Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechnicky a informatiky

Optimalizace energetické náročnosti osvětlovacích soustav v závislosti na denním světle

DISERTAČNÍ PRÁCE

2017 **Ing. Jan Šumpich**

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektrotechniky

Doktorský studijní program: Elektrotechnika P2649

Studijní obor: Elektroenergetika 3907V001

Autor: Ing Jan Šumpich

Školitel: prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.

Optimalizace energetické náročnosti osvětlovacích soustav v závislosti na denním světle

Energy Performance Optimizing of Lighting Systems Depending on Daylight

2017 **Ing. Jan Šumpich**

Prohlášení studenta

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

V Ostravě 31. srpna 2017 Ing. Jan Šumpich

Poděkování

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Karlu Sokanskému, CSc. za vedení disertační práce, cenné rady, odborné usměrnění a připomínky poskytnuté k vypracování této práce. Děkuji všem blízkým za upřímnou podporu a trpělivost se mnou při vypracování této práce.

Abstrakt

Ve své disertační práci řeším výpočty úspor elektrické energie v oblasti osvětlení. Práce přináší podklady pro nástavbu softwaru pro výpočty osvětlení WDLS/WILS od firmy ASTRA. Z podkladů se dají jednoduše predikovat energetické úspory dosažitelné řízením osvětlovacích soustav umělého osvětlení zejména v závislosti na dynamice a směrovosti denního osvětlení.

První část práce je zaměřena na základní teorií denního světla, spektrální záření a jeho vliv a potřebu pro živé organismy. Z denního světla vyplývají možnosti využití pro modelování rovnoměrně zatažené oblohy, osvětlování vnitřních pracovních prostor umělým světlem a možnosti jeho řízení v kontextu s chováním denního světla. Jsou zde rozebrány kvantitativní a kvalitativní parametry na osvětlování vnitřních pracovních prostor. Dále tato část naznačuje možnosti regulace osvětlovacích soustav s využitím moderních světelných zdrojů a dostupných řídících a měřících systémů. V této teoretické části je přehled z pohledu legislativních požadavků, které vytvářejí tlak na snižování energetických náročností osvětlovacích soustav.

Další část práce se věnuje rešerši možností predikce spotřeby elektrické energie osvětlovacích soustav umělého osvětlení u současně dostupných softwarů. Stávající část porovnává současný stav, kterým směrem se ubírají nástavbové části programů pro výpočty úspor elektrické energie ve výpočetních softwarech RELUX, DIALux.

Hlavní jádro disertační práce se věnuje základní filozofii využití dynamického modelu rovnoměrně zatažené oblohy pro výpočty příspěvků osvětleností ve výpočetních bodech míst zrakových úkolů ve vnitřních pracovních prostorech. Tyto cyklické výpočty probíhají s využitím softwaru pro výpočet denního osvětlení. Hodnoty takto vypočtených osvětleností získaných pomocí denního světla jsou následně cyklicky porovnávány s navrženou osvětlovací soustavou umělého osvětlení. Predikce energetických úspor je následně vyhodnocována z požadované úrovně stmívaní osvětlovací soustavy umělého osvětlení provozované na takovou hladinu, aby součet denní a umělé složky odpovídal normativním požadovaným parametrům na udržovanou osvětlenost. Z tohoto rozdílu a doby provozu řešeného prostoru se následně generuje předpokládaná spotřeba takto řízené osvětlovací soustavy umělého osvětlení vůči osvětlovací soustavě neřízené.

Díky navržení matematického modelu pro výpočet osvětleností na venkovní nezastíněné rovině během celého roku, který je implementován do výpočetního softwaru WDLS, přepočítá matematický model rovnoměrně zatažené oblohy venkovní nezastíněné roviny přes známý činitel denní osvětlenosti D, na vnitřní intenzitu osvětlenosti. Výpočty WDLS importuji jednoduše do programu WILS, který mi díky navrženému principu regulace dopočítá nastavenou hodnotu intenzity osvětlení ve vnitřním pracovním prostředí. V software WILS si nastavím jednotlivé řady svítidel pro regulaci a tím získám výpočty příkonů cele umělé osvětlovací soustavy jak s regulací, tak bez regulace.

Poslední část je věnována verifikaci matematického modelu se skutečnými hodnotami získanými v testovaných prostorech na základě dlouhodobých měření.

Klíčová slova

Energetické úspory, osvětlení, denní osvětlení, rovnoměrně zatažená obloha, umělé osvětlení, stmívání, predikce.

Abstract

Dissertation deals with calculation of the electrical energy savings in the illumination field. Resource materials for superstructure software for the illumination calculation WDLS/WILS from ASTRA MS software are drawn up in this thesis. From these resource materials, it is possible to predict the electrical energy savings, which are achievable by controlling the artificial lighting system based on daylight dynamics.

First part of dissertation is focused on basic theory of daylight, spectral radiation and its influence and need for living organisms. Possibilities of the overcast sky for using in model follow. This part of dissertation is devoted to the illumination of the indoor workspaces by artificial lighting with contribution of daylight. Quantitative and qualitative parameters of the indoor workspaces illumination are described. Possibilities of the lighting system regulation using modern light sources, the available control and measurement systems and the legislative requirements overview for the energy consumption reduction of the lighting systems follow.

Next part of thesis deals with predictions of electrical energy consumption of artificial lighting systems in available software. Comparison of electrical energy savings calculations in RELUX and DIALux software is presented.

The core of dissertation is concentrate to create the dynamic model of the overcast sky for calculation of daylight illuminance on plane of the visual tasks in the indoor workspaces. This calculations run in the software for daylight factor calculation. Gained values are compared with the designed artificial lighting system. Predictions of the electrical energy savings are evaluated with respect to required level of dimming of the artificial lighting system, which is based on level of daylight and artificial light sum. This sum must meet normative requirements for sustainable illuminance. From this difference and operating time of each specific workspace presumptive savings of the electrical energy consumption of controlled lighting systems in comparison with uncontrolled lighting systems of artificial illumination are calculated.

Suggested mathematical model of the outdoor unshadowed plane illumination during whole year uses mathematical model of the overcast sky and known daylight factor D to calculate indoor illumination level. Suggested model is implemented into software WDLS. The calculations made in WDLS are then imported into WILS program. Given values of the indoor workspaces illuminance are used as input for dimming of the artificial lighting system. Individual lines of luminaires are controlled in WILS software and input power of whole artificial lighting system recorded – both with and without regulation.

The last part of dissertation is dedicated to verification of mathematical model. Data for verification are obtained from long-term measurements in two tested spaces.

Key words

Energy savings, illuminance, daylight, overcast sky, artificial lighting system, dimming, prediction.

Motivace

Motivací pro řešení problematiky optimalizace energetické náročnosti osvětlovacích soustav v závislosti na denním světle byla především možnost zjednodušit výpočty o návratnost spotřeby elektrické energie. Predikce spotřeby elektrické energie je vhodným nástrojem pro volbu mezi regulovatelnou a neregulovatelnou osvětlovací soustavou z hlediska investice již v projekční fázi.

Mezi další důvody vypracování disertační práce patří zájem o:

- projektování osvětlovacích soustav jak denního, tak i umělého osvětlení v různých výpočetních programech,
- možnosti řízení a regulace osvětlovacích soustav,
- měření jednotlivých svítidel i celých osvětlovacích soustav.

Práce vznikla s přispěním projektů: Metodika pro výpočet potenciálu energetických úspor ve vnitřních osvětlovacích soustavách využitím denního světla ve fázi projektu - HS4101414, Optimalizace spotřeby elektrické energie využitím moderních světelných zdrojů - SGS SP2011/135 a Nové možnosti LED technologií v osvětlování - SGS SP2013/88 a v kooperaci s vývojáři z firmy ASTRA MS Software s.r.o., (WDLS,WILS).

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 10

SEZNAM OBRÁZKŮ 12

SEZNAM GRAFŮ 13

SEZNAM TABULEK 14

ÚVOD 15

CÍL PRÁCE A CHARAKTERISTIKA SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY 17

1 OPTICKÉ ZÁŘENÍ A DENNÍ SVĚTLO 18

1.1 ZÁŘENÍ 18

1.2 SVĚTLO 20

1.3 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ 20

1.4 TYPY OBLOH DLE CIE 24

1.5 OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY DENNÍHO OSVĚTLENÍ 25

2 UMĚLÉ OSVĚTLENÍ 31

2.1 MOŽNOSTI REGULACE VNITŘNÍCH OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV 33

2.1.1 Ovládání osvětlení 34

2.1.2 Regulace světelného toku světelných zdrojů 34

2.1.3 Automatická regulace s využitím senzorů 35

2.1.4 Inteligentní digitální systémy řízení 35

3 ENERGETICKÝ AUDIT 41

3.1 VÝPOČTY SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA OSVĚTLENÍ POMOCÍ RYCHLÉ METODY 42

3.2 VÝPOČTY SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA OSVĚTLENÍ POMOCÍ PODROBNÉ METODY 42

4 ANALÝZA VÝPOČETNÍCH PROGRAMŮ Z HLEDISKA VÝPOČTŮ ENERGETICKÝCH ÚSPOR 43

4.1 VÝPOČETNÍ PROGRAMY RELUX A DIALUX 43

4.2 STANOVENÍ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA ZÁKLADĚ PRŮBĚHŮ OSVĚTLENOSTI 44

5 OPTIMALIZACE NÁVRHU ÚSPORNÝCH OPATŘENÍ NÁVRHEM MATEMATICKÉHO MODELU 46

5.1 DYNAMICKÝ MODEL ROVNOMĚRNĚ ZATAŽENÉ OBLOHY 46

5.2 MODEL DENNÍHO SVĚTLA 48

5.3 MODELOVÁNÍ DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ DENNÍHO OSVĚTLENÍ 48

5.4 Souřadnice Slunce a geometrie slunečního paprsku 52
5.5 Deklinace Slunce 53
5.6 Čas a hodinový úhel Slunce 53
5.7 Výška Slunce 54
5.8 Výpočty průběhu denních osvětleností 54
5.9 Difúzní osvětlenost 55

6 IMPLEMENTACE MATEMATICKÉHO MODELU DO SOFTWARU WDLS/WILS 57

7 OVĚŘENÍ NAVRŽENÉHO PREDIKČNÍHO MODELU 63

7.1 Popis umělých osvětlovacích soustav 64
7.2 Způsob řízení osvětlovacích soustav v modelových místnostech 66
7.2.1 Místnost č.1 - KNX/DALI řídicí systém pro osvětlení 67
7.2.2 Místnost č.1 KNX/DALI brána 67
7.3 Aplikace predikčního modelu 68

8 ANALÝZA NAVRŽENÉHO PREDIKČNÍHO MODELU DLOUHODOBÝM MĚŘENÍM 72

8.1 Modelová místnost č.1 72
8.2 Modelová místnost č.2 74
8.3 Celkové srovnání modelových místností 77

9 SHRNUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ A PŘÍNOSŮ DISERTAČNÍ PRÁCE 79

10 NÁVRH DALŠÍHO SMĚROVÁNÍ VÝZKUMU A VÝVOJE 80

11 ZÁVĚR 81

SEZNAM LITERATURY 83

SEZNAM VLASTNÍCH PUBLIKACÍ A OSTATNÍCH VÝSTUPŮ 85

Seznam použitých symbolů a zkratek

CCT	Náhradní teplota chromatičnosti [K]
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage - Mezinárodní komise pro osvětlení
ČSN	Česká soustava norem
ČSN EN	Česká soustava normy převzatá z evropské normy
DALI	Digital Addressable Lighting Interface - digitálně programovatelné rozhraní
DIALUX	Výpočetní program pro výpočet denního a umělého osvětlení
DSI	Digital serial interface - Digitální sériové rozhraní
IR	Infračervené záření
ISO	International Organization for Standardization - Mezinárodní organizace pro normalizaci
KNX	Celosvětově standardizovaný systém pro automatizaci domů a budov
LED	Light-Emitting Diode - dioda emitující světlo
OS	Osvětlovací soustava
RELUX	Výpočetní program pro výpočet denního a umělého osvětlení
UGR	Činitel oslnění
WILS	Windows interiors light systems - výpočetní program na výpočet umělého osvětlení
WDLS	Windows day lighting systems - výpočetní program na výpočet denního osvětlení

D	Činitel denní osvětlenosti [%]
D_m	Průměrný činitel denní osvětlenosti [%]
D_{min}	Minimální činitel denní osvětlenosti [%]
D_v	Difuzní oblohová horizontální osvětlenost [lx]
D_{Vm}/E_V	Koeficient propustnosti oblohového světla [-]
$D_{v,t}$	Proměnná venkovní osvětlenost v čase [lx]
$D_{x,y}$	Činitel denního osvětlení v jednom bodě řešeného prostoru [-]
E	Osvětlenost bodu dané vnitřní srovnávací roviny [lx]
$E_{a,x,y,t}$	Výsledná intenzita osvětlení ve vnitřním prostoru v daném bodě [lx]
E_m	Střední hodnota osvětlenosti [lx]
E_{max}	Největší hodnota osvětlenosti [lx]
E_{min}	Nejmenší hodnota osvětlenosti [lx]
E_{norm}	Intenzita osvětlení požadovaná normou pro daný prostor [lx]
E_{ob}	Osvětlenost oblohová na venkovní nezastíněné rovině[lx]
ET	Časový rozdíl mezi PSČ - SSČ [hod]
E_V	Extraterestriální horizontální osvětlenost [lx]
E_{V0}	Solární světelná konstanta 133 334 [lx]
$E_{x,y,t}$	Vnitřní osvětlenost v prostoru a v čase vyvolaná denní složkou světla [lx]
$E_{x,y,t}$	Vnitřní osvětlenost v prostoru a v čase vyvolaná denní složkou světla
G_v	Celková osvětlenost [lx]
J	Pořadový den v roce [-]
L_γ	Jas oblohy v úhlové výšce γ nad horizontem v [cd.m^{-2}]
L_z	Jas oblohy v zenitu v [cd.m-2]
PSČ	Pravý sluneční čas [h]
P_v	Přímá sluneční osvětlenost na horizontální plochu [lx]
SEČ	Středoevropský čas [h]
T_{Vm}	Světelný činitel zákalu [-]
Uo	Rovnoměrnost [-]

---

a_V	Extinkční koeficient (Clearův vztah) [-]
c_0	Rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu ($c_0 = 2{,}998.10^8$) [$m.s^{-1}$]
m	Relativní optická tloušťka atmosféry [-]
s_r	Hodnota slunečního svitu [-]
ν	Kmitočet [Hz]

γ	Úhel nad horizontem [°]
γ_S	Výška Slunce [°]
δ	Deklinace Slunce [°]
ε	Činitel excentricity [-]
λ	Vlnová délka [m]
Δλ	Interval vlnové délky [mm]
λ_z	Zeměpisná délka [°]
ρ_T	Činitel odrazu [-]
Φ_e	Zářivý tok [W]
$\Phi_e(\lambda)$	Spektrální hustota zářivého toku [$W.m^{-1}$]
φ	Zeměpisná šířka [°]

Seznam obrázků

Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření [1] 19
Obrázek 2 Spektrum slunečního záření [29] 20
Obrázek 3: Poměrná spektrální citlivost lidského oka [4] 21
Obrázek 4: Prostup slunečního záření atmosférou během dne [P25] 22
Obrázek 5: Rozklad extrateresrtriálního slunečního záření na složky denního světla [7] 24
Obrázek 6: Pravoúhlý sluneční diagram [26] 26
Obrázek 7: Příklad funkčního vymezení vnitřního prostoru pro zrakovou třídu IV [P25] 29
Obrázek 8: Potřebná hladina osvětlení pro stejný zrakový výkon při různém věku lidí [P25] 33
Obrázek 9: Řízení osvětlení na konstantní hladinu intenzity [9] 35
Obrázek 10: Příklad použití kombinovaného senzoru [11] 36
Obrázek 11: Schéma zapojení stmívatelného elektronického předřadníku DSI/DALI [9] 37
Obrázek 12: Přehled nákladů [9] 38
Obrázek 13: Schéma inteligentního systému [9] 40
Obrázek 14: Stanovení energetických požadavků na osvětlení [28] 42
Obrázek 15: Úrovně venkovní osvětlenosti v luxech [10] 45
Obrázek 16: Typické průběhy denních osvětleností [11][5] 49
Obrázek 17: Model celoročního relativního slunečního svitu v Čechách [9] 50
Obrázek 18: Zeměpisné souřadnice bodu na povrch Země [7] 52
Obrázek 19: Deklinace pro čtyři charakteristické dny v roce [1] 52
Obrázek 20: Hodnoty difúzní osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině v průběhu celého roku [P25] 55
Obrázek 21: Výpočet denního osvětlení [16] 58
Obrázek 22: Osvětlenost denního osvětlení [16] 59
Obrázek 23: Návrh umělého osvětlení [16] 60
Obrázek 24: Modelové místnosti z venku (na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2) 63
Obrázek 25: Výpočet činitele denní osvětlenosti 64
Obrázek 26: Modelové místnosti uvnitř (na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2) 65
Obrázek 27: Návrh umělé osvětlovací soustavy 65
Obrázek 28: Princip uzavřené smyčky regulující osvětlenost na konstantní hodnotu [P21] 66
Obrázek 29: Blokové schéma pro řízení osvětlovacích soustav s použitím systému KNX [P22] 67
Obrázek 30: Blokové schéma řízení osvětlovacích soustav s použitím systému KNX/DALI Gateway [P22] 68
Obrázek 31: Převod hodnot činitele denní osvětlenosti na vnitřní osvětlenost v luxech 68
Obrázek 32: Součet umělé osvětlovací soustavy na 100% s denní složkou osvětlenosti 69
Obrázek 33: Možnost regulace osvětlovací soustavy na konstantní hladinu osvětlenosti 70

Seznam grafů

GRAF 1: SPOTŘEBA ELEKTRICKÉ ENERGIE PRO MODELOVOU MÍSTNOST Č.1 73
GRAF 2:SROVNÁNÍ CELKOVÉ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE S REGULOVANOU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVOU A S REÁLNÝMI DATY PRO MÍSTNOST Č.1 74
GRAF 3: SPOTŘEBA ELEKTRICKÉ ENERGIE PRO MODELOVOU MÍSTNOST Č.2 76
GRAF 4: SROVNÁNÍ CELKOVÉ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE S REGULOVANOU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVOU A S REÁLNÝMI DATY V MÍSTNOSTI Č.2 76
GRAF 5: POROVNÁNÍ SPOTŘEB ELEKTRICKÝCH ENERGIÍ PRO MODELOVÉ MÍSTNOSTI Č.1 A Č.2 77
GRAF 6: POROVNÁNÍ ÚSPOR ELEKTRICKÝCH ENERGIÍ PRO MODELOVÉ MÍSTNOSTI Č.1 A Č.2 78

Seznam tabulek

TABULKA 1: ZÁKLADNÍ TYPY STANDARDNÍCH OBLOH [19] 25
TABULKA 2: ZRAKOVÉ ČINNOSTI A HODNOTY ČINITELE DENNÍ OSVĚTLENOSTI [9][23] 28
TABULKA 3: TEPLOTA CHROMATIČNOSTI RŮZNÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ [31] 31
TABULKA 4: MĚRNÝ VÝKON BĚŽNÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ [9][P9] 31
TABULKA 5: ORIENTAČNÍ ŽIVOTNOST BĚŽNÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ [9][P25] 32
TABULKA 6: DOPORUČENÉ ROZSAHY OSVĚTLENOSTÍ PODLE CIE [24] 32
TABULKA 7: ROZSAH REGULACE PRO RŮZNÉ TYPY SVĚTELNÝCH ZDROJŮ [P25] 35
TABULKA 8: KOEFICIENT PROPUSTNOSTI OBLOHOVÉHO SVĚTLA A SVĚTELNÉHO ČINITELE ZÁKALU [5] 50
TABULKA 9: HODNOTY REGULACE DLE VENKOVNÍ OSVĚTLENOSTI 60
TABULKA 10: PŘEHLED VÝPOČTŮ SW PRO ÚSPORY 61
TABULKA 11: REGULACE JEDNOTLIVÝCH ŘAD OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY V [%] PRO MÍSTNOST Č.1 71
TABULKA 12: REGULACE JEDNOTLIVÝCH ŘAD OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY V [%] PRO MÍSTNOST Č.2 71
TABULKA 13: UKÁZKA VYBRANÝCH HODNOT Z MĚŘENÍ A VÝPOČTU SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE 72
TABULKA 14: UKÁZKA VYBRANÝCH NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE [P7] 75

Úvod

Vzhledem ke zvyšující se ceně za elektrickou energii se začínají hledat úspory elektrické energie nejen v odvětvích těžkých průmyslových zařízení, kde je spotřeba elektrické energie nejvyšší, ale hledají se i úspory v oblasti osvětlení. Na první pohled se může zdát, že spotřeba elektrické energie pro osvětlovací soustavy je malá, ale v celkovém součtu se pohybuje okolo 15 % celkové spotřeby elektrické energie.[36]

První stupeň hledání úspor elektrické energie vede k výměně zastaralých a dnes již morálně, technicky i normě nevyhovujících osvětlovacích soustav. Nejvhodnějšími svítidly, které jsou hojně používány se ziskem úspor, jsou LED svítidla, která se vyznačují nižším příkonem při srovnatelném světelném toku. Díky vysokému měrnému světelnému výkonu LED světelných zdrojů (čipů) a možnosti jejich jednoduchého směrovaní je tento zdroj nejlepší k dosažení (základních, primárních) energetických úspor.

Dalším stupněm pro dosažení ještě vyšších úspor v oblasti osvětlení je, jestliže se osvětlovací soustava reguluje, resp. stmívá, „nejúspornější je, když svítidla zůstanou zhasnutá a prostor osvětluje denní světlo“. Proto se v dnešní době čím dál tím více používají různá řízení osvětlovacích soustav, která se z finančního hlediska stávají dostupnějšími. Každý prostor má předepsanou intenzitu osvětlení, kterou musí splňovat dle normativních předpisů, buď s použitím denního světla, umělého světla nebo kombinací obou těchto variant z pohledu několikasměnného provozu. Díky automatickému řízení není problém si pro každý prostor nastavit požadovanou intenzitu osvětlení, kterou nám hlídají čidla umístěná na stropech, popř. při vyšším systému řízení ve venkovním prostoru a to na střeše tak, aby nebyla čidla ničím zastíněna. Téma této složité regulace je cílem pro další výzkum.

Řízení osvětlovacích soustav nám zaručuje, že během dne budeme mít dostatečné osvětlení na požadovaných místech, ale na druhou stranu nám šetří nemalé peníze díky využití denního světla (Slunce), které je „prozatím“ zdarma.

K tomu, abychom byli schopni vypočítat spotřeby elektrických energií osvětlovacích soustav, jsou navrženy nástroje, které jsou popsány v normě ČSN EN 15193 Energetická náročnost budov - energetické požadavky na osvětlení. Tyto požadavky na výpočty jsou implementovány do výpočetních programů, ale jejich správné zadání vyžaduje odborné znalosti ze světelné techniky. Pro současné projektanty je zatím nedostupné dosáhnout adekvátních výsledků, ze kterých by se dal předpokládat správný výpočet spotřeby elektrické energie.

Mým cílem je najít cestu, kterou zjednoduším tyto výpočtové modely a implementuji je do uživatelsky příznivého rozhraní.

Ke stanovení, kdy je potřeba svítit umělou osvětlovací soustavou a kdy ne, je nutno znát průběhy změn počasí. Jako za nejlepší střední cestu považuji využití modelu rovnoměrně zatažené oblohy. Tento typ oblohy je nejhorším stavem z pohledu světla. Rovnoměrně zatažená obloha ve skutečnosti nastává v našich zeměpisných souřadnicích pouze několikrát do roka, proto je ji obtížné měřit. Rovnoměrně zatažená obloha je definována jako přesný typ oblohy dle mezinárodní komise pro osvětlování CIE. Díky vlastnostem rovnoměrně zatažené oblohy (difuzní záření) je možné provádět výpočty příspěvků osvětleností bez uvažování směrování oken a světlíků do světových stran. Nelze zjistit polohu Slunce

vizuálně, lze ji zjistit výpočtem (není přímá složka slunečního záření a jasové poměry horizontu a zenitu jsou 1 : 3).

Po zvolení typu oblohy je zapotřebí zjednodušit výpočtové metody a vhodně je implementovat do nástroje pro automatický výpočet. Základem pro stanovení výpočtů je modelování pohybu Slunce během jednotlivých dní v celém roce a to za předpokladu rovnoměrně zatažené oblohy za účelem eliminace vlivu světových stran daných prostor. Díky těmto poznatkům si vytvořím dynamický model venkovních intenzit osvětlení pro celý rok, které potřebuji k zjištění vnitřní intenzity osvětlení a následnému doplnění denního světla umělým. Horizontální osvětlenost na venkovní nezastíněné rovině, ze které vychází výpočty denního osvětlení ve vnitřních pracovních prostorech, jejichž výstupem je pouze D – činitel denní osvětlenosti. Tento činitel je poměrná jednotka osvětlenosti, která vychází ze statického předpokladu osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině. Tyto teoretické výpočty je třeba vzít v úvahu a vhodně je implementovat do výpočetních programů, a tím vytvořit cyklus, který nám umožní správné nastavení regulačních členů osvětlovacích soustav a také nám vypočte příkony umělých osvětlovacích soustav jak neregulovaných, tak i regulovaných.

Po provedení výpočtů je třeba tyto hodnoty porovnat s reálně naměřenými daty. Pro tyto účely máme dvě různé modelové místnosti, ve kterých budou probíhat dlouhodobá měření jak příkonů celé osvětlovací soustavy, včetně spotřeby regulačních členů, tak i ověřování intenzity osvětlení v jednotlivých bodech srovnávací roviny zrakových úkolů.

