ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky

Optimalizace kombinovaného osvětlení denním a umělým světlem

Optimalization of artificial lighting combined with daylight

Diplomová práce

Diploma thesis

Bc. Jiří Pavlousek

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

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jiří Pavlousek**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Optimalizace kombinovaného osvětlení denním a umělým světlem**

Pokyny pro vypracování:

1. Technické požadavky na osvětlovací soustavy v interiérech a na denní osvětlení.
2. Analýza světelně technických a elektrických parametrů osvětlovací a stínící soustavy při kombinovaném osvětlení denním a umělým světlem při různých venkovních podmínkách.
3. Návrh metodiky řízení soustavy umělého osvětlení v závislosti na prostupu denního světla do interiéru.

Seznam odborné literatury:

[1] ČSN EN 12464: Světlo a osvětlení: Osvětlení pracovních prostorů.
[2] ČSN 360020: Sdružené osvětlení
[3] HABEL, Jiří, et al. Světelná technika a osvětlování. 1. Praha : FCC Public, 1995. 438 s. ISBN 80-901985-0-3.

Vedoucí: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

Abstrakt

Tato práce se zabývá technickými požadavky na osvětlování pracovních prostorů, analýzou osvětlení a návrhem metodiky pro řízení osvětlovací a stínicí soustavy.

V první části jsou shrnuty požadavky na osvětlování interiérů z hlediska platných českých norem pro umělé, denní a sdružené osvětlení.

Druhá část práce se zabývá komplexní analýzou osvětlení zvolené vzorové místnosti. Analýza je provedena jak pro osvětlení umělé, tak pro osvětlení denní při různých atmosférických podmínkách a nastavení stínicí soustavy.

V poslední části práce je na základě naměřených hodnot zpracován návrh řídicích algoritmů osvětlovací a stínicí soustavy.

Klíčová slova

světlo a osvětlování, umělé osvětlení, denní osvětlení, sdružené osvětlení, řízení osvětlovací soustavy, řízení stínicí soustavy - žaluzie

Abstract

This thesis focuses on illumination of interior work places, on analysis of lighting parameters and on propose of automatic control of lighting and vertical blinds systems.

In the first part, there is summary of technical requests for artificial lighting, daylighting and combined lighting, based on Czech technical standards.

Second part consist of complex analysis of lighting in sample room. Analysis comprises of artificial lighting and daylighting at different atmospheric conditions and at different vertical blinds settings.

In the last part, there is a new control algorithm of lighting and vertical blinds systems proposed, based on measured values form second part of thesis.

Keywords

lighting and illumination, artificial lighting, daylighting, combined lighting, lighting systems control, vertical blinds system control

Prohlášení

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 19. 5. 2016

Jiří Pavlousek

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Markovi Bálskému Ph.D. za ochotu, cenné připomínky a věnovaný čas.

Obsah

1. Úvod 12

1.1 Světlo a osvětlování 12

1.2 Cíl práce 13

2. Technické požadavky na osvětlovací soustavy v interiérech a na denní osvětlení 14

2.1 Požadavky na umělé osvětlení 14

2.1.1 Osvětlenost 14

2.1.1.1 Rovnoměrnost osvětlení 16

2.1.2 Jas 17

2.1.2.1 Oslnění 18

2.1.2.2 Pracoviště se zobrazovacími jednotkami (DSE) 20

2.1.3 Hodnocení barev 21

2.1.3.1 Barevný tón světla 21

2.1.3.2 Podání barev 23

2.1.4 Další požadavky 23

2.1.5 Postup při návrhu osvětlovací soustavy 24

2.1.5.1 Klasifikace pracovního prostoru 24

2.1.5.2 Výběr svítidla 24

2.1.5.3 Model, simulace a výpočet parametrů 26

2.1.5.4 Realizace a měření osvětlení 26

2.2 Požadavky na denní osvětlení 27

2.2.1 Činitel denní osvětlenosti 27

2.2.2 Funkční vymezení vnitřního prostoru 30

2.2.3 Rovnoměrnost denního osvětlení 31

2.2.4 Rozložení jasu a oslnění denním světlem 31

2.3 Požadavky na sdružené osvětlení 32

2.3.1 Užití sdruženého osvětlení 32
2.3.2 Posuzování kvantity sdruženého osvětlení 32
2.3.2.1 Denní složka sdruženého osvětlení 33
2.3.2.2 Umělá složka sdruženého osvětlení 33
2.3.3 Posuzování kvality sdruženého osvětlení 33
2.3.3.1 Rovnoměrnost sdruženého osvětlení 33
2.3.3.2 Rozložení jasů při sdruženém osvětlení 34
2.3.3.3 Barva doplňujícího umělého osvětlení 34
2.3.4 Regulace sdruženého osvětlení 35
3. Analýza parametrů osvětlovací a stínící soustavy při kombinovaném osvětlení 36
3.1 Vzorová místnost 36
3.1.1 Rozměry a vybavení místnosti 37
3.1.2 Výpočtové body a kontrolní plochy 38
3.1.3 Charakteristika osvětlovací soustavy 39
3.1.4 Charakteristika stínicí soustavy 40
3.1.5 Udržovací činitel 40
3.2 Použité přístroje 41
3.3 Analýza umělého osvětlení 41
3.3.1 Měření umělého osvětlení 41
3.3.2 Výpočet umělého osvětlení 44
3.4 Analýza denního osvětlení 47
3.4.1 Měření denního osvětlení – zatažená obloha 47
3.4.2 Výpočet denního osvětlení – zatažená obloha 50
3.4.3 Měření denního osvětlení – jasná obloha 54
3.4.3.1 Jasná obloha – bez žaluzií 55
3.4.3.2 Jasná obloha – užití venkovních žaluzií 57

3.5 Vyhodnocení a závěry z analýzy osvětlení 59

4. Návrh metodiky řízení soustavy umělého osvětlení v závislosti na denním světle 61

4.1 Ukazatele stavu osvětlení 61

4.2 Návrh řízení osvětlovací soustavy 62

4.2.1 Algoritmus řízení hladiny osvětlenosti 62

4.2.2 Nastavení konstant řízení osvětlovací soustavy 64

4.3 Návrh řízení stínicí soustavy 65

4.3.1 Algoritmus řízení stínicí soustavy 66

4.3.2 Nastavení konstant řízení stínicí soustavy 68

4.4 Řízení teploty chromatičnosti 71

5. Závěr 72

5.1 Vyhodnocení cílů práce 72

5.2 Návrhy na další pokračování práce 73

Literatura 74

Příloha 1 – Obsah přiloženého CD 76

Seznam obrázků

Rozvržení oblastí pro hodnocení osvětlení pracoviště dle [1] 15
Činitel polohy podle Gutha [4] 19
Úhel clonění světelného zdroje umístěného ve svítidle [1] 20
Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy xy (CIE 1931) s vyznačenou čárou teplotních zářičů [6] 22
Poměrná pozorovací vzdálenost [2] 28
Funkční vymezení vnitřního prostoru z hlediska požadavků na denní osvětlení 30
Vzorová místnost - půdorys 37
Vzorová místnost - řez - okno 38
Vzorová místnost - kontrolní body a plochy 39
Svítidlo MO T8 (výrobce TREVOS a.s.) 40
Umělé osvětlení - isolinie osvětlenosti [lx] 43
Umělé osvětlení - 3D vizualizace 44
Zatažená obloha - isolinie činitele denní osvětlenosti 49
Zatažená obloha - 3D vizualizace 51
Řízení osvětlovací soustavy - vývojový diagram - obecně 63
Řízení osvětlovací soustavy - vývojový diagram - T2: B3-355 65
Řízení stínicí soustavy - vývojový diagram - obecně 67
Řízení osvětlovací soustavy - vývojový diagram - T2: B3-355 70

Seznam tabulek

Osvětlenost bezprostředního okolí zrakového úkolu [1] 16
Doporučené hodnoty činitele odrazu povrchů [1] 17
Minimální úhel clonění v závislosti na jasu světelného zdroje [1] 20
Průměrné mezní jasy svítidel, které se mohou zobrazit na plochých obrazovkách [1] 21
Barevný tón světla [1] 22
Činitel denní osvětlenosti – posouzení denního osvětlení [2] 29
Činitel denní osvětlenosti – posouzení sdruženého osvětlení [3] 33
Poměr jasů pozorovaného předmětu a okenního otvoru [2] 34
Odraznosti povrchů vzorové místnosti 38
Umělé osvětlení - naměřené hodnoty osvětlenosti 42
Umělé osvětlení – vyhodnocení 42

Umělé osvětlení - naměřené hodnoty jasu 43
Umělé osvětlení - porovnání vypočtených a naměřených hodnot 45
Umělé osvětlení - porovnání vypočtených a naměřených hodnot 46
Umělé osvětlení - hodnocení oslnění metodou UGR.....46
Zatažená obloha - naměřené hodnoty osvětlenosti 48
Zatažená obloha – vyhodnocení.....48
Zatažená obloha - naměřené hodnoty jasu 50
Zatažená obloha - teplota chromatičnosti.....50
Zatažená obloha - porovnání vypočtených a naměřených hodnot činitele denní osvětlenosti.....52
Zatažená obloha - porovnání vypočtených a naměřených hodnot osvětlenosti 53
Zatažená obloha - porovnání vypočtených a naměřených hodnot činitele denní osvětlenosti.....53
Jasná obloha - bez žaluzií - naměřené hodnoty osvětlenosti.....55
Jasná obloha - bez žaluzií - porovnání vypočtených a naměřených hodnot osvětlenosti56
Jasná obloha - bez žaluzií - naměřené hodnoty jasu 56
Jasná obloha - bez žaluzií - teplota chromatičnosti.....57
Jasná obloha – užití žaluzií – naměřené hodnoty osvětlenosti.....58
Jasná obloha – užití žaluzií – naměřené hodnoty jasů 59
Jasná obloha – užití žaluzií – teplota chromatičnosti.....59
Ukazatelé stavu osvětlení pro různé světelné scény.....61
Řízení osvětlovací soustavy - konstanty a proměnné.....63
Řízení osvětlovací soustavy - konfigurace T2: B3-355 64
Řízení stínicí soustavy - konstanty a proměnné.....66
Řízení stínicí soustavy - konfigurace T2: B3-355.....69

Seznam použitých symbolů

Symbol	*Význam*	*Jednotka*
E	Osvětlenost	lx
I	Svítivost	cd
L	Jas	$cd.m^{-2}$
Ω	Prostorový úhel	sr
U_0, u_0	Rovnoměrnost umělého osvětlení	-
UGR	Činitel oslnění „Unified glare rating“	-
T_{CP}	Náhradní teplota chromatičnosti	K
D	Činitel denní osvětlenosti	%
U_{0D}, u_{0D}	Rovnoměrnost denního osvětlení	-
U_{0S}, u_{0D}	Rovnoměrnost sdruženého osvětlení	-
E_H	Horizontální osvětlenost	lx
X_m	Střední hodnota veličiny X	x
X_{min}	Minimální hodnota veličiny X	x
X_{max}	Maximální hodnota veličiny X	x

Seznam použitých zkratek

Zkratka	*Význam*
CIE	Commission Internationale de l´Eclairage, Mezinárodní komise pro osvětlování
ČSN	Česká technická norma
EN	European Norm, evropská norma

1. Úvod

1.1 Světlo a osvětlování

V současné době je světlo nedílnou součástí životního prostředí většiny obyvatel. Obzvláště v moderních civilizacích tráví lidé velkou část svého života uvnitř budov, kde je pro vytvoření příjemného prostředí nutné vytvořit tzv. světlenou pohodu.

Světelná (ne)pohoda výrazně ovlivňuje člověka a to jak po stránce psychické, tak i po stránce fyzické. Kvalitní osvětlení umožňuje lidem provádět požadované zrakové úkony s maximální precizností, minimem chyb a s dostatečným oddálením pocitu únavy. Správné složení osvětlení (umělé a denní složky) obvykle působí pozitivně na náladu člověka a také může pozitivně ovlivnit fyziologické i psychologické reakce.

Pro dosažení světlené pohody je třeba dostatečně dbát na všechny aspekty osvětlení, ať již jde o dostatečnou udržovanou osvětlenost, správné rozložení jasů a omezení oslnění, podání barev a tvaru nebo o dostatečné proslunění a příspěvek denního světla. Pro efektivní návrh osvětlení se užívá specializovaných výpočetních programů tak, aby bylo možno kontrolovat splnění požadovaných světelně technických parametrů už ve fázi projektu.

Společně s vývojem západní společnosti přichází tlak nejen na kvalitu osvětlení, ale stále více se objevují požadavky na snižování energetické náročnosti stávajících i nově budovaných staveb a také na automatizaci spínání a řízení osvětlovacích soustav. Nově budované stavby se často ucházejí o certifikáty potvrzující energetickou šetrnost budovy, společně s nadstandardní kvalitou pracovního prostředí v nich. Příkladem těchto certifikátů jsou např. certifikáty LEED nebo BREEAM.

Dále se klade stále větší důraz na snížení energetické náročnosti budov a vytvoření přirozenějšího prostředí za pomoci větších příspěvků denního světla. S tímto jsou spojené pokusy o automatickou regulaci stínicí soustavy, která umožňuje pružně reagovat na změny atmosférických podmínek a maximalizovat tak využití denního světla, a to při současném zachování komfortu osvětlení jako celku.

Kombinované osvětlení denním a umělým světlem je, společně s automatickým řízením osvětlovací a stínicí soustavy, hlavním tématem této práce.

1.2 Cíl práce

Prvním cílem práce je vytvořit souhrn požadavků na umělé, denní a kombinované osvětlení plynoucí z platných právních norem, včetně popisu základních projekčních kroků při návrhu osvětlovacích soustav.

Druhým cílem je kompletní analýza osvětlení skutečné místnosti s venkovními žaluziemi. Analýza se bude skládat z měření osvětlení umělého, denního při zatažené obloze a denního při obloze jasné, kde bude navíc analyzován vliv různého nastavení venkovních žaluzií. Současně s tímto měřením je mým cílem vytvořit model místnosti v programu Dialux 4.12 a porovnat naměřené a vypočtené hodnoty a posléze vyhodnotit přesnost výpočtu pro různé aplikace.

Třetím cílem práce je návrh základního algoritmu pro automatické řízení osvětlení místnosti, a to především prostřednictvím spínání a stmívání svítidel pro umělé osvětlení, s využitím podílu denního světla a s integrovaným řízením stínicí soustavy (venkovních žaluzií).

2. Technické požadavky na osvětlovací soustavy v interiérech a na denní osvětlení

Technické požadavky na osvětlování pracovních prostorů řeší primárně norma ČSN EN 12 464: Světlo a osvětlení: Osvětlení pracovních prostorů. [1]. Hodnocení denního osvětlení se provádí dle normy ČSN 73 0580: Denní osvětlení budov [2]. Podmínky a požadavky na kombinované osvětlení jsou zaneseny v normě ČSN 36 0020: Sdružené osvětlení [3]. V následujících kapitolách jsou shrnuty nejdůležitější požadavky plynoucí z těchto norem.

2.1 Požadavky na umělé osvětlení

Jak již bylo zmíněno, požadavky na umělé osvětlení uvádí norma ČSN EN 12 464 [1], pro vnitřní pracovní prostory konkrétně její část ČSN EN 12 464-1: Světlo a osvětlení: Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory.

Předpokládejme, že všechna použitá svítidla (i jejich součásti) a další elektrotechnická zařízení odpovídají svým výrobním a provozním provedením platné legislativě, především platným elektrotechnickým normám a předpisům.

V následujících kapitolách jsou shrnuty požadavky normy [1] na umělé osvětlení pracovních prostor, společně s pravidly pro vhodný výběr osvětlovací soustavy.

2.1.1 Osvětlenost

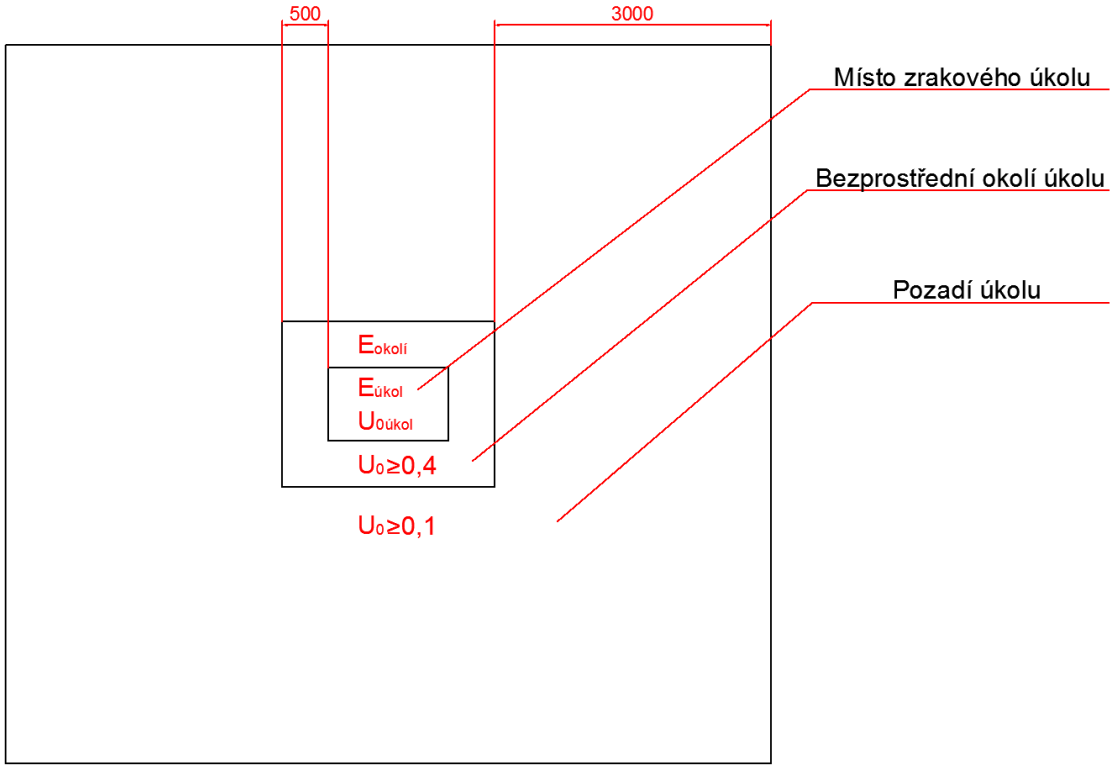
Osvětlenost, též intenzita osvětlení, je jednou ze základních fotometrických veličin. Je definována jako světelný tok dopadající na jednotku plochy:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}\ [lx] \tag{1}$$

kde Φ je světelný tok dopadající na plochu [lm],

S je plocha, na kterou tok dopadá [m^2].

Při návrhu hodnotíme osvětlení v následujících oblastech (na základě normy [1]), rozlišujeme místo zrakového úkolu, bezprostřední okolí úkolu a pozadí úkolu:



Obrázek 1: Rozvržení oblastí pro hodnocení osvětlení pracoviště dle [1]

Základní sledovanou fotometrickou veličinou je udržovaná osvětlenost E_m (tj. průměrná osvětlenost v době, kdy má být provedena údržba) v místě zrakového úkolu a jeho okolí. Pro tyto účely je definováno místo zrakového úkolu jako dílčí prostor pracoviště, na němž probíhá zrakový úkol. Bezprostřední okolí zrakového úkolu je poté definováno jako pás o šířce minimálně 0,5 m okolo místa zrakového úkolu uvnitř zorného pole (viz obr. 1).

Základní doporučená řada osvětleností, vytvořená tak, aby zohledňovala vnímatelné rozdíly, je následující (hodnoty jsou v luxech):

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1000 – 1500 – 2000 – 3000 – 5000

Volba požadované osvětlenosti zrakového úkolu poté probíhá dle klasifikace prostor podle tabulky 5 normy ČSN EN 12 464-1 [1], přičemž osvětlenost má být zvětšena o jeden stupeň řady ve speciálních případech jako je např. neobvykle dlouhé trvání zrakového úkolu, snížené zrakové schopnosti pracovníků, dále v případech, kdy je zraková činnost při práci rozhodující nebo se vzniklé chyby pouze obtížně opravují.

Hladinu osvětlenosti lze i snížit a to v případech, kdy zrakový úkol trvá neobvykle krátkou dobu nebo pokud jsou kritické detaily úkolu neobvykle velké či mají vysoký kontrast.

Co se týče osvětlení bezprostředního okolí místa zrakového úkolu, z důvodu vyvážení jasů v zorném poli, a tím sníženém namáhání zraku, jsou dány tabulkou č. 1 výše zmíněné normy [1] minimální hodnoty osvětlenosti bezprostředního okolí úkolu:

Osvětlenost místa zrakového úkolu [lx]	Osvětlenost bezprostředního okolí úkolu [lx]
≥ 750	500
500	300
300	200
200	150
150	$E_{úkol}$
100	$E_{úkol}$
≤50	$E_{úkol}$

Tabulka 1: Osvětlenost bezprostředního okolí zrakového úkolu [1]

2.1.1.1 Rovnoměrnost osvětlení

Rovnoměrnost osvětlení U_0 je definována následovně:

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_m} \; [-] \tag{2}$$

kde E_{min} je minimální hodnota udržované osvětlenosti [lx],

E_m je střední hodnota udržované osvětlenosti [lx].

Dle normy [1] nesmí být rovnoměrnost osvětlení místa zrakového úkolu menší než minimální hodnoty uvedené v tabulce 5 této normy.

Bezprostřední okolí úkolu musí při osvětlení umělým světlem splňovat podmínku $U_0 \geq 0{,}40$.

