úspor elektrické energie v inteligentní budově pomocí regulace osvětlení* [online]. 12.12.2013 [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/zvyseni-uspor-elektricke-energie-v-inteligentni-budove-pomoci-regulace-osvetleni-629>
- [29] *ABB 6122/98-509* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/ABB.DEBJE6132-0-0307>
- [30] ČSN 36 0035. *Denní osvětlení budov*. 1968.
- [31] ČSN 73 0580-1. *Denní osvětlení budov - Část 1: Základní požadavky*. Český normalizační institut, 2007.
- [32] KAŇKA, Jan. *Stavební fyzika 1: akustika budov*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03664-8.
- [33] BUDÍN, Jan. Složky ceny elektřiny. *OENERGETICE.cz* [online]. 10.2.2015 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/trh-s-elektrinou/za-co-vsechno-platime-v-uctech-za-elektrinu/>
- [34] MatlabCentral: Multivariate Polynomial Regression. *GitHub* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://github.com/ahmetcecen/MultiPolyRegression-MatlabCentral>
- [35] *RFC 1866 - The 'text/html' Media Type* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://tools.ietf.org/html/rfc1866>

-
- [36] *PHP: What is PHP? - Manual* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://php.net/manual/en/intro-what-is.php>
- [37] PAVELKA, Tomáš. *Provozní vlastnosti LED a jejich modelování*. Brno, 2016. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Petr Baxant, Ph.D.
- [38] Voltampérová charakteristika diody. *ELUC* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/578> 1983. ISBN 0005-8580.
- [39] KLIPSTEIN, Don. *LED types by Color, Brightness, and Chemistry* [online]. 18.6.2011 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://donklipstein.com/ledc.html>
- [40] *Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier* [online]. 26.3.2014 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.cree.com/news-media/news/article/cree-first-to-break-300-lumens-per-watt-barrier>
- [41] SOUSEDÍKOVÁ, Kristýna. Dopad LED osvětlení na lidský organismus. *Časopis Světlo* [online]. 15.2.2017 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/dopad-led-osvetleni-na-lidsky-organismus-2660>
- [42] BUDZYNSKI, Lukasz. *Junction temperature, spectral shift, and efficiency in GaInN based blue and green light Thin Solid Films* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-c0be688f-636b-4703-9ffa-7069c311415a/c/chmot64_01.pdf
- [43] PHILIPS. *Understanding power LED lifetime analysis* [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: http://www.climateactionprogramme.org/images/uploads/documents/Philips_Understanding-Power-LED-Lifetime-Analysis.pdf
- [44] LIANQIAO, Yang, Hu JIANZHENG a Moo Whan SHIN. *Degradation of high power LEDs at dynamic working conditions* [online]. 1.6.2009 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://yonsei.pure.elsevier.com/en/publications/degradation-of-high-power-leds-at-dynamic-working-conditions>

Příloha A

Tabulka hodnot horizontální exteriérové osvětlenosti

	leden	únor	březen	duben	květen	červen
0:28	0	0	0	0	0	0
1:28	0	0	0	0	0	0
2:28	0	0	0	0	0	0
3:28	0	0	0	0	0	0
4:28	0	0	0	0	0	0
5:28	0	0	0	0	925	1684
6:28	0	0	1368	1656	4114	4779
7:28	0	1354	4810	5102	7419	8006
8:28	1785	4475	7943	8443	10616	11146
9:28	4275	7107	10555	11450	13487	13983
10:28	6117	9069	12468	13918	15835	16325
11:28	7185	10227	13552	15680	17501	18011
12:28	7408	10503	13732	16615	18372	18928
13:28	6770	9878	12996	16680	18387	19013
14:28	5314	8395	11395	15811	17547	18260
15:28	3139	6154	9038	14127	15907	16719
16:28	395	3308	6085	11721	13581	14497
17:28	0	0	2737	8759	10725	11744
18:28	0	0	0	5442	7536	8649
19:28	0	0	0	1995	4231	5422
20:28	0	0	0	0	1034	2283
21:28	0	0	0	0	0	0
22:28	0	0	0	0	0	0
23:28	0	0	0	0	0	0

Tabulka A.1. Exteriérová osvětlenost [lx]1. část.

	červenec	srpen	září	říjen	listopad	prosinec
0:28	0	0	0	0	0	0
1:28	0	0	0	0	0	0
2:28	0	0	0	0	0	0
3:28	0	0	0	0	0	0
4:28	0	0	0	0	0	0
5:28	615	0	0	0	0	0
6:28	3754	1583	0	0	0	0
7:28	7044	5018	2472	0	0	0
8:28	10262	8367	5861	3035	2982	2239
9:28	13187	11401	8889	5944	5223	4485
10:28	15620	13912	11351	8270	6757	6040
11:28	17396	15731	13079	9853	7480	6797
12:28	18394	16733	13995	10586	7341	6705
13:28	18545	16850	13918	10418	6351	5771
14:28	17839	16073	12973	9362	4576	4057
15:28	16325	14456	11182	7489	2139	1681
16:28	14105	12109	8669	4926	0	0
17:28	11331	9192	5604	1849	0	0
18:28	8192	5903	2196	0	0	0
19:28	4902	2468	0	0	0	0
20:28	1685	0	0	0	0	0
21:28	0	0	0	0	0	0
22:28	0	0	0	0	0	0
23:28	0	0	0	0	0	0

Tabulka A.2. Exteriérová osvětlenost [lx] 2. část.