Na závěr bude provedeno srovnání naměřených a vypočtených dat, aby bylo známo v jaké procentuální odchylce se budeme pohybovat. Díky verifikaci výsledků je poté možno rozhodnout o vhodnosti mého postupu při návrhu tohoto matematického modelu s implementací do softwarů WDLS a WILS. Na základě mých poznatků bude poté možno rozhodnout o vhodnosti používání tohoto výpočtu pro ověření skutečných stavů pro regulované osvětlovací soustavy. Tento nástroj bude oporou pro projektanty osvětlovacích soustav, jejichž snahou bude ukázat investorovi vhodnost použití regulovaných osvětlovacích soustav vs. umělých osvětlovacích soustav neregulovaných.

Cíl práce a charakteristika současného stavu řešené problematiky

Hlavním cílem disertační práce je návrh nástroje pro zjednodušení výpočtů energetických úspor a díky tomuto možnost následné predikce návratnosti řízených osvětlovacích soustav díky příspěvkům denního světla. Současné výpočetní programy jsou velice náročné na nastavení vstupních parametrů (a díky tomu nepřesné), kterými lze vypočítat energetické úspory (pracují na základě požadavků normy ČSN EN 15 193) V dnešní době zajímá investora finanční stránka celého projektu, proto potřebuje od projektantů znát jak celkovou investici, tak i návratnosti vložených finančních prostředků už ve fázi projektu. Mojí myšlenkou je zpřesnit a zjednodušit tyto vstupní parametry na co nejmenší a nejpřesnější hodnoty.

Denní světlo je prostředkem, který nás nestojí nic „zatím je zdarma“, a proto zaměřuji práci na úsporu elektrické energie s co nejlepším využitím denního světla, které je potřebné jak pro vykonávání různých činnosti, tak i pro biologické potřeby živých organismů.

Etapy zpracování:

Tato disertační práce má v základu několik fází k ztotožnění se s problémem, avšak hlavní část práce je rozdělena do 3 etap:

I. Etapa

První etapa disertační práce je zaměřena na obecný přehled dané problematiky úspor elektrické energie, základní pojmy světelné techniky v oblasti denního a umělého světla, jednotlivých typů obloh, možnosti regulací osvětlovacích soustav a částečný rozbor legislativy k výpočtům energetických úspor.

II. Etapa

Druhá etapa disertační práce je zaměřena na možnosti výpočtů spotřeby elektrické energie spotřebovávané umělou osvětlovací soustavou, vhodné stanovení vstupních parametrů a jejich zjednodušení, vytvoření matematického modelu k dosažení co nejpřesnějších hodnot vůči reálným datům a popis funkcí současných softwaru pro výpočty osvětlovacích soustav a následného dopočtu energetické bilance.

III. Etapa

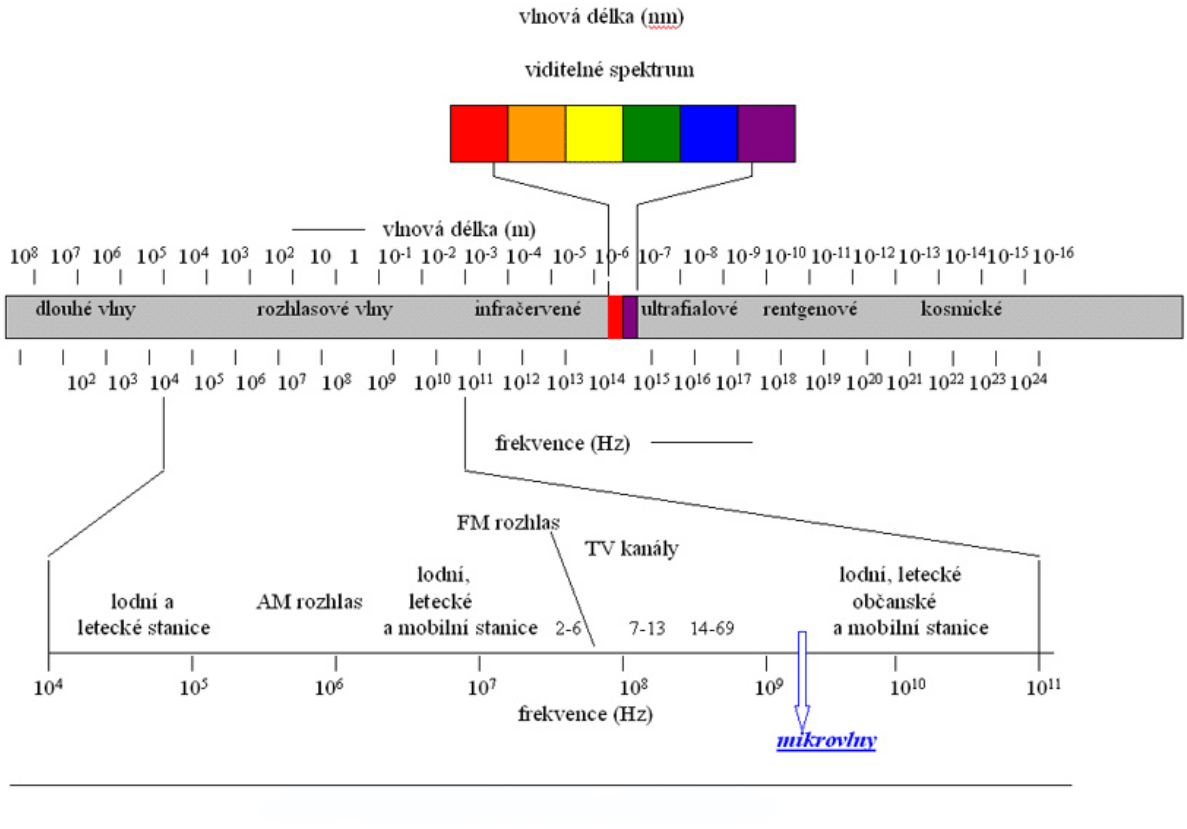
Třetí etapa disertační práce je zaměřena na ověření navrženého výpočtu se skutečnými daty, nasimulování modelových místností výpočetním programem WDLS pro stanovení hodnot pro denní osvětlení a následný přepočet v programu WILS pro výpočet umělého osvětlení, vhodnost nastavení správně regulace na požadovanou intenzitu osvětlení a zahájení měření skutečných příkonů celé osvětlovací soustavy. V závěru je verifikována správnost vypočtených hodnot s hodnotami naměřenými a vyhodnocena jejích rozdílnost.

1 Optické záření a denní světlo

Od dávných dob člověk zná rizika i výhody působení slunečního záření na lidský organismus. V různých dobách vývoje lidstva lidé uctívali Slunce buď jako užitečného dobro konajícího boha, nebo se před jeho paprsky schovávali. Nejen na začátku dvacátých letech minulého století bylo symbolem zdraví a krásy dobře opálené tělo. V druhé polovině století se rapidně zhoršovaly podmínky v přírodě díky obrovským zásahům lidského faktoru, rozvíjející se techniky a díky tomu bylo prostředí stále více zamořováno. V dnešní době se mění i kvalita ovzduší vlivem zjednodušování potřeb člověka („lenivostí“) a tím používání škodlivých chemikálií a různých nebezpečných plynů, které narušují zemskou atmosféru. Tento stav razantně narušuje ozonovou vrstvu a vznikají v ní ztenčená místa, kde dochází k minimálnímu pohlcování škodlivého UV záření. Těmito ozonovými dírami se na zemský povrch dostává nežádoucí záření nebezpečných vlnových délek, které poškozují živé organismy, včetně člověka.[8][20]

1.1 Záření

Záření nebo tzv. radiace je vysílání či přenos energie prostorem v podobě elektromagnetických vln a hmotných částic (fotonů). Elektromagnetické záření lze rozdělit na složky se sinusovým průběhem. Každá složka tohoto záření je dána jediným kmitočtem ν [Hz], nebo vlnovou délkou λ [m]. Monochromatické záření se nazývá složka záření jednoho kmitočtu. Pokud uspořádáme jednotlivé složky dle kmitočtů nebo vlnových délek vedle sebe, získáme celé spektrum záření. Průběh spektra vyzařování elektromagnetických vln je na Obrázku 1.[8][30]



Obrázek 1: Spektrum elektromagnetického záření [1]

Vlnová délka λ je obecně závislá na rychlosti šíření záření. Vlnová délka se nejčastěji udává v nanometrech nebo mikrometrech. Ve vakuu se vlnová délka záření určuje ze vztahu (1): [6][8]

$$\lambda = c_0 . v^{-1} \tag{1}$$

Kde:
λ … vlnová délka [m],
c_0 … rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu ($c_0 = 2{,}998.10^8$ m.s^{-1}) [m.s^{-1}],
ν … kmitočet [Hz].

Optické záření, které je schopno vyvolat zrakový vjem, se označuje za sluneční záření (světlo). Přesné meze spektrálního rozsahu viditelného záření nelze stanovit. Meze jsou závislé na zářivém toku dopadajícím na sítnici oka a také na spektrální citlivosti oka pozorovatele. Oblast viditelného spektra se obvykle pohybuje od 380 nm až po 780 nm pro normalizovaného pozorovatele viz. Obrázek 2 (u některých lidí se může spektrum viditelnosti pohybovat od 360 nm po 830 nm). Světlo (viditelné záření) je velmi důležité pro život organismů a u rostlin zajišťuje tvorbu chlorofylu. Velký význam má viditelné záření nejen pro světelnou techniku, ale využití najde i v odvětví optiky, chemie, elektrotechnice atd.[1]

1.2 Světlo

Světlo je prostředkem k přenosu a získávání informací o prostředí, ve kterém se pohybujeme a které nás obklopuje. Aby člověk dokázal informace zrakem přijímat bez zkreslení a bez zrakové námahy, je zapotřebí dostát přiměřeného osvětlení k charakteru zrakové činnosti. Při pracovních činnostech vycházíme z požadavků na zrakový výkon, který vyplývá z obtížnosti zrakového úkolu a nakonec se ověřuje, zda není porušena zásada zrakové pohody.[1]

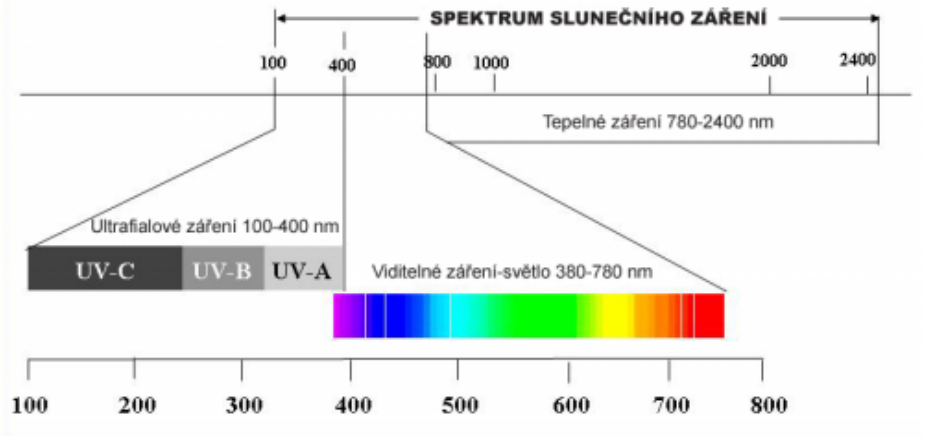
Světlo jako takové může mít i nepříznivé účinky v podobě velkých jasových rozdílů (oslnění), což může v lepším případě způsobit zrakovou nepohodu nebo v horším případě dokonce havárii či úraz.[1]

Světlo má i důležitý vliv na lidský organismus, protože většina biologických pochodů v lidském těle pravidelně kolísá přibližně ve dvaceti čtyř hodinovém cirkadiánním cyklu. Tento cyklus se vyvinul díky pravidelnému střídání světla a tmy. Tímto režimem se řídí všechny pochody v těle, jako jsou např. metabolismus, krevní tlak, produkce a uvolňování hormonů atd. Pokud náš organismus nemá dostatek světla, jsou naše biorytmy narušeny a přináší nám to různé potíže ve formě poruch spánku, pocitu nepohody, zdravotních a psychických potíží atd. Tento proces se v našich zeměpisných podmínkách projevuje během zimních měsíců, kdy jsou hladiny osvětleností nižší než po zbytek roku.[8]

1.3 Sluneční záření

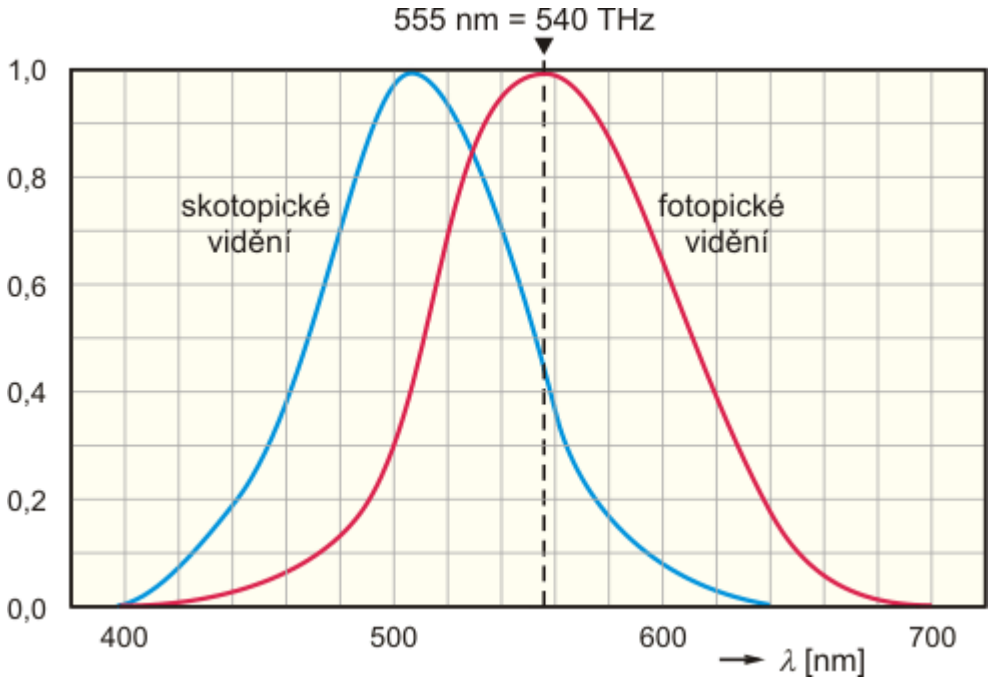
Primárním zdrojem denního záření je Slunce, které je jednou z přirozených forem energie, již můžeme bezprostředně využívat. Světlo vzniká jako viditelná část spektra denního záření a je produktem slunečního elektromagnetického záření. Slunce emituje elektromagnetické záření v celém spektrálním pásmu definovaným Planckovým vyzařovacím zákonem.[13]

Světelný tok odpovídá zářivému toku zhodnocenému zrakovým orgánem normalizovaného pozorovatele. Popisuje energii vyzařovanou zdrojem do prostoru v oblasti viditelného záření.



Obrázek 2 Spektrum slunečního záření [29]

Na Obrázku 3 je poměrná spektrální citlivost lidského oka při denním (fotopickém) a nočním (skotopickém) vidění.[32][9]



Obrázek 3: Poměrná spektrální citlivost lidského oka [4]

Důsledkem spektrálního složení slunečního záření, které obsahuje všechny vlnové délky, a díky vjemu lidského oka se nám jeví Sluce během celého dne v různých barevných odstínech. Sluneční záření je spojité absorpční spektrum a platí pro něho vztah (2):

$$\phi_e = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} \phi_e^{(\lambda_e)} \Delta\lambda \qquad (2)$$

Kde:
Φ_e … zářivý tok [W],
$\Phi_e^{(\lambda e)}$ … spektrální hustota zářivého toku [W.m^{-1}],
$\Delta\lambda$ … interval vlnové délky [mm].

Sluneční záření lze rozdělit na:

- globální,
- přímé,
- difuzní,
- extraterestriální (mimozemské).

Globální záření je množství sluneční energie, které dopadá na zemský povrch. Intenzitu slunečního záření určuje tzv. solární konstanta, která udává, kolik energie obsahuje sluneční záření na horní hranici atmosféry. Solární konstanta je přibližně 1370 W/m^2, což znamená, že na horní hranici atmosféry by

na plochu 1 m^2 kolmou na sluneční záření dopadalo 1370 W sluneční energie. Ve viditelné oblasti je sluneční energie kolem 48 %, což odpovídá 657 W/m^2 (IR oblast 45 % => 616 W/m^2 a UV oblast 7 % => 97 W/m^2). Toto sluneční záření je zeslabováno při průchodu atmosférou, částečně rozptylováno, částečně odráženo a částečně pohlcováno. Na zemský povrch pak dopadá zeslabené přímé sluneční záření, které se pohybuje v původním směru a vrhá stíny, a dále dopadá rozptýlené sluneční záření, díky kterému vidíme i při zatažené obloze. Bez rozptýleného záření by ve stínu byla tma. Součet přímého a rozptýleného slunečního záření, dopadajícího na vodorovnou plochu v úrovni zemského povrchu, se nazývá globální záření. Toto záření je hlavním zdrojem ohřívání zemského povrchu.[7]

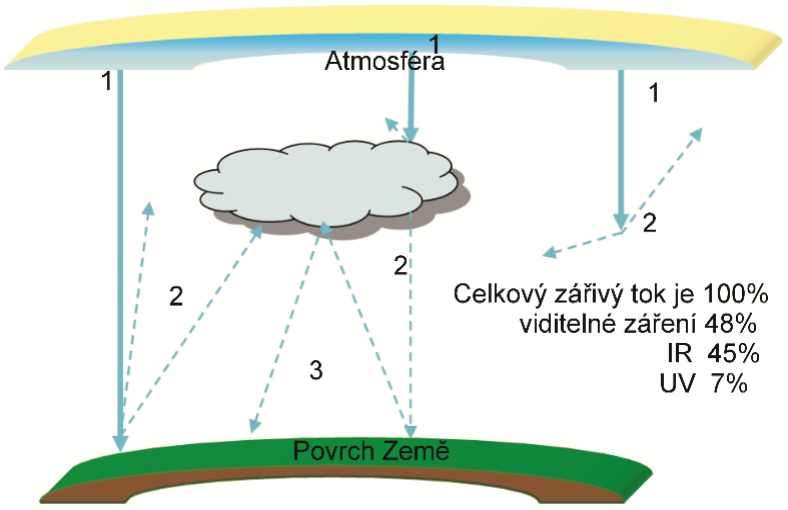
Přímé záření je paprsek, který přímo vyzáří Slunce na povrch Země a jeho intenzita je přímo ovlivněna stavem atmosféry.

Difuzní záření je nepřímé záření a dá se vyjádřit jako paprsek, který je odražený, rozptýlený nebo je jinak ovlivněný stavem atmosféry nebo klimatickými podmínkami. Vyzařování probíhá pomocí celého povrchu oblohy i při jasné obloze.[10]

Extraterestriální světelný tok dopadající ze Slunce na povrch Země se vyjádří pomocí světelné fotometrické konstanty (solární světelné konstanty) E_{V0} = 133 334 $lm.m^{-2}$ nebo E_{V0} = 133 334 lx, což je extraterestriální osvětlenost fiktivní roviny kolmé ke slunečním paprskům ve dnech rovnodennosti. Extraterestriální osvětlenost fiktivní roviny nad danou lokalitou charakterizuje maximální úroveň slunečního světla, tedy i referenční hodnotu pro zjištění dostupnosti osvětlení na zemském povrchu. Tato osvětlenost je v každém dni jiná v závislosti na vzdálenosti Slunce a Země.[5]

Sluneční záření je během dopadnu na zemský povrch ovlivněno třemi následujícími faktory:

- absorpce,
- rozptyl,
- odraz.



Obrázek 4: Prostup slunečního záření atmosférou během dne [P25]

Obrázek 4 znázorňuje prostup slunečního záření atmosférou a jeho různé odrazy:

1. Sluneční záření absorbované atmosférou.
2. Difuzní sluneční záření po odrazech od různých překážek, např. povrch Země, oblaky, atmosféra.
3. Vícenásobný odraz difuzního záření.

Odražené denní záření vzniká odrazem od povrchu Země a také od různých povrchů, na které toto záření dopadá. Toto odražené záření se z části vrací do meziplanetárního prostoru.

Denní osvětlenost ve venkovním prostoru se skládá z přímého světla a světla oblohového, které se označují globální (celková) osvětlenost.

Úplně zatažená obloha má poloměr jasu L_γ ve směru úhlu γ nad horizontem k jasu L_z v zenitu daný vztahem (3):[7]

$$L_\gamma = \frac{1}{3} L_z (1 + 2 \sin \gamma) \tag{3}$$

Kde:
L_γ … jas oblohy v úhlové výšce γ nad horizontem v [cd.m^{-2}],
L_z … jas oblohy v zenitu v [cd.m^{-2}],
γ … úhel nad horizontem [°].

V mezních situacích pro γ = 0° (ve směru k horizontu) a γ = 90° (ve směru k zenitu) je poměr hodnot $L_0 : L_{90} = 1 : 3$. To platí za předpokladu tmavého terénu s činitelem odrazu $\rho_T = 0{,}005$ až 0,20. Často se proto tato obloha označuje jako rovnoměrně zatažená obloha s gradací jasu 1 : 3 při tmavém terénu nebo jen krátce obloha s gradací jasu 1 : 3. U této oblohy je v makroskopickém měřítku vliv přímého slunečního světla vyloučen (na obloze nelze rozeznat polohu Slunce).[7]

ČSN 73 0580-1 uvádí vztahy pro výpočet jasu při rovnoměrně zatažené obloze a zasněženém terénu – viz vztah (4):[3][19]

$$L_\gamma = \frac{1}{2} . L_z (1 + \sin \gamma) \tag{4}$$

Kde:
L_γ … jas oblohy v úhlové výšce γ nad horizontem v [cd.m^{-2}],
L_z … jas oblohy v zenitu v [cd.m^{-2}],
γ … úhel nad horizontem [°].

Činitel odrazu terénu se předpokládá v rozmezí hodnot 0,5 až 0,85. Pro označení této oblohy se používá též termín rovnoměrně zatažená obloha s gradací jasu 1 : 2 při zasněženém terénu. Tyto hodnoty lze využít jako doplňkový údaj pro místa s dlouhodobou sněhovou pokrývkou.

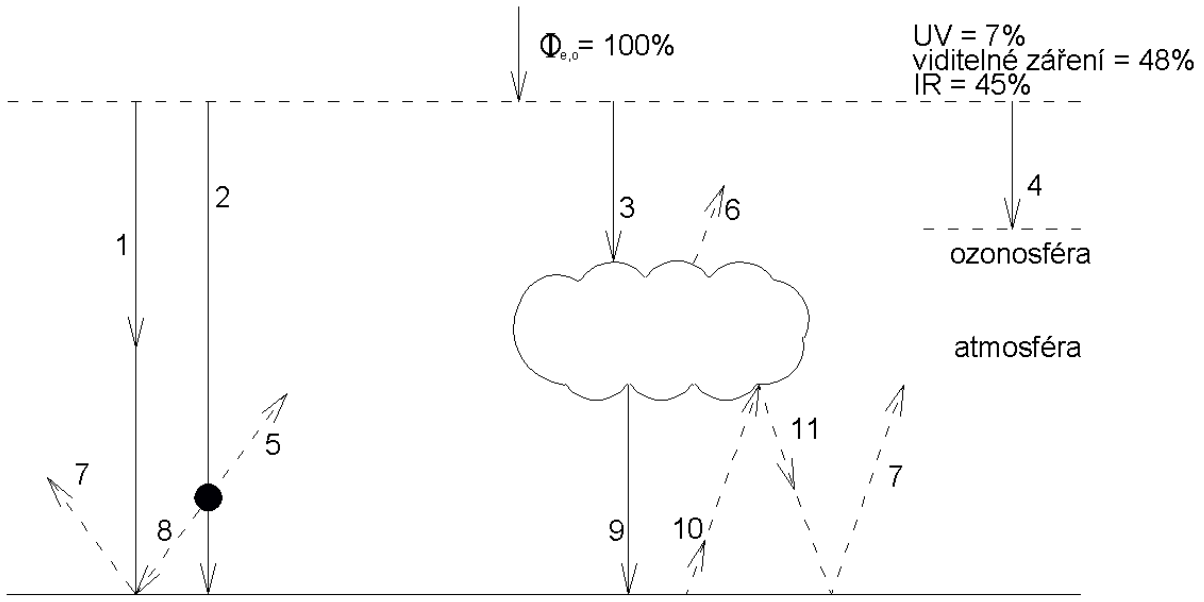
Splnění kritéria rozložení jasu oblohy s gradací 1 : 3, resp. 1 : 2 je v exteriérových podmínkách ojedinělé v některých dnech během listopadu až března. To je častá příčina obtíží při měření denního osvětlení, mají-li být hodnoty vypočtené a hodnoty naměřené ve vzájemné korelaci.[7]

Denní světlo je nejen vhodným energetickým zdrojem pro osvětlování prostorů, ale také nutným předpokladem k vytvoření zdravého prostředí pro život živých organismů v interiérech. Vytvoření podmínek pro dosažení vhodných parametrů denního osvětlení je složitým úkolem a to zejména proto, že se zde setkávají mnohdy protichůdné požadavky pracovníků různých profesí. Složitost je dána i tím, že denní světlo nejen umožňuje vidění osob v interiéru, ale současně spoluvytváří zdravé životní prostředí stimulací biorytmů organismů.[1][2]

1.4 Typy obloh dle CIE

CIE - Commission Internationale de l'Eclairage - mezinárodní komise pro osvětlení, je v dosavadní praxi jedním ze základních zdrojů denního oblohového světla využívaného při normalizaci požadavků na denní osvětlení, návrhu a kontroly parametrů denního osvětlení budov.