Pro účely hodnocení rovnoměrnosti je dále definováno pozadí zrakového úkolu, jako alespoň tři metry široká plocha přilehlá k bezprostřednímu okolí úkolu v mezích prostoru (viz obr. 1). Toto pozadí okolí úkolu musí při osvětlení umělým světlem splňovat podmínku $U_0 \geq 0{,}10$.

2.1.2 Jas

Druhou důležitou veličinou při návrhu osvětlení je jas a jeho rozložení v navrhovaném prostoru. Jas je definován obecně určenou hustotou světelného toku:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dS} \; [cd \cdot m^{-2}] \tag{3}$$

kde L je jas paprsků ve směru osy [cd·m^{-2}],

Φ je světelný tok přenášený paprsky [lm],

Ω je prostorový úhel, ve kterém se paprsky šíří [sr],

S je plocha kolmá k ose svazku paprsků, na které se posuzuje plošná hustota světelného toku [m^2].

Rozložení jasu v zorném poli ovlivňuje viditelnost prováděných úkolů, dobře vyvážený adaptační jas vede ke zlepšení ostrosti vidění, zvýšení kontrastní citlivosti a k celkové lepší účinnosti zrakových funkcí. K dosažení zrakové pohody je třeba vyloučit příliš velké jasy způsobující oslnění a dále příliš velké i malé jasy, které vedou k únavě v důsledku neustálé readaptace zraku, respektive v důsledku monotónního a nestimulujícího pracovního prostředí.

K zabránění přítmí a zvýšení adaptační úrovně a pohody osob se doporučují světlé plochy interiéru, především stěn a stropu. Doporučené hodnoty činitele odrazu povrchu převzaté z normy [1] jsou uvedeny v následující tabulce:

Povrch	Doporučený činitel odrazu [-]
strop	0,7 – 0,9
stěny	0,5 – 0,8
podlaha	0,2 – 0,4
hlavní předměty (nábytek, dveře, apod.)	0,2 – 0,7

Tabulka 2: Doporučené hodnoty činitele odrazu povrchů [1]

Zároveň se v uzavřených prostorech určují minimální hodnoty osvětlenosti těchto povrchů (v některých prostorech, jako např. haly těžkého průmyslu, regálové sklady je z důvodu jejich velikosti, složitosti a vybavení akceptovatelné jejich snížení) a to následovně:

- $E_m > 50$ lx, při $U_0 \geq 0{,}10$ na stěnách,
- $E_m > 30$ lx, při $U_0 \geq 0{,}10$ na stropu.

V kancelářích, chodbách, schodištích a dalších podobných prostorech, se vyžadují stěny a strop světlejší, doporučuje se E_m > 75 lx, respektive E_m > 50 lx při zachování původní rovnoměrnosti.

2.1.2.1 Oslnění

Oslnění je jev způsobený jasnými povrchy v zorném poli. Mezi příčiny oslnění mohou patřit např. nadměrné jasy částí svítidel v zorném poli (přímé oslnění), odrazy svítivých ploch na lesklých částech vybavení místnosti (oslnění odrazem), dalším zdrojem oslnění mohou být okna a světlíky (oslnění denním světlem).

Jak uvádí např. prof. Habel v [4] oslnění lze dále dělit dle vlivu na vidění na:

- oslnění psychologické
  - pozorovatelné
  - rušivé
- oslnění fyziologické
  - omezující
  - oslepující

Psychologické oslnění je registrovatelné, ale nevyvolává měřitelné změny zrakových funkcí. Norma ČSN [1] řeší omezení rušivého oslnění, pokud je dodržen požadavek na omezení rušivého oslnění, nebývá omezující oslnění problémem.

Pro hodnocení míry rušivého oslnění v interiérech (přímého oslnění od svítidel) se v současnosti (od roku 2004) užívá činitel *UGR* (z angl. *unified glare rating*):

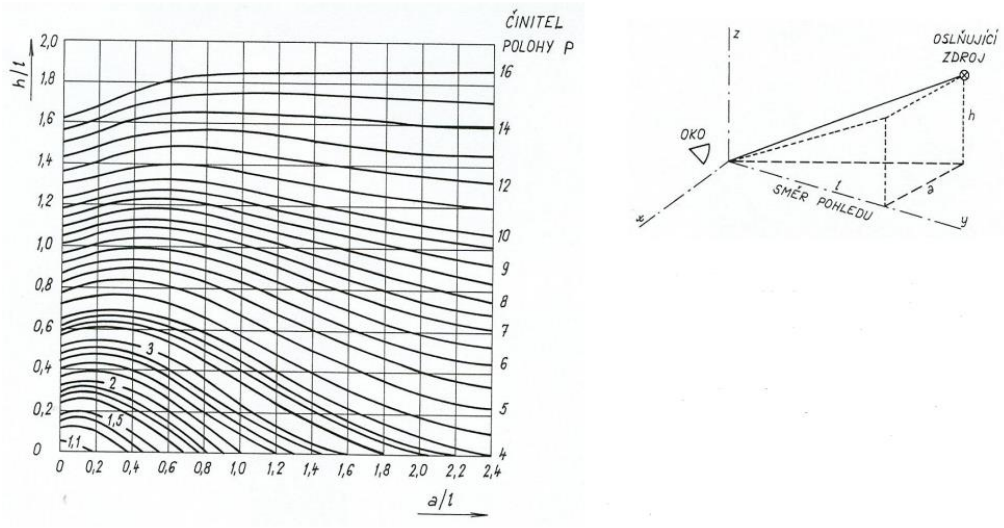
$$UGR = 8\,log_{10}\left(\frac{0{,}25}{L_B}\sum\frac{L^2\omega}{p^2}\right)\,[-] \qquad (4)$$

kde L_B je jas pozadí vypočítaný jako E_{ind}/π, kde E_{ind} [lx] je svislá nepřímá osvětlenost oka pozorovatele [cd/m^2],

L je jas svítících částí svítidel ve směru oka pozorovatele [cd/m^2],

ω je prostorový úhel svítící části svítidel ve směru oka pozorovatele [sr],

p je činitel polohy podle Gutha pro každé svítidlo [–].



Obrázek 2: Činitel polohy podle Gutha [4]

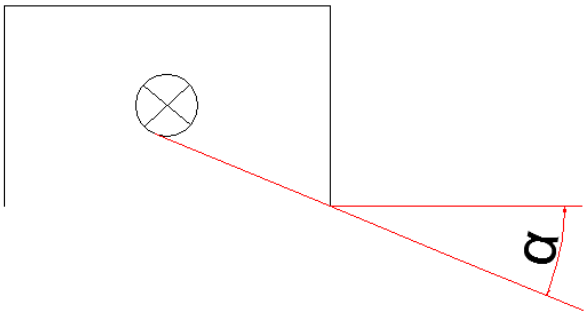
Diagram na obrázku 2 zobrazuje způsob určení činitele polohy *p* podle odchýlení od směru pohledu. Metodu hodnocení oslnění *UGR* nelze užít pro svítidla pod směrem pohledu pozorovatele a problematické je i užití u nepřímých svítidel. Dalšími nedostatky metody *UGR* se zabýval např. doktor Žák v článku [5], kde upozorňuje na nevhodnost použití metody *UGR* pro svítidla s velmi malou vyzařovací plochou (pod 0,005 m^2, např. čirá žárovka), kdy je metoda *UGR* příliš přísná a naopak pro svítidla s velkou vyzařovací plochou (nad 1,5 m^2, např. napínané prosvětlené podhledy), kdy je metoda *UGR* příliš mírná. Podobných úvah se v nedávné době objevilo vícero, ale žádná z nich se dosud nepromítla do aktuálního znění normy.

Problémem zůstává hodnocení míry rušivého oslnění v interiérech způsobeného okny, jelikož pro toto hodnocení v současnosti neexistuje normalizovaná metoda.

Podobně jako je v normě [1] uvedena řada osvětleností, je utvořena i řada mezních hodnot UGR, opět tak, aby hodnoty odpovídaly pozorovatelným změnám oslnění:

10 – 13 – 16 – 19 – 22 – 25 – 28

K omezení přímého oslnění od světelných zdrojů, ale i oken, se používají především různé prostředky stínění a clonění, kterým se věnuje jedna z následujících kapitol. Přímo v normě [1] je zakotvena nutnost clonění světleného zdroje v určitém minimálním úhlu. Úhel clonění je definován na následujícím obrázku:



Obrázek 3: Úhel clonění světelného zdroje umístěného ve svítidle [1]

Hodnoty úhlu clonění se určují na základě jasu použitého světelného zdroje:

Jas světelného zdroje [kcd·m^{-2}]	Minimální úhel clonění α [°]
20 až < 50	15
50 až < 500	20
≥ 500	30

Tabulka 3: Minimální úhel clonění v závislosti na jasu světelného zdroje [1]

Pro omezení oslnění odrazem uvádí norma pouze několik doporučení:

- vhodné uspořádání pracovních míst vzhledem ke svítidlům, oknům a světlíkům,
- vhodná povrchová úprava předmětů (matné povrchy),
- omezení jasu svítidel, oken a světlíků,
- světlá barva stropu a stěn.

2.1.2.2 Pracoviště se zobrazovacími jednotkami (DSE)

Další důležitou oblastí, ve které je třeba věnovat pozornost jasu svítidel, jsou pracoviště vybavená zobrazovacími jednotkami (display screen equipment). Těchto pracovišť je v poslední době většina. Oproti standardnímu zařazení pracovního prostoru je navíc třeba dbát na vyloučení odlesků a odrazů na DSE a klávesnici. Ke snížení kontrastu dochází buď přímým odrazem jasných svítidel a povrchů na obrazovce nebo dochází k tzv. závojovému oslnění. O závojovém oslnění se zmiňuje profesor Habel [4] jako o zvláštním druhu oslnění, které vzniká, pokud se před pozorovaným pozadím nachází prostředí s vyšším jasem.

Opatřením proti těmto odrazům je vhodná volba typu svítidel a jejich rozmístění. Norma [1] uvádí průměrné mezní jasy svítidel s dolním tokem, které se mohou zrcadlit na DSE při normálních směrech pohledu. Mezní hodnoty jsou platné pro svítidla v úhlech 65° a více od dolů orientované svislice a pro DSE se sklonem 0 – 15°.

Největší jas obrazovky	**Obrazovky s vysokým jasem** $L > 200$ **cd/m²**	**Obrazovky s nízkým jasem** $L \leq 200$ **cd/m²**
Případ A (pozitivní polarita a běžné požadavky na barvy a detaily zobrazovaných informací, používané v kancelářích, učebnách apod.)	3000 cd/m²	1500 cd/m²
Případ B (negativní polarita a/nebo vyšší požadavky na barvy a detaily zobrazovaných informací, používané na pracovištích CAD, při kontrole barev apod.)	1500 cd/m²	1000 cd/m²

Tabulka 4:Průměrné mezní jasy svítidel, které se mohou zobrazit na plochých obrazovkách [1]

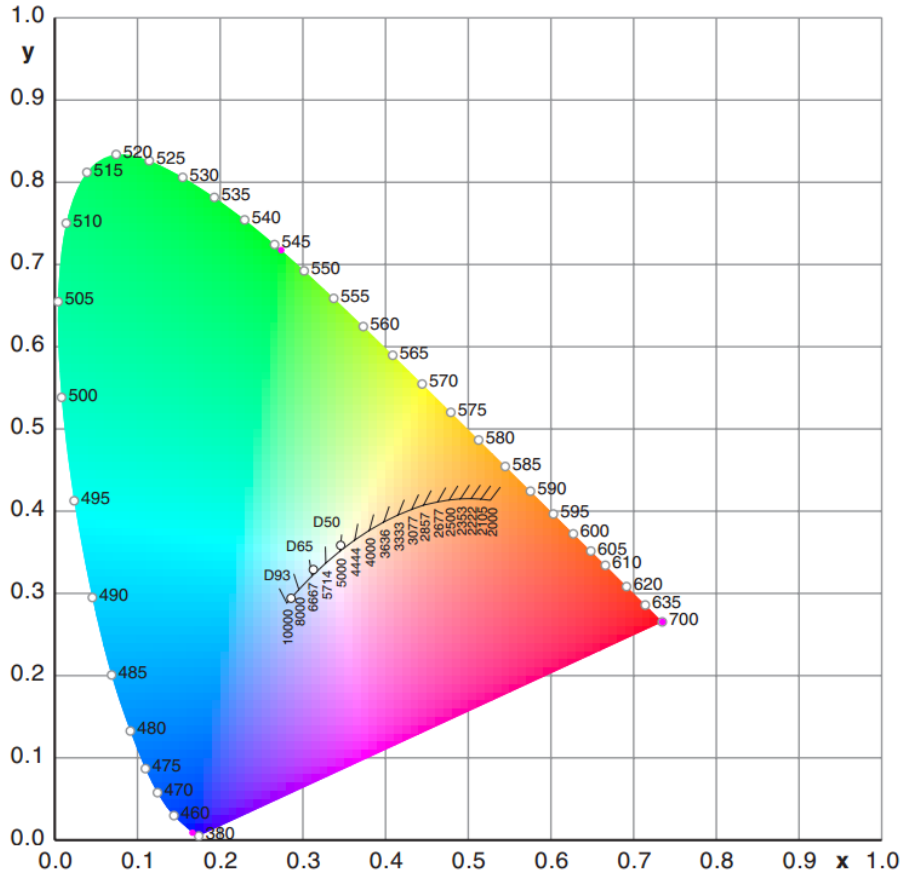
Největší jas obrazovky je hodnota jasu bílé části obrazovky při maximálním nastaveném jasu, hodnota má být uváděna výrobcem obrazovky.

2.1.3 Hodnocení barev

Z hlediska barev se u umělého osvětlení, respektive světlených zdrojů, hodnotí dvě oddělená kritéria, a to barevný tón světla a podání barev.

2.1.3.1 Barevný tón světla

Barevný tón světla se vztahuje k zdánlivé barvě vyzařovaného světla. Pro účely hodnocení se tato barva popisuje tzv. náhradní teplotou chromatičnosti T_{CP} [K]. Čára teplotních zářičů s náhradní teplotou chromatičnosti je na obrázku č. 4:



Obrázek 4: Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy xy (CIE 1931) s vyznačenou čárou teplotních zářičů [6]

Barevný tón světla lze také zjednodušeně hodnotit slovně dle následující tabulky [1]:

Barevný tón světla	**Náhradní teplota chromatičnosti T_{CP} [K]**
teple bílý	do 3300
neutrálně bílý	3300 - 5300
chladně bílý	nad 5300

Tabulka 5: Barevný tón světla [1]

Volba barevného tónu světla je v případě osvětlování některých specializovaných pracovišť omezena normou [1], ale v naprosté většině připadá výběr na projektanta. Jde především o věc estetickou, ale zavedenou praxí je v současnosti využívat pro kancelářské, výrobní a podobné prostory zdroje s T_{CP} 4000 K, zatímco pro užití v bytech, domech a podobně se užívají zpravidla zdroje s T_{CP} 3000 K, případně 2700 K. Chladně bílé zdroje se používají spíše výjimečně, například pro lepší simulaci denního světla nebo pro prostory s velmi vysokou udržovanou osvětlenosti. Toto rozdělení samozřejmě není striktní a závisí na přání a volbě investora/architekta.

2.1.3.2 Podání barev

Pro správný zrakový výkon je třeba osvětlení umožňující věrné a přirozené vnímání barev. Pro hodnocení barevného podání se užívá všeobecný index podání barev R_a (taktéž se užívá označení *CRI*, z angl. *color rendering index*). Ten nabývá hodnot od 0 do 100, kdy 0 je hodnota minimální (značí nemožnost rozpoznání barev) a 100 hodnota maximální (dokonale věrné podání barev). Klasické normou [1] požadované hodnoty R_a jsou 40 (např. komunikační prostory, místa s omezenou přítomností osob), 60 (např. sklady, zásobárny), 80 (většina prostor, např. kanceláře, výrobny, denní místnosti, atd.) a 90 (např. kontroly barev, některé specializované vyšetřovny). V současnosti se však (při profesionálním návrhu) již jen zřídka užívají zdroje s indexem podání barev menším než 80 (s výjimkou nouzového osvětlení).

Dalším požadavkem na všechny použité světelné zdroje je, že v jejich světle musí být rozpoznatelné bezpečností barvy (opět důležité především pro výrobce nouzových svítidel).

Podobně jako u metody hodnocení oslnění *UGR*, se i u hodnocení věrnosti podání barev pomocí všeobecného indexu podání barev R_a vedou diskuze o jeho (ne)vhodnosti a možnosti náhrady jinou metodikou hodnocení. Více uvádí např. inženýr Fuksa v článku [7]. Tyto diskuze mohou přinést zajímavé výsledky do budoucna, v současnosti však do normových požadavků zatím nepronikly.

2.1.4 Další požadavky

Norma [1] uvádí několik dalších požadavků, kterým se však již budeme věnovat pouze v krátkosti.

Jako první lze zmínit požadavek na podání tvaru a střední válcovou osvětlenost v aktivních prostorech. Z důvodu snadné vizuální komunikace a rozpoznávání předmětů má být střední válcová osvětlenost větší než 50 lx, při $U_0 \geq 0{,}10$ na vodorovné rovině ve stanovené výšce (1,2 m pro sedící a 1,6 m pro stojící osoby). V kancelářích, zasedacích místnostech, učebnách atd. se doporučuje 150 lx při $U_0 \geq 0{,}10$. V souvislosti s podáním tvaru je dále nutné vyvarovat se příliš směrovanému (vrhá stíny) i příliš difúznímu osvětlení (monotónní světelné prostředí se špatným podáním tvaru). Poměr mezi rozptýleným a směrovaným světlem by měl být vyvážený.

Osvětlovací soustavy mají být navrženy tak, aby se zabránilo míhání (což je především věc výrobců svítidel, respektive světlených zdrojů a jejich předřadných částí).

Také je třeba zabránit stroboskopickým jevům, především v provozech s točivými stroji, kde může snadno dojít k nebezpečným situacím kvůli změněnému vnímání pohybu těchto strojů. Těmto jevům se dá snadno zabránit použitím moderních elektrických předřadníků, pracujících na vysokých frekvencích.

Mezi dalšími požadavky na projektanta je především uvedení výpočtu udržovacího činitele a předpokladů k jeho odvození. Dále je třeba připravit kompletní plán údržby na základě zadaných předpokladů tak, aby bylo vždy dosaženo požadovaných hodnot světelně technických veličin.

Během celého návrhu by navíc měl projektant dbát požadavku na energetickou účinnost a to především výběrem kvalitních svítidel s vysokou účinností optické i elektrické části, využitím dodatečných přínosů denního světla a možným návrhem řízení osvětlovací soustavy (od jednoduchého skupinového spínání zdrojů přes stmívání jednotlivých svítidel, až po složité systémy umožňující např. i změnu teploty chromatičnosti použitích zdrojů). Některé energetické parametry (např. hodnoty $W/m^2/100$ lx, (ne)přítomnost inteligentního řízení) mohou být podkladem pro udělení různých certifikátů typu „energeticky úsporná budova“ apod. Možnost realizace moderní osvětlovací soustavy samozřejmě vždy závisí i na ekonomických možnostech investora.

2.1.5 Postup při návrhu osvětlovací soustavy

2.1.5.1 Klasifikace pracovního prostoru

Základním krokem správného návrhu osvětlovací soustavy je správná klasifikace pracovního prostoru a jeho zařazení dle tabulky 5 této normy [1]. Ze zařazení vyplývají požadavky na minimální udržovanou hodnotu osvětlenosti, maximální činitel rušivého oslnění *UGR* a index podání barev R_a a případně některé další speciální požadavky (např. náhradní teplota chromatičnosti zdrojů, výška srovnávací roviny, atd.). Tabulka 5 normy [1] je sestavena z tabulek pro mnoho různých prostor – od veřejných komunikačních prostor, přes jednotlivé části administrativních, vzdělávacích a zdravotnických zařízení až po mnoho oblastí výrobních, logistických a dopravních prostor.

2.1.5.2 Výběr svítidla

Na základě klasifikace místnosti, dle stavebních a cenových možností a vkusu investora a architekta je třeba následně vybrat typ svítidla pro osvětlení místnosti. Tento výběr probíhá dle několika parametrů, např. typ montáže svítidla, typ optického

systému a světelného zdroje, požadavků na krytí a odolnost svítidla, na použitý materiál, design a cenu svítidla.

Dle montáže můžeme svítidla rozdělit na vestavná (do rastrových, SDK a dalších podhledů), přisazená, závěsná a nástěnná svítidla. Každá z kategorií má svoje výhody a nevýhody, při návrhu je třeba dát pozor, aby bylo svítidlo možné namontovat (problém může nastat např. v materiálu stropu, malé výšce podhledu, atd.).

U výběru světelného zdroje nejčastěji rozhoduje přání a cenové možnosti investora. V současnosti se většinou volí mezi užitím svítidel s LED čipy a moduly (standardní doba života L70/B50 50 000 hodin), nebo svítidly s lineárními T5 (doba života 24 000 hodin) a kompaktními zářivkami (doba života 20 000 hodin) [8]. V logistických a skladových halách a též pro uliční osvětlení se stále v hojné míře využívá svítidel pro různé typy výbojek (sodíkové, halogenidové, doba života 12 000 hodin) [8]. V případě užití zářivkových svítidel se v dnešní době užívá téměř výhradně vysokofrekvenčních elektronických předřadníků.