Denní světlo je viditelná část přímého slunečního záření a oblohového záření. Rozklad extraterestriálního slunečního záření na jednotlivé složky denního světla znázorňuje Obrázek 5.[7]



Obrázek 5: Rozklad extrateresrtriálního slunečního záření na složky denního světla [7]

Kde:
1) Sluneční záření absorbované atmosférou.
2) Sluneční záření zeslabené rozptylem .
3) Sluneční záření dopadající na oblaka.
4) Ultrafialové záření absorbované ozonosférou.
5) Difuzní záření odražené atmosférou.
6) Difuzní záření odražené oblaky.
7) Difuzní záření odražené povrchem Země.

8) Difuzní oblohové záření způsobené rozptylem slunečního záření v zakalené atmosféře.
9) Difuzní oblohové záření způsobené rozptylem slunečního záření oblaky.
10,11) Difuzní záření vícenásobně odražené mezi oblaky a zemí.

Pod čísly 5, 6 a 7 je znázorněno difuzní záření, které je odraženo zpátky do mimozemského (extrateristriálního) prostoru. Velikosti jednotlivých složek jsou závislé na aktuálním typu oblohy. Typ oblohy závisí na zákalu atmosféry, rozložení oblaků, jejich typu a propustnosti. Z těchto důvodů se dříve používaly dva typy obloh. Jasná homogenní obloha (20 000 lx) se Sluncem v konkrétní poloze a zatažené obloze v zimě (5 000 lx) s konstantním oblohovým jasem. V roce 2003 CIE přijala změnu a vnikla norma ISO 15469:2004 vycházející ze studie CIE S 011 / E: 2003. Prostorové rozdělení denního světla je definováno řadou podmínek, díky kterým je standardní obloha rozdělena na patnáct typů. Popis typů uvádí Tabulka 1. Jednotlivé typy obloh se od sebe liší mírou zákalu atmosféry a jasem závislým na úhlové vzdálenosti oblohového elementu od zenitu i úhlové výšce elementu nad horizontem.[11][19]

Tabulka 1: Základní typy standardních obloh [19]

Typ	Popis rozložení jasu na obloze
1	CIE Standardní zatažená obloha
2	Zatažená obloha se zvýšeným jasem v místě Slunce
3	Zatažená obloha se sníženou gradací jasu k zenitu
4	Zatažená obloha se sníženou gradací jasu k zenitu a zvýšeným jasem v místě Slunce
5	Jednotkový jas na celé obloze
6	Částečně oblačná obloha bez gradace jasu k zenitu a zvýšeným jasem v místě zastíněného Slunce
7	Částečně oblačná obloha bez gradace jasu k zenitu a zřetelným jasem v okolí částečně zastíněného Slunce
8	Částečně oblačná obloha bez gradace jasu k zenitu a zvýšeným jasem v okolí Slunce
9	Částečně oblačná obloha se zastíněným Sluncem
10	Částečně oblačná obloha se zřetelným jasem v okolí Slunce
11	Bělomodrá obloha se zvýšeným jasem v okolí Slunce
12	CIE Standardní jasná obloha s nízkým zákalem
13	CIE standardní jasná obloha s vyšším zákalem
14	Bezoblačná, značně zakalená obloha
15	Bezoblačná bělomodrá obloha s vyšším zákalem

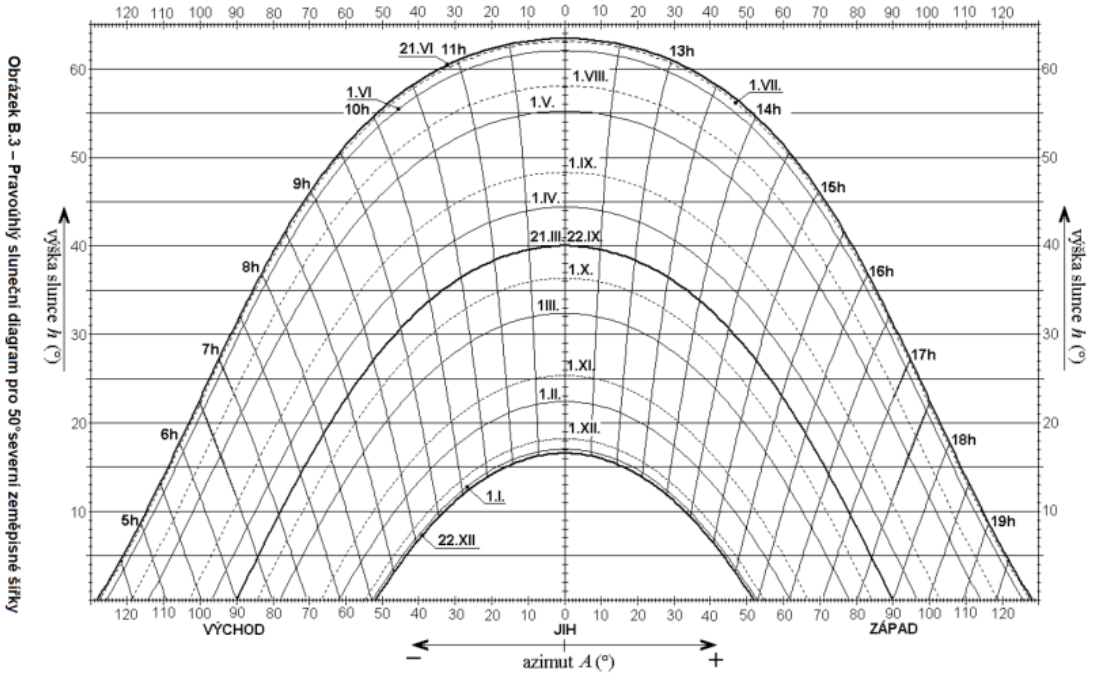
V této práci se uvažovalo pro výpočty osvětleností a pro výpočty úspor elektrické energie pouze s prvním typem oblohy a to dle CIE - Standardní zatažená obloha. Tato obloha byla vybrána z hlediska jejích parametrů, jelikož tyto parametry představují horší variantu oblohy, než která může během roku nastat. Tato rovnoměrně zatažená obloha eliminuje vliv natočení místnosti vůči světovým stranám a tím je možné při výpočtech zanedbat orientaci osvětlovacích otvorů v podobě oken a světlíků. Pro výpočet pomocí této oblohy bude také používána gradace jasu 1 : 3 pro tmavý terén (resp. 1 : 2 pro zasněžený terén).[7]

1.5 Osvětlovací soustavy denního osvětlení

Do osvětlovací soustav vnitřního umělého osvětlení zahrnujeme venkovní denní osvětlení s tím, že denní osvětlení může způsobovat nežádoucí jevy a to v podobě oslnění přímím slunečním svitem. Toto

nežádoucí osvětlení můžeme regulovat pomocí závěsů, žaluzií, markýz a dalších stínících prvků (dnes i možnost využití automatizovaných řídicích systémů).

Denní osvětlení jak venku, tak i v interiéru je během dne proměnlivé díky závislosti na meteorologických podmínkách, natočení zeměkoule (viz Obrázek 6) a poloze Slunce během dne. Slunečního záření se snažíme dostat do vnitřního prostoru přiměřený podíl (vzhledem k prostupu tepla) pomocí všech dostupných stavebních otvorů ve zdech, stropech a střechách. Do míst, kde není možné některou z předchozích možností dosáhnout přístupu slunečního záření, lze tento nedostatek nahradit pomocí prosklených stěn (okna, luxfery, apod.). Tam, kde není možnosti přístupu denního světla za pomocí vedlejších místností, lze využít světlovody. Ty jsou schopny za jasného počasí přenést pomocí odrazných ploch značné množství pohlceného světla do interiéru.[11]



Obrázek 6: Pravoúhlý sluneční diagram [26]

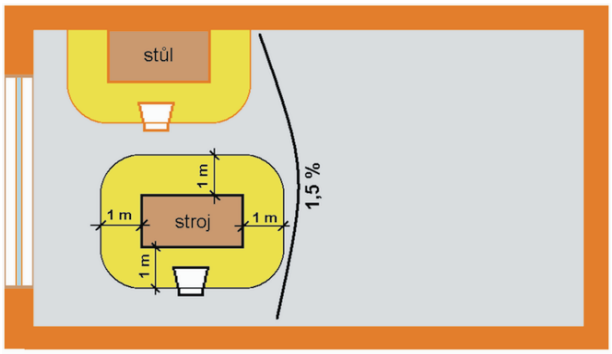
Přístup denního osvětlení do vnitřních prostor neřešíme jen proto, že je dán normou ČSN 73 0580-1, ale i sami pro sebe. Lidský organismus potřebuje denní světlo, viz. předchozí kapitola. Norma pojednává o právním nároku na denní osvětlení a jmenovitě označuje prostory, jež musí mít v nově navrhovaných budovách vždy vyhovující denní osvětlení. Takovéto prostory jsou například ložnice a pokoje pro dlouhodobé ubytování a rekreaci, denní místnosti v zařízeních pro předškolní výchovu, učebny škol, posluchárny atd. Norma explicitně stanovuje minimální hladiny denních osvětleností. To, že některé prostory určené k trvalému pobytu osob nejsou uvedeny v normě neznamená, že v nich není vyžadováno denní světlo, pouze jim není věnována zvýšená pozornost a v takovém případě se denní světlo doporučuje. Za trvalý pobyt se považují prostory, v nichž je celková doba pobytu více než 4 hodiny a více než 1x za týden.[10][31]

Základní požadavky na denní osvětlení ve vnitřních prostorech se vztahují vždy k účelům, ke kterým bude prostor využíván. Pro zjištění jaké množství denního světla dopadá do vnitřního prostoru je stanoven činitel denní osvětlenosti - D. Činitel denní osvětlenosti je stanoven na základě podílu osvětleností daného vnitřního prostoru na srovnávací rovině a současně srovnávací hodnoty osvětlenosti venkovní nezastíněné vodorovné roviny za předpokládaného rozložení jasu s gradací 1 : 3 pro tmavý terén (resp. 1 : 2). Hodnoty činitele denní osvětlenosti jsou udávány v procentech. V normě ČSN 73 0580-1 jsou pro různé zrakové činnosti stanoveny třídy, v nichž se požaduje dodržení hodnot průměrného D_m a minimálního D_{min} činitele denní osvětlenosti. Místnosti, se kterými budeme pracovat, jsou laboratoř a technicko-administrativní místnost, ve které je dán požadavek na kancelářské osvětlení. Z toho vyplývá, že místnost spadá do čtvrté třídy zrakové činnosti - viz Tabulka 2.[10][31]

Tabulka 2: Zrakové činnosti a hodnoty činitele denní osvětlenosti [9][23]

Třída zrakové činnosti	**Charakteristika zrakové činnosti**	**Poměrná pozorovací vzdálenost**	**Příklady zrakové činnosti**	**Hodnota činitele denní osvětlenosti v [%]**	
				Minimální D_{min}	**Průměrná D_m**
I	Mimořádně přesná	3300 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 - 3300	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 - 1670	Přesná výroba a kontrola, rýsování, technické kreslení, obtížné laboratorní práce, náročná vyšetření, jemné šití, vyšívání	2	6
IV	Středně přesná	500 - 1000	Středně přesná výroba a kontrola, čtení psaní (rukou, strojem vč. PC), obsluha strojů, běžné laboratorní práce, vyšetření, ošetření, hrubší šití, pletení, žehlení, příprava jídel, závodní sport	1,5	5
V	Hrubší	100 - 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

Po zařazení prostoru do příslušné zrakové třídy lze stanovit hranici, kde je možné vykonávat tuto zrakovou činnost za příspěvku pouze denního světla a to v případě našich místností je 1,5 %. Další mezní hodnotou pro zrakové úkony je hladina 0,5 %, kde je nutné použití jak denního světla, tak i umělého. Pod hranici 0,5 % by neměl být trvalý pobyt osob. Na Obrázku 7 je zobrazen názorný příklad z normy ČSN 73 0580-1 odpovídající zrakové činnosti třídy IV.[23][P25]



Obrázek 7: Příklad funkčního vymezení vnitřního prostoru pro zrakovou třídu IV [P25]

Pokud chceme zjistit hodnotu činitele denního osvětlení D výpočtem nebo měřením, je nutné použít difuzní oblohu bez přímé složky slunečního záření. Měření rovnoměrně zatažené oblohy je velice náročné, ve většině případů stačí hodnoty činitele denního osvětlení získané výpočtem. Měření i výpočet je prováděn v rovnoměrném definovaném rastru, který je stanoven dle rozměrů místností. Výpočet rastru je stanoven v normě ČSN EN 73 0580-1.[23]

Činitel denní osvětlenosti je tedy stanoven vztahem (5):

$$D = \frac{E}{E_{ob.}}.100 \tag{5}$$

Kde:
E … osvětlenost bodu dané vnitřní srovnávací roviny [lx],
E_{ob} … osvětlenost oblohová na venkovní nezastíněné rovině [lx],
D … činitel denní osvětlenosti [%].

Rovnoměrnost denního osvětlení nemá být pro zrakové činnosti třídy I - IV menší než 0,2 a při třídě V menší než 0,15. Pro třídy I až III norma doporučuje rovnoměrnost 0,3. Rovnoměrnost U_0 je dána podílem nejmenší a největší hodnoty činitele denní osvětlenosti zjištěné v kontrolních bodech – viz vztah (6):[23][28]

$$U_0 = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \tag{6}$$

Kde:
E_{min} … nejmenší hodnota osvětlenosti [lx],
E_{max} … největší hodnota osvětlenosti [lx],
U_0 … rovnoměrnost denního světla [-].

Venkovní nezastíněná rovina je plocha, která se nachází vně budovy na volném prostoru, kde nestíní žádný okolní objekt (budova, strom atp.), a nachází se v blízkosti měřené místnosti. Jako vhodný prostor této roviny bývá ve většině případů střecha domu, na které je měření prováděno.[28]

2 Umělé osvětlení

Kapitola umělého osvětlení vyjadřuje jen souvislost s denním osvětlením. Umělé osvětlení je realizováno pomocí svítidel se světelnými zdroji (dnes nejčastěji fluorescenční a kompaktní zářivky nebo světelné diody). Díky tomuto umělému světlu je možné doplnit denní světlo tam, kde je ho nedostatek např. vzdálená místa od oken nebo při zastínění pracovní plochy překážkou. Moderní světelné zdroje umožňují vytvořit ve vnitřních prostorech umělé osvětlení kvantitativně srovnatelné s denním světlem, ale nemohou ho v jeho účincích nahradit. Princip a technologie výroby a použití udává příslušnému zdroji světla jeho parametr náhradní teploty chromatičnosti – viz Tabulka 3. Při výběru světelného zdroje při projektování je nutné brát v úvahu vhodnost jeho použití pro daný prostor a funkci jakou má plnit. Z tohoto hlediska je nutné znát parametry, kterými se jednotlivé světelné zdroje liší, a také jejich vhodnost pro určité činnosti.

Tabulka 3: Teplota chromatičnosti různých světelných zdrojů [31]

Druh světelného zdroje	**Náhradní teplota chromatičnosti CCT [K]**
Zářivka studené denní světlo	6 500 a více
Zářivka denní světlo	5 400
Jasná obloha	6 500
Slunce v létě v poledne	5 500
Zářivka studená bílá	4 000
Slunce při západu	3 500 ÷ 4 000
Žárovka, zářivka teple bílá	2 700
Plamen svíčky	1 800

Níže uvedené Tabulky 4 a 5 zobrazují parametry jednotlivých zdrojů světla. Z těchto tabulek zjistíme, že lineární zářivka má teplotu chromatičnosti obdobnou jako denní světlo, má vysoký měrný výkon a relativně dlouhou životnost. Díky jejímu podání barev a možnosti řízení je v dnešní době ideálním zdrojem světla pro administrativní prostory, laboratoře, učebny atd.

Tabulka 4: Měrný výkon běžných světelných zdrojů [9][P9]

Druh světelného zdroje	**Příkon [W]**	**Měrný světelný výkon [lm/W]**
Žárovka	15 – 200	6 – 15
Halogenová žárovka	10 – 2000	14 – 26
Kompaktní zářivka	5 – 60	56 – 88
Lineární zářivka T8	10 – 58	65 – 90
Lineární zářivka T5	14 – 80	70 – 104
Indukční výbojky	50 – 400	70 – 93
Rtuťová výbojka	50 – 1 000	50 – 80
Vysokotlaká sodíková výbojka	50 – 1 000	88 – 150
Halogenidová výbojka	35 – 3 500	94 – 103
Nízkotlaká sodíková výbojka	18 – 180	130 – 200
Světelné diody	1 – 20	až 220
Xenonová výbojka	25 – 10 000	až 95
Plazmový světelný zdroj	až 250	až 85

Tabulka 5: Orientační životnost běžných světelných zdrojů [9][P25]

Druh světelného zdroje	**Průměrná životnost [h]**	**Ekonomická životnost [h]**
Obyčejné žárovky	1 000	1 000
Halogenové žárovky	2 000 – 3 000	2 000 – 3 000
Kompaktní zářivky	15 000	6 000 – 15 000
Lineární zářivky	20 000	10 000 – 18 000
Vysokotlaké rtuťové výbojky	16 000 – 24 000	10 000 – 20 000
Vysokotlaké sodíkové výbojky	32 000	20 000
Nízkotlaké sodíkové výbojky	16 000	16 000
Halogenidové výbojky	10 000	4 000
Indukční výbojky	60 000	20 000
Výkonové světelné diody	50 000 – 100 000	25 000 – 50 000
Plazmové světelné zdroje	50 000	50 000
Xenonové výbojky	1 000 – 3 000	1 000 – 3 000

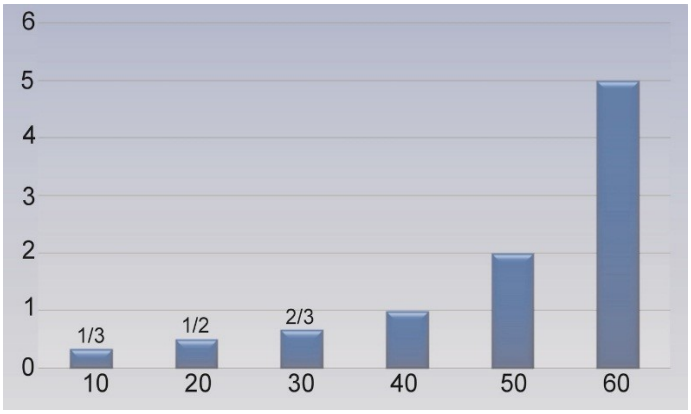
Dalšími rozhodovacími parametry je cena světelného zdroje a svítidla, diagram jeho využití, úspora energie při použití daného svítidla a z toho vyplývající návratnost vložené investice. Další možností vzniku úspor energie v osvětlovací soustavě je typ řízení samotné osvětlovací soustavy. Nejzákladnější typ řízení světelného zdroje využívá každý člověk. Vypínání a zapínání světelného zdroje pomocí vypínače se dá považovat už jako primitivní princip řízení. Pokud změníme řízení na automatické, dojde ke zvýšení úspor a zajištění většího uživatelského komfortu. Z praxe je patrné, že lidé svítí na pracovních místech i za dostatečného denního osvětlení. Týká se to zejména velkých hal s vysokými závěsnými výškami a velkými světlíky, zde je dobré uvažovat o automatickém systému řízení osvětlovací soustavy.

Intenzitu umělého osvětlení navrhujeme na požadovaný zrakový výkon. Požadované intenzity osvětlení přiřazené pracovním činnostem uvádí Tabulka 6.[4]

***Tabulka 6:* Doporučené rozsahy osvětleností podle CIE [24]**

Osvětlenost [lx]	**Prostor, místo, druh činnosti**
20-30-50	Základní jednoduchá zraková orientace v prostředí
50-75-100	Jednoduchá orientace, kratší doba jednoduché činnosti
100-150-200	Prostory, které nejsou dlouhodobě užívány pro pracovní účely, prostory obytné a společenské
200-300-500	Zraková místa pro jednodušší, běžné pracovní úkoly (kanceláře, školy)
500-750-1000	Zraková místa pro vizuálně náročnější déle trvající pracovní úkony
1000-1500-2000	Zvláště náročné zrakové úkoly
více než 2000	Velmi náročné zrakové úkoly

Z uvedené Tabulky 6 plyne skutečnost, že čím je obtížnější zrakový výkon, tím je vyšší intenzita osvětlení na základě toho, že oko musí rozlišovat menší detaily. Potřebná intenzita se zvyšuje s délkou zrakové činnosti, s rychlostí změn pozorovaného detailu a s menšími kontrasty pozorovaných ploch. Konkrétní hodnoty osvětleností pro různé druhy činnosti jsou uvedeny v normě ČSN EN 12464-1, která byla převzata z evropské normy pro osvětlování. Hodnoty osvětlenosti pro stejný zrakový výkon se rovněž zvyšují s věkem člověka – viz Obrázek 8.



Obrázek 8: Potřebná hladina osvětlení pro stejný zrakový výkon při různém věku lidí [P25]

Současný stav v osvětlování je charakterizován:

- aplikací moderních výpočetních programů při návrhu nových osvětlovacích soustav,
- novou harmonizovanou normou pro osvětlení (např. ČSN EN 12 464-1: Osvětlování vnitřních prostorů – Vnitřní pracovní prostory, stanovuje explicitně hladiny osvětlení pro výkon lidských činností, která nahradila ČSN 36 0450),
- častější přítomností inteligentních elektroinstalačních prvků.[19]

Příklady moderních aspektů pro osvětlování:

- zohlednění biorytmů: Philips Dynamic Lighting,
- nová technologie směrování světla: Mirrortec, ELDAKON,
- nové světelné zdroje, LED technologie,
- inteligentní elektroinstalace: DALI, KNX, LITENET,INELS,
- využití denního světla – světlovody,
- materiálová základna – vysoce kvalitní odrazné materiály (MIRO, vícevrstvé leštěné plechy s vysokou odrazností) nebo kvalitní simulační a vizualizační nástroje. [19]

2.1 Možnosti regulace vnitřních osvětlovacích soustav

Mezi hlavní důvody regulace a řízení osvětlení patří dosažení požadovaného osvětlení s ohledem na vykonávanou činnost, přizpůsobení osvětlení požadavkům uživatele, dosažení požadovaného osvětlení v závislosti na úrovni denního světla a snížení provozních nákladů na osvětlení. Výsledkem řízení osvětlení je zlepšení kvality osvětlení, zpříjemnění pobytu a práce, snížení příkonu svítidel a ztrát na napájecím vedení.

Dříve byly světelné zdroje řízeny (regulovány) z důvodu přizpůsobení jasu určité situaci. V posledních desetiletích však osvětlovací zařízení regulují intenzitu osvětlení převážně z ekonomického hlediska. S vývojem elektronických technologií se postupně ustupuje od klasického způsobu ovládání osvětlovacích soustav pouze změnou napájecího napětí a přistupuje se k řízení osvětlení pomocí různých

řídicích systémů. Tyto systémy poskytují možnost řídit a ovládat osvětlovací soustavu z hlediska maximálního využití denního světla a přítomnosti osob.

V dnešní době existují systémy, které se zabývají nejen řízením osvětlení, ale také ovládáním všech technologií v budovách, jako jsou vytápění, klimatizace, bezpečnostní systémy a požární signalizace. Přestože ekonomické a energetické úspory jsou hlavním kritériem pro volbu těchto systémů, dosahuje se pomocí nich také zvýšení komfortu osvětlování a provozní bezpečnosti.[32]

Mezi nejdůležitější požadavky pro řízení umělého osvětlení patří:

- Komfort řízení – spočívá v poskytnutí pohodlného ovládání dané osvětlovací soustavy. Komfort spojený s kvalitou řízení osvětlovací soustavy se dosahuje použitím různých senzorů a dálkových ovládání.
- Úspora elektrické energie – řídicí systémy dosahují vysoké úspory při optimálním návrhu osvětlovací soustavy ve spojení s využitím dostupného denního světla, s časovými spínači a s použitím světelných a pohybových senzorů.
- Flexibilita – přizpůsobivost řídicího systému je důležitou vlastností řídících prvků zabezpečujících variabilitu použití.
- Přesnost a funkčnost systému – je dána kvalitou použitých řídících prvků.
- Ekonomické náklady – jsou jedním z rozhodujících kritérií při výběru řídicího systému a souvisí s předcházejícími kritérii.[11]

2.1.1 Ovládání osvětlení

Provádí se klasickými spínači – řízení rovnoměrně rozmístěné osvětlovací soustavy dosáhneme okruhováním svítidel. Jednotlivé okruhy spínáme vypínači nebo napojením na řízení v závislosti na přítomnosti denního osvětlení či přítomnosti osob. Je to jeden s nejjednodušších principů řízení osvětlovacích soustav. Nutná je ovšem podmínka zachování vyhovující rovnoměrnosti. Rozsah stmívání je obvykle 100 % a 50 %. Počet regulačních stupňů závisí pouze na počtu okruhů. Je nutné s těmito stupni počítat (již při návrhu osvětlovací soustavy) tak, aby byla při všech úrovních splněna podmínka požadované rovnoměrnosti osvětlení. Hlavní výhodou tohoto řízení jsou nesporně velmi nízké investiční náklady.[32]

2.1.2 Regulace světelného toku světelných zdrojů

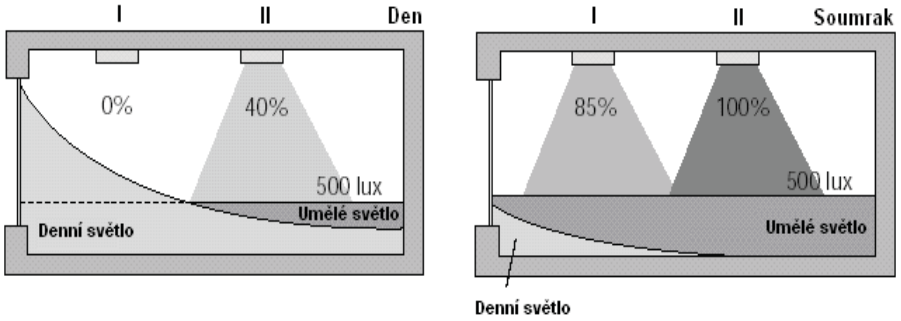
Stmívači – dosahujeme plynulé regulace osvětlovací soustavy. Existují různé druhy stmívačů od analogových až po elektronické, v závislosti na použitém zdroji osvětlení a předřadného přístroje. Tyto stmívače můžeme řídit ručně pomocí tlačítek, řídicím systémem nebo dálkovým ovládáním. Povel ke stmívání může být také spuštěn z čidla přítomnosti osob, čidlem na denní osvětlení, nebo časovým spínačem. Při stmívání se obecně snižuje měrný výkon světelných zdrojů. Tento fakt je nutno zdůraznit, protože například při provozu osvětlovací soustavy na 50 % světelného toku není elektrický příkon 50 %, ale je vyšší. Možnost stmívání jednotlivých světelných zdrojů je uvedeno v Tabulce 7.[10][32]

Tabulka 7: Rozsah regulace pro různé typy světelných zdrojů [P25]

Druh svítidla	Rozsah regulace [%]
Žárovky	0-100
Halogenové žárovky	0-100
Zářivkové svítidlo s klasickým předřadníkem	50-100
Zářivkové svítidlo s elektronickým předřadníkem	1-100
Vysokotlaké sodíkové výbojky	70-100
Světelné diody	0-100

2.1.3 Automatická regulace s využitím senzorů

Inteligentní řídicí systémy využívají senzory k automatické regulaci umělého osvětlení. Senzory mohou snímat intenzitu denního osvětlení, intenzitu osvětlení v místnosti a přítomnost osob. Získané informace zpracuje řídicí systém a nastaví míru regulace. Jako světelné senzory se používají pro snímání intenzity osvětlení především fotodiody anebo fototranzistory. Některé typy senzorů mohou přímo ovládat stmívatelné elektronické předřadníky, přičemž nastavení referenční hodnoty osvětlenosti se provádí přímo na senzoru. Napájení senzoru se provádí přímo z předřadníků nebo z řídících jednotek. Pomocí řídící jednotky může čidlo ovládat i více skupin svítidel tak, aby intenzita osvětlení v místnosti byla na minimální normativní hodnotě v průběhu celého dne – viz Obrázek 9. U intenzity osvětlení je dobré, když kolísá a tím se trénuje akomodace oka. Ne vždy je vhodné osvětlovací soustavu zcela vypínat při dostatečném denním osvětlení. Je to z důvodů velkých jasových rozdílů v místnosti, které vedou k zrakové nepohodě, někdy i k oslnění. V tomto případě je vhodné používat clonění přímého slunečního záření nebo zvýšit intenzitu osvětlení v potřebném místě. [32]



Obrázek 9: Řízení osvětlení na konstantní hladinu intenzity [9]

Kombinované senzory - jsou senzory, pomocí kterých se reguluje hladina osvětlení podle denního světla a zároveň podle přítomnosti osob. Součástí těchto kombinovaných senzorů mohou být také IR přijímače pro dálkové ovládání osvětlovací soustavy, které ovšem slouží pouze ke zvýšení komfortu ovládání.[9]

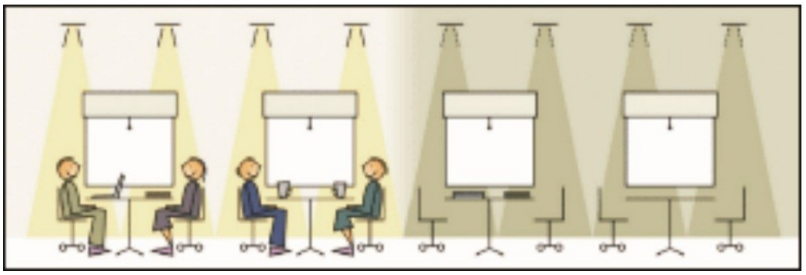
2.1.4 Inteligentní digitální systémy řízení

Inteligentní řídicí systémy pro řízení osvětlovacích soustav se v principu neliší od jiných automatizovaných systémů řízení. Princip řízení spočívá ve vyhodnocování okamžitých stavů

snímaných veličin, které se porovnávají s předem nastavenými hodnotami, a na základě vyhodnocení se provede zpravidla samočinně regulační zásah, nebo o stavu dané veličiny systém informuje obsluhu. Komunikace mezi jednotlivými komponenty v systému probíhá většinou pomocí sběrnice (BUS), kterou se rozumí přenosové médium tvořené obvykle párem vodičů. Ke sběrnici jsou paralelně připojeni různí účastníci, kteří si po sběrnici vyměňují informace.[11]

Všechny přístroje této inteligentní instalace lze rozdělit do tří skupin a to na senzory, akční členy a systémové přístroje.

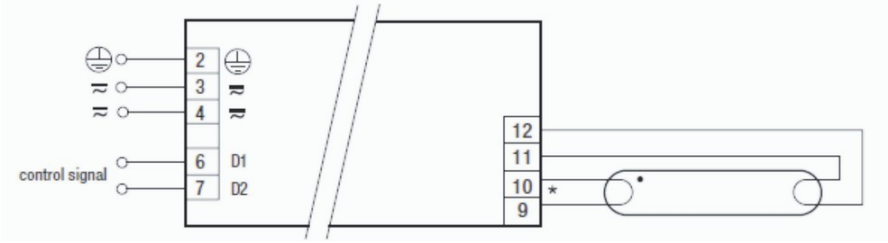
- **Senzory** - do této skupiny přístrojů patří tlačítkové spínače, senzory osvětlení, binární vstupy, infračervené (IR) přijímače, senzory pohybu, apod. Jsou to přístroje, které sledují události v systému, jako je například pohyb osob, či změna sledované veličiny (intenzita osvětlení) – viz. Obrázek 10. Jestliže dojde ke změně v systému, senzor dává povel na sběrnici nebo do řídící jednotky.



Obrázek 10: Příklad použití kombinovaného senzoru [11]

- **Akční členy** - tvoří skupinu přístrojů obsahující především spínače, binární výstupy a stmívače. Aktory mají za úkol zajistit provedení požadované operace, ke které dostaly povel ze společné sběrnice. Například při poklesu intenzity denního světla v místnosti dojde pomocí stmívače k zesílení umělého osvětlení.
- **Systémové přístroje a komponenty** - mezi systémové přístroje patří především napáječe sběrnice (zdroje napětí pro elektronické obvody v přístrojích), vazební členy mezi jednotlivými úseky sběrnice, sběrnicové zesilovače, logické automaty, řadiče a rozhraní pro připojení počítačů. Zajišťují základní funkce systému a vytvářejí jeho infrastrukturu.[32]

Digitální řízení pomocí rozhraní DSI - v DSI (digital serial interface = Digitální sériové rozhraní) se převádějí signály obslužných elementů (tlačítka, senzory, domovní řídící systémy 42 atd.) na digitální data (digitální sériové slovo) a přenášejí se k jednotlivým elektronickým předřadným přístrojům. Protože jednotlivé předřadníky jsou řízeny digitálně, je hladina světelného toku od prvního do posledního předřadníku stejná. V digitálním stmívacím systému jsou jednotlivé hodnoty řídícího signálu přiřazeny předdefinované hodnotě světelného toku. Odstupňování je v souladu s logaritmickou křivkou citlivosti oka. Na Obrázku 11 je uvedeno schéma zapojení stmívatelního elektronického předřadníku DSI/DALI pro nízkotlaké výbojové zdroje.[32]



Obrázek 11: Schéma zapojení stmívatelného elektronického předřadníku DSI/DALI [9]

Digitální řízení pomocí rozhraní DALI - vlastní protokol DALI byl vyvinut v polovině devadesátých let Mezinárodní elektrotechnickou komisí (International Electrotechnical Commission - IEC). Ovládání pomocí analogových rozhraní jako je systém 1 - 10V neumožňuje ani flexibilitu ani možnost řízení jednotlivých svítidel v osvětlovacím systému. Proto byl vyvinut sběrnicový systém, který umožňuje digitální komunikaci mezi všemi zúčastněnými komponenty v osvětlovacím systému nebo v celých systémech správy budov. Systém DALI je možné integrovat jako subsystém do nadřazeného systému správy budovy. DALI (Digital Addressable Lighting Interface = digitální adresovatelné světelné rozhraní) je mezinárodní norma, která zaručuje vzájemnou komunikovatelnost řízených stmívatelných předřadníků od různých výrobců. Rozhraní DALI je uvedeno v normě zářivkového předřadníku IEC 60929 v příloze E. DALI protokol zaručuje vzájemnou digitální komunikaci mezi jednotlivými prvky osvětlovací soustavy. Jsou zde vyspecifikovány parametry přenosu a definovány příkazy pro řízené prvky a jejich odpovědi, včetně definice datové struktury. Každý prvek lze individuálně řídit, protože má svou předepsanou adresu. Schéma zapojení je obdobné jako u systému DSI.[32]

Inteligentní řídicí systém z hlediska osvětlení umožňuje:

- centrální řízení osvětlovací soustavy celého objektu a jejích částí,
- zajištění hospodárného provozu a úsporu elektrické energie,
- regulaci intenzity osvětlení v závislosti na kvalitě denního osvětlení,
- volbu charakteru a intenzity osvětlení pro jednotlivá pracoviště,
- automatické ovládání osvětlení v závislosti na přítomnosti osob v prostoru,
- centrální kontrolu přítomnosti osob v objektu,
- snadnou změnu naprogramovaných variant pomocí ovládacích prvků,
- ovládání dalších spotřebičů, souvisejících s osvětlením (žaluzie),
- kontrolu a ovládání všech prvků napojením na PC,
- programové zablokování zvoleného režimu proti nežádoucí manipulaci,
- pomocí BUS-systému snadnou změnou konfigurace a rozsahu soustavy,
- zapojení do nadřazeného řídicího systému (BUILDING MANAGEMENT).[32]

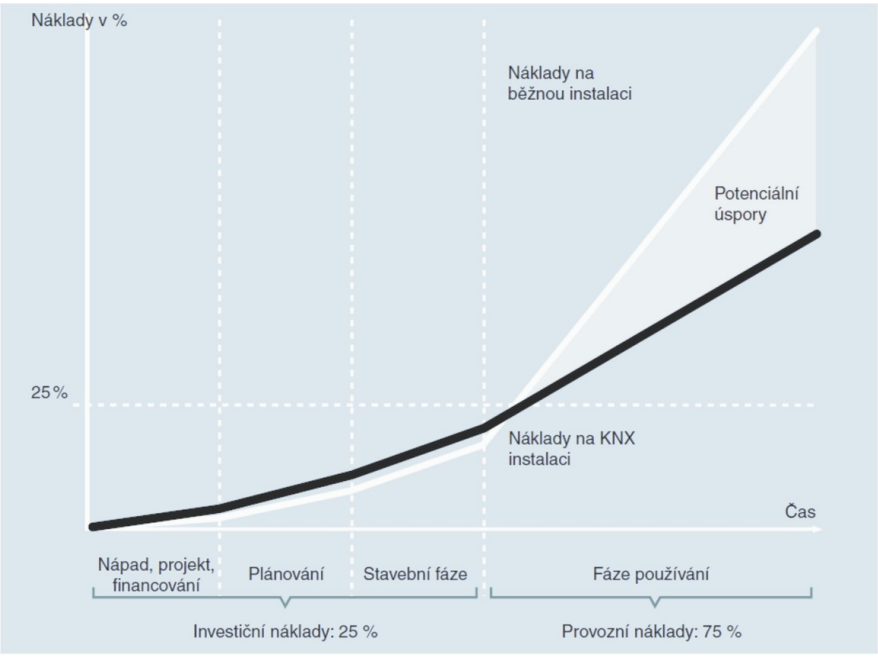
Inteligentní systém pro vnitřní řízení KNX - Systém řízení KNX je celosvětový otevřený standard pro automatizaci a technologii budov v souladu s EN 50090. KNX je inteligentní systém, který přináší vyšší komfort a úspory energií jak u komerčních, tak i obytných budov díky čidlům a senzorům pro jednotlivé ovládání přiřazených prvků. Tento systém lze využít například u objektů, jako jsou

administrativní budovy, obchody, banky, hotely, zařízení pro volný čas, sportovní areály, školy, nemocnice, průmyslové budovy a všude tam, kde je kladen důraz na komfort.[9]

U běžných elektrických instalací musíte předem určit, jak a kde budou spínací systémy vaší budovy instalovány, dříve než výstavba vůbec začne, ale u KNX můžete své volby ponechat otevřené. Je tomu tak proto, že vše v systému lze kdykoli změnit nebo rozšířit bez obvyklého nepořádku a pokládání nových kabelů. Navíc jsou všechna zařízení a instalace technologie budovy propojeny pomocí jediného sběrnicového vedení. Sběrnicové vedení je položeno paralelně k napájecímu vedení 230 V. Pokud aktivujete čidlo (např. tlačítko), akční člen (např. ovládání svinovací žaluzie) provede všechny potřebné přepínací povely.[9]

Důkladné naplánování elektrické instalace je velice důležité. Sběrnicové vedení by mělo být položeno dříve, než je postaven první podhled. A všude tam, kde plánujete umístit spínače světel, výstupy svítidel, zásuvky atd., by měl být položen souběžně se silovým kabelem i kabel pro inteligentní řízení. Náklady jsou minimální, přínos obrovský. Díky tomu máte v průběhu celé životnosti budovy volnost v propojování požadovaných funkcí technologie budovy.[9]

I když se při plánování stavby může zdát cena KNX řešení dražší než běžné řešení, náklady výrazně klesnou poté, co je objekt předán do užívání. Důvodem je, že počáteční investiční náklady pokrývají průměrně pouze cca 25 % veškerých nákladů budovy. Provozní náklady představují cca 75 %, jak je patrno z Obrázku 12. A právě zde lze dosáhnout velkých úspor. Zjistíte, že se vaše potřeby, co se týče řízení provozu budovy, postupem času mění. Může k tomu dojít díky tomu, že soukromý dům bude obydlený několika generacemi, nebo že místnosti v komerční nemovitosti jsou poskytnuty jiným uživatelům, novým nájemníkům nebo novým majitelům.[9]



Obrázek 12: Přehled nákladů [9]

Flexibilita řídicích systémů

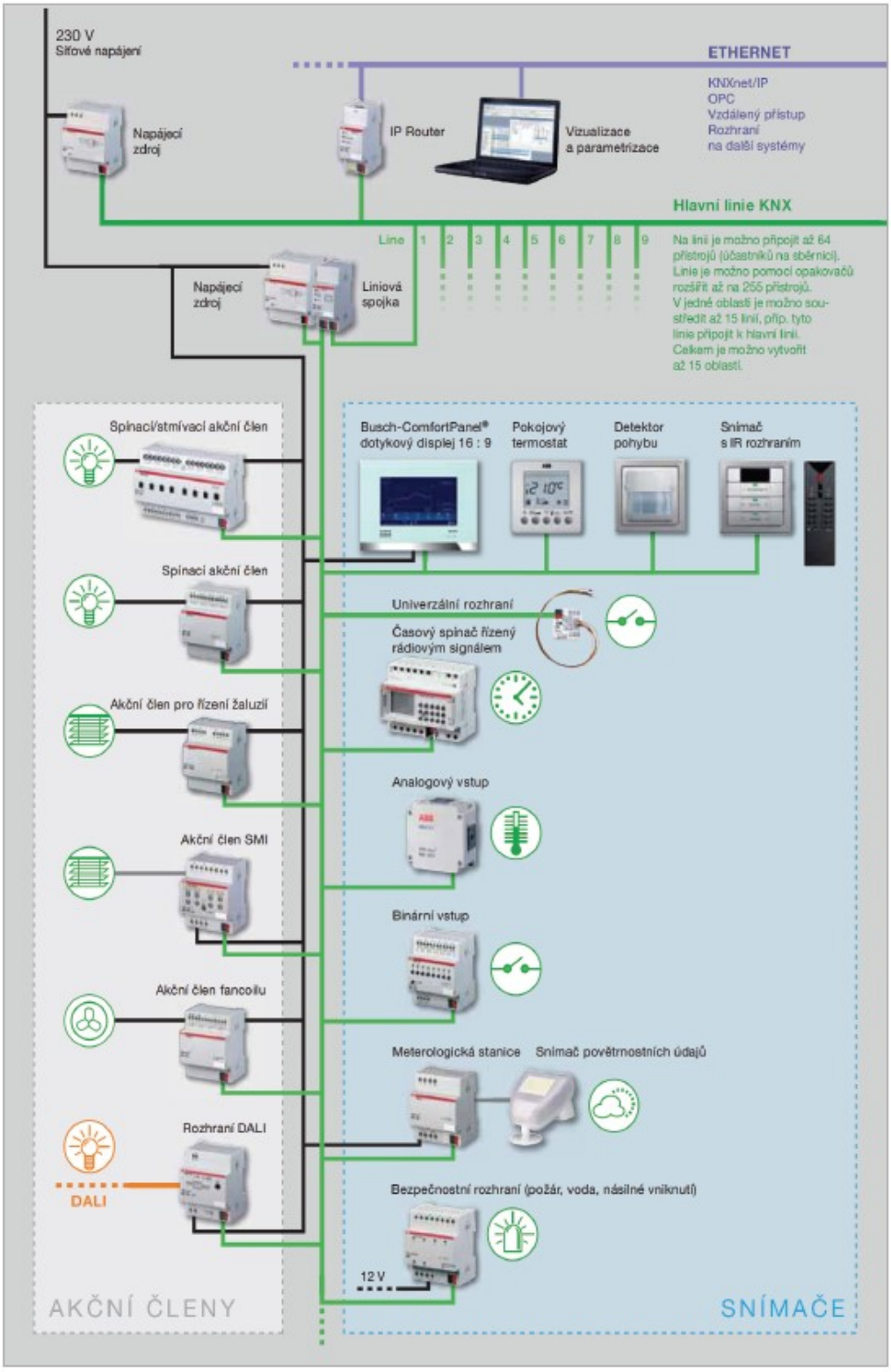
Uvážíme-li, že většina budov je navržena pro užívání po několik desetiletí, je nevyhnutelné, že dříve nebo později se využití jejich místností změní. Proto je dobré mít možnost snadno měnit funkce budovy podle momentálních potřeb uživatelů bez bourání zdí, pokládání nových kabelů a při vynaložení nízkých nákladů.

Bezpečnost a zabezpečení

Technologie budovy musí rychle a inteligentně reagovat ve všech kritických situacích i bez přítomnosti obsluhy. Běžné elektrické instalace mají však omezené možnosti a brzy dosáhnou svých limitů.

Efektivita nákladů

Při zvažování efektivity nákladů není rozhodující pouze prvotní stavební investice, ale také následující provozní náklady. Platí, že technologie budovy šetří finanční prostředky více tím, že je flexibilní a může být pružně a levně přizpůsobena novým požadavkům. Když vezmeme v úvahu neustále se zvyšující tlak na ochranu životního prostředí a stoupající ceny energií, je jasné, že je nutno do projektu rovněž začlenit inteligentní řešení pro efektivní využívání energie.



Obrázek 13: Schéma inteligentního systému [9]

3 Energetický audit

Energetický audit je potřebný nejen k zjištění tepelných ztrát, ale slouží i k porovnání spotřebované elektrické energie osvětlovací soustavy původní s návrhem spotřeby nové osvětlovací soustavy, u které lze naprojektovat nejmodernější světelné zdroje a různé systémy ovládání.

Energetický audit je soubor činností, které provádí energetický auditor za účelem vypracování informačního dokumentu o stavu budovy, způsobu využívání energie a hospodaření s energií v budovách a energetickém hospodářství.

Energetický audit současně zahrnuje návrh opatření, které je potřeba učinit k dosažení energetických úspor.

Podíl spotřeby elektrické energie (dodávané spotřebitelům) pro umělé osvětlení je v evropských zemích 10 % až 15 %. V České republice je podíl spotřeby elektrické energie pro osvětlení okolo 11 % což odpovídá cca 6,5 TWh.

Pro zavedení dohod a postupů pro stanovení energetických požadavků na osvětlení v budovách a poskytnutí metod pro numerický indikátor LENI („číselný ukazatel“) spotřeby energie v budovách byla navržena norma ČSN EN 15193-1.[27]

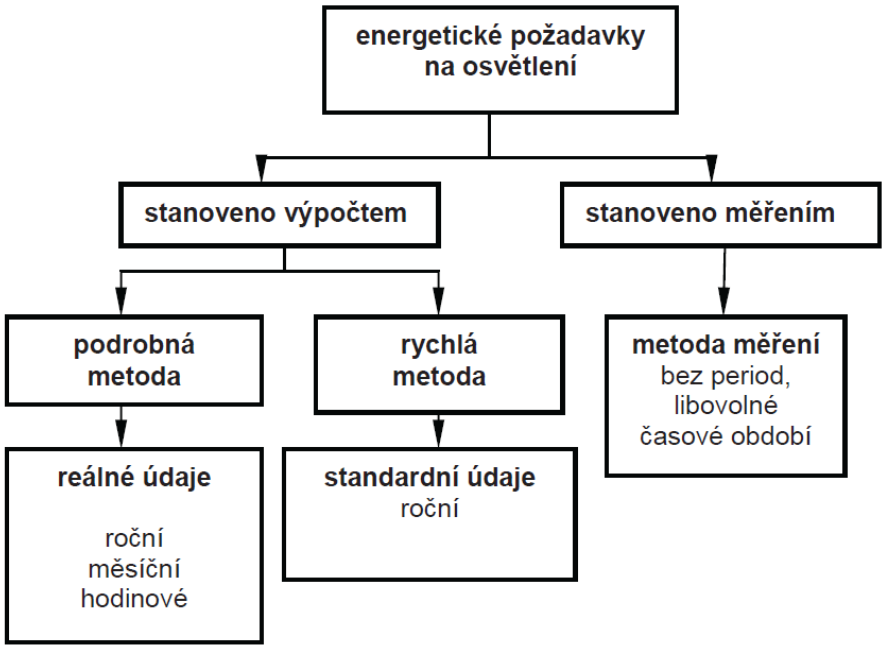
Problematika auditů se řeší hlavně v dokumentech ČSN EN 15193 (TNI 73 0327) Energetická náročnost budov – Energetické požadavky na osvětlení. Tato norma byla navržena pro zavedení dohod a postupů na stanovení energetických požadavků na osvětlení v budovách. Též poskytuje vodítko k zavedení národních limitů spotřeby energie pro osvětlení odvozených z referenčních schémat. Požadavky této normy vycházejí ze směrnice EC pro spotřebu energie v budovách č. 2002/91/EC. Specifikuje metodiku výpočtu pro vyhodnocování množství energie používané pro osvětlení v budovách a poskytuje číselný ukazatel pro požadavky na energii pro osvětlení používaný pro účely certifikace.

Tato Evropská norma může být použita pro stávající budovy a pro návrh nových nebo renovovaných budov. Poskytuje také referenční schémata k založení plánování energie určené k použití pro osvětlení. Dále poskytuje metodologii pro výpočet okamžitého využití energie pro osvětlení a pro stanovení celkové spotřeby energie budovy.[18][24][25]

Vyhláška č.148/2007 o energetické náročnosti budov ze dne 18. června 2007 stanovuje:

- požadavky na energetickou náročnost budov, porovnávací ukazatele a výpočtovou metodu stanovení energetické náročnosti budov,
- obsah průkazu energetické náročnosti budov a způsob jeho zpracování včetně využití již zpracovaných energetických auditů,
- rozsah přezkušování osob z podrobností vypracování energetického průkazu budov.[22]

Stanovení energetických požadavků na osvětlení lze dosáhnout výpočtem nebo měřením. U výpočtu se jedná o dvě metody a to o podrobnou nebo rychlou metodu – viz Obrázek 14.