Účelem optického systému je dosažení vysoké světelné účinnosti a zároveň snížení úrovně oslnění. Pro prostory náročné na omezení oslnění (kanceláře, CAD pracoviště) se v současnosti užívají různé typy mřížek (bílá, lamelová, parabolická, MIRO Silver, turbo rastr,…) a mikroprismatických krytů (mnoho typů, neustále ve vývoji, např. „diamond mikroprisma“, existují i typy pro svícení z boku do rozptylného materiálu). Pro méně náročné prostory (chodby, denní místnosti, kuchyňky) se často užívají svítidla se satinovým difuzorem, poskytující příjemné rovnoměrné světlo (avšak s menším omezením oslnění a účinností). Další kapitolou jsou poté průmyslová svítidla (často jednoduchý levný prismatický kryt). Pro osvětlování z velkých výšek a pro směrové osvětlení se poté užívají různé typy leštěných reflektorů a čoček, umožňující upravit směrovou distribuci světelného toku svítidla). Samostatnou kapitolou jsou designová svítidla, kde účinnost a funkčnost optického systému není prvořadá.

Některé prostory (venkovní, znečištěné, prašné,…) vyžadují svítidla se zvýšenou odolností. Odolnost proti vniknutí předmětů a vody značí stupnice IP (IP00 – IP69) [9], proti mechanickému poškození stupnice IK (IK00 – IK10) [10].

V neposlední řadě je důležité zkontrolovat, zda se osvětlovací soustava nebude nacházet v jistém speciálním prostředí, jako mohou být např. čisté prostory a laboratoře (s vyššími požadavky na odolnost proti výparům chemických sloučenin), prostory

s protipožárním podhledem (kde je třeba zabezpečit montáž a připojení svítidla bez narušení protipožární vrstvy), prostory s abnormální teplotou okolí (kde se ve většině případů použijí speciálně upravená svítidla), případně prostory s nebezpečím výbuchu (kde je nutné navrhnout svítidla s certifikátem známým jako ATEX (z franc. Atmosphères Explosibles, [11]), a mnoho dalších specifických prostředí.

2.1.5.3 Model, simulace a výpočet parametrů

Jelikož ručně prováděný výpočet je časově, a pro složitější prostory i technicky, obtížný, provádí se dnes téměř výhradně za pomoci výpočetní techniky. Pro modelování prostorů se nejčastěji používají programy Dialux 4.12, Dialux EVO (Dial GmbH) a Relux (Relux Informatik AG). Existují i některé další výpočetní programy, které však většinou nejsou užívány ve větší míře nebo jsou zaměřeny pouze na specializované výpočty.

Tyto programy jsou přímo uzpůsobené pro vytvoření modelu osvětlovaného prostoru, vložení svítidel (skrze LDT nebo IES data svítidel vytvářených výrobcem) a výpočet osvětleností, oslnění a dalších parametrů (např. energetické účinnosti). Jak Dialux, tak Relux navíc umožňuje import výkresů ve formátech .dwg nebo .dxf a tím výrazně ulehčit modelování půdorysů místností, jakožto i export použitých svítidel zpět do výkresu.

Po vytvoření návrhu tak, aby splňoval požadované hodnoty osvětlenosti a oslnění, je třeba exportovat protokol o výpočtu osvětlení (často včetně nouzového osvětlení), který je dále prezentován před kolaudací ke schválení dohlížející hygienické stanici, případně pracovníkovi požární ochrany a dalším.

2.1.5.4 Realizace a měření osvětlení

Při realizaci samotné osvětlovací soustavy se samozřejmě mohou vyskytnout další neočekávané problémy, které musí vyřešit projektant ve spolupráci s montážními pracovníky. Důležité je nezapomenout pracovníky montáže informovat např. o nutnosti zahoření zářivek po dobu minimálně 100 hodin v kuse, než dojde k samotnému měření osvětlení. Dalším často opomíjeným faktem je poloha zářivek ve svítidlech, u kterých jsou dvě trubice vedle sebe. U těchto svítidel je nutné, aby byly konce zářivek paticemi s potiskem na stejné straně, aby se nezahříval „cold spot“ zářivek a nedocházelo tak ke snižování světelných toků a životnosti.

Po nainstalování a zahoření svítidel přichází na řadu samotné měření osvětleností navržených prostor, které provádí firma, která je k tomu oprávněna vydaným certifikátem. Měření probíhá vždy za pomoci luxmetru s platnou kalibrací a výsledkem měření je vyhotovený protokol splňující požadavky normy ČSN 36 0011 [12], který se předává ke kolaudačnímu řízení.

Měření indexu rušivého oslnění UGR se obvykle neprovádí, a to především z hlediska technické a časové náročnosti měřící metody. Jednou z výjimek, kde měření UGR proběhlo je např. budova Florentinum v Praze v ulici Na Florenci (investor Penta Investments, s.r.o., dodavatel svítidel HORMEN CE a.s.). Měření, které provedl profesor Sokanský, bylo provedeno pro body, kde se očekávaly nejvíce nepříznivé výsledky a nejvyšší naměřená hodnota UGR byla 16 [13]. Prokázalo se tedy, že navržená a realizovaná osvětlovací soustava splňuje normou [1] požadované hodnoty.

2.2 Požadavky na denní osvětlení

Jak již bylo řečeno výše, požadavky na denní osvětlení stanovuje norma ČSN 73 0580: Denní osvětlení budov. Dostatek denního osvětlení výrazně přispívá ke zrakové i psychické pohodě přítomných osob a zajišťuje přirozený průběh biologických pochodů v organismu. Na rozdíl od umělého osvětlení je denní osvětlení vysoce časově proměnné a méně předvídatelné. Změny nastávají jednak s měnícím se časem ve dne a v roce, dále velmi závisí na atmosférických podmínkách. Z těchto důvodů je kvantifikace denního osvětlení poměrně složitou záležitostí. Denní osvětlení interiérů se dělí do tří hlavních kategorií a to konkrétně:

- horní denní osvětlení (např. světlíky),
- boční denní osvětlení (např. okenní otvory),
- kombinované denní osvětlení (kombinace horního a bočního osvětlení).

V následující kapitole se pokusím co nejpřesněji shrnout požadavky na denní osvětlení v interiérech.

2.2.1 Činitel denní osvětlenosti

Z důvodu již zmíněné proměnlivosti denního osvětlení se jeho úroveň posuzuje za pomoci tzv. činitele denní osvětlenosti *D*. Ten je v normě [2] definován následovně:

$$D = \frac{E}{E_h} \cdot 100\ [\%] \tag{5}$$

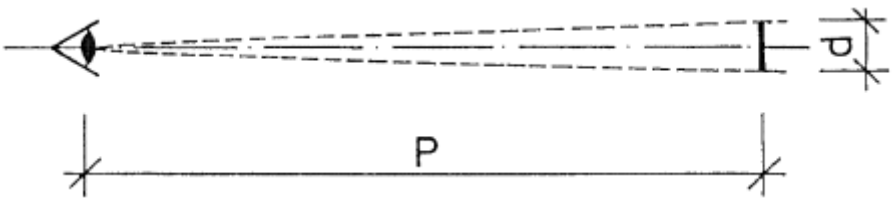
kde E je osvětlenost v kontrolním bodě v místnosti [lx],

E_h je horizontální osvětlenost za stanovených podmínek [lx].

Důležité je, že při tomto hodnocení se pracuje pouze s oblohovou složkou osvětlenosti, čehož se dosahuje výpočtem za nejvíce nepříznivých podmínek, tedy rovnoměrně zatažené oblohy v zimním období. U tohoto typu oblohy se uvažuje nulová přímá složka osvětlenosti, jas oblohy je azimutálně nezávislý, závisí pouze na elevačním úhlu γ. Klasifikaci obloh, horizontální osvětlenosti a osvětlenosti vertikálních rovin při různých stavech oblohy jsem se více věnoval ve své bakalářské práci [14].

Norma [2] dále stanovuje přesný postup výpočtu denního osvětlení, od vztahů uplatňovaných pro výpočet rozložení jasu oblohy (s rozdílem tmavého a zasněženého terénu) přes doporučené činitele prostupu různých materiálů až po stanovení stínění venkovní překážkou. Jelikož tyto výpočty budu v další části práce provádět výhradně ve výpočetním programu Dialux 4.12, je zbytečné zde zdlouhavě rozepisovat postup tohoto výpočtu. V případě bližšího zájmu doporučuji prostudovat citovanou normu [2] a moji bakalářskou práci [14], kde je na výpočet osvětlenosti horizontální a vertikální nezacloněné roviny kladen větší důraz.

Pro účely hodnocení denního osvětlení se dále definuje tzv. poměrná pozorovací vzdálenost, která je definována jako podíl vzdálenosti kritického detailu od oka pozorovatele P a rozměru kritického detailu d, viz obrázek 5:



Obrázek 5: Poměrná pozorovací vzdálenost [2]

Na základě poměrné pozorovací vzdálenosti jsou poté definovány jednotlivé třídy zrakové činnosti a jejich minimální (D_{min}) a průměrné (D_m) hodnoty činitele denní osvětlenosti [2], viz tabulka 6:

Třída zrakové činnosti	Charakteristika zrakové činnosti	Poměrná pozorovací vzdálenost	Příklady zrakových činností	D_{min} [%]	D_m [%]
I	mimořádně přesná	3330 a větší	Nejpřesnější zraková činnost s omezenou možností použití zvětšení, s požadavkem na vyloučení chyb v rozlišení, nejobtížnější kontrola	3,5	10
II	velmi přesná	1670 až 3330	Velmi přesné činnosti při výrobě a kontrole, velmi přesné rýsování, ruční rytí s velmi malými detaily, velmi jemné umělecké práce	2,5	7
III	přesná	1000 až 1670	Přesná výroba a kontrola, rýsování, technické kreslení, obtížné laboratorní práce, náročné vyšetření, jemné šití, vyšívání	2	6
IV	středně přesná	500 až 1000	Středně přesná výroba a kontrola, čtení, psaní (rukou i strojem), obsluha strojů, běžné laboratorní práce, vyšetření, ošetření, hrubší šití, pletení, žehlení, příprava jídel, závodní sport	1,5	5
V	hrubší	100 až 500	Hrubší práce, manipulace s předměty a materiálem, konzumace jídla a obsluha, oddechové činnosti, základní a rekreační tělovýchova, čekání	1	3
VI	velmi hrubá	menší než 100	Udržování čistoty, sprchování a mytí, převlékání, chůze po komunikacích přístupných veřejnosti	0,5	2
VII	celková orientace	-	Chůze, doprava materiálu, skladování hrubého materiálu, celkový dohled	0,2	1

Tabulka 6: Činitel denní osvětlenosti – posouzení denního osvětlení [2]

Jak se uvádí v normě [2], minimální hodnoty D_{min} musí být splněny pro danou činnost ve všech kontrolních bodech místnosti. Průměrné hodnoty D_m musí být splněny pouze u vnitřních prostorů s horním denním osvětlením a s kombinovaným denním osvětlením (pokud je podíl horního denního osvětlení roven minimálně jedné polovině).

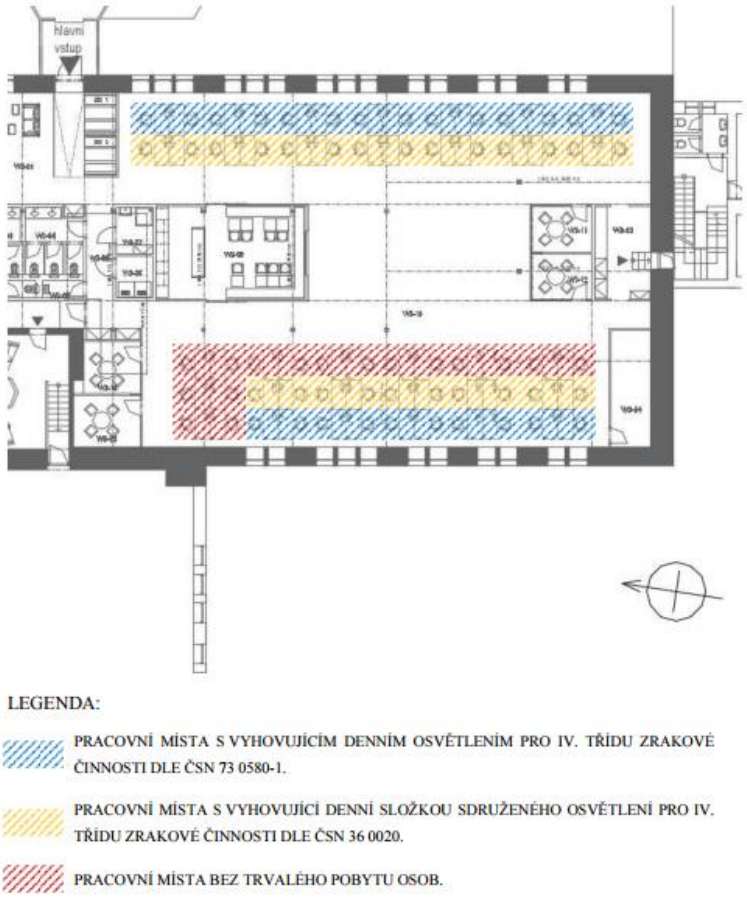
Norma [2] dále určuje, že pro prostory s trvalým pobytem osob (déle než čtyři hodiny denně častěji než jeden den v týdnu) je stanovena hranice D_{min} = 1,5 % a D_m = 3 % (pokud se vyžaduje), i když pro vykonávanou činnost stačí nižší hodnoty.

Jak lze vyvodit z popisu zrakových činností, většina běžně projektovaných prostorů s trvalým pobytem osob spadá do třídy zrakové činnosti IV (kanceláře, výrobní prostory, učebny, atd.), ve výjimečných případech do třídy zrakové činnosti III (ateliéry, technické kreslení, atd.). U většiny těchto prostor převládá boční denní osvětlení, jelikož jsou většinou koncentrovány do rozlehlých vícepodlažních budov. Kancelářská pracoviště s trvalým pobytem osob se obvykle umísťují podél obvodových

stěn budovy u rozměrných okenních otvorů, naopak pracoviště bez trvalého pobytu osob (jednací a zasedací místnosti, komunikační prostory, atd.) se umísťují do vnitřních prostor budovy.

2.2.2 Funkční vymezení vnitřního prostoru

Z důvodu výrazného poklesu činitele denní osvětlenosti se zvětšující se vzdáleností od okenních otvorů (při bočním denním osvětlení) se v projektové dokumentaci vyznačuje odstupňování denního osvětlení a to pro jednotlivé třídy zrakové činnosti, nebo pro jednu zrakovou třídu s odstupňováním prostorů s vyhovujícím denním osvětlením, prostorů s vyhovující denní složkou sdruženého osvětlení (o sdruženém osvětlení pojednává kapitola 2.3 této práce) a prostorů nevhodných pro umístění trvalých pracovních míst. Příklad funkčního vymezení prostorů v projektové dokumentaci je na obrázku 6 (jedná se o rekonstrukci starší administrativní budovy):



Obrázek 6: Funkční vymezení vnitřního prostoru z hlediska požadavků na denní osvětlení

2.2.3 Rovnoměrnost denního osvětlení

Rovnoměrnost denního osvětlení se dle normy [2] hodnotí různě u prostorů s bočním denním osvětlením a horním a kombinovaným denním osvětlením.

Pro prostory, kde je vyžadováno splnění obou hodnot D_{min} a D_m je již tímto splněním zajištěna přiměřená rovnoměrnost denního osvětlení.

U prostorů s bočním denním osvětlením se rovnoměrnost, na rozdíl od umělého osvětlení, nedefinuje jako poměr minimální a střední hodnoty, ale je definována jako poměr minimální a maximální hodnoty činitele denní osvětlenosti:

$$U_{0D} = \frac{D_{min}}{D_{max}} \; [-] \tag{6}$$

kde D_{min} je minimální hodnota činitele denního osvětlení v kontrolních bodech [%],

D_{max} je maximální hodnota činitele denního osvětlení v kontrolních bodech [%].

Pro třídy zrakových činností I – IV nesmí být rovnoměrnost U_{0D} menší než 0,2 (pro třídy I – III se doporučuje 0,3), pro třídy V – VII 0,15.

2.2.4 Rozložení jasu a oslnění denním světlem

Pro rozložení jasů počítá norma [2] s umístěním pozorovaného předmětu v kuželu se středovým úhlem 10° od směru podhledu, pozadí od 10° do 60° a vzdálených ploch více než 60°. Poté mají být pro vytvoření zrakové pohody dodrženy tyto poměry hodnot průměrných jasů:

- 1 : 1 – 3 : 1 (mezi pozorovaným předmětem a pozadím),
- 1 : 1 – 10 : 1 (mezi předmětem a světlými vzdálenými plochami),
- 1: 1 – 1: 10 (mezi předmětem a světlými vzdálenými plochami).

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.2.1, v současnosti neexistuje metoda pro hodnocení oslnění denním světlem v interiérech. Norma [2] se drží pouze obecného konstatování, že uživatelé interiérů mají být chráněni proti oslnění při zatažené, polojasné i jasné obloze a že jas okenních otvorů při úhlu menším než 60° od obvyklého směru pohledu nemá překročit hodnotu 4000 cd/m^2 a poměr jasů mezi pozorovaným předmětem a oblohou hranici 1 : 200. Také je zmíněno doporučení o používání nelesklých materiálů a vhodných povrchových úprav předmětů.

V praxi se pro zábranu oslnění denním světlem využívá kombinace jedné či více metod, mezi něž např. patří:

- vhodná orientace budovy, vhodné umístění pracovních míst v interiérech,
- konstrukční úprava okenních otvorů, použití pokovených skel nebo fólií pro snížení činitele prostupu,
- vnější či vnitřní stínicí soustava, tvořená většinou různými typy žaluzií.

Problémem zůstává, podobně jako u stínění svítidel, že každé omezení oslnění je doprovázeno poklesem denního osvětlení místnosti. Z tohoto důvodu se jako nejvhodnější prvek jeví užití vnitřních či vnějších žaluzií, které se dají regulovat spouštěním a natáčením, a to jak ručně, tak u pokročilých systémů automaticky. Základním užívaným prvkem jsou v současnosti ještě stále difúzní žaluzie, jejich užitím při omezení oslnění a současným změnám osvětlenosti v místnosti se hlouběji věnuje kapitola 4.2 této práce.

2.3 Požadavky na sdružené osvětlení

Sdružené osvětlení je definováno jako současné záměrné osvětlení denním a umělým světlem. Definice, požadavky a podmínky užití sdruženého osvětlení jsou dány normou ČSN 36 0020: Sdružené osvětlení [3], přičemž nedílnou součástí jsou odkazy na již dříve zmíněné normy pro umělé [1] a denní [2] osvětlení.

2.3.1 Užití sdruženého osvětlení

Sdružené osvětlení se má u nových budov dle normy [3] používat pouze v odůvodněných případech, kdy nelze docílit požadovaného denního osvětlení. V současnosti se sdružené osvětlení u nových budov užívá především z důvodu snahy o optimalizaci energetické náročnosti budov. Dalším širokým uplatněním jsou rekonstrukce a užívání starších budov, u kterých ve velké většině není zajištěno dostatečné denní osvětlení (dle dnešních norem). Důležité je uvědomit si, že sdružené osvětlení není rovnocennou náhradou denního osvětlení a při užití se hygienická hlediska nadřazují nad technická a ekonomická.

2.3.2 Posuzování kvantity sdruženého osvětlení

U sdruženého osvětlení se posuzuje denní a umělá složka. Denní složka sdruženého osvětlení se hodnotí dle zásad pro posuzování denního osvětlení, umělá složka (doplňující denní složku) se hodnotí dle zásad pro umělé osvětlení. Při návrhu

sdruženého osvětlení se osvětlenost prostoru vyjadřuje v luxech, počítá se jako součet umělé a denní složky a to při uvažování rovnoměrně zatažené oblohy s horizontální osvětleností 5 000 lx.

2.3.2.1 Denní složka sdruženého osvětlení

Denní složka osvětlení se posuzuje podle normy pro denní osvětlení [2], tedy pomocí činitele denní osvětlenosti. Při užití sdruženého osvětlení se původní hodnoty činitele denní osvětlenosti (viz tabulka 6) mění následovně:

Třída zrakové činnosti	Poměrná pozorovací vzdálenost	D_{min} [%]	D_m [%]
I, II	1670 a větší	1	2,5
III	1000 až 1670	0,7	2
IV	500 až 1000	0,5	1,5
V, VI, VII	menší než 500	0,5	1

Tabulka 7: Činitel denní osvětlenosti – posouzení sdruženého osvětlení [3]

Minimální a průměrné hodnoty se požadují pro horní a boční denní osvětlení stejně jako v hodnocení denního osvětlení, dle výsledků výpočtu se opět uplatňuje funkční vymezení prostorů. Při užití sdruženého osvětlení v prostorech s trvalým pobytem osob je stanovena hranice D_{min} = 1 %.

2.3.2.2 Umělá složka sdruženého osvětlení

Co se týče umělého osvětlení ve vnitřních prostorech, případně ve funkčně vymezených částech je nutné dosáhnout udržované osvětlenosti stanovené normou pro vnitřní pracovní prostory [1] (bez příspěvku denní složky), přičemž v rozsahu osvětleností 200 – 500 lx se osvětlenost navýší o jeden stupeň řady osvětlenosti.

Typickým příkladem tohoto navýšení jsou kancelářské prostory či jejich funkčně vymezené části, kde dojde ke zvýšení udržované osvětlenosti z 500 na 750 lx.

2.3.3 Posuzování kvality sdruženého osvětlení

Pro posuzování kvality, především rovnoměrnosti, sdruženého osvětlení, se předpokládá rovnoměrně zatažená obloha s horizontální osvětleností 20 000 lx. Pouze při návrhu regulace umělého osvětlení má být v úvahu brán i stav jasné oblohy s působením přímé složky denního světla.