Obrázek 14: Stanovení energetických požadavků na osvětlení [28]

3.1 Výpočty spotřeby elektrické energie na osvětlení pomocí rychlé metody

Rychlá metoda hodnotí spotřebu elektrické energie budovy jako celku. Tato metoda se používá v případě, kdy jsou k dispozici pouze hodnoty o celkové spotřebě elektrické energie na osvětlení v daném objektu a její podíl v celkové spotřebě objektu je malý. Při této metodě se ověří pouze to, zda daná spotřeba elektrické energie na osvětlení odpovídá směrným hodnotám spotřeby elektrické energie pro referenční objekt. Na základě výsledků nelze z této metody navrhovat úsporná opatření a nesmí se použít na bilanční hodnocení, tj. pro účely kolaudace.[21][28]

3.2 Výpočty spotřeby elektrické energie na osvětlení pomocí podrobné metody

Podrobná metoda umožňuje analyzovat spotřebu elektrické energie na osvětlení z pohledu prostorové a časové distribuce spotřeby elektrické energie na osvětlení. Při tomto způsobu hodnocení lze osvětlovací soustavu prostorově dělit podle typových prostorů, místností nebo zón. Typové místnosti jsou prostory s podobným charakterem využití, což jsou například komunikační prostory, kancelářské prostory, učebny apod. Spotřebu těchto prostorových jednotek lze pak posuzovat časově pro jednotlivá časová období, jako jsou rok, čtvrtletí, měsíc nebo den. Tento způsob hodnocení umožňuje získat přehled o podílu spotřeby elektrické energie jednotlivých prostorových jednotek objektu.[21][28]

4 Analýza výpočetních programů z hlediska výpočtů energetických úspor

Výpočetní technika se vyvíjí velkou rychlostí a díky tomu se zvyšuje i výpočetní výkon. Z toho důvodu můžeme používat výpočtově náročnější metody, které umožní přesněji modelovat světelné situace denního i umělého osvětlení. V počátcích výpočtů se uvažovaly pouze zrcadlové odrazy při výpočtech. Dnes se používají pravděpodobnostní výpočty ostatních složek osvětlenosti s možností nastavení různých parametrů odrazností a propustností materiálů. Také je možné definovat kvalitu výpočtu a s ní svázaný potřebný čas pro výpočet. Kvalita výpočtu je ovlivněna množstvím vyslaných paprsků, které jsou pro výpočet použity.[33]

Pro modelování vnitřního osvětlení se používají výpočetní programy, které umějí modelovat světelné soustavy podle různých výpočtových metod vycházejících z metody bodového zdroje. Ve výsledku se liší pouze uživatelským rozhraním. Z těchto programů zde máme hlavní zástupce. České programy od firmy ASTRA (http://www.astrasw.cz/). Program Wils z anglického názvu „windows interiors light systems“ se používá pro výpočet interiérového osvětlení a Wdls z anglického názvu „windows day light systems“ se používá k výpočtům denního osvětlení . Druhým hlavním zástupcem je švýcarský program Relux a třetí je německý Dialux. Programy Relux a Dialux jsou uživatelsky přívětivější, umí modelovat interiérové i venkovní světlo. Další výhodou programu Dialux je, že je zdarma. Ostatní programy jsou také zdarma, ale s jistými omezeními jako například doba použitelnosti nebo omezení nějakých nabídek a možností výpočtu.[33][34][35]

Všechny programy spolupracují se systémy CAD. Umožňují řešení sdruženého i nouzového osvětlení. Výpočty provádí dle platných norem. Výslednými výstupy z programu je model místnosti 2D nebo 3D s rozmístěním světelných zdrojů a světelných překážek, výpočet osvětlenosti, udržovacího činitele a činitele oslnění UGR. Dále programy pracují s databázemi svítidel českých i mezinárodních výrobců.[33][34][35]

4.1 Výpočetní programy Relux a Dialux

Výpočetní programy Relux a Dialux jsou nejvíce používanými softwary, které nám slouží i pro výpočty energetických úspor, přímo navazují na výpočetní programy na osvětlovací soustavy. Oba tyto nejznámější programy vychází z evropské normy EN 15193 nebo z německé normy DIN 18599. Tyto výpočetní součásti programů pro energetické úspory jsou zdarma implementovány do základní části. Výpočty úspor elektrické energie jsou značně složité z důvodů nutnosti dobrých znalostí normy EN 15193. V programech je velké množství vstupních parametrů, na kterých je výpočet závislý a není nikterak jednoduché docílit správného výsledku, který by se dal porovnat se skutečnými reálnými situacemi.

Úvahy výpočetních programů jsou směřovány k obecným úsporným opatřením.

Normy, které stanovují udržované osvětlenosti, jsou kompromisem mezi optimálním stavem světelných parametrů vzhledem k vykonávané práci a ekonomickými možnostmi.

Z těchto důvodů je třeba si při návrhu úsporných opatření uvědomit, že je potřebné dodržení využití daného prostoru, zrakové činnosti a zrakové pohody.

Návrh osvětlovacích soustav lze vyjádřit do základní podoby:

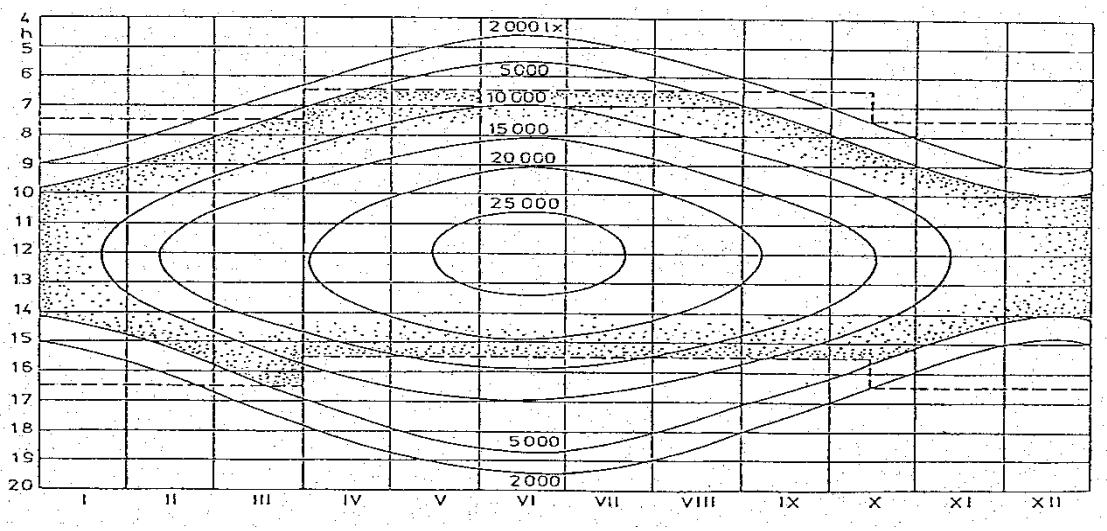
- hledisko světelně technické,
- hledisko zrakové pohody,
- hledisko provozně technické,
- hledisko vedlejších vlivů.

4.2 Stanovení spotřeby elektrické energie na základě průběhů osvětlenosti

Alternativní možnost výpočtů úspor elektrické energie je využití diagramu celoročního průběhu venkovní průměrné osvětlenosti při rovnoměrně zatažené obloze. Pro úspory umělého osvětlení jeho náhradou denním světlem je rozhodující celoroční průběh venkovního denního osvětlení. Venkovní osvětlenost denním světlem se mění během dne i roku jednak v závislosti na výšce Slunce nad obzorem, a jednak na stavu oblačnosti. Na Obrázku 15 je znázorněn celoroční průběh venkovní osvětlenosti (měsíce I až XII) během dne (od 4 do 20 hodin) při rovnoměrně zatažené obloze, která je charakteristická pro zimní období. Při jiných stavech oblohy, to jest při jasné obloze nebo při polojasné obloze částečně pokryté mraky, jsou hodnoty venkovní osvětlenosti vyšší.[10]

Denní osvětlení vnitřních prostorů se navrhuje tak, aby bylo dostatečné při venkovní osvětlenost 5000 luxů a vyšší. Dále je zde možné odečítat dobu, po kterou v jednotlivých měsících musí být umělé osvětlení v činnosti, i dobu, po kterou je nahrazeno denním světlem (tečkované plochy). Podle typu objektu a konkrétních podmínek využití vnitřních prostorů (např. směnnosti v průběhu roku) je možné odvodit celkovou roční dobu využití denního světla a na ní závislou nezbytnou dobu používání umělého osvětlení. Celková roční doba, po kterou venkovní denní osvětlení převyšuje hodnotu 5 000 luxů, je v našich klimatických podmínkách v průměru asi 3 500 hodin. Z toho se v běžných administrativně-výrobním objektu (při jednosměnném provozu) může při odečtení sobot, nedělí, svátků a celozávodní dovolené využít podle doby vyučování a dalších činností v průměru až 800 hodin. To představuje významnou úsporu umělého osvětlení a elektrické energie ve srovnání s vnitřními prostory bez denního osvětlení.[10]

Při důsledné regulaci umělého osvětlení ve vnitřních prostorech podle venkovní osvětlenosti je celková roční doba využití umělého osvětlení v závislosti na pracovní době v průměru 320 - 350 hodin. Energetický význam náhrady umělého osvětlení denním ve výrobně administrativních objektech lze dokumentovat na skutečnosti, že množství denního světla, které pronikne plochou okna místnost o velikosti 1 m^2 a je zde během celoroční činnosti využito, by při nahrazení umělým světlem při zářivkovém osvětlení znamenalo spotřebu elektrické energie mezi 100 kWh až 120 kWh. Uvedený diagram lze rovněž využít pro hrubé stanovení možnosti využití denního světla posuzovaného objektu a nutnosti využití umělého osvětlení v závislosti na rozvrhu pracovní doby v posuzované budově. Diagram je takto možno využívat u objektů s dostatečným přístupem denního světla. Při návrhu umělého osvětlení a jeho regulace se tedy musí respektovat nejen funkce daného vnitřního prostoru, obtížnost zrakových činností a jejich rozmístění a časový charakter, ale také podmínky denního osvětlení a vazba umělého osvětlení na ně. To platí zejména pro případy modernizací a rekonstrukcí osvětlení ve starších objektech, ve kterých je nezbytné zjistit hladinu denního osvětlení a jeho rozložení ve vnitřním prostoru buď měřením, nebo výpočtem.[10]



Obrázek 15: Úrovně venkovní osvětlenosti v luxech [10]

Křivky na Obrázku 15 vyznačují úrovně venkovní osvětlenosti v luxech (2 000 lx až 25 000 lx) během dne (od 4 do 20 hodin), během roku (měsíce I až XII). Umělé osvětlení se zapíná při hodnotách venkovní osvětlenosti nižších než 5000 lx. Čárkovanou čarou je vyznačena jako příklad doba výuky od 7.30 do 13 hodin a odpolední využití do 16 hodin. Tečkovaná plocha značí dobu, po kterou je umělé osvětlení nahrazeno denním.[10]

5 Optimalizace návrhu úsporných opatření návrhem matematického modelu

V návrhu predikčního modelu se využívá princip stmívaní osvětlovací soustavy na konstantní hladinu osvětlenosti u dané osvětlovací soustavy umělého osvětlení při uvažování příspěvku denního osvětlení přes boční osvětlovací soustavy denního osvětlení (okna), anebo přes horní osvětlovací soustavy denního osvětlení (světlíky).

Základní motivací pro vytvoření predikčního modelu byl požadavek projektantů vnitřního osvětlení na předvedení ekonomického přínosu navrhovaných stmívatelných osvětlovacích soustav při komunikaci s investorem v rámci projektové přípravy. Navržený predikční model jednoznačně a názorně ukazuje na ekonomický přínos použití stmívatelných osvětlovacích soustav, stmívaných na základě příspěvků denního světla v interiérech budov.

Navrhovaný predikční model vychází ze základního předpokladu dynamického chování denního světla. Aby mohl být eliminován vliv světových stran na umístění osvětlovacích otvorů a zároveň aby model pracoval s nejméně příznivými podmínkami denního světla, byl použit model rovnoměrně zatažené oblohy. Model rovnoměrně zatažené oblohy pracuje s dopadajícím zářením na základě polohy Slunce vůči Zemi v poloze, ve které je osvětlovací soustava vyhodnocována. Na základě přepočtu parametrů rovnoměrně zatažené oblohy a výšky Slunce se získají informace o osvětlenostech na vodorovné nezastíněné rovině. Přepočtem dynamicky se měnící osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině přes síť bodů činitelů denní osvětlenosti vypočítaných v řešeném vnitřním prostoru dojde k vygenerování osvětleností v těchto bodech způsobených denním světlem jak v čase, tak v řešeném vnitřním prostoru budovy.[P11]

Odečtem takto získaných příspěvků denního světla od normou požadované osvětlenosti (v čase a prostoru) se dojde k úrovni osvětlenosti, která musí být generována osvětlovací soustavou umělého osvětlení. Rozdíl příkonů elektrické energie mezi fakticky instalovanou nestmívatelnou osvětlovací soustavou pracující na 100 % příkonu a stmívatelnou osvětlovací soustavou je pak vyhodnocován jako úspora elektrické energie (pouze v časech předpokládaného provozu daného pracoviště), která může být dále přepočtena na dobu návratnosti investic daného vylepšení osvětlovací soustavy umělého osvětlení.

Návrh predikčního matematického modelu si ověřím testováním na reálných osvětlovacích soustavách. Tyto osvětlovací soustavy využívají pro řízení na konstantní osvětlenost sběrnicový systém KNX tak, aby bylo možné efektivně vyhodnocovat úsporu elektrické energie.[P10][17]

5.1 Dynamický model rovnoměrně zatažené oblohy

Při modelování potenciálu úspor je třeba vycházet z úrovně intenzity vnějšího osvětlení. Tato je ovšem výrazně proměnlivá. Pro současné výpočty činitele denní osvětlenosti se používá modelu rovnoměrně zatažené oblohy s intenzitou osvětlení 5 klx, resp. 20 klx. Námi navržený dynamický model vychází z rovnoměrně zatažené oblohy s proměnlivou osvětleností během dne. Tento model lze využít během celého roku pro výpočty osvětleností způsobených denním světlem v interiérech, aniž by bylo nutné znát orientaci oken vzhledem ke světovým stranám.

Rovnoměrně zatažená obloha je horší stav oblohy, než jsou průměrné dny v roce v našich zeměpisných souřadnicích. Nicméně tento stav umožňuje vytvoření modelu oblohy, se kterým lze pracovat a který jednoznačně stanovuje, jakým způsobem se chovají jasy oblohy od horizontu až k zenitu. Námi využívaný model rovnoměrně zatažené oblohy při tmavém terénu uvažuje o obloze s gradací jasu od horizontu k zenitu 1 : 3 (dle CIE). Jas libovolného bodu oblohy je pak dán vztahem (7): [7]

$$L_\gamma = \frac{1}{3} L_z (1 + 2 \sin \gamma) \tag{7}$$

Kde:
L_γ … jas oblohy v úhlové výšce γ nad horizontem v [cd.m^{-2}],
L_z … jas oblohy v zenitu v [cd.m^{-2}],
γ … úhel nad horizontem [°].

S touto oblohou pracují výpočetní programy pro výpočet denního osvětlení. Pro kompletní přiblížení principu výpočtu denního osvětlení ve vnitřních prostorách je ještě nezbytné představit činitel denní osvětlenosti.

Činitel denní osvětlenosti, kterým se stanovuje míra příspěvku denního světla v budovách v místech zrakových úkolů, je podíl vnitřní osvětlenosti (přímým i odraženým světlem) a osvětlenosti venkovní nezastíněné roviny za rovnoměrně zatažené oblohy. Příspěvky přímého slunečního světla jsou z obou osvětleností vyloučeny. Hodnota činitele denní osvětlenosti v sobě zahrnuje vlivy zasklení, znečištění, vnitřního i venkovního stínění atd. Naopak, díky využití rovnoměrně zatažené oblohy, eliminuje vliv natočení oken a světlíků na různé světové strany.

Činitel denní osvětlenosti je tedy stanoven vztahem (8): [7]

$$D = \frac{E}{E_{ob}}.100 \tag{8}$$

Kde:
D … činitel denní osvětlenosti [%],
E … osvětlenost bodu dané vnitřní srovnávací roviny [lx],
E_{ob} … osvětlenost oblohová na venkovní nezastíněné rovině[lx].

Nicméně je nutné si uvědomit, že hodnota osvětlenosti E_V na venkovní nezastíněné rovině vychází z výše uvedených hodnot 5 klx a 20 klx. Činitel denní osvětlenosti nám tudíž poskytuje informaci pouze o tom, kolik procent z venkovní osvětlenosti se ve vyšetřovaném bodě vnitřního prostoru bude vyskytovat. Informace o dynamice tohoto příspěvku vlivem změn venkovní osvětlenosti zcela zaniká. Z tohoto důvodu je nutné provést výpočty dynamiky osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině během dne a roku při respektování parametrů rozložení jasů rovnoměrně zatažené oblohy.[P12]

5.2 Model denního světla

Současné ekonomické požadavky vedou ke snižování energetické náročnosti budov. V oblasti vnitřního osvětlení vedou tyto požadavky k větší míře využití denního světla v kombinaci se světlem umělým (sdružené osvětlení). Technická úroveň současných osvětlovacích soustav umožňuje v soustavách sdruženého osvětlení regulaci světelného toku na konstantní hladinu osvětlenosti pomocí stmívání soustav umělého osvětlení a realizovat tak snížení spotřeby elektrické energie.

Aby bylo možné stanovit potenciál úspor a návratnost stmívatelných osvětlovacích soustav, je nutné znát hladinu vnější intenzity osvětlení. Ta je ale proměnlivá. Vzhledem k tomu, že činitelé denní osvětlenosti se počítají z rovnoměrně zatažené oblohy, i výpočty konkrétních osvětleností budou prováděny za této situace.

Na základě stanovení režimu využívání místnosti, budovy (typ zrakového úkolu, požadovaná osvětlenost, obsazenost, pracovní doba, směnný provoz apod.) pak lze určit energetickou náročnost této regulované osvětlovací soustavy a stanovit dobu návratnosti investice oproti osvětlovací soustavě neregulované.

Je nutné se zmínit i o tom, že denní světlo ovlivňuje základní biologické pochody v lidském organismu, a proto jsou stavební normy a hygienické předpisy koncipovány tak, aby ho ve vnitřních prostorách zabezpečily co nejvíce.[P13]

5.3 Modelování dynamického chování denního osvětlení

Modelování světelných podmínek je důležitou součástí návrhu budov. Výpočetní programy umělého osvětlení usnadňují práci projektantům. Díky modelům nedochází při realizaci a hygienickém měření k nesplnění norem. Modelování denního světla představuje důležitější roli, jelikož venkovní osvětlení je závislé na ročním období, denní době a meteorologických podmínkách. Z tohoto důvodu je měření s denním světlem náročné. Měření činitele denní osvětlenosti ve vhodných podmínkách je možné provádět, jak již bylo zmíněno. Jelikož podmínky jsou takto proměnlivé, pracujeme ve většině případů s modely.[11]

Modelování příspěvku denního osvětlení je ve většině případů založeno na statistickém zpracování měsíčních, denních nebo v případě vysoké přesnosti hodinových dat. Naměřená a statisticky upravená data, ať už slunečního, difuzního nebo celkového ozáření zemského povrchu poskytují pravděpodobnostní informace o předpokládaném ozáření v daný časový interval.[11]

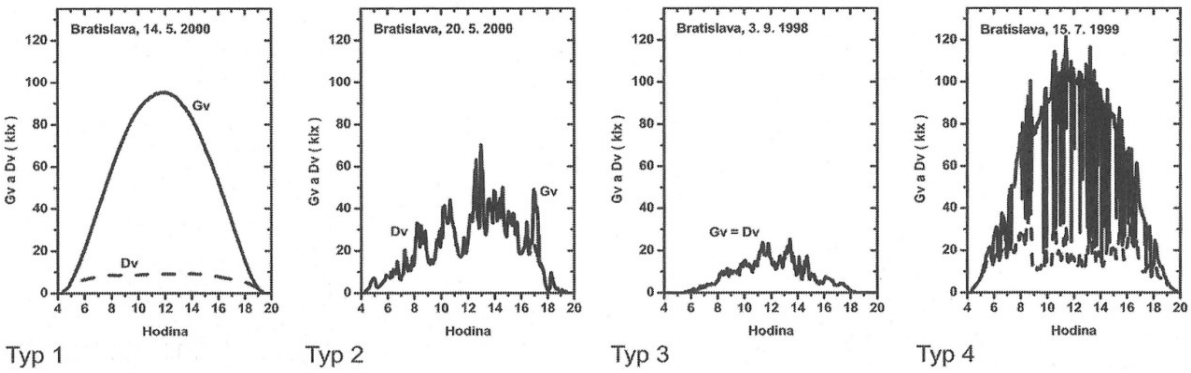
Pokud budeme modelovat denní osvětlení v budovách pomocí různých výpočetních programů, může se stát, že dojde k situaci, kdy se výsledky jednotlivých výpočtů budou lišit z důvodu použití různého výpočetního algoritmu a různých zdrojových statistických dat. Výpočtový algoritmus je ve většině případů dán přepočtem statistických hodnot ozáření zemského povrchu na osvětlenost pomocí světelné účinnosti.[11]

Vznikem stanic CIE IDMP na čtyřech kontinentech (Evropa, Asie, Austrálie a Severní Amerika) se v roce 1992 razantně změnil výzkum dostupnosti denního světla. Nejvíce kompletní průběhy celodenních výsledků celkového G_V a difuzního D_V způsobených horizontální osvětleností v průběhu celého roku prezentovali v roce 2006 výzkumníci z akademie věd slovenské republiky. Porovnání jednotlivých dní ukazuje vysokou dynamiku světla jak z časového hlediska výskytu, tak co do velikosti

naměřených hodnot. Z výzkumu bylo zjištěno, že za období 1994 – 2006 nebyly nalezeny žádné dva dny se shodným průběhem celkové a difuzní osvětlenosti.[11]

Z důvodu potřeby výpočtů spotřeby energií v budovách v určité lokalitě byla vytvořena srovnávací data TMY (typický meteorologický rok). Tato data byla dále rozšířena o difuzní a celkovou osvětlenost v takzvaných typických měsících. Typický měsíc je stanoven z databáze měření podle osvětlenosti, zenitního jasu a slunečního svitu. Takto podrobná data jsou již dostupná pouze pro místa, kde dochází k pravidelnému měření pomocí měřících stanic CIE IDMP. Tyto stanice jsou například umístěny v Bratislavě, Athénách, Hamburku, Moskvě a v mnohých dalších lokalitách na výše uvedených čtyřech kontinentech.[11][P14]

Jednodušší alternativa výpočtů předurčujících světelné klima je provedena způsobem, který se opírá o základní poznatky. Při prostupu světla atmosférou dochází k zeslabení difuzní složky. Tato složka odpovídá hodnotě D_v/E_v a v slunečních situacích i přímé složky. Během roku se projevuje spousta světelných situací a posouzení každé by nebylo možné, proto se jako dostačující pro aproximaci při modelování celodenních venkovních osvětleností používají tyto čtyři základní situace.[11]



Obrázek 16: Typické průběhy denních osvětleností [11][5]

Kde:

Typ 1: Jasný půlden s převládajícím dopoledním nebo odpoledním slunečním svitem nad 0,75.

Typ 2: Oblačný půlden s malým relativním odpoledním nebo dopoledním svitem mezi 0,01 - 0,75 s největším výskytem kolem 0,4.

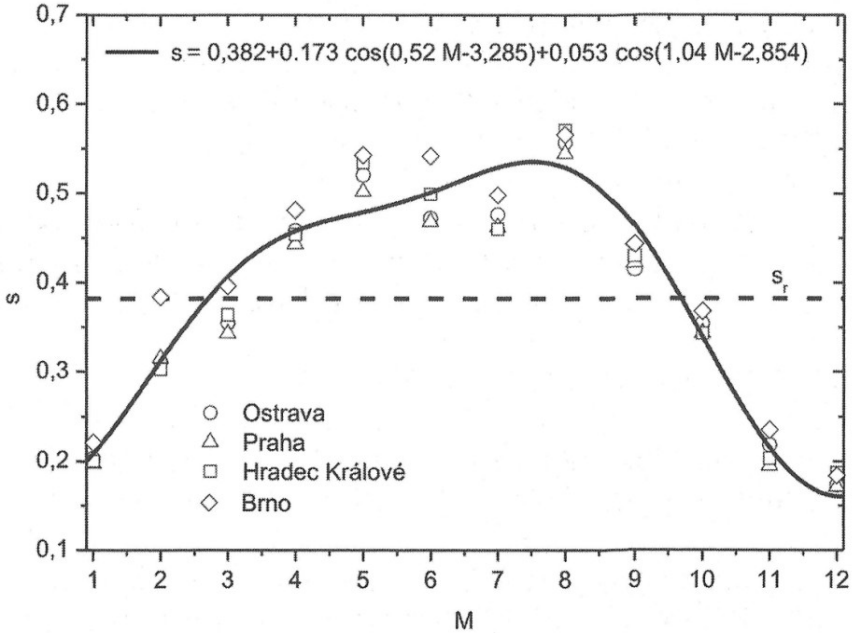
Typ 3: Zatažený půlden bez slunečního svitu, maximum dopoledního nebo odpoledního svitu pod 0,01.

Typ 4: Půl den s častým střídáním period se slunečním světlem a bez něho vlivem pohybu oblaků, v rozsahu relativních svitů dopoledních nebo odpoledních mezi 0,01 - 0,75 s největším výskytem kolem 0,6.

Vstupními parametry zjednodušeného modelování jsou tedy čas a datum, nebo přímo z těchto dat vypočítávaná výška Slunce, parametr D_{vm}/E_v je velikost difuzního světla pro zataženou oblohu a parametr T_{Vm} pro slunečné situace. T_{Vm} zde reprezentuje míru zákalu oblohy.[11]

Na Obrázku 17 je zobrazena křivka průběhu relativního slunečního svitu během jednoho roku vytvořená ze statistických údajů nashromážděných za 10 let. Rovnice uvedená v obrázku popisuje matematicky tvar křivky. Hodnota 0,382 odpovídá průměrné relativní hodnotě slunečního svitu s_r pro Českou

republiku a například pro Slovensko je tato hodnota stanovena na 0,42 a písmeno M udává jednotlivé měsíce během roku.[11]



Obrázek 17: Model celoročního relativního slunečního svitu v Čechách [9]

Vstupní parametry pro zjednodušené modelování jsou čas, datum a díky tomu i výška Slunce v průběhu celého roku, volba koeficientu propustnosti oblohového světla D_{Vm}/E_V pro situace se zataženou oblohou, to ještě bez vlivu slunečního světla, volba parametru světelného činitele zákalu T_{Vm} pro situace v vlivem slunečního světla.

V Tabulce 8 jsou uvedeny průměrné měsíční naměřené hodnoty všech různých světelných podmínek. Měřená data jsou z Bratislavy v rozmezí 1994 - 2005.[5]

Tabulka 8: Koeficient propustnosti oblohového světla a světelného činitele zákalu [5]

Měsíc	**Situace**		
	Bez slunečního světla	**Se slunečním světlem**	
	D_{Vm}/E_V	**D_{Vm}/E_V**	**T_{Vm}**
Leden	0,2	0,3	3,55
Únor	0,25	0,3	3,99
Březen	0,23	0,28	4,71
Duben	0,24	0,29	5,32
Květen	0,25	0,26	4,84
Červen	0,25	0,26	4,88
Červenec	0,24	0,26	4,86
Srpen	0,25	0,26	4,95
Září	0,24	0,26	4,52
Říjen	0,23	0,28	4,19
Listopad	0,2	0,29	3,95
Prosinec	0,18	0,3	3,48

Výpočet celkové denní osvětlenosti se skládá z osvětlenosti difuzní D_V a osvětlenosti přímé P_V. Níže uvedené výpočty respektují podmínky nezastíněné oblohy bez vlivu odraženého světla od fasád budov a terénu. Pro zatažený model je hodnota $P_V = 0$ a pro jasný den se provádí součet osvětleností podle vztahu (9):[5]

$$G_v = D_v + P_v \tag{9}$$

Kde:
G_v … celková osvětlenost [lx],
D_v … přímá sluneční osvětlenost [lx],
P_v … výška Slunce [°].

Difuzní složka D_V se stanoví podle stejného vztahu jako u zataženého dne, jenom koeficient transmise oblohového světla D_{Vm} se vybere z Tabulky 8 – viz vztah (10):

$$D_v = \left(\frac{D_{vm}}{E_v}\right).E_{vo.}\varepsilon.sin_y \tag{10}$$

Kde:
D_v … difuzní oblohová horizontální osvětlenost [lx],
D_{Vm}/E_V … koeficient propustnosti oblohového světla [-],
E_{V0} … světelná solární konstanta 133 334 [lx],
ε … činitel excentricity [-],
γ_S … výška Slunce [°].

Výpočet přímé sluneční osvětlenosti je dán vztahem (11):

$$P_v = E_v.e^{-av.m.Tvm} \tag{11}$$

Kde:
P_V … přímá sluneční osvětlenost na horizontální plošku [lx],
E_V … extraterestriální horizontální osvětlenost [lx],
a_V … extinkční koeficient (Clearův vztah) [-],
m … relativní optická tloušťka atmosféry [-],
T_{Vm} … světelný činitel zákalu [-].

Tyto výpočty založené na statistických datech jsou podkladem pro výpočetní program řešící velikosti úspor elektrické energie vyvolané stmíváním interiérového osvětlení na stanovenou hranici osvětlenosti.

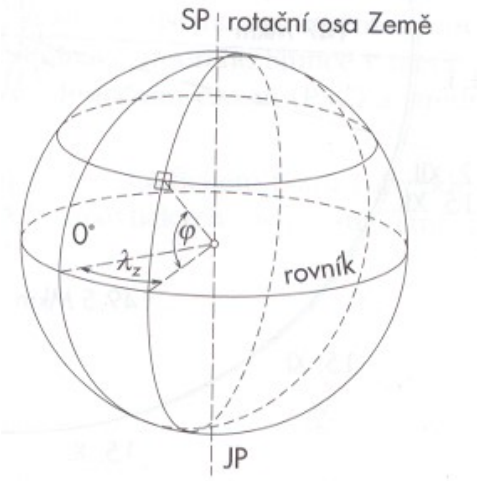
Tato část příspěvku znázorňuje dynamické modelování denního světla jako podklad pro výpočet regulace umělých osvětlovacích soustav a následné vyčíslení energetických úspor. Při dynamickém modelování vzniká celá řada aspektů, které je zapotřebí brát v úvahu. Základem pro dynamické modelování příspěvků denní osvětlenosti je výše zmíněné využití rovnoměrně zatažené oblohy. Díky tomuto lze při výpočtu eliminovat vliv světových stran na umístění osvětlovacích otvorů. Do výpočtu nevstupuje pouze model rovnoměrně zatažené oblohy, ale také vliv deklinace Slunce měnící se v průběhu celého roku.[5]

5.4 Souřadnice Slunce a geometrie slunečního paprsku

Pro stanovení konkrétních jasů oblohy, které umožní výpočet osvětlenosti venkovní nezastíněné roviny, je nutná znalost polohy Slunce vůči vyšetřované srovnávací rovině.

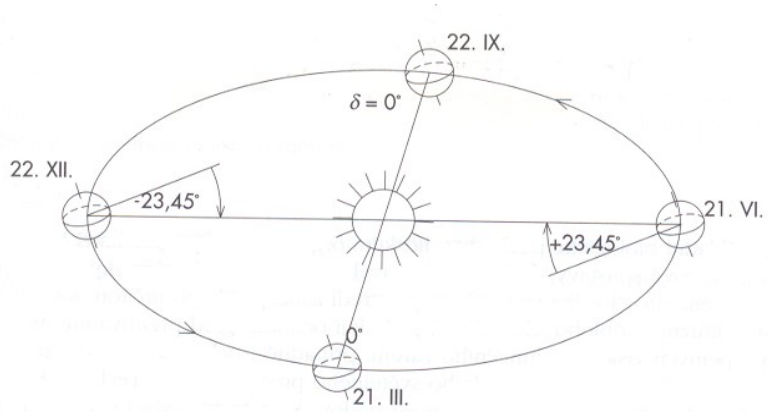
V následující kapitole je uveden způsob určování polohy Slunce, který se využívá ve výpočtech oslunění budov a je použit i v našem modelu.

Výpočet zdánlivé polohy Slunce na obloze je determinován geografickou polohou daného místa na zeměkouli, rotací Země a vzájemnou polohou Slunce a Země ve vesmíru. Poloha libovolného bodu na zemském povrchu se obvykle určuje zeměpisnou šířkou φ a zeměpisnou délkou λ_z – viz Obrázek 18.[5]



Obrázek 18: Zeměpisné souřadnice bodu na povrch Země [7]

Při pohybu Země okolo Slunce po mírné eliptické oběžné dráze je rovina zemského rovníku odkloněna od roviny ekliptiky o 23,45°- viz Obrázek 19.[5][P14]



Obrázek 19: Deklinace pro čtyři charakteristické dny v roce [1]

5.5 Deklinace Slunce

Úhel, který svírají sluneční paprsky s rovinou zemského rovníku, se nazývá deklinace Slunce δ a v průběhu roku se neustále mění. Pro konkrétní časový údaj jsou přesné hodnoty deklinace uvedeny ve hvězdářských ročenkách. Pro naše účely se deklinace zjišťuje pomocí matematických výrazů. Výpočtově se vychází z předpokladu, že nulová deklinace nastává o půlnoci, která předchází dnu jarní rovnodennosti 21. března. Vycházíme ze vztahu (12): [5]

$$\delta = 23{,}45° \sin\left[\frac{360°}{365.(J-81)}\right] \tag{12}$$

Kde:
J ... pořadový den v roce [-],
δ … deklinace Slunce [°].

V den zimního slunovratu (obvykle 22. prosince), kdy je ke Slunci nejvíc přikloněna jižní polokoule Země, je hodnota deklinace Slunce δ = -23,45° a v době letního slunovratu (zpravidla 21. června) je δ = 23,45°. Ve dnech jarní a podzimní rovnodennosti (21. března a 22. září) se Slunce nachází nad rovníkem Země a deklinace má nulovou hodnotu.[5]

5.6 Čas a hodinový úhel Slunce

Délka slunečního dne je tradiční a nejrozšířenější jednotkou času na Zemi. Časová rovnice má během roku maximální hodnoty 16. května (+ 3,8 min.) a 3. listopadu (+ 16,4 min.) a minimální hodnoty 12. února (- 14,4 min.) a 25. července (- 6,3 min.).

Místní sluneční čas je definován jako střední sluneční čas. Místní poledne nastává tehdy, když přes místní meridián přechází střední Slunce, pak hovoříme o středním poledni. Každý meridián má svůj vlastní střední čas. Bylo by velmi nepraktické, aby se čas na hodinách měnil na každém meridiánu. Určité oblasti mají zavedeny jednotný čas. Středoevropský čas SEČ je shodný se středním slunečním časem na λ_Z = 15° východní zeměpisné délky a jako pásmový hodinkový čas platí v rozsahu zeměpisných délek 7,5° ≤ λ_Z ≤ 22,5°. Ze středoevropského času určíme pravý sluneční čas podle vztahu (13): [5]

$$PSČ = SEČ + \frac{\lambda_Z - 15°}{15°} + ET \tag{13}$$

Kde:
$PSČ$ … pravý sluneční čas [h],
λ_Z … zeměpisná délka [°],
$SEČ$ … středoevropský čas [h],
ET ... časový rozdíl mezi PSČ – SSČ [h].

5.7 Výška Slunce

Výška Slunce γ_S je úhel, který svírá sluneční paprsek s horizontální rovinou. Pro výpočet výšky Slunce se používá známý vztah (14):

$$\gamma_S = \arcsin\left[\sin\varphi.\sin\delta - \cos\varphi.\cos\gamma.\cos(15°PSČ)\right] \quad (14)$$

Kde:
δ ... deklinace Slunce [°],
γ_S ... výška Slunce [°],
PSČ ... pravý sluneční čas [h].

V technických výpočtech se obvykle zanedbává vliv lomu slunečních paprsků v atmosféře a nepravidelnosti deklinace Slunce, protože i v nejnepříznivějším případě způsobují chybu v určování souřadnic Slunce menší než 1°.[5]

5.8 Výpočty průběhu denních osvětleností

Na základě znalosti polohy Slunce a rozložení jasů rovnoměrně zatažené oblohy lze přistoupit k řešení osvětleností venkovní nezastíněné srovnávací roviny v konkrétních lokalitách a v konkrétních dnech a hodinách.

První krok výpočtu je stanovení extraterestialní osvětlenosti, což je horizontální osvětlenost fiktivní roviny nad danou lokalitou na vnější hranici atmosféry. Ta stanovuje maximální osvětlenost. Získáme tedy referenční hodnotu pro zjištění dostupnosti osvětlení na zemském povrchu. Extraterestriální horizontální osvětlenost E_V bude v každém dni jiná. Závisí nejen na výšce Slunce γ_S, ale i na poměrné vzdálenosti Země od Slunce. Korekce této vzdálenosti je řešena pomocí činitele excentricity ε – viz vztah (15): [5]

$$\varepsilon = 1 + 0{,}034\cos\left[\frac{360°}{365}.(J - 2°)\right] \quad (15)$$

Kde:
ε … činitele excentricity [-],
J … pořadový den v roce [-].

Extraterestriální horizontální osvětlenost se vypočítá pomocí vztahu (16):

$$E_V = E_{V0}.\varepsilon.\sin\gamma_S \quad (16)$$

Kde:
E_{V0} … světelná solární konstanta = 133 334 [lx],
γ_S … výška Slunce [°],
ε … činitele excentricity [-],
E_v … extraterestriální horizontální osvětlenost [lx].

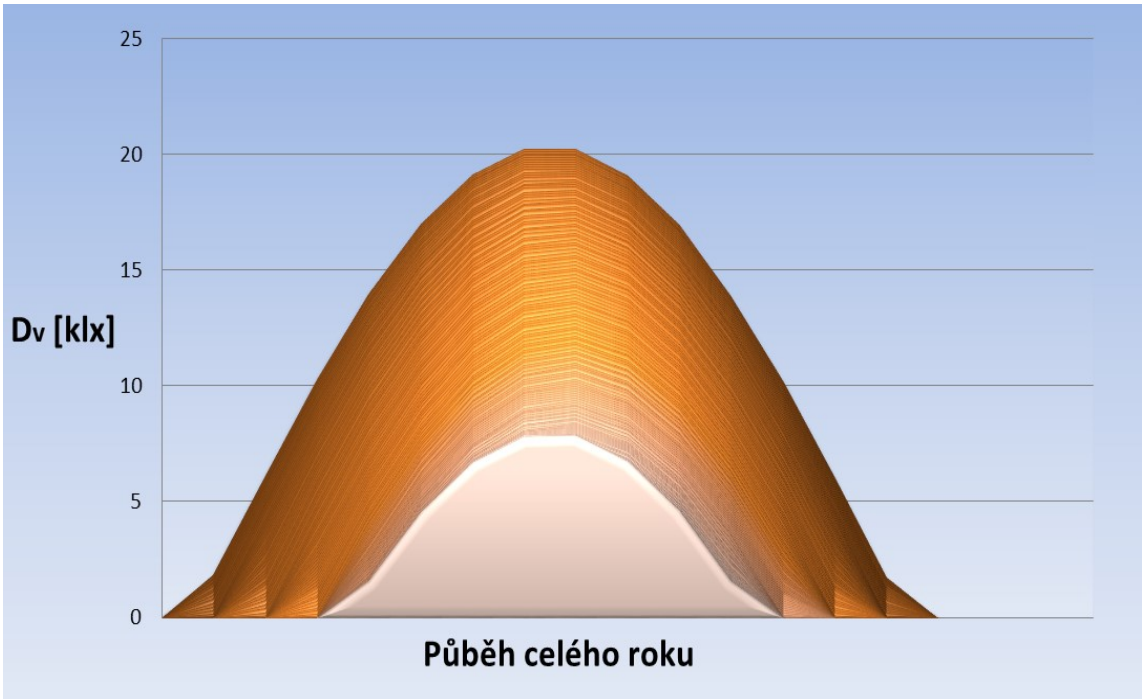
5.9 Difúzní osvětlenost

Difúzní osvětlenost D_V, tedy osvětlenost venkovní nezastíněné horizontální roviny pod rovnoměrně zataženou oblohou při znalosti konkrétních zeměpisných a časových souřadnic, pak lze stanovit na základě vztah (17):[5]

$$D_V = \left(\frac{D_{Vm}}{E_V} \right) . E_{V0} . \varepsilon . \sin \gamma_S \text{ [lx]} \tag{17}$$

Kde:
D_v … difuzní osvětlenost [lx],
D_{Vm}/E_V … koeficient propustnosti oblohového světla [-],
E_{V0} … světelná solární konstanta = 133 334 [lx],
γ_S … výška Slunce [°].

V rámci mého modelu byla ještě hodnota vertikální osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině korigována koeficienty propustnosti oblohového světla D_{vm}/E_v, které byly získány na základě dlouhodobých měření v Bratislavě – viz Tabulka 8.



Obrázek 20: Hodnoty difúzní osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině v průběhu celého roku [P25]

Postupným dosazováním poměrných hodnot ε a γ_s do vztahu (18) s předpokladem rovnoměrně zatíženým modelem oblohy pro různé časy v rámci roku dostaneme hodnoty osvětleností pro venkovní nezastíněné roviny. Přepočtem těchto hodnot venkovních osvětleností D_v se přepočítají průběhy osvětlení ve vnitřních prostorech. Hodnoty osvětleností jsou vypočteny od východu po západ Slunce.[5]

$$E_{x,y,t} = \frac{D_{,yy}.D_{y,t}}{100} \quad (18)$$

Kde:
$E_{x,y,t}$ … vnitřní osvětlenost v prostoru a v čase vyvolaná denní složkou světla [lx],
$D_{y,y}$ … činitel denního osvětlení v jednom bodě řešeného prostoru[-],
$D_{y,t}$ … proměnná venkovní osvětlenost v čase [-].

Vzhledem k tomu, že cílem výpočtu je stanovení potenciálu úspor elektrické energie a osvětlovací soustavy vnitřního osvětlení, je nezbytné od předpokládaného příspěvku denního světla odečíst normou požadovanou hodnotu pro daný prostor, čímž získáme požadavek na dotaci od osvětlovací soustavy umělého osvětlení – viz vztah (19):[5]

$$E_{a,x,y,t} = E_{norm} - E_{x,y,t} \quad (19)$$

Kde:
$E_{a,x,y,t}$ … výsledná hladina osvětlení ve vnitřním prostoru v daném bodě [lx],
E_{norm} … hladina osvětlení požadovaná normou pro daný prostor [lx],
$E_{x,y,t}$ … vnitřní hladina osvětlení v prostoru a v čase vyvolaná denní složkou světla [lx].

Pozn.: $E_{x,y,t}$ musí být větší než E_{norm}, jinak bude rovno nulové hodnotě.

Využitím světelně-technického návrhu osvětlovací soustava vnitřního osvětlení a následnými cyklickými přepočty této osvětlovací soustavy a stmíváním jednotlivých řad nebo jednotlivých svítidel na hodnoty blížící se požadavkům hodnot $E_{x,y,t}$ pro všechny časy získáme průběhy úrovní stmívání jednotlivých částí řad svítidel nebo přímo jednotlivých svítidel osvětlovací soustavy umělého osvětlení v čase.[5][1]

Přepočtem hladiny stmívání na úroveň příkonu osvětlovací soustavy umělého osvětlení dojde k získání informace o předpokládaném odběru energie osvětlovací soustavy v čase při využití rovnoměrně zatažené oblohy.[5]

Při znalosti předpokládané polohy provozu řešeného prostoru lze provést výpočet rozdílu spotřeby navržené osvětlovací soustavy umělého osvětlení pracující na 100 % příkonu a světelného toku osvětlovací soustavy stmívané na konstantní hladinu osvětlenosti. Tento rozdíl lze chápat jako predikci potenciálu úspor elektrické energie stmívatelné osvětlovací soustavy stmívané na konstantní hladinu osvětlenosti.[5]

Aby bylo možné výše popsaný model verifikovat, byly jeho části implementovány do výpočetního softwaru pro výpočet denního osvětlení (WDLS - Windows Day Lighting System) a do výpočetního softwaru pro výpočet umělého osvětlení (WILS - Windows Interiér Lighting System).[33]

6 Implementace matematického modelu do softwaru WDLS/WILS

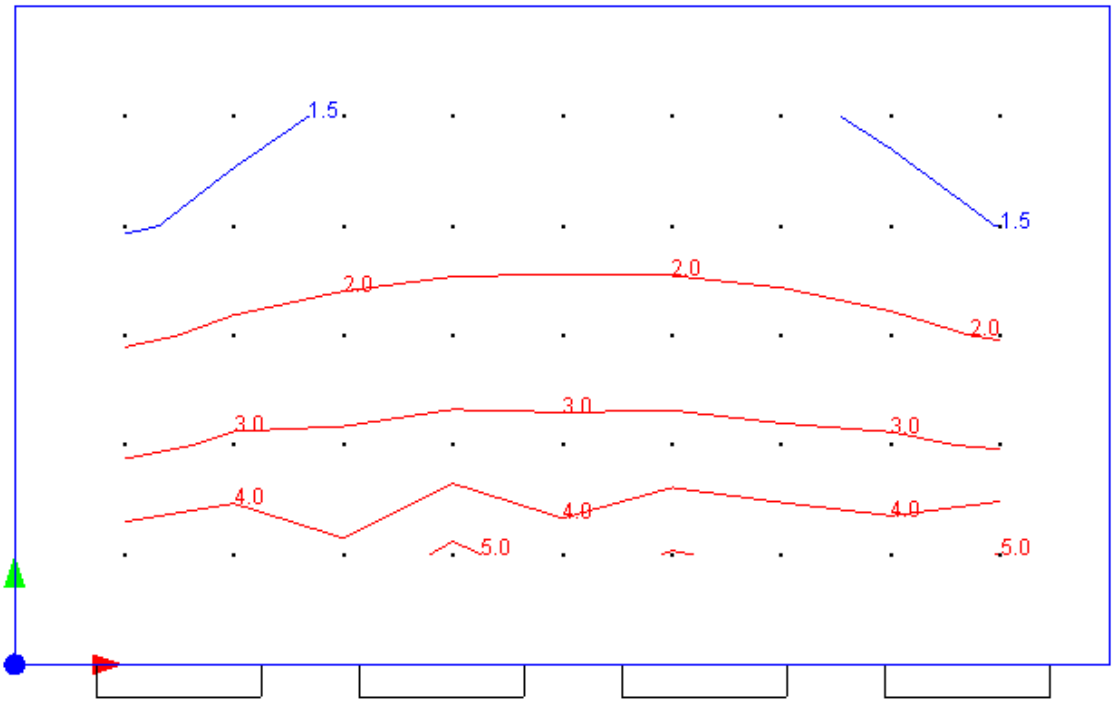
V dnešní době, kdy jsou již běžně dostupná zařízení umožňující regulaci soustav umělého osvětlení, vzniká potřeba navrhnout tuto regulaci tak, aby uživatel osvětlení co nejvíce ušetřil a přitom dodržel ustanovení platných zákonů a norem. Takový regulační systém musí umět vhodně reagovat na změny denního osvětlení, stmívat soustavy umělého osvětlení tak, aby byly stále dodrženy hygienické limity, ovládat žaluzie zejména v případě přímého slunečního záření, případně řešit i regulaci vzhledem ke stárnutí a znečištění osvětlovacích soustav. Soustavy umělého osvětlení by přitom s tímto účelem měly „svítit co nejméně“ tak, aby spotřeba elektrické energie byla co nejnižší.

Základním problémem je, jak zajistit správnou reakci osvětlovacích soustav na okamžitý stav denního osvětlení. Obecně vzato je možno čidla měřicí hladinu osvětlení umístit do interiéru nebo do exteriéru v nejlepším případě do obou současně. Tyto způsoby s sebou přinášejí problémy, které je třeba vyřešit. V případě umístění do exteriéru je hlavním problémem nekonečně mnoho stavů denní oblohy a zejména přímé sluneční záření. Pokud jsou místnosti objektu orientovány na různé strany, je třeba použít několika vhodně umístěných čidel a návazné softwarové řešení regulačního systému. V případě umístění čidel do interiéru, čidla obvykle snímají součet denního a umělého osvětlení na různých místech úkolu a systém reguluje na nastavenou hodnotu úrovně osvětlení. V tomto případě je pravděpodobně potřeba většího počtu světelných čidel a principiálně jiného způsobu regulace.

Předpokládejme tedy zatím, že v exteriéru je rovnoměrně zatažená obloha a že se tedy běžný výpočet denního osvětlení blíží reálnému stavu. Pokud máme možnost výpočet denního osvětlení načíst do programu k výpočtu umělého osvětlení, můžeme simulovat různé stavy v interiéru zadáním externí horizontální osvětlenosti na nezastíněné rovině. Pokud dále rozmístíme kontrolní výpočetní body tak, aby reprezentovaly místa zrakového úkolu v místnosti, vzniká zajímavá úloha najít takovou kombinaci regulace soustav či svítidel, aby součet denní a umělé osvětlenosti ve všech bodech byl vyhovující a současně aby úspora byla co největší.

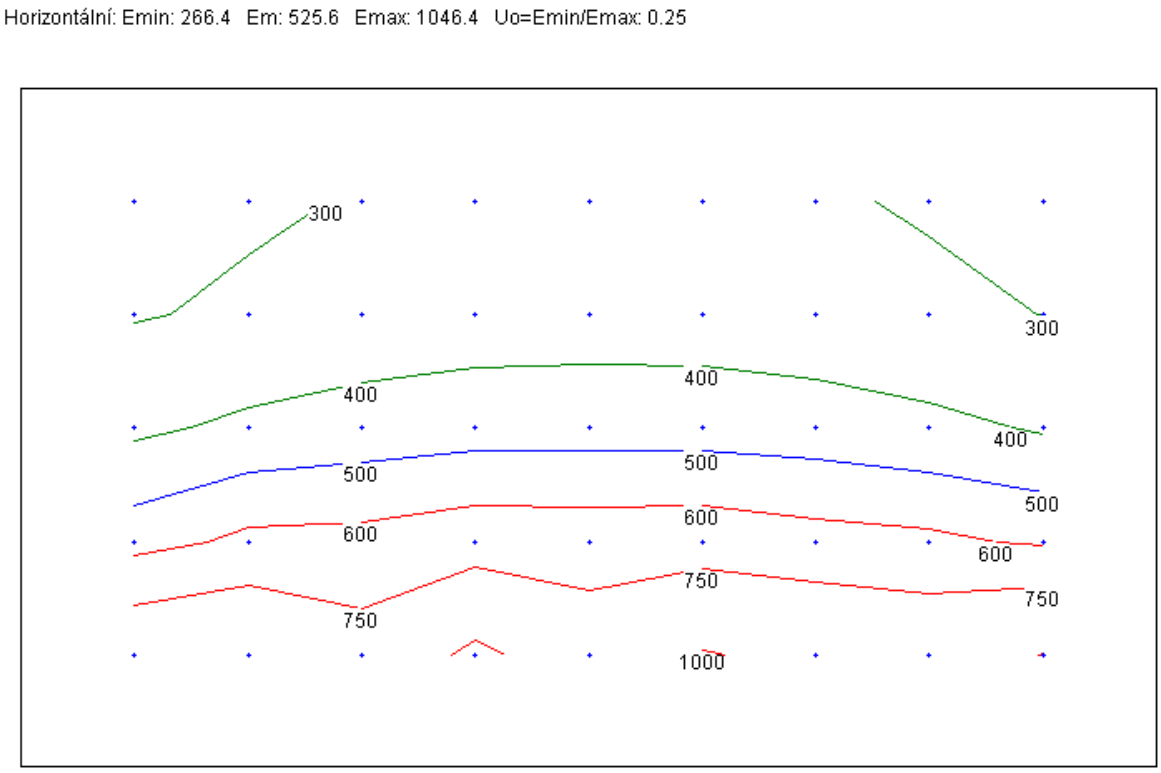
Prakticky jsme tedy zvolili následující postup. Budeme regulovat vždy celé soustavy svítidel, přitom necháme na navrhovateli, aby vhodně svítidla do osvětlovacích soustav sdružil. Regulace soustav svítidel bude probíhat ve skocích po 10 % od 0 % do 100 % a budeme zkoušet všechny varianty všech soustav. Základní vstupní hodnotou bude externí horizontální osvětlenost a jedinou podmínkou použitelnosti varianty regulace bude, aby součtová osvětlenost ve všech bodech sítě vyla rovna nebo větší než je nastavená požadovaná hodnota E_m. A z těchto použitelných variant budeme hledat tu, při níž je celkový součtový příkon všech soustav minimální. Závislost mezi světelným tokem a příkonem světelného zdroje ovšem není lineární a závisí na typu světelného zdroje a předřadníku. Zde jsme si to trochu zjednodušil, předpokládám použití zářivek, které mají křivku téměř lineární a přestávají svítit při asi 10 % příkonu.