2.3.3.1 Rovnoměrnost sdruženého osvětlení

Při sdruženém osvětlení s bočním denním osvětlením se rovnoměrnost definuje jako poměr minimální a maximální hodnoty osvětlenosti:

$$U_{0S} = \frac{E_{min}}{E_{max}} \; [-] \tag{7}$$

kde E_{min} je minimální hodnota udržované osvětlenosti při sdruženém osvětlení [%],

E_{max} je maximální hodnota udržované osvětlenosti při sdruženém osvětlení [%].

Takto definovaná rovnoměrnost U_{0S} nesmí být menší než 0,2 (při výše definovaném stavu oblohy).

Pro ostatní případy (sdružené osvětlení s horním nebo kombinovaným denním osvětlením) se rovnoměrnost posuzuje dle normy pro vnitřní pracovní prostory [1].

2.3.3.2 Rozložení jasů při sdruženém osvětlení

Poměry jasů v místnosti mají odpovídat jasovým poměrům daným normou pro denní osvětlení [2] (viz kapitola 2.2.4), vyjma jasů svítidel, které se posuzují dle normy pro umělé osvětlení [1] (viz kapitola 2.1.2).

Zábrana oslnění denním světlem se hodnotí dle normy pro denní osvětlení [2]. V případech, kdy je úhel mezi běžným směrem pohledu a rovinou osvětlovacích otvorů převážně větší než 30°, se doporučuje podrobnější posouzení oslnění. Doporučují se následné poměry jasů pozorovaného předmětu a osvětlovacího otvoru:

Třída zrakové činnosti	Poměrná pozorovací vzdálenost	Poměr jasů
I, II, III	1000 a větší	1 : 40
IV	500 až 1000	1 : 80
V, VI	menší než 500	1 : 200
VII	-	1 : 400

Tabulka 8: Poměr jasů pozorovaného předmětu a okenního otvoru [2]

2.3.3.3 Barva doplňujícího umělého osvětlení

Světelné zdroje ve svítidlech určených pro doplňující umělé osvětlení se z hlediska teploty chromatičnosti T_{CP} a indexu podání barev R_a volí dle normy pro umělé osvětlení [1]. V případech, v nichž nedochází k dobrému mísení denní a umělé složky (především prostory s bočním denním osvětlením) se použijí světelné zdroje s podobnými vlastnostmi záření jako denní světlo, tj. se spojitým spektrem a ve vyšších teplotách chromatičnosti (4000 – 5000 K).

2.3.4 Regulace sdruženého osvětlení

Z důvodu extrémní proměnlivosti denní složky osvětlení v průběhu dne i roku, vyžaduje soustava sdruženého osvětlení určité regulační možnosti. Regulace by měla umožnit splnění následujících požadavků za každých podmínek:

- dostatečná kvantita osvětlení (osvětlenost),
- dostatečná kvalita osvětlení (rovnoměrnost, omezení oslnění),
- minimální energetická náročnost (využití denního světla).

Tyto požadavky jsou navíc navzájem protichůdné, tudíž není jednoduché zajistit „ideální“ provoz soustavy denního osvětlení. Obvykle je třeba kombinovat regulaci stínící soustavy (většinou různé typy žaluzií, především venkovních), která musí snížit jas okenního otvoru a poměr jasů v zorném poli tak, aby bylo zabráněno oslnění, společně s regulací svítidel.

Pro menší prostory se obvykle z ekonomických důvodů volí regulace ruční se stupňovitým spínáním jednotlivých svítidel, případně se spojitým stmíváním typu „TouchDIM“ a ručním ovládáním žaluzií – konkrétně jejich spuštěním a natočením. U těchto levných aplikací jsou standardem klasické difúzní žaluzie.

Naopak pro prostory s vysokým počtem pracujících osob, např. v nově stavěných kancelářských centrech je často snaha využívat regulace automatické. Denní složka sdruženého osvětlení je monitorována za pomoci čidel a dle těchto čidel dochází k řízení doplňujícího umělého osvětlení. Tento způsob regulace lze bez větších problémů aplikovat u prostor s horním denním osvětlením. V případech bočního denního osvětlení je navíc nutno zajistit regulaci stínící soustavy tak, aby byl zajištěn poměr jasů mezi pozorovaným předmětem a okenním otvorem (viz tabulka 8). Toho lze docílit regulací venkovních žaluzií, často již speciálně provedených, aby při částečném sklopení odrážely část denního světla na strop místnosti. Regulace clonící soustavy není doposud plně zvládnuta a podrobně se jí věnuji v kapitole 4.3.

3. Analýza parametrů osvětlovací a stínící soustavy při kombinovaném osvětlení

Jak vyplývá z kapitoly 1 této práce, je pro zajištění odpovídajících světelných podmínek nutné udržet požadovanou hladinu osvětlenosti současně při zajištění dostatečné kvality osvětlení spočívající v udržení dostatečné rovnoměrnosti a především k dostatečnému omezení oslnění. Pro snížení nákladů a vytvoření odpovídající světelné pohody je vhodné v maximální možné míře využít denní světlo. V současné době se u rekonstruovaných nebo nově stavěných staveb dbá na dostatek denního světla, což je spojené s nutností návrhu regulace denního osvětlení. Vliv denního světla je obvykle regulován za pomoci žaluzií. Zabývat se budu vnějšími žaluziemi, které mají dostatečnou regulační schopnost společně s možností implementace moderních automatických řídicích metod.

Základním principem je omezit oslnění denním světlem a zároveň zachovat maximální možný přírůstek denní osvětlenosti. Cílem následující části práce je analýza kombinovaného osvětlení ve vzorové místnosti za různých atmosférických podmínek, především za stavu zatažené oblohy a za stavu jasné či polojasné oblohy s přítomností přímého slunečního svitu.

Současně s měřením a analýzou dat je cílem vytvořit model vzorové místnosti v programu Dialux 4.12 a porovnat naměřené hodnoty s hodnotami vypočtenými.

3.1 Vzorová místnost

Jako vzorovou místnost jsme ve spolupráci s doktorem Bálským zvolili zasedací a konzultační místnost katedry elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze, označení místnosti T2: B3-355. Tuto místnost jsme zvolili z několika důvodů a to především s ohledem na přítomnost relativně moderní a použitelné osvětlovací i stínicí soustavy, snadnou přístupnost místnosti pro měření a dále z hlediska orientace okenních otvorů a jejich minimálnímu zastínění okolními objekty.

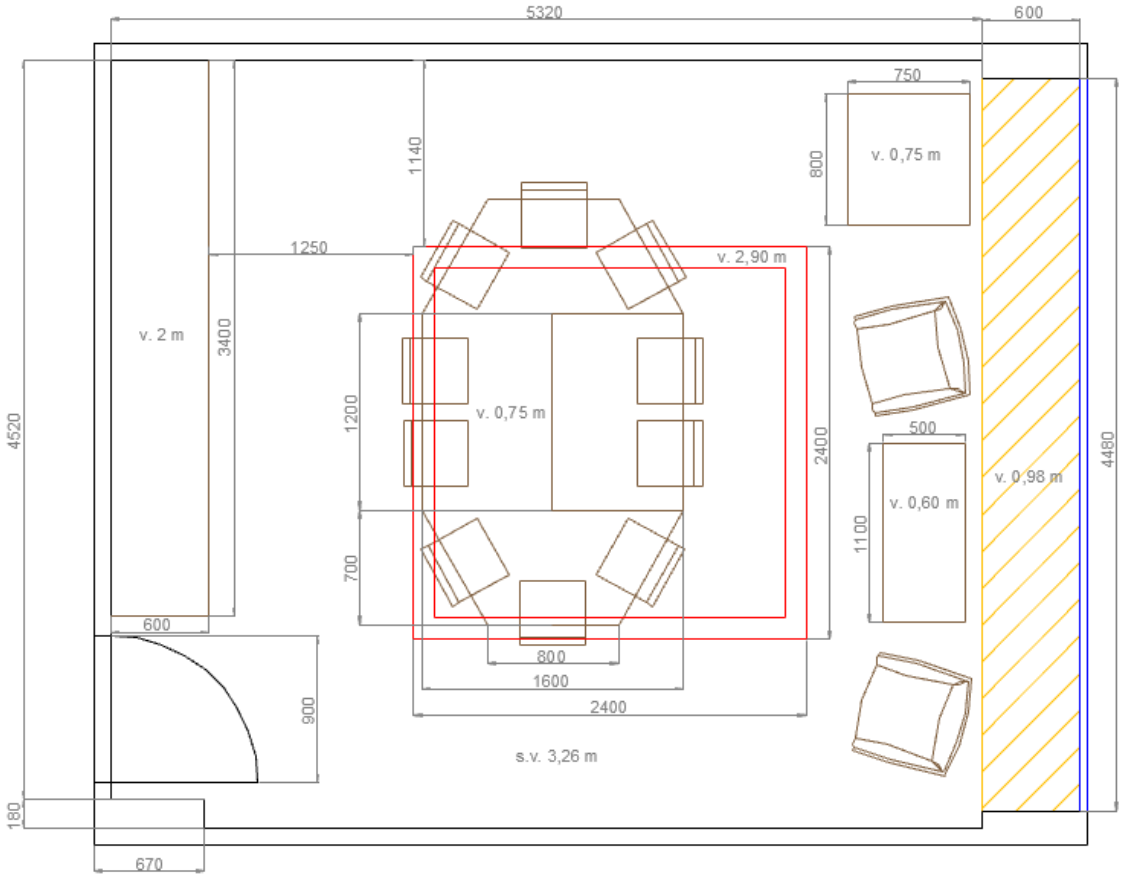
Pro další výpočty je důležitá orientace normály roviny okna vzhledem k severu. Vyhodnocení jsem provedl z katastrálních map, včetně korekce meridiánové konvergence (viz [14], kapitola 5.3.2). Zjištěný azimut vertikální roviny okenního prostoru (při uvažování rozsahu azimutů 0° – 360°, A_{SEVER} = 0°):

$$A_V = 129° \tag{8}$$

Tento azimut míří přibližně jihovýchodním směrem, tudíž vliv přímého slunečního světla se ve zkušební místnosti dá pozorovat především v dopoledních hodinách.

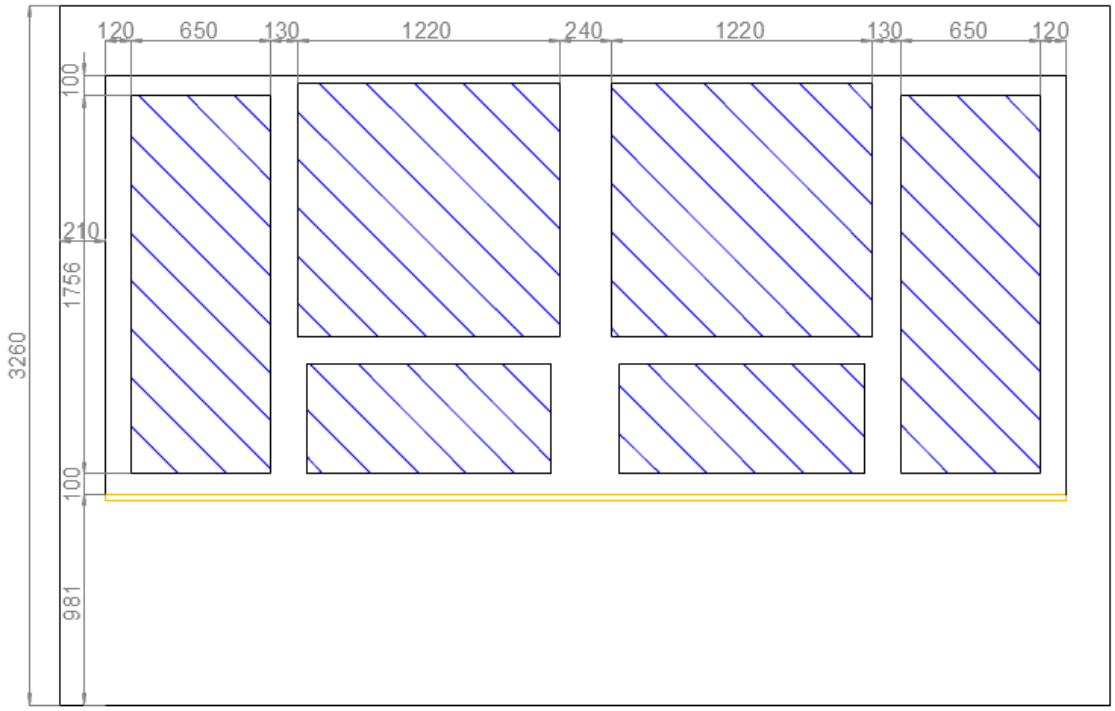
3.1.1 Rozměry a vybavení místnosti

Místnost je zařízena jedním velkým stolem přibližně na středu místnosti. Na jedné straně se po téměř celé délce místnosti nachází okno s hliníkovým rámem a izolačním trojsklem. Na druhé straně místnosti zabírá většinu místa podél stěny skříň ve světle hnědé barvě. Lepší představu o podobě a rozměrech lze získat z následujících nákresů:



Obrázek 7: Vzorová místnost - půdorys

Na dalším obrázku je zobrazena vzorová místnost v řezu tak, aby byly zobrazeny důležité rozměry okenního otvoru:



Obrázek 8: Vzorová místnost - řez - okno

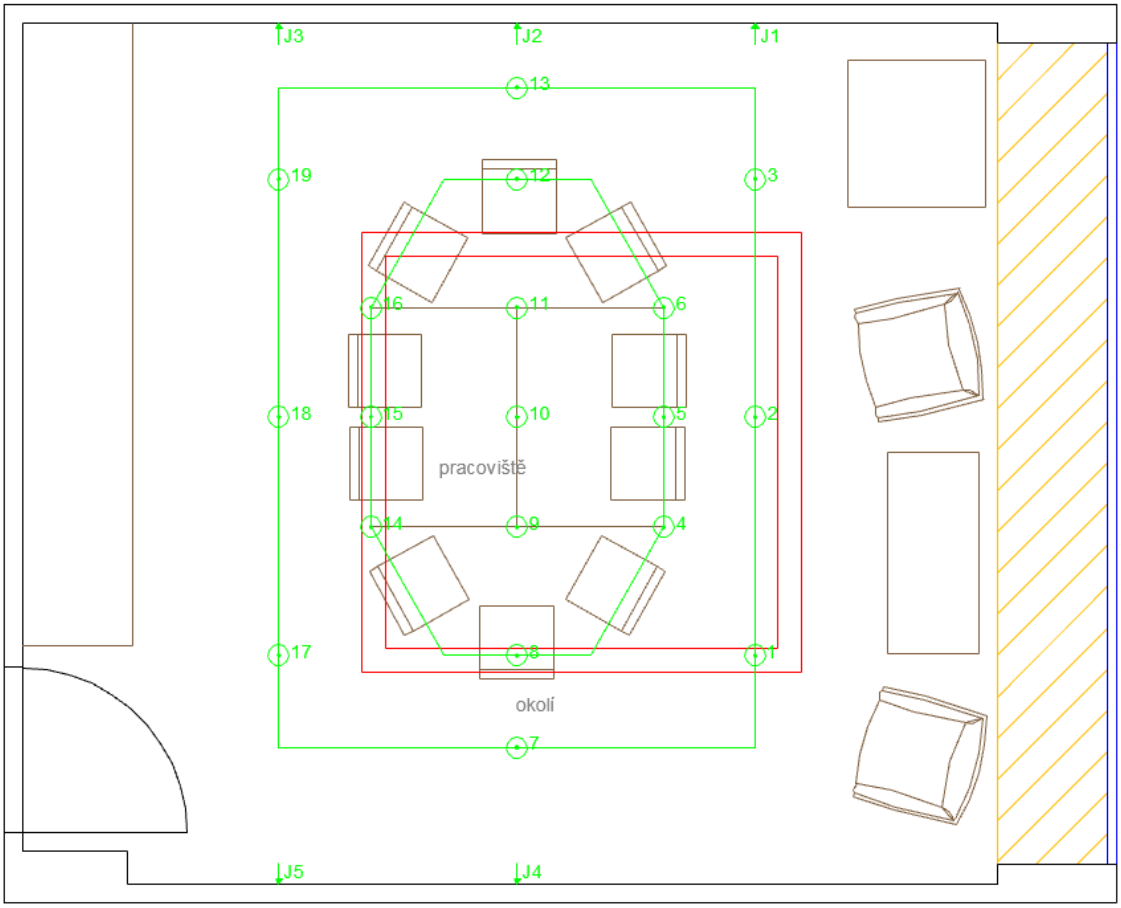
Místnost je poměrně nově vymalovaná. Odraznosti ρ stropu, stěn, podlahy a důležitých objektů jsem změřil pomocí reflektometru typu Reflecta s následujícími výsledky:

Povrch	**ρ [-]**
strop	0,8
stěny	0,8
koberec	0,22
skříň	0,65
parapet	0,7

Tabulka 9: Odraznosti povrchů vzorové místnosti

3.1.2 Výpočtové body a kontrolní plochy

Následující nákres obsahuje vyznačené kontrolní body osvětlenosti 1 – 19 (ve výšce pracoviště, tj. 0,75 m), kontrolní body jasu (J1 – J5) ve výšce očí sedícího člověka (1,20 m) a zároveň vyznačení zvolených kontrolních ploch:



Obrázek 9: Vzorová místnost - kontrolní body a plochy

Jas v místě předpokládaného kontrolního bodu v pravém dolním rohu místnosti nelze posoudit z důvodu pevně umístěné lesklé bílé tabule.

3.1.3 Charakteristika osvětlovací soustavy

Zasedací místnost je osvětlena pomocí čtyř svítidel s bílou plastovou mřížkou (referenční typ Trevos MO 258, viz obr. č. 10) spojených do tvaru čtverce a zavěšených ve výšce 2,9 m. Každé svítidlo je osazeno dvěma zářivkami T8 (840, výrobce Philips) o výkonu 58 W. Před měřením byly ve svítidlech vyměněny všechny zářivky za nové, které byly náležitě zahořeny.

Sestava svítidel není umístěna souměrně nad stolem, ale je oproti ose stolu (tj. pracovišti) posunuta směrem k oknu místnosti.

Obrázek 10: Svítidlo MO T8 (výrobce TREVOS a.s.)

3.1.4 Charakteristika stínicí soustavy

Zasedací místnost je pro omezení oslnění denním světlem vybavena stínicí soustavou tvořenou venkovními difúzními žaluziemi. Ovládání žaluzií je manuální, pomocí kliky uvnitř místnosti. Žaluzie lze spustit a naklápět v rozmezí úhlů 90° – 10°.

3.1.5 Udržovací činitel

Udržovací činitel vzorové místnosti jsem vypočetl v programu Dialux 4.12 za následujících vstupních parametrů (se snahou přiblížit se plánem údržby co nejblíže skutečným podmínkám údržby místnosti):

- prostředí místnosti: čisté (školy),
- interval údržby místnosti: 3 roky,
- interval údržby svítidel: 3 roky,
- interval výměny světelných zdrojů: 3 roky, skupinová výměna,
- typ svítidel: uzavřené IP2x,
- doba provozu: 1550 hodin/rok,
- typ zdroje: třísvazková zářivka (zářivka s třípásmovým luminoforem).

Výsledný udržovací činitel:

$$z = z_p \cdot z_s \cdot z_z \cdot z_{fz} = 0{,}94 \cdot 0{,}79 \cdot 0{,}90 \cdot 1{,}00 = 0{,}66 \quad (9)$$

kde z_p je udržovací činitel povrchů [-],

z_s je udržovací činitel svítidel [-],

z_z je činitel stárnutí světelných zdrojů [-],

z_{fz} je činitel funkční spolehlivosti světelných zdrojů [-].

Činitel funkční spolehlivosti lineárních zářivek je při zvoleném plánu údržby (doba svícení 1550 hodin za rok) i při skupinové výměně zdrojů v intervalu tří let roven jedné. Pro delší roční doby svícení by již docházelo k poklesu, tudíž by se vyplatilo volit neodkladnou výměnu nefunkčních světelných zdrojů.

3.2 Použité přístroje

V průběhu analýzy osvětlení jsem využíval následující přístroje:

- luxmetr Krochmann Radiolux 111,
- luxmetr Extech HD450 Datalogging Light Meter,
- jasoměr LMT L1009,
- kolorimetr Colormeter C1210,
- laserový dálkoměr Leica Disto A5.

Všechny použité přístroje jsou ve vlastnictví katedry elektroenergetiky, které tímto děkuji za jejich zapůjčení.

3.3 Analýza umělého osvětlení

Analýza umělého osvětlení je provedena za pomocí měření osvětlenosti pracoviště (na stole) a jeho okolí a také měřením jasů stěn ve vybraných bodech (vyhodnocovací body viz obrázek 9). Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny a je posouzena jejich shoda s požadavky danými normou [1]. Následně jsou naměřené hodnoty porovnány s hodnotami vypočtenými v programu Dialux 4.12 s cílem analyzovat přesnost výpočtu a zjistit případné nedostatky.

3.3.1 Měření umělého osvětlení

Měření umělého osvětlení jsem provedl pomocí digitálního luxmetru Krochmann Radiolux 111, jas stěn jsem měřil pomocí jasoměru LMT L1009. Vliv denního světla byl vyloučen měřením po setmění, měření proběhlo při teplotě vzduchu 22 °C. Světelné zdroje byly před měřením 15 minut v provozu, aby došlo k ustálení jejich světelného toku.