Abychom dále mohli spočítat předpokládanou roční úsporu elektrické energie, potřebujeme znát průběh venkovní horizontální osvětlenosti po dobu celého roku od rána až do večera. Poté nám už nic nebránilo provést analytické řešení úlohy, jejíž výsledky se zde pokusíme prezentovat na následujícím Obrázku 21.[16]



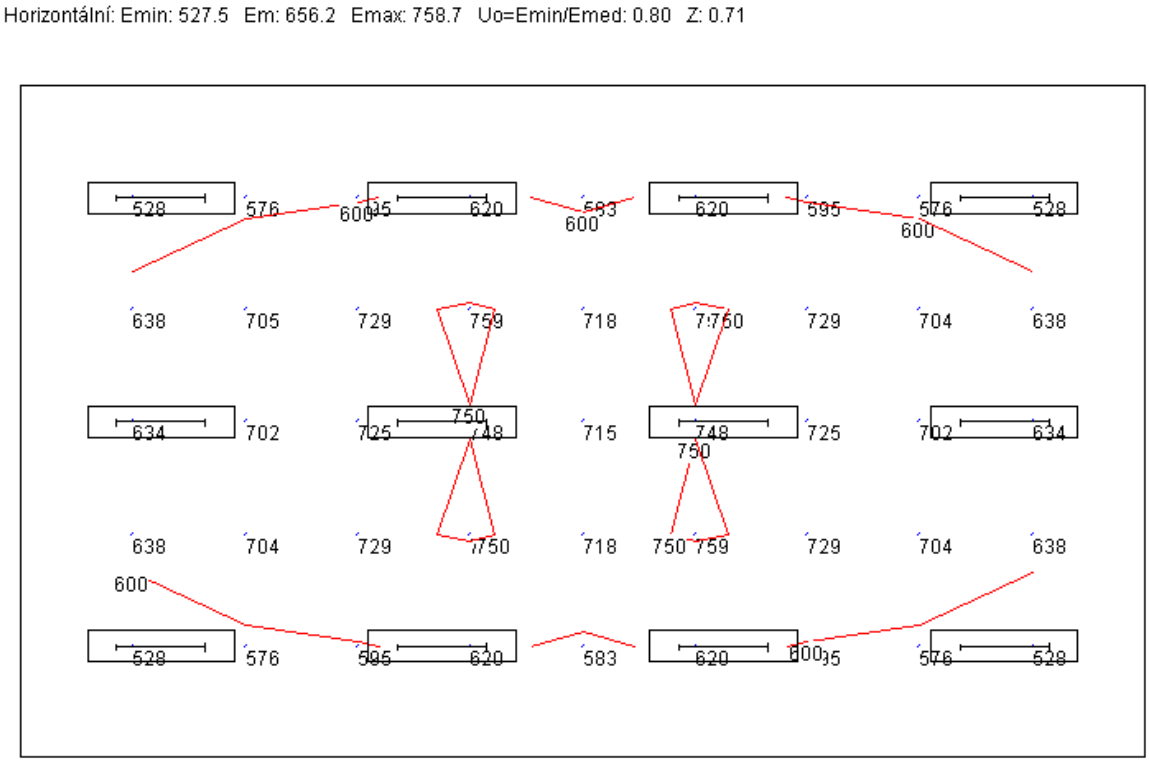
Obrázek 21: Výpočet denního osvětlení [16]

Jedná se o jednoduchou místnost obdélníkového půdorysu s jednostranným bočním osvětlením. Z výpočtu vyplývá, že v téměř celé místnosti denní osvětlení vyhovuje normě ČSN 730580. Pokud tento výpočet načteme do výpočtu umělého osvětlení a použijeme-li například venkovní osvětlenost 20 000 lx, bude výsledek následující – viz Obrázek 22.[16]



Obrázek 22: Osvětlenost denního osvětlení [16]

Budeme-li předpokládat běžnou kancelářskou práci, požadovaná hodnota udržované osvětlenosti je 500 lx**,** pro tuto hodnotu navrhneme umělé osvětlení. Podle výše uvažovaného kritéria navrhneme umělé osvětlení tak, aby v každém bodě sítě byla vypočtená udržovaná osvětlenost vyšší než 500 lx. Použijeme lineární zářivková svítidla. Výsledek návrhu je vidět na Obrázku 23.[16]



Obrázek 23: Návrh umělého osvětlení [16]

Nyní je třeba se zamyslet nad rozdělením svítidel do samostatně regulovaných soustav. V našem případě s jednoduchým jednostranným bočním osvětlením rozdělíme svítidla do 3 řad po 4 svítidlech. Teoreticky lze svítidla rozdělit do neomezeného počtu soustav. Prakticky jsme zjistili, že pro náš algoritmus je použitelné maximum 4 soustavy svítidel, při větším počtu je už délka výpočtu těžko akceptovatelná. Je zřejmé, že ve složitějších případech bude hodně záležet na tom, jak chytře navrhovatel svítidla do soustav rozmístí. V případě nevhodného rozdělení svítidel do soustav program neposkytne žádné použitelné výsledky.[16]

Analytické řešení programu nyní poskytuje dvě možnosti. První z nich je výpočet regulace, kdy program najde takovou kombinaci regulování soustav, aby byl celkový příkon soustav svítidel minimální. Výsledkem je Tabulka 9, která přehledně zobrazuje dosažené výsledky. V prvním sloupci je zadaná horizontální osvětlenost exteriéru a v dalších sloupcích pak stupně regulování jednotlivých řad (soustav), v našem případě tří soustav.[16]

Tabulka 9: Hodnoty regulace dle venkovní osvětlenosti

E_{ext} [lx]	řada R1	řada R2	řada R3
1 000	0.80	0.60	0.90
5 000	0.30	0.80	0.70
7 000	0.10	0.90	0.60
10 000	0.00	0.60	0.70
15 000	0.00	0.30	0.60
20 000	0.00	0.10	0.60
25 000	0.00	0.00	0.40

Z Tabulky 9 vyplývá, že pokud bude v exteriéru 10 000 lx, tak nebude muset pro maximální úsporu první řada (soustava) svítidel svítit vůbec, druhá řada by svítila na 60 %, třetí na 70 %. A pokud by venku bylo 25 000 lx, tak bude nejlépe, když bude svítit pouze řada svítidel nejdále od oken a to na 40 %. V našem ukázkovém případě je zřejmé, že potenciál úspor je poměrně velký. Taková tabulka může snadno posloužit k nastavení regulačního systému.[P20]

Druhou možností, kterou program poskytuje, je výpočet celkových ročních úspor elektrické energie. Výchozím výše uvedeným podkladem je Tabulka 10 vypočtených horizontálních osvětleností [klx] v průběhu každého dne během roku, který poskytla VŠB - TU Ostrava. A přímo do této tabulky program spočítá spotřebu elektrické energie každý den při použití optimální regulace i bez ní. Pak již lze snadno provést součet celkových spotřeb a výpočet úspory. Uživatel programu zadá před zahájením výpočtu počátek a konec pracovní doby a využití víkendů. Při výpočtu program zohlední výše uvedenou závislost mezi příkonem a světelným tokem.[P20]

Tabulka 10: Přehled výpočtů SW pro úspory

D	**M**	**Dv 4,5[h]**	**Dv 8,5[h]**	**Dv 9,5[h]**	**Dv 13,5[h]**	**Dv 14,5[h]**	**Dv 15,5[h]**	**Dv 22,5[h]**	**Celkový příkon regulované OS**	**Celkový příkon neregulované OS**
-	**-**	**[klx]**	**[klx]**	**[klx]**	**[klx]**	**[klx]**	**[klx]**	**[klx]**	**kW/pracovní doba**	**kW/pracovní doba**
1	1	0,00	1,72	4,71	6,74	4,60	1,58	0,00	Neděle	
2	1	0,00	1,78	4,76	6,77	4,61	1,58	0,00	4,95	7,78
3	1	0,00	1,84	4,82	6,80	4,63	1,60	0,00	4,67	7,78
4	1	0,00	1,90	4,88	6,83	4,66	1,61	0,00	4,67	7,78
5	1	0,00	1,97	4,94	6,86	4,68	1,63	0,00	4,54	7,78
6	1	0,00	2,03	5,01	6,90	4,71	1,65	0,00	4,46	7,78
7	1	0,00	2,10	5,07	6,94	4,74	1,67	0,00	Sobota	
8	1	0,00	2,18	5,14	6,98	4,78	1,70	0,00	Neděle	
9	1	0,00	2,25	5,21	7,03	4,81	1,73	0,00	4,46	7,78
10	1	0,00	2,33	5,29	7,07	4,85	1,76	0,00	4,46	7,78
17	6	1,92	17,00	19,83	21,94	19,98	17,20	0,00	Neděle	
18	6	1,94	17,02	19,84	21,94	19,98	17,20	0,00	1,94	7,78
19	6	1,96	17,03	19,85	21,93	19,97	17,19	0,00	1,94	7,78
20	6	1,98	17,04	19,86	21,93	19,96	17,18	0,00	1,94	7,78
21	6	1,99	17,05	19,87	21,92	19,95	17,16	0,00	1,94	7,78
22	6	2,01	17,06	19,87	21,91	19,94	17,15	0,00	1,94	7,78
27	12	0,00	1,39	4,42	6,70	4,62	1,65	0,00	2,59	7,78
28	12	0,00	1,44	4,46	6,71	4,62	1,65	0,00	2,59	7,78
29	12	0,00	1,49	4,51	6,72	4,62	1,64	0,00	Sobota	
30	12	0,00	1,54	4,55	6,74	4,63	1,64	0,00	Neděle	
31	12	0,00	1,59	4,60	6,76	4,64	1,64	0,00	2,59	7,78
Příkon za období 1 měsíce									**645,95**	**2022,8**

V prvních dvou sloupcích Tabulky 10 označených D a M je den a měsíc roku, v dalších sloupcích označených D_v jsou horizontální osvětlenosti v exteriéru během celého dne, tzn. od 4:30 hodin do 22:30 hodin dle východu a západu Slunce. V posledních dvou sloupcích se nachází příkon regulované osvětlovací soustavy a neregulované osvětlovací soustavy. Jsou zde součtové spotřeby soustav umělého osvětlení s uvažováním regulace a bez regulace. Na posledním řádku tabulky je vyčíslen součet obou sloupců. Je vidět, že denní spotřeba se mění skokově v návaznosti na skokové testování regulace soustav. V našem příkladu by tedy použití regulace mohlo potenciálně ušetřit až 2/3 elektrické energie.[P19]

7 Ověření navrženého predikčního modelu

K ověření navrženého modelu bylo nutné kromě matematických výpočtů spojených s výpočty denního a umělého osvětlení provést dlouhodobá měření elektrických parametrů u vybraných vnitřních prostorů vybaveným osvětlovacími soustavami stmívatelnými na konstantní hladinu osvětlenosti.

Na Obrázku 24 jsou k dispozici fotografie z venkovní strany vybraných místností, které disponují umělou osvětlovací soustavou stmívatelnou na konstantní hladinu umělého osvětlení. V obou místnostech proběhlo dlouhodobé měření průběhů příkonu osvětlovací soustavy. Obě místnosti se nacházejí v České republice, ve městě Ostravě na zeměpisných souřadnicích 49,82 N, 18,24 E pro místnost č.1 a 49,84 N, 18,15 E pro místnost č.2.

Modelová místnost č.1 se nachází na ulici Sokola Tůmy 3, Ostrava a modelová místnost č.2 se nachází na ulici Otakara Jeremiáše v areálu VŠB –TU Ostrava, Fakulty stavební.

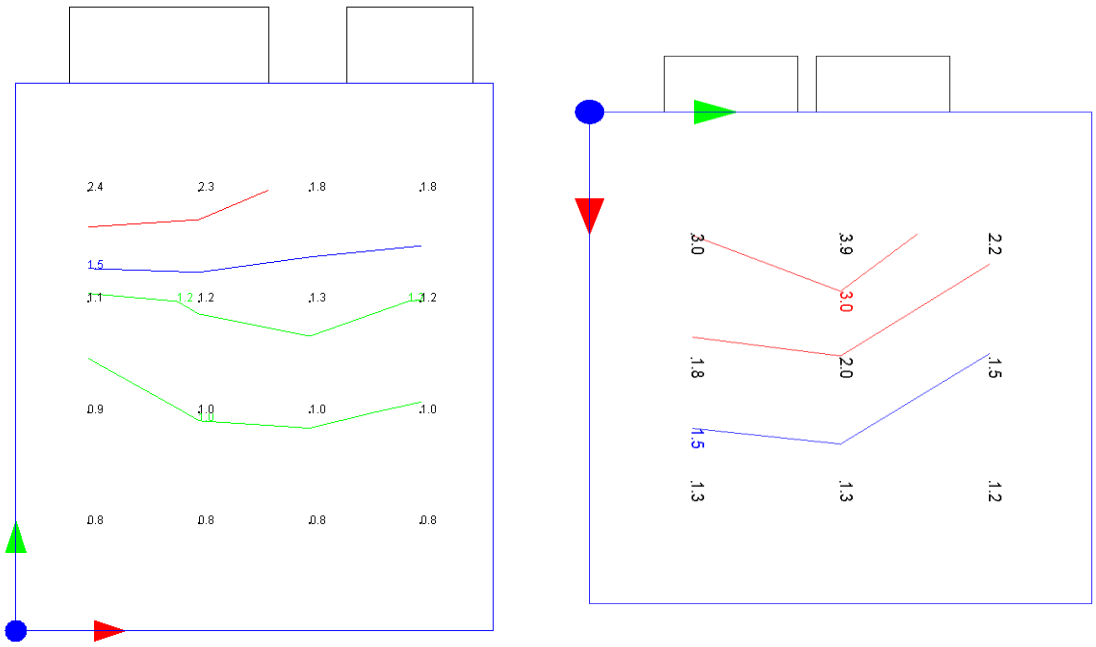
Obrázek 24: Modelové místnosti z venku (na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2)

Místnost č.1 se nachází ve 3. patře administrativní budovy (pro samotný výpočet jsou zohledněny stínící okolní budovy a stromy), rozměry prostoru jsou 4300 x 5000 mm a světlá výška 2670 mm. Na kratší stěně se nachází okna: Trojokno o rozměrech 1400 x 1800 mm ve výšce 1030 mm nad podlahou od stěny 480 mm. Druhé dvojokno o rozměrech 1400 x 1140 mm ve výšce 1030 mm nad podlahou od stěny 180 mm. Okna jsou mezi sebou vzdálena 700 mm.[P8]

Místnost č.2 se nachází ve 2. patře zkušebního rodinného domu, vybudovaného MSDK (Moravskoslezským dřevařským klastrem) pro výzkumné účely na VŠB TU Ostrava (pro samotný výpočet jsou zohledněny stínící okolní budovy a stromy). Rozměry místnosti č.2 jsou 3975 x 3372 mm a světlá výška 2100 mm. Na kratší stěně se nachází okna. První okno o rozměrech 900 x 1000 mm

ve výšce 810 mm nad podlahou od stěny 500 mm. Druhé okno o rozměrech 900 x 1000 mm ve výšce 810 mm nad podlahou od stěny 1520 mm. Okna jsou mezi sebou vzdálena 120 mm.

Půdorysy modelových místností, včetně umístění oken, jsou zobrazeny na Obrázku 25 jako výstupy z výpočetního programu pro výpočet denního osvětlení (dle ČSN EN 12 464-1).



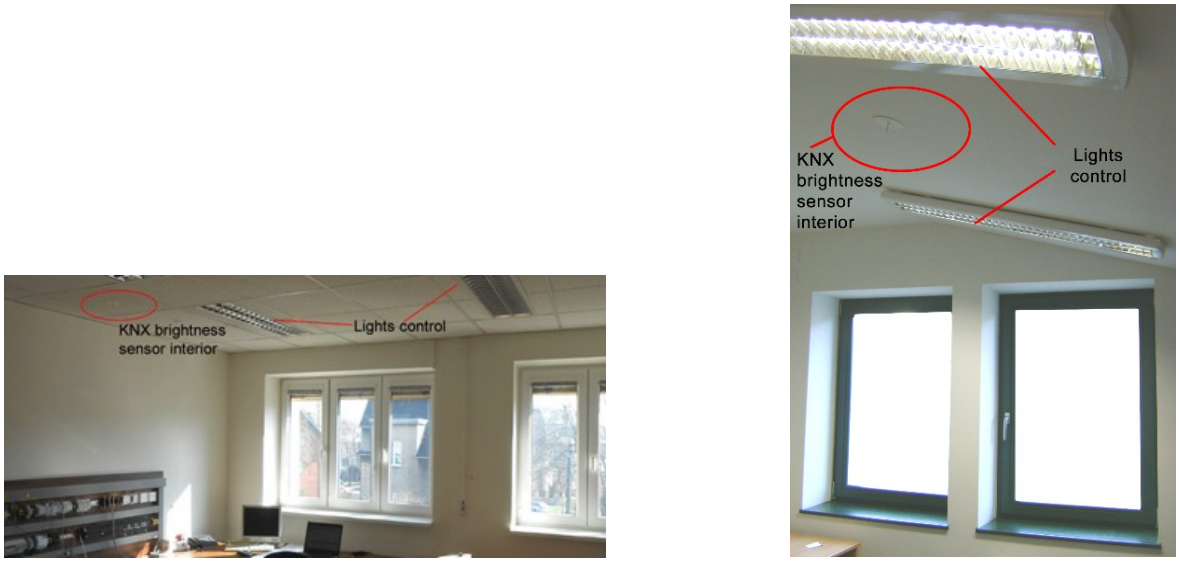
Obrázek 25: Výpočet činitele denní osvětlenosti
(na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2)

Součástí půdorysu jsou také výpočetní body pro výpočet činitele denní osvětlenosti při rovnoměrně zatažené obloze a následně i izofoty činitelů denní osvětlenosti ve výšce srovnávací roviny předpokládaných míst zrakových úkolů (pracovní stoly) 0,75 m. Při výpočtech činitele denní osvětlenosti byly samozřejmě brány v potaz i venkovní stínící překážky (budovy stromy,….).

Na základě vypočteného činitele denní osvětlenosti a průběhů venkovní osvětlenosti na nezastíněné rovině pro zeměpisné souřadnice daného objektu dojde k přepočtům činitele denního osvětlení na předpokládané příspěvky denního osvětlení v řešených místnostech v luxech. Na Obrázku 31 je převod hodnot činitele denní osvětlenosti uveden jako příklad přepočtu pro venkovní osvětlenosti pro obě řešené místnosti.[P16]

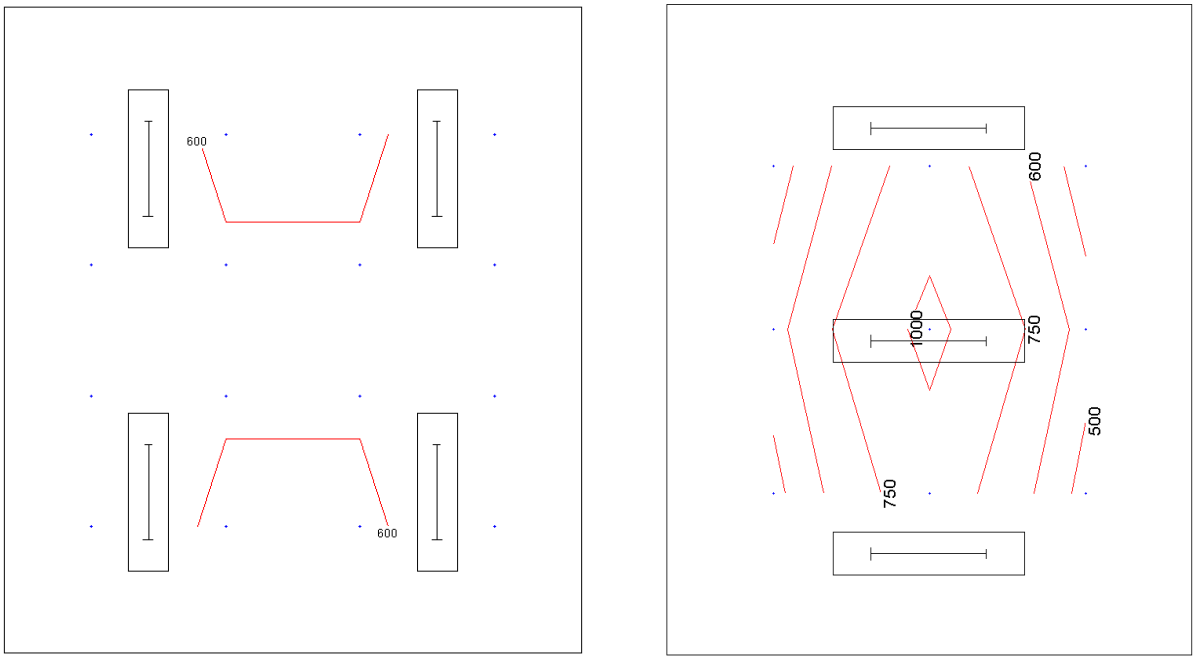
7.1 Popis umělých osvětlovacích soustav

Pro další postup při výpočtu úspor elektrické energie je třeba provést návrh umělé osvětlovací soustavy pro naše prostory. Jedná se o běžnou kancelář (viz. Obrázek 26), ve které je normou (ČSN EN 12464–1) stanoven požadavek na udržovanou osvětlenost 500 lx pro místnost č.1 (resp. 300 lx pro místnost č.2). Protože ve zvolených místnostech nejsou stanovena konkrétní místa zrakových úkolů, byl výpočet proveden tak, aby byl požadavek na hodnotu 500 lx (resp. 300 lx) splněn v každém výpočetním bodě.



Obrázek 26: Modelové místnosti uvnitř (na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2)

Návrh umělé osvětlovací soustavy byl proveden v programu WILS dle přesných rozměru daného prostoru z důvodů možnosti implementace výpočetních cyklů (viz Obrázek 27). V prostoru č.1 jsou umístěna čtyři přisazená zářivková svítidla – QUATTROC BODY 2x36W TC-L HFI WL6 L840. V místnosti č.2. jsou umístěna tři přisazená zářivková svítidla - ZC T5 228/12LOS ZK, 2x28W/840.[P17]

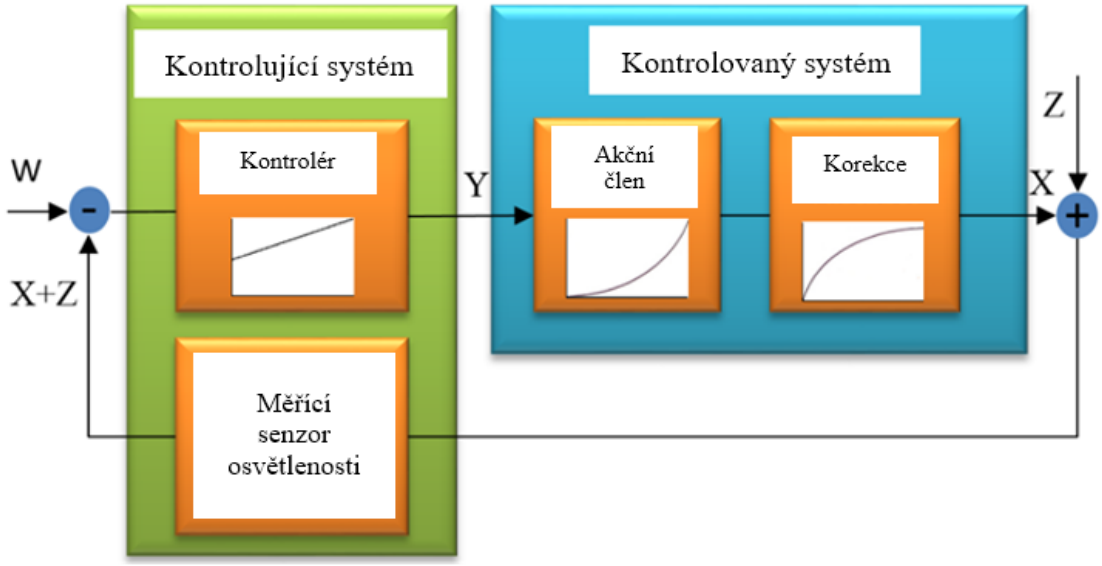


Obrázek 27: Návrh umělé osvětlovací soustavy
(na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2)

Výpočty umělého osvětlení v řešených prostorech stanoví maximální příkon osvětlovací soustavy. Z této hodnoty lze počítat spotřebu elektrické energie nestmívatelné osvětlovací soustavy pro předpokládané využití prostoru.

7.2 Způsob řízení osvětlovacích soustav v modelových místnostech

Námi dlouhodobě měřené osvětlovací soustavy ve vyšetřovaných místnostech využívají pro řízení osvětlení technologie DALI (stmívání) a KNX (řízení pomocí tzv. otevřené nebo uzavřené smyčky). Protože ověřování provádíme na malých osvětlovacích soustavách nespolupracujících s dalšími technologickými systémy, byla pro řízení využita uzavřená smyčka, která je dostatečná pro řízení osvětlení na konstantní hladinu osvětlenosti – viz. Obrázek 28.[14][P21]



Obrázek 28: Princip uzavřené smyčky regulující osvětlenost na konstantní hodnotu [P21]

Kde:
W … vstupní veličina, např. jas (bod nastavení),
X … skutečná hodnota (hodnota v luxech),
Y … kontrolovaná hodnota (stmívání 1 - 100%),
Z … rozhraní (hladina vnějšího světla).