Následující tabulka uvádí hodnoty osvětlenosti naměřené v jednotlivých vyhodnocovacích bodech:

i [-]	*E_i [lx]*	*$E_i \cdot z$ [lx]*	*i [-]*	*E_i [lx]*	*$E_i \cdot z$ [lx]*
1	592	391	11	820	541
2	729	481	12	670	442
3	521	344	13	620	409
4	865	571	14	717	473
5	885	584	15	732	483
6	804	531	16	661	436
7	639	422	17	482	318
8	763	504	18	572	378
9	877	579	19	416	275
10	907	599	-	-	-

Tabulka 10: Umělé osvětlení - naměřené hodnoty osvětlenosti

Z naměřených dat vypočteme průměrnou udržovanou osvětlenost kontrolních ploch (postup při uvažování nové osvětlovací soustavy a nově kolaudované místnosti):

$$E_m = \frac{\sum_{i=1}^{19} E_i}{19} \cdot z = 461\ lx \tag{10}$$

$$E_{mprac} = \frac{\sum_{i=4}^{6} E_i + \sum_{i=8}^{12} E_i + \sum_{i=14}^{16} E_i}{11} \cdot z = 522\ lx \tag{11}$$

$$E_{mokol} = \frac{\sum_{i=1}^{3} E_i + E_7 + E_{13} + \sum_{i=17}^{19} E_i}{8} \cdot z = 377\ lx \tag{12}$$

Dále vypočteme rovnoměrnosti osvětlení:

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_m} = \frac{275}{461} = 0{,}60 \tag{13}$$

$$U_{0prac} = \frac{E_{minprac}}{E_{mprac}} = \frac{436}{522} = 0{,}84 \tag{14}$$

$$U_{0okol} = \frac{E_{minokol}}{E_{mokol}} = \frac{275}{377} = 0{,}73 \tag{15}$$

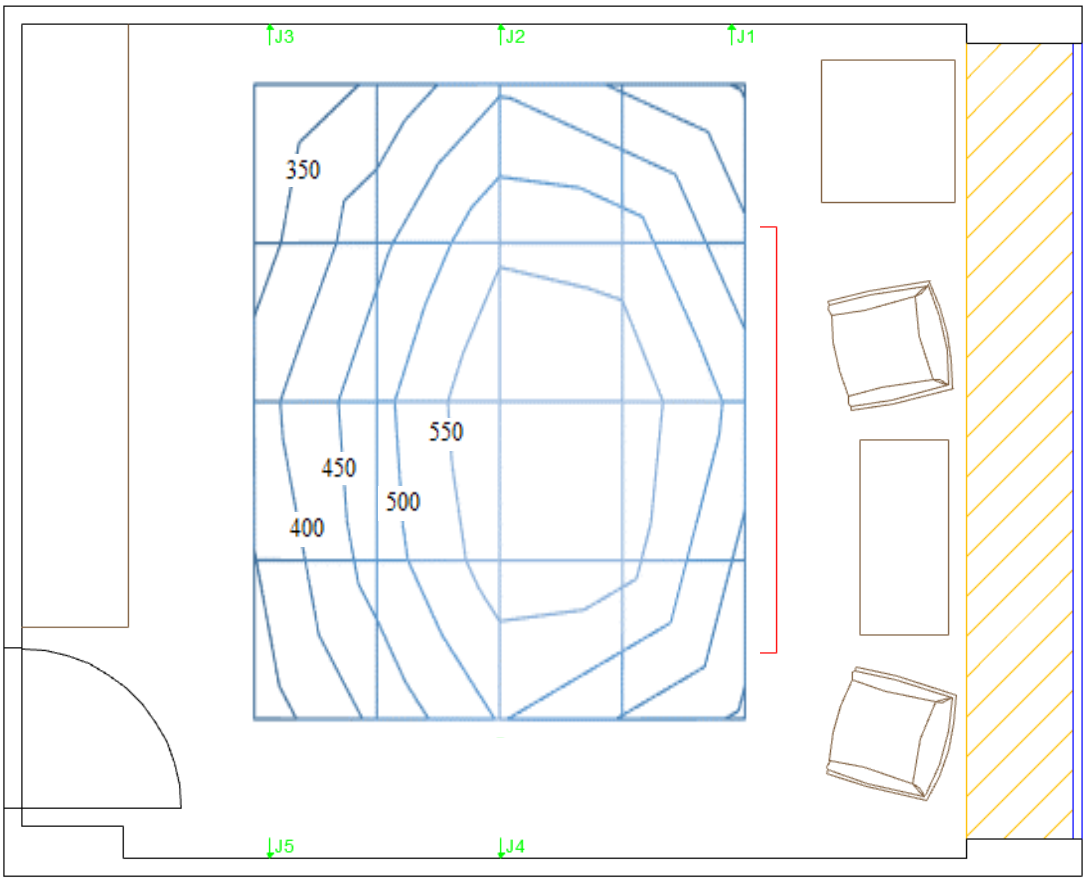
Vypočtené hodnoty porovnáme s požadavky danými normou [1], konkrétně s požadavky na osvětlení zasedacích místností:

Veličina	**Požadavek**	**Změřeno/vypočteno**	**Výsledek**
E_m	-	461 lx	-
U_0	0,1	0,60	vyhovuje
E_{mprac}	500 lx	522 lx	vyhovuje
U_{0prac}	0,6	0,84	vyhovuje
E_{mokol}	300 lx	377 lx	vyhovuje
U_{0okol}	0,4	0,73	vyhovuje

Tabulka 11: Umělé osvětlení – vyhodnocení

Z výše uvedené tabulky je tedy patrné, že umělé osvětlení splňuje požadavky na udržovanou osvětlenost a rovnoměrnost a to i v případě, že by osvětlovací soustava byla posuzována jako nově instalovaná. Pro posouzení činitele oslnění *UGR* je nutné provést výpočet ve specializovaném programu (Dialux, Relux, atd.), *UGR* nelze jednoduše změřit. Subjektivní hodnocení sice není plně relevantní, ale považuji za vhodné uvést, že osvětlovací soustava nepůsobila oslňujícím dojmem.

Naměřená data ještě znázorňuji graficky v podobě isolinií osvětlenosti:



Obrázek 11: Umělé osvětlení - isolinie osvětlenosti [lx]

Nakonec uvádím tabulku jasů naměřených v jednotlivých bodech J1 – J5, vyhodnocení těchto hodnot se budu věnovat později, především v kapitole 4 věnující se optimalizaci řízení osvětlení:

Ji **[-]**	L_{Ji} **[cd·m^{-2}]**	$L_{Jivýpočet}$ **[cd·m^{-2}]**
1	89	94
2	118	112
3	72	70
4	118	113
5	76	71

Tabulka 12: Umělé osvětlení - naměřené hodnoty jasu

Naměřené jasy jsou rovnou porovnány s přibližnými jasy vypočtenými. Ačkoliv Dialux neumožňuje do interiérů umísťovat výpočtové body jasu, lze zobrazit jasové mapy povrchů místnosti (stěn, stropů a podlah). Z těchto map byly jasy jednotlivých bodů odhadnuty (jasové mapy jsou k dispozici v rámci výstupů z modelu ve formátu pdf na přiloženém CD).

3.3.2 Výpočet umělého osvětlení

Pro vytvoření modelu místnosti a výpočet osvětlení jsem použil program Dialux 4.12 (výpočtový soubor pavlousek_DP.dlx je, včetně výstupů ve formátu pdf, k dispozici na přiloženém CD). Model místnosti jsem vytvořil dle importovaného výkresu zobrazeného na obrázku 10. Na následujícím obrázku je 3D vizualizace umělého osvětlení vzorové místnosti:

Obrázek 12: Umělé osvětlení - 3D vizualizace

Následně porovnáme vypočtené hodnoty osvětlenosti (po vynásobení udržovacím činitelem) s naměřenými (nejprve skutečně naměřenými, poté s přepočtenými dle udržovacího činitele):

i [-]	$E_{ivýpočet}$ [lx]	$E_{iměření}$ [lx]	ΔE_i [lx]	ΔE_i [%]
1	645	592	53	8,2
2	830	729	101	12,2
3	577	521	56	9,7
4	942	865	77	8,2
5	973	885	88	9,0
6	859	804	55	6,4
7	676	639	37	5,5
8	791	763	28	3,5
9	970	877	93	9,6
10	1001	907	94	9,4
11	889	820	69	7,8
12	709	670	39	5,5
13	600	620	-20	-3,3
14	761	717	44	5,8
15	786	732	54	6,9
16	688	661	27	3,9
17	500	482	18	3,6
18	657	572	85	12,9
19	441	416	25	5,7
$\Delta E_{prům}$			**54**	**6,9**
i [-]	**$E_{ivýpočet}$ [lx]**	**$E_{iměření} \cdot z$ [lx]**	**ΔE_i [lx]**	**ΔE_i [%]**
1	645	391	254	39,4
2	830	481	349	42,0
3	577	344	233	40,4
4	942	571	371	39,4
5	973	584	389	40,0
6	859	531	328	38,2
7	676	422	254	37,6
8	791	504	287	36,3
9	970	579	391	40,3
10	1001	599	402	40,2
11	889	541	348	39,1
12	709	442	267	37,7
13	600	409	191	31,8
14	761	473	288	37,8
15	786	483	303	38,5
16	688	436	252	36,6
17	500	318	182	36,4
18	657	378	279	42,5
19	441	275	166	37,6
$\Delta E_{prům}$			**291**	**38,5**

Tabulka 13: Umělé osvětlení - porovnání vypočtených a naměřených hodnot

Z porovnaných hodnot lze vypozorovat, že jak zasedací místnost, tak osvětlovací soustava jsou již několik let v provozu a využívány. Skutečné naměřené hodnoty se v porovnání s vypočtenými liší průměrně o cca 54 lx, což činí průměrně 6,9 % z vypočtené hodnoty.

Dále ještě porovnáme naměřené a vypočtené hodnoty pro kontrolní plochy za různých výpočtových předpokladů (index B – hodnoty na základě 19 výpočtových bodů, index R – hodnoty na základě rastru Dialuxu):

Plocha	$E_{mvýpočetR}$ **[lx]**	$U_{0výpočetR}$ **[-]**	$E_{mvýpočetB}$ **[lx]**	$U_{0výpočetB}$ **[-]**
Celý prostor	635	0,29	753	0,59
Pracoviště	887	0,75	852	0,81
Okolí	698	0,60	616	0,72
	$E_{mměření}$ **[lx]**	$U_{0měření}$ **[-]**	$E_{mměření} \cdot z$ **[lx]**	$U_{0měření}$ **[-]**
Celý prostor	698	0,60	461	0,60
Pracoviště	791	0,84	522	0,84
Okolí	571	0,73	377	0,73

Tabulka 14:Umělé osvětlení - porovnání vypočtených a naměřených hodnot

Největší shoda panuje mezi naměřenými hodnotami (bez násobení udržovacím činitelem) a hodnotami vypočtenými v Dialuxu ve shodně umístěných bodech. Za přesnější výpočet by se však měly uvažovat hodnoty vzešlé z Dialuxu za užití více výpočtových bodů (rastry 32x32, 16x16, resp. 16x16). Zde je nejvíce ovlivněna celková hodnota pro celý prostor, jelikož výpočet zahrnuje i body mimo pracoviště a jeho okolí, ve kterých nebylo z důvodu časové náročnosti měření realizováno.

Jako poslední zbývá vyhodnotit oslnění, respektive hodnotu indexu rušivého oslnění UGR. Výpočtové plochy činitele UGR mají stejnou velikost a polohu jako rozměry okolí pracoviště, přičemž se uvažuje pohled pozorovatele do čtyř směrů (viz příloha 1). Výsledky a hodnocení dle normy [1] jsou následující:

Směr pohledu	UGR_{MAX} **[-]**	**Požadavek** UGR_{MAX} **[-]**	**Výsledek**
„Horní“ stěna (s body J1 – J3)	20	19	nevyhovuje
Skříň	17		vyhovuje
„Dolní“ stěna (s body J4 – J5)	21		nevyhovuje
Okno	20		nevyhovuje

Tabulka 15: Umělé osvětlení - hodnocení oslnění metodou UGR

Jak z vypočtených hodnot vyplývá, požadavek na omezení rušivého oslnění není splněn ve většině směrů pohledu. Hodnoty požadované normou jsou sice překročeny jen mírně a subjektivně mi instalovaná soustava nepřišla oslňující, ale při kolaudaci by tento návrh neměl přes hygienickou stanici projít. Dalším prostorem pro úvahu je míra přesnosti výpočtu indexu rušivého oslnění v programu Dialux, čemuž se však tato práce nevěnuje.

3.4 Analýza denního osvětlení

Analýzu denního osvětlení jsem provedl podobně jako u osvětlení umělého. Opět jsem měřil osvětlenosti a jasy ve vzorové místnosti, tentokrát však bylo třeba navíc zároveň měřit horizontální osvětlenost nezacloněné roviny (pro výpočet činitele denní osvětlenosti). Vyjma těchto měření jsem navíc za pomoci kolorimetru měřil barevný tón světla pronikajícího do vzorové místnosti.

Analýza denního osvětlení je rozdělena do dvou částí a to na měření při zatažené obloze s azimutálně rovnoměrným rozložením jasu a gradací směrem k zenitu (typ oblohy číslo 1 dle CIE, viz [14]) a poté při jasné obloze se slabým zákalem (typ 12 dle CIE, viz [14]). Již z tohoto vyplývá komplikovanost měření, které je náročné na vhodnost a stálost atmosférických podmínek a také na flexibilní přístup všech zúčastněných. Dalším problémem je nutnost mít neustále připravené vybavení pro měření (luxmetry, jasoměr, kolorimetr, atd.) a především jen velice obtížná predikce a omezená možnost plánování jednotlivých měření.

V souvislosti s měřením za jasné oblohy s přímým slunečním světlem jsem také provedl stěžejní měření pro tuto diplomovou práci, a to analýzu prostupu světla do místnosti při různém nastavení stínicí soustavy (venkovních difúzních žaluzií). Naměřené hodnoty jsou základními podklady pro návrh algoritmu komplexního řízení kombinovaného osvětlení v kapitole 4 této práce.

3.4.1 Měření denního osvětlení – zatažená obloha

Měření denního osvětlení jsem provedl za pomoci stejných přístrojů jako měření osvětlení umělého, pro záznam horizontální osvětlenosti jsem navíc použil luxmetr Extech. Měření proběhlo při zatažené obloze, 31. 3. 2016 v 9:00 – 9:20 SELČ. Měřil jsem ve stejných výpočtových bodech jako osvětlení umělé. Do výpočtu denního osvětlení nezasahuje udržovací činitel, naopak je pro posouzení nutné vypočíst z naměřených hodnot činitel denní osvětlenosti (dle vzorce č. 3). Naměřené hodnoty osvětleností a dopočtené hodnoty činitele denní osvětlenosti jsou následující:

$$E_H = 3200\ lx \tag{16}$$

i [-]	E_i [lx]	D_i [%]	i [-]	E_i [lx]	D_i [%]
1	220	6,88	11	144	4,50
2	244	7,63	12	134	4,19
3	230	7,19	13	110	3,44
4	195	6,09	14	107	3,34
5	210	6,56	15	107	3,34
6	210	6,56	16	104	3,25
7	115	3,59	17	71	2,22
8	137	4,28	18	81	2,53
9	142	4,44	19	75	2,34
10	154	4,81	-	-	-

Tabulka 16: Zatažená obloha - naměřené hodnoty osvětlenosti

Z naměřených hodnot vypočteme hodnoty důležité pro posouzení denního osvětlení:

$$D_m = \frac{\sum_{i=1}^{19} D_i}{19} = 4{,}59\ \% \tag{17}$$

$$D_{min} = 2{,}22\ \% \tag{18}$$

$$D_{max} = 7{,}63\ \% \tag{19}$$

$$U_{0D} = \frac{D_{min}}{D_{max}} = \frac{2{,}22}{7{,}63} = 0{,}29 \tag{20}$$

Pro vyhodnocení požadavků normy [2] je třeba zatřídit místnost do příslušné třídy zrakové činnosti. V případě zasedací místnosti se jedná o středně přesnou zrakovou činnost, tedy třídu IV zrakové činnosti. Pro ni vyhodnotíme denní osvětlení (vzhledem k faktu, že jde o boční denní osvětlení, je rozhodující pouze minimální hodnota činitele denní osvětlenosti):

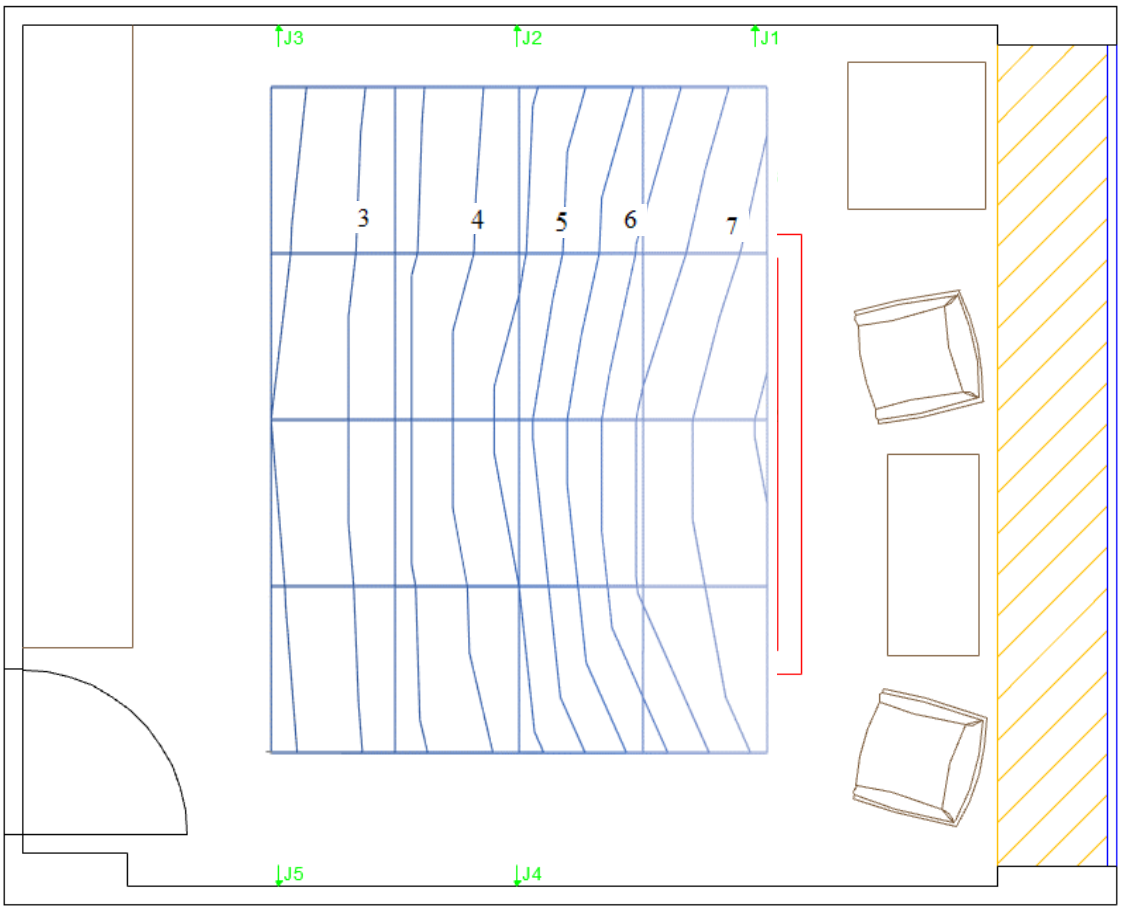
Veličina	Požadavek	Změřeno/vypočteno	Výsledek
D_m	-	4,59 %	-
D_{min}	1,5 %	2,22 %	vyhovuje
U_{0D}	0,2	0,29	vyhovuje
E_{mprac}	500 lx	149 lx	nevyhovuje
U_{0prac}	0,6	0,70	vyhovuje
E_{mokol}	300 lx	143 lx	nevyhovuje
U_{0okol}	0,4	0,50	vyhovuje

Tabulka 17: Zatažená obloha – vyhodnocení

Z tabulky je patrno, že ve chvíli měření byl splněn požadavek na denní osvětlení daný normou [2]. Osvětlení pracoviště na požadované hodnoty je nutno řešit dodatečným příspěvkem umělého osvětlení.

Jak jsem zmiňoval v kapitole 2 této práce, dosud není zpracována standardní metoda oslnění denním světlem. V této části se tedy musím spolehnout na subjektivní hodnocení oslnění a to konkrétně na konstatování, že denní světlo při zatažené obloze nikterak neoslňovalo a nebylo třeba stahovat venkovní žaluzie. Naopak pro dosažení potřebné osvětlenosti na pracovišti by bylo nutné rozsvítit umělé osvětlení (bohužel ve vzorové místnosti není osvětlovací soustava stmívatelná, což do značné míry vylučuje regulaci umělého osvětlení dle příspěvku denního světla).

Podobně jako u umělého osvětlení uvádím isolinie osvětlenosti, následující obrázek zobrazuje isolinie s průběhem hodnot činitele denní osvětlenosti:



Obrázek 13: Zatažená obloha - isolinie činitele denní osvětlenosti

Opět uvádím tabulku jasů naměřených v jednotlivých bodech J1 – J5, naměřené hodnoty jsou dále využity v kapitole 4, při návrhu regulace osvětlení:

Ji [-]	L_{Ji} [cd·m^{-2}]	$L_{Jivýpočet}$ [cd·m^{-2}]
1	93	26
2	53	21
3	34	14
4	42	18
5	30	12

Tabulka 18: Zatažená obloha - naměřené hodnoty jasu

Za povšimnutí stojí, že zatímco v případě výpočtů umělého osvětlení byly vypočtené hodnoty jasů přesné (co se shody s naměřenými týká), tak pro denní osvětlení jsou vypočtené jasy velmi nepřesné, ve své podstatě nepoužitelné pro další užití při návrhu komplexního řízení osvětlení místnosti.

Jak jsem zmiňoval v úvodu kapitoly o analýze denního osvětlení, pokusil jsem se změřit i barevné vlastnosti denního světla po průchodu okenním otvorem, výslednou teplotu chromatičnosti jsem získal převodem ze souřadnic barevného prostoru xy na webu Bruce Lindblooma [15]:

x [-]	*y* [-]	T_C [K]
0,332	0,335	5517

Tabulka 19: Zatažená obloha - teplota chromatičnosti

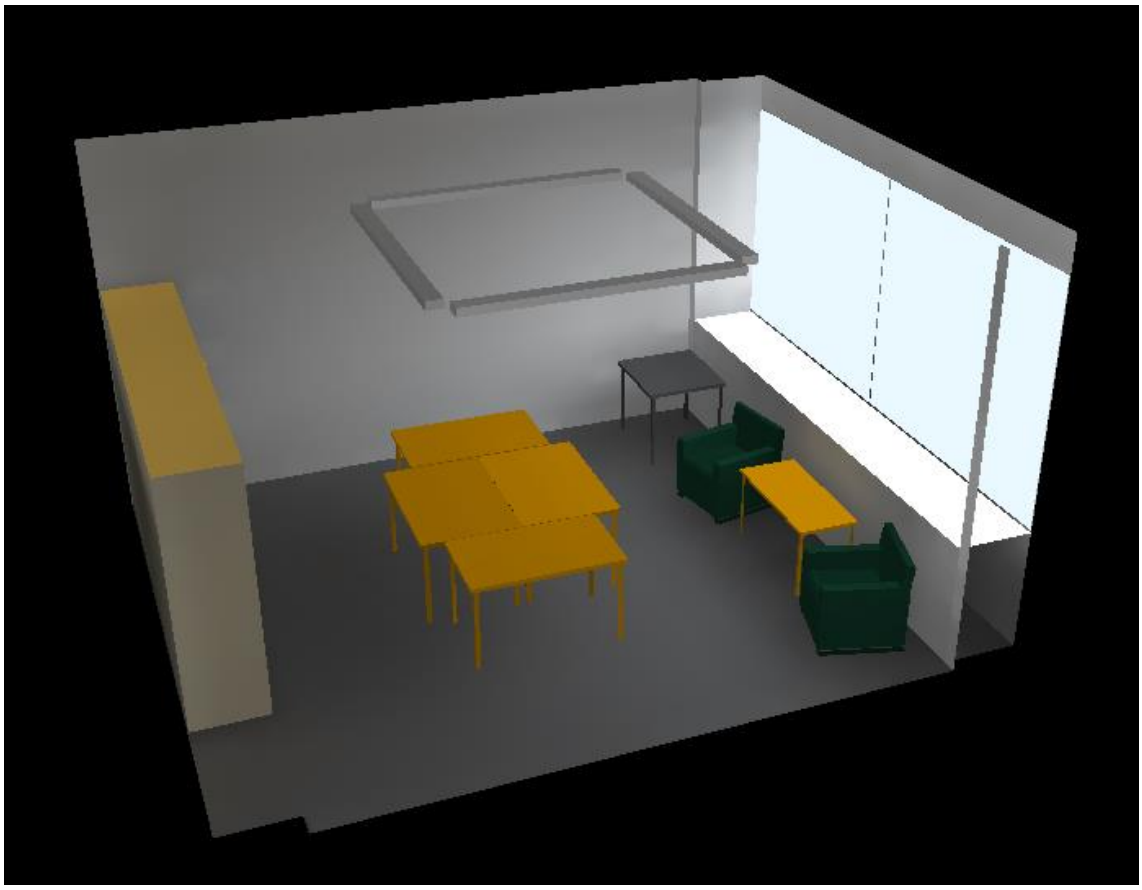
3.4.2 Výpočet denního osvětlení – zatažená obloha

Výpočet denního osvětlení je proveden na stejném modelu jako výpočet osvětlení umělého. Soubor pavlousek_DP.dlx i kompletní výstup ve formátu pdf je k dispozici na přiloženém CD.

Pro výpočet denního osvětlení jsem zvolil následující vstupní parametry okenního otvoru (činitel znečištění jsem volil poměrně vysoký z důvodu nedávného mytí oken):

- převodní stupeň – okenní sklo: 90%,
- činitel znečištění – obytná oblast (nepatrně): 0,80,
- činitel rozčlenění – kovové okno (k otevírání): 0.80
- faktor snížení při jiném než kolmém dopadu světla: 0,85.

Vizualizace prostupu světla do místnosti vypadá následovně:



Obrázek 14: Zatažená obloha - 3D vizualizace

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot začnu porovnáním horizontální osvětlenosti:

$$E_H = 3200\ lx \tag{21}$$

$$E_{HV} = 3017\ lx \tag{22}$$

Rozdíl v naměřené a vypočtené horizontální osvětlenosti je cca 6 %, což je v případě měření denního osvětlení hodnota velmi přesná. V porovnání činitele denní osvětlenosti uvádím navíc rozdíl po korekci, tj. po vynásobení vypočtených hodnot koeficientem 1,06 (poměrem E_H/E_{HV}):

i [-]	$D_{ivýpočet}$ [%]	$D_{iměření}$ [%]	ΔD_i [%]	$\Delta D_{ikorekce}$ [%]
1	6,41	6,88	-0,47	-0,08
2	6,72	7,63	-0,91	-0,50
3	6,00	7,19	-1,19	-0,82
4	4,87	6,09	-1,22	-0,93
5	4,89	6,56	-1,67	-1,38
6	4,85	6,56	-1,71	-1,42
7	3,01	3,59	-0,58	-0,40
8	3,06	4,28	-1,22	-1,04
9	3,23	4,44	-1,21	-1,01
10	3,26	4,81	-1,55	-1,35
11	3,17	4,50	-1,33	-1,14
12	3,01	4,19	-1,18	-0,99
13	2,95	3,44	-0,49	-0,31
14	2,34	3,34	-1,00	-0,86
15	2,33	3,34	-1,01	-0,87
16	2,30	3,25	-0,95	-0,81
17	1,91	2,22	-0,31	-0,19
18	1,97	2,53	-0,56	-0,44
19	1,88	2,34	-0,46	-0,35
$D_{prům}$	3,59	4,59	-1,00	-0,78

Tabulka 20: Zatažená obloha - porovnání vypočtených a naměřených hodnot činitele denní osvětlenosti

Odchylka naměřených hodnot činitele denní osvětlenost je průměrně 1 %, což je hodnota, která sice může ovlivnit rozčlenění místnosti do funkčních zón, ale opět nejde o dramatickou nepřesnost, kvůli které by byla celá místnost zařazena pouze pro činnosti méně náročných zrakových tříd.

Model výpočtu činitele denní osvětlenosti při zatažené obloze je v Dialuxu proveden tak, aby byly výsledky nezávislé na datu a času výpočtu, tudíž vypočtené hodnoty činitele denního osvětlení jsou platné obecně pro jakýkoliv den v roce. Hodnoty osvětleností (jak horizontální, tak výpočtových bodů v místnosti) se v absolutních hodnotách samozřejmě liší, čemuž je třeba přizpůsobit algoritmus řízení umělého osvětlení (stmívání svítidel dle čidla osvětlenosti). Pro úplnost porovnávám naměřenou a vypočtenou osvětlenost v jednotlivých bodech:

i	$E_{ivýpočet}$ [lx]	$E_{iměření}$ [lx]	ΔE_i [lx]	ΔE_i [%]
1	193	220	-27	-14,0
2	202	244	-42	-20,8
3	181	230	-49	-27,1
4	149	195	-46	-30,9
5	148	210	-62	-41,9
6	147	210	-63	-42,9
7	91	115	-24	-26,4
8	93	137	-44	-47,3
9	98	142	-44	-44,9
10	98	154	-56	-57,1
11	96	144	-48	-50,0
12	90	134	-44	-48,9
13	88	110	-22	-25,0
14	71	107	-36	-50,7
15	70	107	-37	-52,9
16	68	104	-36	-52,9
17	58	71	-13	-22,4
18	59	81	-22	-37,3
19	57	75	-18	-31,6
$\Delta E_{prům}$			-39	-38,2

Tabulka 21: Zatažená obloha - porovnání vypočtených a naměřených hodnot osvětlenosti

Jak vyplývá z tabulky 21, rozdíl v naměřených a vypočtených hodnotách je v absolutní hodnotě srovnatelný s rozdílem u umělého osvětlení (54 a 39), ovšem poměrně je výsledek výrazně méně přesný (7 % a 38 %). Tento problém vzniká především souběhem několika vlivů – rozdíly mezi modelem a skutečným stavem oblohy, parametry okenního otvoru a také skutečností, že absolutní hodnoty nejsou vztaženy k horizontální osvětlenosti tak, jako činitel denní osvětlenosti.

V následující tabulce shrnuji nejdůležitější naměřené i vypočtené hodnoty denního osvětlení při zatažené obloze, včetně výpočtu činitele denní osvětlenosti na ploše pracoviště a jeho okolí v rastru 16 x 16 bodů:

Zdroj dat	D_m [%]	D_{min} [%]	D_{max} [%]	U_{0D} [-]
Měření – body	4,59	2,22	7,63	0,29
Výpočet – body	3,59	1,88	6,72	0,28
Výpočet – plocha	3,42	1,98	6,13	0,32

Tabulka 22: Zatažená obloha - porovnání vypočtených a naměřených hodnot činitele denní osvětlenosti

Jak je z tabulky 21 patrno, naměřené hodnoty vycházejí mírně lépe než hodnoty vypočtené, což může být dáno jednak nedokonalou shodou stavu oblohy s modelem, dále do výpočtu vstupují parametry okenního otvoru. Také nelze vyloučit možnost, že výpočet v Dialuxu počítá blíže k méně „optimistické“ variantě, čímž vzniká určitá rezerva, aby byly požadavky dané normou [2], splněny vždy i reálně.

Pokud vezmu v úvahu všechny činitele ovlivňující výpočet a měření, myslím, že se podařilo dospět k velmi dobré shodě mezi modelem a výpočtem a potvrdit, že vzorová místnost T2: B3-355 splňuje nároky dané normou [2] pro činnosti zařazené do třídy IV zrakové činnosti. Dále jsem dospěl k závěru, že program Dialux 4.12 je vhodný pro návrhy umělého osvětlení, případně jej lze ještě užít k posouzení průběhu činitele denní osvětlenosti při zatažené obloze a k následujícímu funkčnímu rozdělení prostorů dle zrakových tříd. Užití programu Dialux 4.12 pro modely regulace umělého osvětlení dle denního světla nedoporučuji z důvodu značného poklesu přesnosti výpočtů v absolutních hodnotách osvětlenosti, jakožto i jasů.

3.4.3 Měření denního osvětlení – jasná obloha

Jestliže lze měření při zatažené obloze označit za komplikované, měření a analýza denního osvětlení při jasné obloze (s přímou složkou osvětlenosti) je komplikováno několika dalšími faktory, mezi které patří (mimo obtížné predikce stavu oblohy a plánování měření) především delší doba měření. Měření prodlužuje nutnost proměřit osvětlenost a jasy ve všech bodech při různém nastavení žaluzií. Zároveň s měřením ve vzorové místnosti je třeba za pomoci dalšího luxmetru snímat a ukládat aktuální hodnoty horizontální osvětlenosti (pro výpočet činitele denní osvětlenosti).

Důležitým poznatkem je, že výpočty při jasné obloze nejsou součástí dokumentace nutné ke kolaudaci budovy (vyžaduje se pouze posouzení činitele denní osvětlenosti při zatažené obloze). Hlavním cílem měření je tedy získat podklady popisující prostup světla do místnosti při různém nastavení stínicí soustavy venkovních žaluzií. Na základě naměřených dat je poté v další kapitole navržen algoritmus integrovaného řízení osvětlovací a stínicí soustavy.

Měření jsem provedl dne 18. 2. 2016 mezi 9:30 – 10:30 SEČ. Naměřená teplota v místnosti byla 23,5 °C. Stav oblohy byl pro měření ideální, bylo jasno s jasným slunečním zářením a minimálním rozptylem v atmosféře. Vyjma přístrojů zmíněných dříve, jsem navíc pro logování hodnot horizontální osvětlenosti užil luxmetr Extech.

V případě měření bez spuštěných žaluzií lze naměřené hodnoty porovnat s hodnotami vypočtenými v Dialuxu (po nastavení jasné oblohy s přímým slunečním světlem). U měření se spuštěnými žaluziemi jde především o zaznamenání naměřených hodnot, s tím, že jejich důkladnější vyhodnocení a interpretace bude užita v kapitole 4 při návrhu řízení stínicí i osvětlovací soustavy.

3.4.3.1 Jasná obloha – bez žaluzií

Jako první uvádím výsledky měření bez žaluzií, tyto výsledky lze také jako jediné porovnat s výpočtem denního osvětlení při jasné obloze ve výpočetním modelu. Měření v některých bodech je ovlivněno stínem vrženým okenním rámem. V těchto případech uvádím navíc za lomítkem osvětlenost změřenou co nejblíže původnímu bodu, ale mimo vržený stín:

$$E_H = 33\,960\ lx \tag{23}$$

i **[-]**	E_i **[lx]**	D_i **[%]**	***i*** **[-]**	E_i **[lx]**	D_i **[%]**
1	3180/16000	9,36/47,11	11	15200	44,76
2	3560/16700	10,48/49,18	12	15400	45,35
3	17500	51,53	13	14900	43,88
4	3300/15500	9,72/45,64	14	14400	42,40
5	3200/15100	9,42/44,46	15	15000	44,17
6	3600/16100	10,60/47,41	16	15000	44,17
7	12600	37,10	17	11100	32,69
8	14800	43,58	18	11500	33,86
9	15700	46,23	19	15300	45,05
10	16400	48,29	-	-	-

Tabulka 23: Jasná obloha - bez žaluzií - naměřené hodnoty osvětlenosti

Jak jsem již zmiňoval, Dialux umožňuje simulovat výpočet denního osvětlení i při jasné obloze, avšak bez výpočtu činitele denní osvětlenosti. Problémem je, že u výpočtu není uveden užitý model oblohy a horizontální osvětlenost můžu dopočíst pouze za pomoci postupů popsaných např. v mé bakalářské práci [14]. Porovnávám tedy naměřené a vypočtené hodnoty osvětlenosti (naměřené hodnoty budu uvažovat mimo stín vržený okenním rámem):

i	$E_{ivýpočet}$ [lx]	$E_{iměření}$ [lx]	ΔE_i [lx]	ΔE_i [%]
1	5508	16000	-10492	-190,5
2	5599	16700	-11101	-198,3
3	5580	17500	-11920	-213,6
4	5478	15500	-10022	-182,9
5	5214	15100	-9886	-189,6
6	5541	16100	-10559	-190,6
7	5119	12600	-7481	-146,1
8	5192	14800	-9608	-185,1
9	5304	15700	-10396	-196,0
10	5346	16400	-11054	-206,8
11	5370	15200	-9830	-183,1
12	5395	15400	-10005	-185,4
13	5462	14900	-9438	-172,8
14	5289	14400	-9111	-172,3
15	5349	15000	-9651	-180,4
16	5366	15000	-9634	-179,5
17	5255	11100	-5845	-111,2
18	5576	11500	-5924	-106,2
19	5672	15300	-9628	-169,7
$\Delta E_{prům}$			-9557	-176,9

Tabulka 24: Jasná obloha - bez žaluzií - porovnání vypočtených a naměřených hodnot osvětlenosti

Jak je z porovnání patrné, rozdíly mezi vypočtenými a skutečně naměřenými hodnotami jsou propastné. Ukazuje se, že v případě přítomnosti přímé složky denní osvětlenosti nelze simulovat osvětlení místnosti s přesností dostatečnou pro další úvahy a výpočty. Problémy s přesností výpočtu jsem v tomto případě očekával, ale že odchylka vypočtených hodnot bude přes 150 %, mne nepříjemně překvapilo. Na druhou stranu se tím potvrzuje obtížnost zapracování přímého slunečního světla do světelně technických výpočtů a zároveň se ukazuje, že metody hodnocení denního osvětlení předepsané normou [2] (a tedy založené na modelu zatažené oblohy) jsou z hlediska potřeby kontrolního výpočtu s dostatečnou přesností nastaveny vhodně.

Obdobně jako u předchozích měření uvádím i tabulku naměřených a vypočtených jasů, společně s barvou prostupujícího světla (u jasu v bodu 3 opět uvádím rozdílné hodnoty dle stínu vrženého rámem okna):

Ji [-]	L_{Ji} [cd·m^{-2}]	$L_{Jivýpočet}$ [cd·m^{-2}]
1	1840	553
2	1830	729
3	680/1840	818
4	620	470
5	560	455

Tabulka 25: Jasná obloha - bez žaluzií - naměřené hodnoty jasu

U jasů je odchylka naměřených hodnot oproti osvětlenosti menší, nicméně i zde je patrno, že vliv přímého denního světla posouvá hodnoty jasů do vyšších hodnot, než jak vyjdou ve výpočtovém modelu.

Pro úplnost uvádím barvu světla po prostupu oknem:

x **[-]**	***y*** **[-]**	T_C **[K]**
0,331	0,361	5561

Tabulka 26: Jasná obloha - bez žaluzií - teplota chromatičnosti

Pokud bych měl shrnout výsledky z měření za jasné oblohy bez užití žaluzií, ukázalo se, že simulace v programu Dialux je vzhledem k nepřesnosti prakticky nepoužitelná pro další návrhy a analýzy (zde by bylo zajímavé porovnat výsledky i z dalších programů – Dialux evo, Relux, Wils, apod.). Dále je třeba zmínit, že přímé sluneční světlo působilo vysoce oslňujícím dojmem a v neposlední řadě vedlo k růstu teploty v místnosti. Pokud by tedy měla být místnost využívána pro dlouhodobější činnost, je užití stínicí soustavy v podstatě nezbytné.

3.4.3.2 Jasná obloha – užití venkovních žaluzií

Při měření jasné oblohy s různým nastavením stínicí soustavy (žaluzií), již nebudu porovnávat naměřené hodnoty s vypočtenými, a to především kvůli velmi omezené možnosti žaluzie v Dialuxu 4.12 simulovat. Velká nepřesnost vzniká již při samotném výpočtu denní osvětlenosti s přímou složkou, natož poté s různými pokusy o simulaci žaluzií.

Nové možnosti v simulaci žaluzií (a obecně různých stínicích soustav) nabízí program Dialux evo v nové verzi 6.0. Tato verze byla vydána 22. 3. 2016 a bohužel se mi ji z časových důvodů již nepodařilo do diplomové práce více zakomponovat (ať již jde o zpoždění, než jsem zjistil, že je vydána nová verze, tak o nutnost učit se s novým programem). Dle popisu vývojáře (společnosti Dial GmbH) má být právě v této verzi poprvé zakomponováno množství nástrojů pro snadné výpočty a návrhy denního osvětlení, včetně možnosti modelování difúzních či textilních žaluzií, okenních fólií, světlíků a dalších systémů využití denního světla. Je škoda, že tato verze nebyla vydána o půl roku dříve, takto se již zařadí pouze do části doporučení pro pokračování této práce.

V následující tabulce uvádím kompletní výsledky měření osvětleností, jasů a barvy světla při různém nastavení žaluzií. Úhel natočení žaluzií je uvažován vzhledem k rovině okenního otvoru (žaluzie se dají sklápět pouze dolů).

E_H [lx]	36287		37810		40226	
žaluzie [°]	90		65		45	
i [-]	E_i [lx]	D_i [%]	E_i [lx]	D_i [%]	E_i [lx]	D_i [%]
1	2500	6,89	1800	4,76	1100	2,73
2	14200	39,13	1950	5,16	1100	2,73
3	11200	30,87	7800	20,63	1100	2,73
4	2400	6,61	1800	4,76	910	2,26
5	2500	6,89	1800	4,76	920	2,29
6	2600	7,17	1700	4,50	910	2,26
7	8900	24,53	1200	3,17	690	1,72
8	9300	25,63	1300	3,44	715	1,78
9	13200	36,38	1600	4,23	750	1,86
10	11600	31,97	1500	3,97	750	1,86
11	2400	6,61	1500	3,97	740	1,84
12	10800	29,76	4900	12,96	730	1,81
13	10200	28,11	1350	3,57	700	1,74
14	12700	35,00	1100	2,91	600	1,49
15	13200	36,38	3100	8,20	610	1,52
16	2200	6,06	2400	6,35	610	1,52
17	5200	14,33	3900	10,31	570	1,42
18	7600	20,94	1900	5,03	660	1,64
19	5100	14,05	950	2,51	480	1,19

E_H [lx]	43246		43760	
žaluzie [°]	25		10	
i [-]	E_i [lx]	D_i [%]	E_i [lx]	D_i [%]
1	770	1,78	240	0,55
2	830	1,92	240	0,55
3	770	1,78	250	0,57
4	660	1,53	200	0,46
5	650	1,50	200	0,46
6	670	1,55	200	0,46
7	510	1,18	150	0,34
8	530	1,23	150	0,34
9	550	1,27	150	0,34
10	540	1,25	160	0,37
11	520	1,20	160	0,37
12	500	1,16	150	0,34
13	480	1,11	150	0,34
14	450	1,04	130	0,30
15	450	1,04	130	0,30
16	430	0,99	130	0,30
17	360	0,83	110	0,25
18	350	0,81	115	0,26
19	340	0,79	115	0,26

Tabulka 27: Jasná obloha – užití žaluzií – naměřené hodnoty osvětlenosti

Následuje tabulka s naměřenými jasy:

***žaluzie* [°]**	**90**	**65**	**45**	**25**	**10**
***Ji* [-]**	**L_{Ji} [cd·m^{-2}]**				
1	1150	670	220	140	44
2	1180	540	162	113	34
3	445	240	115	82	23
4	440	270	150	105	35
5	370	220	120	87	26

Tabulka 28: Jasná obloha – užití žaluzií – naměřené hodnoty jasů

A pro úplnost změny v barvě světla po průchodu přes žaluzie a okno, opět převedené na teplotu chromatičnosti pomocí kalkulátoru [15]:

***žaluzie* [°]**	***x* [-]**	***y* [-]**	**T_C [K]**
90	0,344	0,369	5107
65	0,375	0,392	4248
45	0,398	0,409	3799
25	0,416	0,422	3518
10	0,416	0,423	3525

Tabulka 29: Jasná obloha – užití žaluzií – teplota chromatičnosti

Jak z měření vyplývá, spolu s poklesem příspěvku přímého denního světla a rostoucí difúzí světla na žaluziích, klesá teplota chromatičnosti z původních cca 5500 K, až na 3500 K. Těchto hodnot lze využít k přizpůsobení barvy umělého osvětlení osvětlení dennímu (pokud je instalována soustava vybavená moderními LED diodami s možností plynulé změny teploty chromatičnosti, případně jinak řešená svítidla s možností regulace teploty chromatičnosti).

3.5 Vyhodnocení a závěry z analýzy osvětlení

Tímto bych uzavřel kapitolu věnující se analýze osvětlení vzorové místnosti. Celkově se podařilo velmi podrobně analyzovat umělé i denní osvětlení a připravit si tak podklady pro další část práce, pro návrh regulačního algoritmu pro osvětlovací a stínící soustavu.

Z měření a světelně technických výpočtů jsem zformuloval několik nejdůležitějších závěrů:

- osvětlovací soustava (až na mírné překročení povoleného činitele oslnění *UGR*) splňuje požadavky kladené na umělé osvětlení,
- denní osvětlení je dostatečné pro třídu IV zrakové činnosti,
- model pro simulaci osvětlení v programu Dialux 4.12 je dobře použitelný pro výpočet umělého osvětlení a denního osvětlení při zatažené obloze,
- tentýž model nelze užít pro výpočty za jasné oblohy s příspěvkem přímého slunečního záření, a to z důvodu velké odchylky mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami,
- naměřené hodnoty umožňují další zpracování za účelem návrhu regulace,
- pro dosažení spolehlivějších a úplnějších výsledků a pro rozšíření analýzy i na další provozní stavy osvětlení by bylo nutné mít k dispozici vzorovou místnost po delší dobu v kuse (společně s přítomností všech přístrojů) a ideálně se stmívatelnou osvětlovací soustavou a elektronicky řízenou stínicí soustavou (umožňující přesně opakovat regulační stavy).

4. Návrh metodiky řízení soustavy umělého osvětlení v závislosti na denním světle

Hlavním cílem poslední kapitoly mé diplomové práce je navrhnout metodiku řízení, která by regulovala nejen samotnou hladinu osvětlenosti (a tedy kvantitu), ale zároveň dokázala reagovat i na proměnlivé stavy oblohy (a zajistit tak co nejvyšší kvalitu osvětlení).

V první části této kapitoly se budu věnovat vyhodnocení naměřených dat z kapitoly 2 a určení klíčových ukazatelů jednotlivých stavů osvětlení, na jejichž základě se ve druhé části pokusím navrhnout algoritmus pro řízení osvětlovací a stínicí soustavy.

4.1 Ukazatele stavu osvětlení

Při návrhu metodiky řízení vycházím z myšlenky, že se uživatelsky příjemné i nepříjemné stavy osvětlení budou vyznačovat shodou v některých měřitelných parametrech. Na výsledcích měření a výpočtech těchto indikátorů by tedy poté měl jít postavit algoritmus řízení. Slabinou tohoto hodnocení je nutnost subjektivního hodnocení kvality osvětlení (především u scén s vlivem přímého slunečního světla), ale na druhou stranu v tomto hodnocení nelze udělat řádovou chybu a především hraniční limity lze kalibrovat přímo na místě instalace regulace. Ale o tom podrobněji až v dalších kapitolách.

Uvádím tabulku se souhrnem možných ukazatelů pro různé světelné scény:

Světelná scéna / **Ukazatel**	**Umělé osv.**	**Zatažená bez ž.**	**Jasná bez ž.**	**Jasná ž. 90°**	**Jasná ž. 65°**	**Jasná ž. 45°**	**Jasná ž. 25°**	**Jasná ž. 10°**
E_{prac} **[lx]**	791	149	12000	7536	2064	750	541	160
E_{okol} **[lx]**	571	143	11205	8113	2606	800	551	171
$u0_{prac}$ **[-]**	0,84	0,70	0,27	0,29	0,53	0,80	0,79	0,81
$u0_{okol}$ **[-]**	0,73	0,50	0,28	0,31	0,36	0,60	0,62	0,64
$u0$ **[-]**	0,60	0,48	0,27	0,28	0,41	0,62	0,62	0,67
E_{min}/E_{max} **[-]**	0,46	0,29	0,18	0,15	0,12	0,44	0,41	0,44
D_m **[%]**	-	4,59	34,35	21,44	6,06	1,92	1,26	0,38
D_{min} **[%]**	-	2,22	9,36	6,06	2,51	1,19	0,79	0,25
D_{max} **[%]**	-	7,63	51,53	39,13	20,63	2,73	1,92	0,57
L_{min}/L_m **[-]**	0,76	0,60	0,46	0,52	0,57	0,75	0,78	0,71
L_{min}/L_{max} **[-]**	0,61	0,32	0,30	0,31	0,33	0,52	0,59	0,52
T_C **[K]**	4000	5517	5561	5107	4248	3799	3518	3525

Tabulka 30: Ukazatelé stavu osvětlení pro různé světelné scény

Některé změřené a vypočtené ukazatele je třeba hodnotit s rezervou a rozmyslem. Konkrétně se především jedná o rovnoměrnosti osvětlenosti (u_0, u_{0prac}, u_{0okol}), kde je velmi výrazný vliv stínů vrhaných okenním rámem a případným dalším vybavením místnosti. Uvedu příklad – v případě, kdy rovnoměrnost u scény jasné oblohy bez žaluzií vypočtu z hodnot změřených poblíž bodů původních, ale mimo stín, vychází rovnoměrnost u_0 = 0,78 namísto z původních bodů vypočtené rovnoměrnosti u_0 = 0,27 (viz tabulka 27). Znovu se potvrzuje, že jak při měření, tak později při umístnění senzorů je třeba dbát na vhodné umístění tak, aby byly podobnými vlivy co nejméně ovlivněny.

4.2 Návrh řízení osvětlovací soustavy

Primárním úkolem osvětlovací soustavy je udržet předepsanou úroveň osvětlenosti vnitřních prostorů. Ve většině provozních stavů však díky příspěvku denního světla není nutno provozovat soustavu ve stavu maximálního možného světelného toku a tedy i nejvyššího příkonu. Z tohoto důvodu se stále častěji uplatňují regulovatelné osvětlovací soustavy schopné přizpůsobení proměnným provozním podmínkám.

Rovnoměrnost osvětlení je dána vhodným rozmístěním jednotlivých svítidel, kde se výpočtem ověří splnění požadavků daných normou [1]. Výpočtem činitele *UGR* je třeba ověřit i požadavky na omezení oslnění. Výpočet se provádí při maximálním světelném toku svítidel. Spolu se stmíváním svítidel se dá očekávat snížení jasů jednotlivých světlených zdrojů a částí svítidel (reflektory, mřížky, apod.) a tudíž i další pokles rušivého oslnění.

Speciálním případem regulace je řízení teploty chromatičnosti umělé osvětlovací soustavy. Tímto tématem se však budu zaobírat spíše okrajově. Vzhledem k ekonomické náročnosti technologie změny barvy světla, je v současnosti v Česku realizováno pouze minimum instalací, většinou pro speciální prezentační nebo experimentální účely.

4.2.1 Algoritmus řízení hladiny osvětlenosti

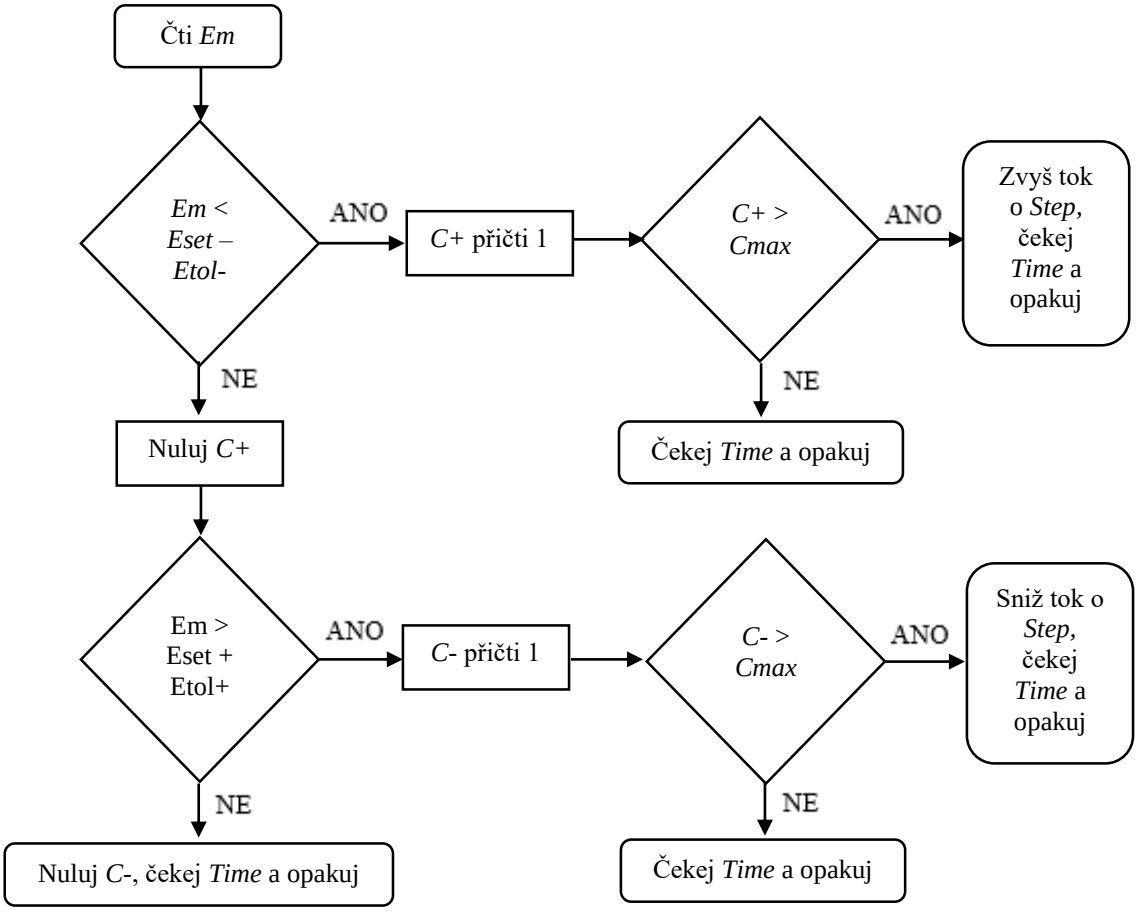
Pro řízení umělé osvětlovací soustavy uvažuji plynule stmívatelnou osvětlovací soustavu (např. přes protokol DALI). Dále je třeba instalovat interiérové čidlo intenzity osvětlení a zajistit propojení k řídicí jednotce. V rozlehlejších prostorech, především v kancelářích typu „openspace“ je vhodné navíc užít i přítomnostní senzory (případně kombinované senzory osvětlenosti a pohybu), umožňující úplné vypnutí osvětlení v momentálně nevyužívaných prostorech.

Pro popis algoritmů jsem se rozhodl užít vývojové diagramy, především pro jejich jednoduchost a názornost. Ve vývojovém diagramu se objevují následující proměnné a konstanty:

Označení	Typ	Význam	Jednotka
Eset	konstanta	hodnota udržované osvětlenosti	lx
Etol+	konstanta	povolená kladná odchylka od Eset	lx
Etol-	konstanta	povolená záporná odchylka od Eset	lx
Em	proměnná	hodnota z interiérového čidla intenzity osvětlení	lx
Time	konstanta	interval mezi jednotlivými cykly	s
C+	proměnná	čítač opakování stavů požadujících zvýšení toku svítidel	-
C-	proměnná	čítač opakování stavů požadujících snížení toku svítidel	-
Cmax	konstanta	max. počet opakování se stejným výsledkem bez změny toku	-
Step	konstanta	krok změny světleného toku svítidel	%

Tabulka 31: Řízení osvětlovací soustavy - konstanty a proměnné

Konstanty musí být nastaveny předem a jsou individuální pro různé prostory a jejich využití (o nastavení těchto hodnot se zmiňuji v podkapitole 4.2.2). Navrhovaný algoritmus má následující podobu:



Obrázek 15: Řízení osvětlovací soustavy - vývojový diagram - obecně

Jak je z diagramu patrno, řízení je založeno na zjišťování aktuální osvětlenosti pomocí čidla osvětlenosti a jeho porovnávání s nastavenou hodnotou (včetně nastavené záporné nebo kladné tolerance). Pomocí konstanty *Time* lze nastavit prodlevu mezi dvěma porovnávacími cykly. Zařazení čítačů umožňuje potlačit vliv krátkodobých změn osvětlenosti a omezit tak příliš časté změny a „blikání“ svítidel. Ke změně úrovně světelného toku svítidel dojde vždy až po uplynutí *C+*, respektive *C-* cyklů se stejným „požadavkem“ na změnu světleného toku.

V diagramu není uvedena smyčka pohybových čidel (kde nepřítomnost osob automaticky znamená zhasnuté či tlumené osvětlení). Dále by bylo možné zavést podmínku minimálního procentuálního toku svítidel a to z důvodu prudce klesající účinnosti v oblasti pod cca 30 % maximálního světleného toku.

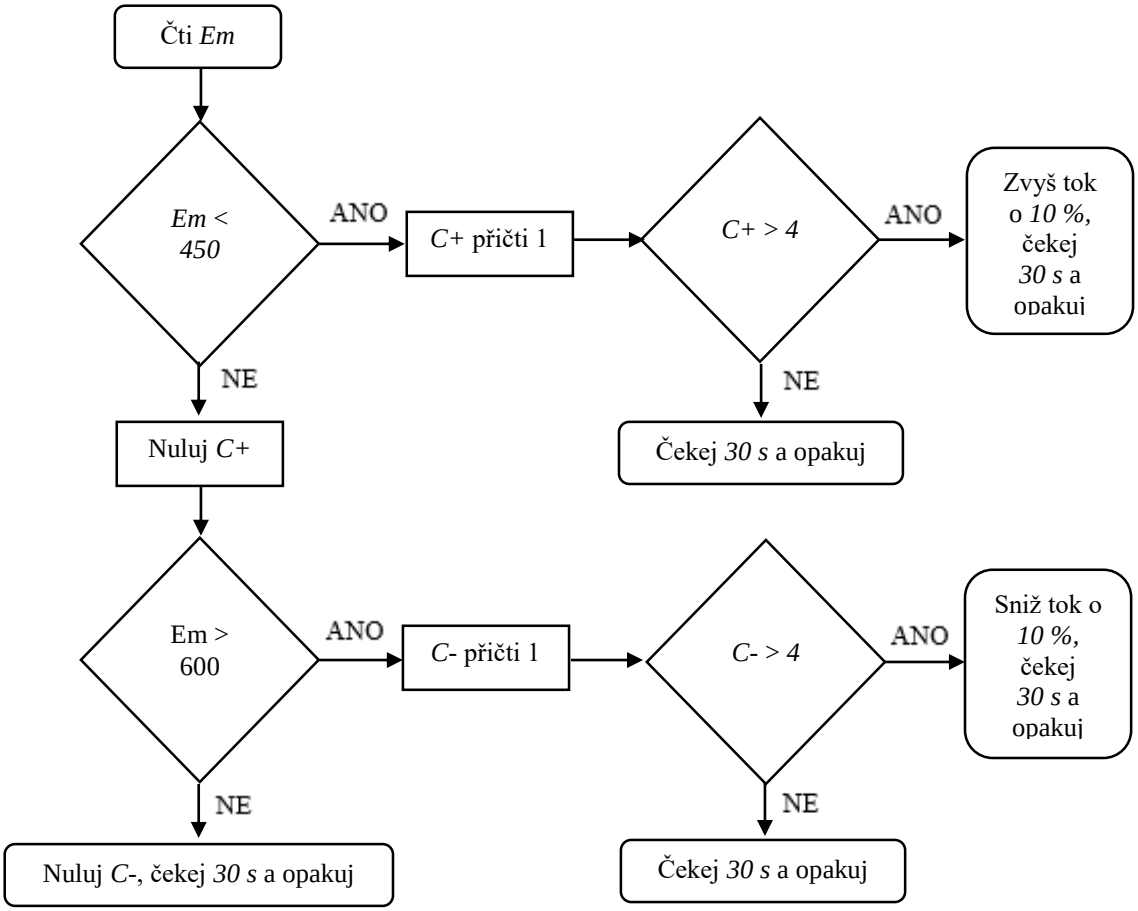
4.2.2 Nastavení konstant řízení osvětlovací soustavy

Navržený algoritmus řízení osvětlenosti uvažuje nastavení několika různých konstant, které ve výsledku výrazně ovlivní řízení osvětlení v daném prostoru. Toto nastavení je ryze individuální a ideální je ho provést přímo na místě instalace dle využití prostor a přání klienta. Pro místnost T2: B3-355 bych volil následující konfiguraci:

Označení	Nastavení
Eset	500 lx
Etol+	100 lx
Etol-	50 lx
Time	30 s
Cmax	4
Step	10 %

Tabulka 32: Řízení osvětlovací soustavy - konfigurace T2: B3-355

Vývojový diagram by tedy dostal následující podobu:



Obrázek 16: Řízení osvětlovací soustavy - vývojový diagram - T2: B3-355

Po konfiguraci systému řízení musí co nejdříve dojít k důkladnému ověření funkčnosti řízení a případné přesnější „kalibraci“ konstant (především se jedná o nastavení dynamičnosti – rychlosti změny toku) dle pocitů pracovníků tak, aby došlo k docílení světelné pohody a navození příjemné pracovní atmosféry.

4.3 Návrh řízení stínicí soustavy

Na rozdíl od řízení osvětlovací soustavy je řízení stínicí soustavy součástí mnohem menšího procenta instalací. To je dáno především komplikovaností a ekonomickou náročností komplexního řešení. Instalace osvětlení a fasádní práce navíc ve velké většině probíhají až jako jedny z posledních prací na stavbách, tedy ve chvílích, kdy se u některých staveb hledají dodatečné úspory na pokrytí neplánovaných výdajů vzniklých během stavby. Tyto náklady jsou pak bohužel často kompenzovány z financí původně určených na automatizaci stínicí a osvětlovací soustavy.

Technologii řízení osvětlovací soustavy, popsanou v předchozí podkapitole, lze prohlásit za relativně dobře zvládnutou a úspěšně instalovanou i na velkých projektech (např. budova Florentinum Praha – cca 9000 LED svítidel v administrativních prostorech). Oproti tomu automatické řízení stínicí soustavy je stále spíše v počátcích, přičemž na vývoji se podílí především velcí výrobci svítidel, jako je např. Zumtobel.

Základní funkcí žaluzií je omezení oslnění pracovníků, společně se zachováním maximální možného příspěvku denního světla. Vzhledem k neexistenci metody hodnocení oslnění denním osvětlením jsem se rozhodl vycházet ze základního předpokladu a to, že oslnění je způsobeno především vysokým kontrastem jasů, případně celkově vysokým (i když třeba rovnoměrným) jasem v zorném poli pozorovatele.

4.3.1 Algoritmus řízení stínicí soustavy

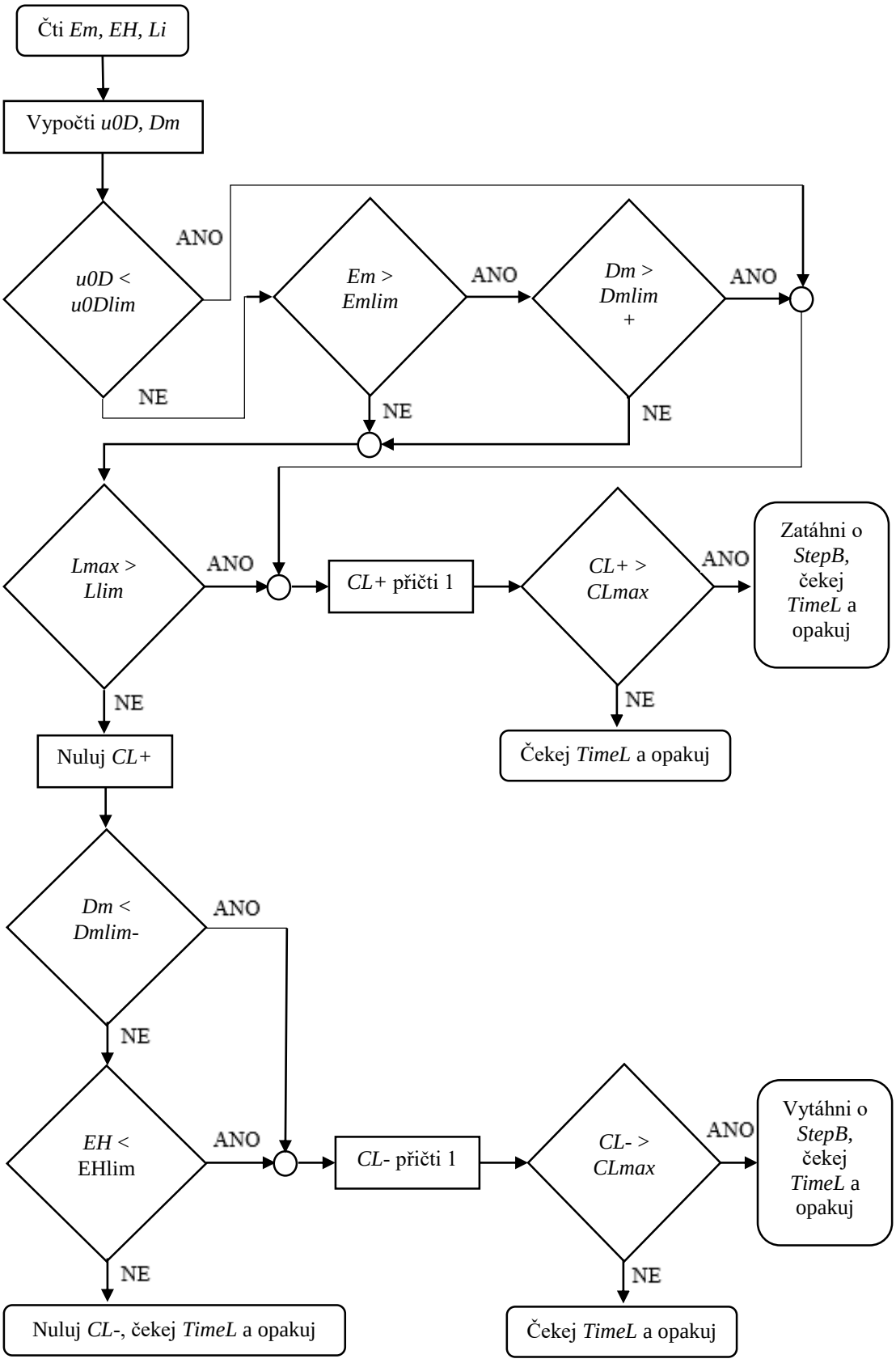
Oproti řízení osvětlovací soustavy je pro mnou navržené řízení stínicí soustavy nutno instalovat další čidla pro získání potřebných vstupních dat. Jedná se o exteriérové čidlo denní osvětlenosti (umístěné ideálně na nestíněném místě na střeše budovy) a několik čidel jasu (v různé vzdálenosti od okenního otvoru).

Pro popis řízení užívám následující konstanty a proměnné:

Označení	Typ	Význam	Jednotka
Li	proměnná	naměřené hodnoty jasu	$cd \cdot m^{-2}$
Lmin	proměnná	minimální hodnota naměřeného jasu	$cd \cdot m^{-2}$
Lmax	proměnná	maximální hodnota naměřeného jasu	$cd \cdot m^{-2}$
Llim	konstanta	minimální hodnota Lmax pro stažení žaluzií	$cd \cdot m^{-2}$
u0D	proměnná	Lmin/ Lmax	-
Em	proměnná	hodnota z interiérového čidla intenzity osvětlení	lx
Emlim	konstanta	minimální osvětlenost pro stažení žaluzií	lx
EH	proměnná	hodnota z exteriérového čidla intenzity osvětlení	lx
EHlim	konstanta	maximální horizontální osvětlenost pro vytažení žaluzií	lx
Dm	proměnná	Em/EH ·100	%
Dmlim+	konstanta	minimální Dm pro stažení žaluzií	%
Dmlim-	konstanta	maximální Dm pro vytažení žaluzií	%
TimeL	konstanta	interval mezi jednotlivými cykly	s
CL+	proměnná	čítač opakování stavů požadujících stažení žaluzií	-
CL-	proměnná	čítač opakování stavů požadujících vytažení žaluzií	-
CLmax	konstanta	maximální počet opakování se stejným výsledkem bez změny nastavení žaluzií	-
StepB	konstanta	krok změny nastavení žaluzií	°

Tabulka 33: Řízení stínicí soustavy - konstanty a proměnné

Algoritmus řízení stínicí soustavy je zjednodušeně popsán v následujícím vývojovém diagramu:



Obrázek 17: Řízení stínicí soustavy - vývojový diagram - obecně

Klíčovým cílem jednotlivých kroků diagramu je rozpoznání dvou stavů. Prvního, kdy je třeba rozpoznat stav vyžadující spuštění a „zavírání“ žaluzií a druhého, kdy naopak jde o stavy vhodné pro „otevření“ či vytažení žaluzií a tím pádem i větší využití denního světla. Je zde snaha docílit co nejvyššího zisku z denního světla, tento zisk však nelze zajistit na úkor kvality osvětlení.

První stav je indikován pomocí sledování poměru minimálního a maximálního jasu z hodnot vhodně umístěných čidel. Pro případ, kdy je k dispozici jen menší množství čidel, případně slunce svítí přímo do místnosti (a kdy tedy může dojít k podobnému jasu na více čidlech), se dále sledují absolutní hodnoty interiérové osvětlenosti a poměru interiérové k horizontální osvětlenosti. V případě, kdy jsou tyto dvě hodnoty příliš vysoké, svítí s největší pravděpodobností slunce do místnosti přímo a oslňuje pracovníky. Proto je vydán pokyn ke stažení či „zavření“ žaluzií.

Indikovat druhý stav, tedy stav, kdy je vhodné „otevřít“ či vytáhnout žaluzie, je o něco obtížnější. Pokud dojde při stažených žaluziích k zatažení oblohy, jasové podmínky uvnitř místnosti se výrazně nezmění. I když zůstává zachována světelná pohoda, snižuje se zisk denního světla, což se projevuje zbytečně vysokým příkonem osvětlovací soustavy a dlouhodobě neudržitelným nedostatkem denního světla v místnosti. Z naměřených hodnot nakonec nejlépe vychází sledování poměru interiérové a horizontální osvětlenosti, společně s absolutní hodnotou horizontální osvětlenosti. K „otevření“ nebo vytažení žaluzií dojde při poklesu jedné z těchto sledovaných hodnot pod nastavenou mez.

Zpoždění pro potlačení krátkodobých změn funguje obdobně jako u regulace osvětlovací soustavy. Celá regulační smyčka funguje nezávisle na smyčce řízení osvětlenosti. Obě smyčky řízení se ovlivňují pouze skrze vstupní hodnoty čidel.

4.3.2 Nastavení konstant řízení stínicí soustavy

Navržený algoritmus řízení stínicí soustavy je na správném nastavení konstant závislý ještě více než algoritmus řízení osvětlovací soustavy. Navržené konstanty se budou lišit podle zeměpisné orientace okenních otvorů, množství a polohy instalovaných čidel a především typu instalovaných žaluzií. Tyto rozdíly způsobí, že instalovanou stínicí soustavu je třeba vždy nutné proměřit za různých atmosférických vztahů a dle výsledků měření nastavit konstanty řízení. Tento proces by šlo v budoucnu omezit využitím předem naměřených hodnot pro typické instalace různých typů žaluzií.

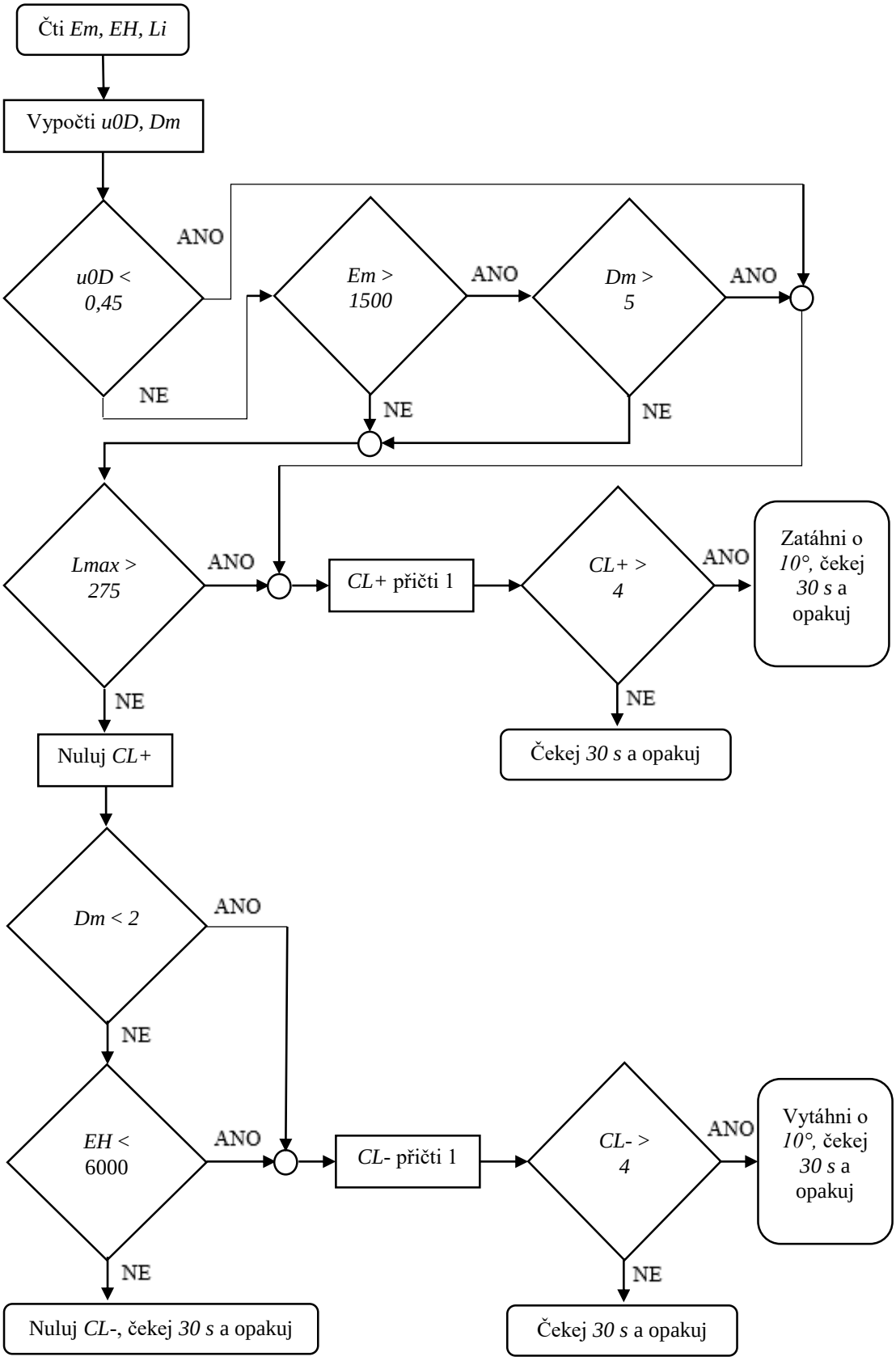
Na základě analýzy osvětlení vzorové místnosti T2: B3-355 bych pro algoritmus řízení stínicí soustavy nastavil následující hodnoty:

Označení	Nastavení
Llim	275 cd·m^{-2}
u0D	0,45
Em	lx
Emlim	1500 lx
EHlim	6000 lx
Dmlim+	5 %
Dmlim-	2 %
TimeL	30 s
CLmax	4
StepB	10°

Tabulka 34: Řízení stínicí soustavy - konfigurace T2: B3-355

Stejně jako u řízení osvětlovací soustavy je i zde nutné ověření a případná kalibrace nastavených hodnot. Zajímavou myšlenkou může být měnit konstantu *EH* v závislosti na roční době a případně i čase (roční doba i čas výrazně ovlivňuje horizontální osvětlenost nejen při zatažené obloze). Pro vývoj velikosti *EH* se nabízí užít výpočtu průběhu horizontální osvětlenosti v průběhu roku z mé bakalářské práce, viz [14].

Vývojový diagram tedy získává následující podobu:



Obrázek 18: Řízení osvětlovací soustavy - vývojový diagram - T2: B3-355

4.4 Řízení teploty chromatičnosti

Na závěr kapitoly o řízení se v krátkosti zmíním o řízení teploty chromatičnosti. Svítidla se řízenou teplotou chromatičnosti se užívají především ve dvou případech. Prvním z nich je snaha o napodobení průběhu denního světla v místnostech s jeho nedostatkem (tzv. biodynamické osvětlení), jako jsou např. velíny, dispečinky apod. Druhým případem je užití prezentační, kdy je změna teploty chromatičnosti součástí komerční prezentace, především luxusních výrobků (např. autosalony), avšak o tomto využití se dále bavit nebudeme.

Biodynamické systémy, založené na předem naprogramované změně intenzity, barvy a případně i směrovosti osvětlení, vyvíjela např. společnost iGuzzini a to za použití většího počtu samostatně řízených fluorescenčních zdrojů s různou teplotou chromatičnosti, viz [16]. V současné době je změna teploty chromatičnosti značně jednodušší, což je dáno možností použít LED moduly s čipy umožňující změnu teploty chromatičnosti (např. řada Talexx LED Premium Tunable white výrobce Tridonic).

V případě mnou navržené soustavy řízení by změnu teploty chromatičnosti bylo vhodné navázat kromě časového plánu i na aktuální stav nastavení žaluzií tak, aby se umělé osvětlení vždy blížilo barevnému tónu prostupujícího denního světla. Na druhou stranu by ovšem instalace biodynamického osvětlení výrazně prodražila celou osvětlovací soustavu a zhoršila by i její účinnost (vzhledem k mírně horší účinnosti barevně řiditelných LED diod).

Z mého pohledu je užití osvětlovací soustavy s možností změny teploty chromatičnosti v prostorech s dostatkem denního světla (tedy v podstatě ve všech prostorech se stínicí soustavou) zbytečné. Sice by touto instalací mohlo dojít k dalšímu mírnému zlepšení světlené pohody v interiéru, nicméně toto zlepšení může jen těžko ospravedlnit výrazně vyšší pořizovací náklady osvětlovací soustavy.

5. Závěr

V následující části je vyhodnocena míra splnění cílů práce a následně jsou uvedeny návrhy dalšího možného využití, vylepšení a ověření získaných poznatků.

5.1 Vyhodnocení cílů práce

Prvního cíle práce, tedy shrnutí technických požadavků na osvětlení, se mi podařilo dosáhnout dle mého hodnocení velmi dobře. Osobně si cením, že kapitola není pouhým přepisem či rešerší několika závazných norem, ale zahrnuje i moje osobní zkušenosti, poznatky a některé ne úplně očekávané problémy z praxe projektanta.

Druhého cíle práce, analýzy světelně technických parametrů osvětlovací a stínicí soustavy ve vzorové místnosti, bylo, i přes určité obtíže dosaženo velmi uspokojivě, co se mého názoru týče. Zmíněné obtíže se týkaly především proměnlivých atmosférických podmínek hrubě ovlivňujících měření, náročnosti na přístrojové vybavení a časové flexibility všech zúčastněných. Jistě by bylo vhodné některá měření opakovat či provádět po delší dobu, nicméně se podařilo naměřit dostatečné množství hodnot, které umožnily nejen vyhodnocení přesnosti výpočetního programu, ale zároveň posloužily jako základ pro návrh algoritmů řízení osvětlovací a stínicí soustavy.

Třetího cíle práce, návrhu řídicích algoritmů pro osvětlovací a stínicí soustavu, se na základě hodnot změřených a analyzovaných v druhé části práce dle mého názoru podařilo dosáhnout. Jediné, čeho se dosáhnout nepodařilo, je ověření navržených algoritmů v praxi. Nutno podotknout, že toto ověření nebylo zahrnuto do cílů práce, především z důvodu nutnosti nemalé investice do zakoupení, instalace a zprovoznění stmívatelné osvětlovací soustavy, automaticky řiditelné stínicí soustavy a senzorového vybavení.

Souhrnně tedy mohu s čistým svědomím tvrdit, že všech cílů obsažených v zadání diplomové práce se mi podařilo alespoň uspokojivě dosáhnout a v budoucnu je možné pracovat na zdokonalení získaných poznatků a především na jejich uvedení do praxe.

5.2 Návrhy na další pokračování práce

Jak jsem již několikrát v průběhu práce naznačil, navržené algoritmy nelze začít okamžitě dogmaticky aplikovat bez dalšího vývoje, kalibrací a ověřování. Proto se také většina námětů pro pokračování tématu práce točí okolo rozšiřování a praktické aplikace navržených metodik.

V rámci další analýzy by bylo ideální, aby se měření chopila soukromá společnost se silným zázemím (jak finančním, tak materiálovým), která by byla schopna vybavit vzorovou místnost (s regulovatelnou osvětlovací i stínicí soustavou) trvale umístěnými přístroji a zajistit dlouhodobé, ideálně alespoň z části automatické, měření.

Na základě těchto měření by mělo dojít k ladění jednotlivých konstant řízení, jejich případných změn v závislosti na aktuálním čase a datu, případně na základě předpovědi počasí či kategorizaci atmosférických podmínek na základě rozsahu vstupních dat ze senzorů. Zároveň musí docházet k identifikaci a následné korekci situací, při kterých automatické řízení selhává, či při které není výstupní nastavení optimální. Nevýhodou, ale bohužel nutností, je předpokládaná délka tohoto ladění, kterou bych odhadoval minimálně na jeden rok (tak, aby proběhla většina stavů oblohy za různých ročních období).

Další možností, kam lze obrátit pozornost, je senzorové vybavení. Vzhledem k nutnosti sledovat světelně technické veličiny ve více bodech, by mohla být zajímavá úvaha o možnosti užití CCD čipů při tomto sledování.

Zároveň by bylo zajímavé sledovat i ekonomickou stránku věci a pokusit se snížit pořizovací náklady automatické regulace. Toho by šlo docílit např. pomocí řízení skupiny místností ze vstupních dat měřených pouze v jedné vzorové místnosti se stejnou orientací okenních otvorů a se stejným využitím, dále optimalizací počtu a rozmístění senzorů a mnoha dalšími kroky.

Konečný vývoj aplikací pro řízení stínicí soustavy je bohužel finančně nákladný a společně s nepříliš silnou kupní silou českého trhu bych odhadoval, že vývoj těchto aplikací zůstane v gesci silných nadnárodních koncernů, operujících na finančně silných trzích, jako jsou např. Philips, Zumtobel/Thorn, Trilux, Prolicht a další.

Literatura

[1] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Březen 2012, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[2] ČSN 73 0580-1. *Denní osvětlení budov - Část 1: Základní požadavky*. Červen 2007, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.

[3] ČSN 36 0020. *Sdružené osvětlení*. Leden 2015, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

[4] HABEL Jiří, Dvořáček Karel, Dvořáček Vladimír, Žák Petr, Světlo a osvětlování, 1, Praha: FCC Public, 2013, 624 s, ISBN 978-80-86534-21-3

[5] ŽÁK, Petr, Nové přístupy k návrhu osvětlení, *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování [online]*, 2007(01) [cit, 2015-11-15], Dostupné z: http://www,odbornecasopisy,cz/svetlo/casopis/tema/nove-pristupy-k-navrhu-osvetleni--15970

[6] HOFFMANN, Gernot. CIE Color Space. In: *Documents by Gernot Hoffmann [online]*. Emdem, Germany, 2000 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: http://docs-hoffmann.de/ciexyz29082000.pdf

[7] FUKSA, Antonín, Měřítka podání barev, *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování [online]*, 2014, 2015-11-20, 2014(6): 44 - 47 [cit, 2015-11-20], Dostupné z: http://www,odbornecasopisy,cz/svetlo/clanek/meritka-podani-barev--744

[8] *Lighting Program 2016/2017* [online]. Munich, Germany: OSRAM GmbH, 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://www.osram.cz/media/resource/HIRES/683761/2017-gb.pdf

[9] ČSN EN 60529. *Stupně ochrany krytem (krytí - IP kód)*. Listopad 1993. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1993.

[10] ČSN EN 50102. *Stupně ochrany poskytované kryty elektrických zařízení proti vnějším mechanickým nárazům (IK kód)*. Únor 1997. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1997.

[11] PŘÍRUČKA KE SMĚRNICI ATEX: (druhé vydání – překlad). In: *SBORNÍKY TECHNICKÉ HARMONIZACE [online]*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: http://www.unmz.cz/sborniky_th/sb2006/atex_Master.pdf

[12] ČSN 36 0011. *Měření osvětlení prostorů*. Únor 2014. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

[13] CARBOL, Zbyněk, Barbara HELŠTÝNOVÁ a Tomáš NOVÁK, ČESKÁ SPOLEČNOST PRO OSVĚTLOVÁNÍ - REGIONÁLNÍ SKUPINA OSTRAVA, Měření UGR v budově Florentinum, Praha, Karel SOKANSKÝ (odborný garant), Ostrava, 2013

[14] PAVLOUSEK, Jiří, Určení a využití horizontální osvětlenosti v průběhu roku, Praha, 2014, Bakalářská práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Vedoucí práce Ing, Jan Zálešák

[15] CIE Color Calculator. *Bruce Lindbloom's Web Site* [online]. Bruce Justin Lindbloom, 2012 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: http://www.brucelindbloom.com/index.html?ColorCalculator.html

[16] ŽÁK, Petr. Biodynamické systémy osvětlení. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování [online]*. 2005(02) [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/biodynamicke-systemy-osvetleni--16384

Příloha 1 – Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje tyto soubory:

Soubor	Popis
pavlousek_diploma_thesis.pdf	Diplomová práce v elektronické formě
pavlousek_DP.dlx	Soubor Dialuxu s modelem vzorové místnosti
pavlousek_DP_vypocet.pdf	Výstup z Dialuxu ve formátu pdf
namerene_hodnoty.xlsx	Interní Excel s naměřenými hodnotami