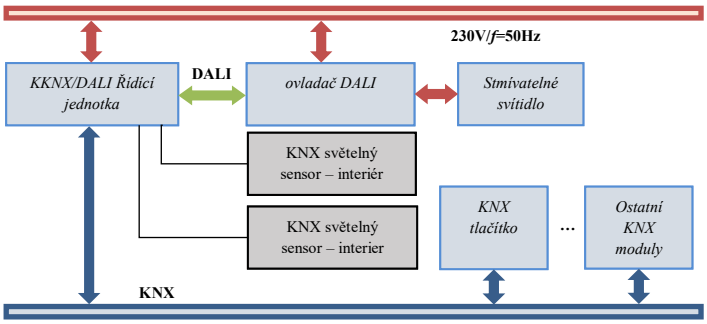
Požadovaná hladina osvětlenosti v místě zrakového úkolu je měřena jako regulovaná veličina. K regulované veličině je přičtena interferenční hodnota osvětlení způsobeného denní složkou světla a potom je v rámci regulační smyčky přivedena zpět do aktoru KNX.[12][P20]

V rámci regulace osvětlovacích soustav umělého osvětlení v měřených prostorách byly v místnosti č.1 a v místnosti č.2 použity rozdílné komponenty technologie KNX:

- Místnost č.1 – komponenty DALI Light Controller DLR/S 8.16.1M se dvěma senzory Light Sensor LF/U2.1.
- Místnost č. 2 – komponenty KNX/DALI Gateway N 141 se senzorem osvětlenosti Brightness Controller UP 255/ 11. [P15]

7.2.1 Místnost č.1 - KNX/DALI řídicí systém pro osvětlení

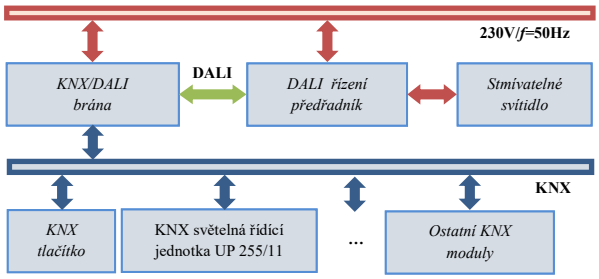
Systém DALI Light Controller má více možností typu řízení osvětlení. Svítidla lze regulovat podle různých typů křivek a dalších módů spínání. Nevýhodou tohoto systému je, že senzor není připojený na sběrnici, ale je přímo připojen do kontroléru (viz Obrázek 29). Regulace je zajištěna pomocí elektronických DALI předřadníků. Informace do aktoru jsou předávány ze dvou na sobě nezávislých senzorů umístěných na stropě. Dvě nezávislá čidla umožňují svítidlům v obou řadách pracovat nezávisle (režim master). Systém pracuje s regulačním krokem 0,1 %. Z důvodu hospodárnosti je omezena spodní hranice regulace na 5 % příkonu svítidla.[15][P18]



Obrázek 29: Blokové schéma pro řízení osvětlovacích soustav s použitím systému KNX [P22]

7.2.2 Místnost č.1 KNX/DALI brána

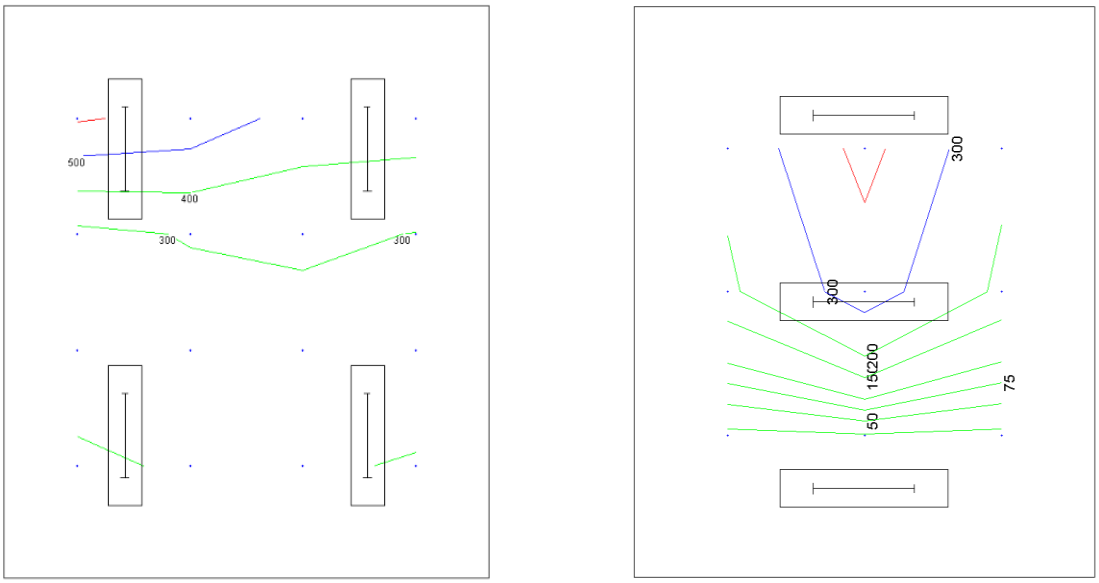
Systém KNX/DALI Gateway (viz Obrázek 30) nemá tak rozsáhlé regulační možnosti. Senzor je připojen přímo na sběrnici KNX, což umožňuje jednodušší programování. Pokud by vznikl požadavek na přenos informace z čidla na velkou vzdálenost, muselo by být zvoleno sběrnicové čidlo z důvodu možnosti ztráty dat vlivem úbytku napětí nebo rušení. DALI předřadníky jsou řízeny KNX aktorem (KNX/DALI Gateway N 141) a jedním sběrnicovým senzorem. Světelné řady byly nastaveny na 3 úrovně. Řada u oken je nastavena jako master a druhá a třetí řada byla nastavena jako slave. Senzor na stropě zasílá informace do aktoru, který vyhodnocuje požadavky na světelný tok v řadě master. Regulace světelného toku není plynulá. Je prováděna s minimálním krokem 5 %.[15][P22]



Obrázek 30: Blokové schéma řízení osvětlovacích soustav s použitím systému KNX/DALI Gateway [P22]

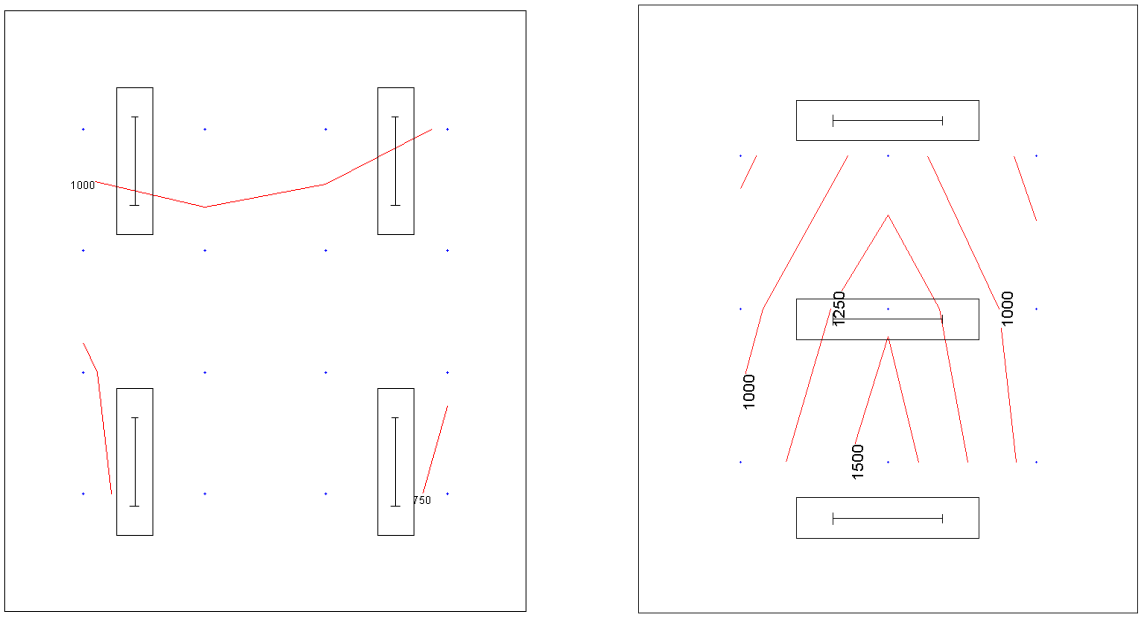
7.3 Aplikace predikčního modelu

Na základě znalosti průběhů osvětleností v čase a řešeného prostoru, které jsou způsobené denním osvětlením (rovnoměrně zatažená obloha), lze spustit cyklus výpočtů úrovní stmívání jednotlivých částí umělých osvětlovacích soustav (svítidla nebo řady svítidel) tak, aby byla splněna podmínka požadované minimální osvětlenosti v daném prostoru. Získáváme tak úrovně osvětlení (míra stmívání) umělé osvětlovací soustavy. Příklad úrovně stmívání umělé osvětlovací soustavy znázorňuje Obrázek 31 pro hladinu denní osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině. V rámci přepočtu hladiny stmívání na úroveň příkonu software pracuje s konečnou závislostí, u které se předpokládá, že měrný výkon svítidla se nebude s regulací měnit.[P1]



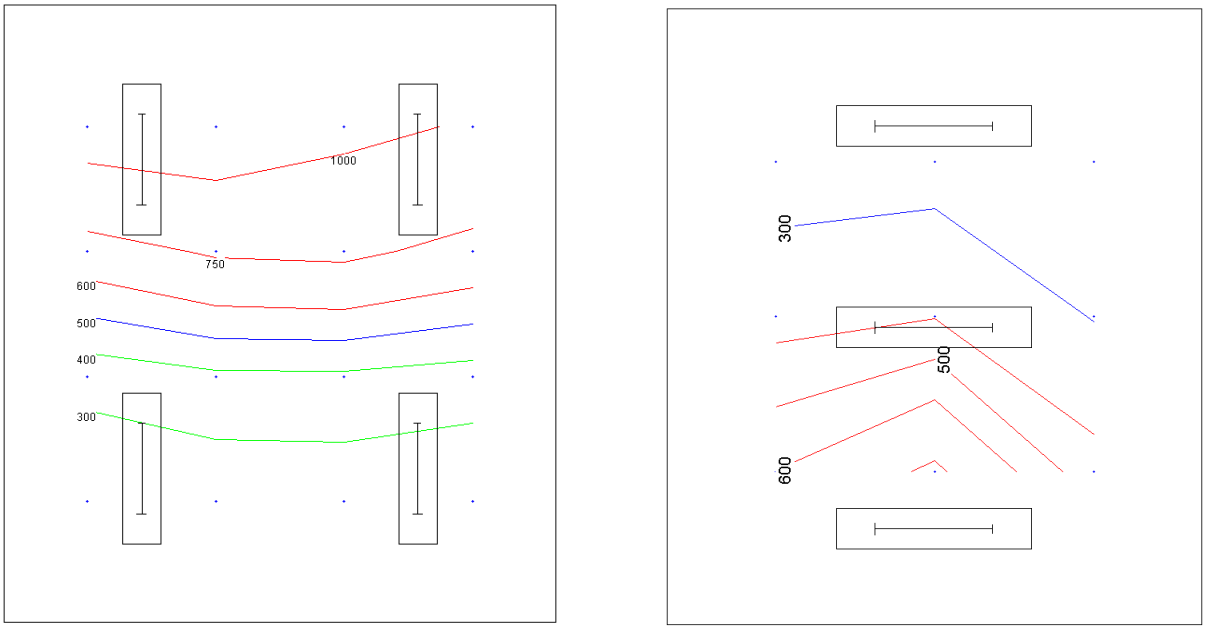
Obrázek 31: Převod hodnot činitele denní osvětlenosti na vnitřní osvětlenost v luxech (na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2)

Na Obrázku 31 jsou příklady hodnot činitele denní osvětlenosti, které jsou přepočtené na hodnoty osvětleností pro konkrétní čas a den v roce. Příklady výpočtů kombinace denního a umělého osvětlení pro jeden konkrétní čas v roce uvádí Obrázek 32.



Obrázek 32: Součet umělé osvětlovací soustavy na 100% s denní složkou osvětlenosti (na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2)

Po základním výpočtu osvětlovacích soustav (denní a umělé osvětlení), je možné v upravené verzi programu WILS přejít k výpočtu potenciálu regulace jednotlivých zadaných soustav umělého osvětlení (viz Obrázek 33).



Obrázek 33: Možnost regulace osvětlovací soustavy na konstantní hladinu osvětlenosti (na levé straně místnost č.1, na pravé straně místnost č.2)

Regulace osvětlovacích soustav při vlastních výpočtech probíhá v krocích po 10 % a to od 0 % do 100 %. Pro tento příklad byla zvolena lineární závislost mezi světelným tokem a příkonem. Při požadavcích na světelný tok jdoucí z osvětlovací soustavy menších než 10 % program tuto soustavu virtuálně odpojí. Pro praktické výpočty úspor osvětlovacích soustav je vhodné použití maximálně čtyř nezávisle řízených řad svítidel. Při použití více regulovaných osvětlovacích soustav dochází k výraznému nárůstu délky samotného výpočtu.[P4]

Výstupem může být kromě podrobného rozpisu odebíraných energií osvětlovací soustavy zkrácená (zjednodušená) tabulka, která může znázornit predikci úrovní stmívání jednotlivých svítidel (či řad svítidel) na základě předpokladu různých úrovní osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině při různých hladinách osvětlenosti.[P5]

Tabulka 11 udává míru regulace dvou osvětlovacích soustav R1 (řada 1) a R2 (řada 2) při různých intenzitách osvětlení na venkovní nezastíněné rovině. Například při hodnotě horizontální osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině 20 klx bude první řada osvětlovací soustavy umělého osvětlení svítit na 60 % a druhá řada bude svítit na 70 %.

Tabulka 11: Regulace jednotlivých řad osvětlovací soustavy v [%] pro místnost č.1

Venkovní osvětlenost	**Řady osvětlovací soustavy**	
D_V [lx]	**R1 [%]**	**R2 [%]**
1000	100	100
5000	90	90
7000	90	90
10000	80	90
20000	70	60
25000	60	40

Tabulka 12 udává taktéž míru regulace umělé osvětlovací soustavy pro místnost č.2. V této místnosti se nacházejí tři svítidla rozdělená do třech osvětlovacích soustav R1 (řada 1), R2 (řada 2), R3 (řada 3) při různých intenzitách osvětlení na venkovní nezastíněné rovině. Například při hodnotě horizontální osvětlenosti na venkovní nezastíněné rovině 20 klx nebude první řada osvětlovací soustavy umělého osvětlení svítit, druhá řada také nebude svítit a třetí řada pojede na 30 %.[P6]

Tabulka 12: Regulace jednotlivých řad osvětlovací soustavy v [%] pro místnost č.2

Venkovní osvětlenost	**Řady osvětlovací soustavy**	
D_V [lx]	**R1 [%]**	**R2 [%]**
1000	20	40
5000	0	30
7000	0	30
10000	0	30
20000	0	0
25000	0	0

8 Analýza navrženého predikčního modelu dlouhodobým měřením

Tato kapitola pojednává o verifikaci naměřených hodnot reálného provozu s hodnotami vypočtenými dle postupu uvedeného v předcházejících kapitolách.

8.1 Modelová místnost č.1

V rámci první modelové místnosti probíhalo dlouhodobě měření v časovém rozmezí od 1. 12. 2012 do 18. 2. 2013. Vzhledem k tomu, že nebylo možno místnost zcela vyhradit pro potřeby měření, nejsou k dispozici data ze všech dnů v tomto období. Pro porovnání možností úspor a stmívatelné osvětlovací soustavy stmívané na konstantní hladinu osvětlenosti (500 lx) byl stanoven předpoklad provozu v tomto prostoru (kancelář). Bylo stanoveno, že místnost bude v provozu pouze pro jednosměnný provoz ve všedních dnech (pondělí až pátek) od 7:00 hodin do 15:30 hodin. V Tabulce 13 je provedeno porovnání naměřených hodnot spotřeby stmívatelné osvětlovací soustavy s predikovanými hodnotami spotřeby energie, vygenerovanými predikčním modelem a spotřebou stejné osvětlovací soustavy provozované na 100 %, tedy v nestmívatelném režimu.[P22]

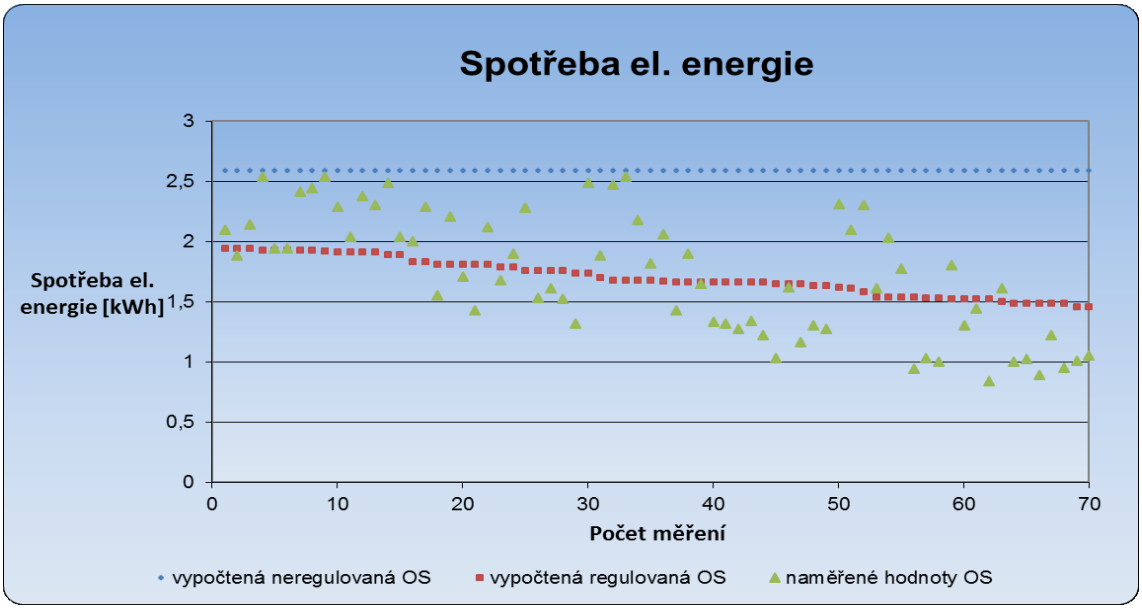
Tabulka 13: Ukázka vybraných hodnot z měření a výpočtu spotřeby elektrické energie

Den měření	Celkový příkon el. energie [kWh]	Regulované hodnoty dle sw [kWh]	Naměřené hodnoty [kWh]
1	2,59	1,92	2,27
10	2,59	1,94	2,35
15	2,59	1,94	1,9
20	2,59	1,81	1,71
25	2,59	1,76	2,28
30	2,59	1,74	2,49
35	2,59	1,68	1,82
40	2,59	1,66	1,33
45	2,59	1,66	1,03
50	2,59	1,61	2,31
55	2,59	1,54	1,77
60	2,59	1,52	1,3
65	2,59	1,49	1,02
70	2,59	1,46	1,05

Z hodnot uvedených v tabulce vyplývá, že reálná i predikovaná úspora elektrické energie v jednotlivých dnech není oproti nestmívatelné osvětlovací soustavě příliš vysoká. Toto je dáno tím, že ověřovací měření probíhalo v zimních měsících, ve kterých je v zeměpisných podmínkách České republiky výrazně méně denního světla než v měsících letních. Z Grafu 1, kde jsou uvedeny spotřeby energií v jednotlivých dnech, lze pozorovat, že reálné naměřené hodnoty spotřeby se pohybovaly pod i nad predikovanými hodnotami. Hodnoty nižší reálné spotřeby elektrické energie byly zaznamenávány ve dnech s minimální oblačností, naopak hodnoty vyšší reálné spotřeby byly naměřeny ve zhoršených

metrologických a rozptylových podmínkách. Při porovnání dlouhodobého odhadu spotřebované energie ve vyšetřovaném časovém rozsahu došlo téměř ke shodě, kdy predikční model odhadoval 35 % úspor elektrické energie pro modelovou místnost a výše stanovený časový úsek. Naměřené hodnoty spotřeby reálné osvětlovací soustavy stmívané na konstantní hladinu osvětlenosti vykazovaly 34 % úspory elektrické energie.

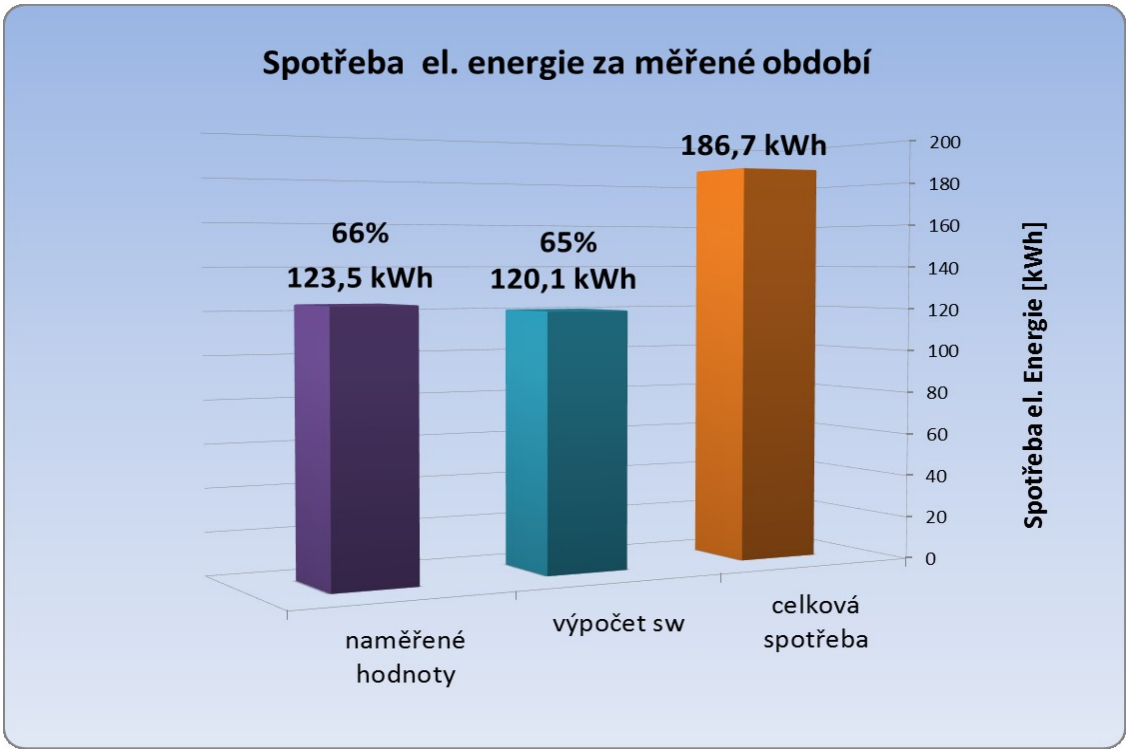
Předpokládali jsme, že dlouhodobě by měly být naměřené úrovně uspořené elektrické energie vyšší než je predikovaná úspora energie. Vzhledem k tomu, že při ověřování byly v mnoha případech meteorologické podmínky horší než podmínky stanovené modelem rovnoměrně zatažené oblohy, můžeme konstatovat, že model lze využít i v průmyslových lokalitách se zhoršenými rozptylovými podmínkami.[P2]



Graf 1: Spotřeba elektrické energie pro modelovou místnost č.1

Na Grafu 2 je zobrazena spotřeba elektrické energie během 72 měřících dnů v období prosinec až leden za pracovní dobu, viz. popis v předchozí kapitole. Celková spotřeba elektrické energie bez jakékoliv regulace v našem testovaném období činila 186,5 kWh. Spotřeba osvětlovací soustavy při regulaci námi vyvinutým software je 120,5 kWh. Naměřené hodnoty v tomto období činily 123,4 kWh.

Z výsledků je patrné, že vyvinutý predikční model s regulací (KNX) osvětlovací soustavy na konstantní hladinu osvětlenosti 500 lx pro každý bod měřící sítě se velice přiblížil skutečné spotřebě osvětlovací soustavy.[P23]



Graf 2:Srovnání celkové spotřeby elektrické energie s regulovanou osvětlovací soustavou a s reálnými daty pro místnost č.1

8.2 Modelová místnost č.2

Tabulka 14 porovnává hodnoty modelové místnosti č. 2, které jsme vypočetli pomocí vyvinutého softwaru s naměřenými hodnotami. Hodnoty jsou naměřeny v časovém rozmezí od 8:00 do 16:30 hodin a v měsících únor až červen (není zde kontinuální měření, v Tabulce 14 jsou zobrazeny pouze vybrané hodnoty z měření na ukázku). Z tabulky je patrné, že v prvním sloupci jsou vybrané hodnoty z měření, druhý sloupec znázorňuje celkový příkon umělé osvětlovací soustavy, což je 1,34 kWh/pracovní doba, v třetím sloupci jsou vypočtené hodnoty pro rovnoměrně zataženou oblohu. Ve čtvrtém sloupci jsou naměřené reálné hodnoty v průběhu od 1. 2. do 5. 6. pro veškeré počasí. (kontinuální měření každý den v měsíci se nepodařilo uskutečnit).

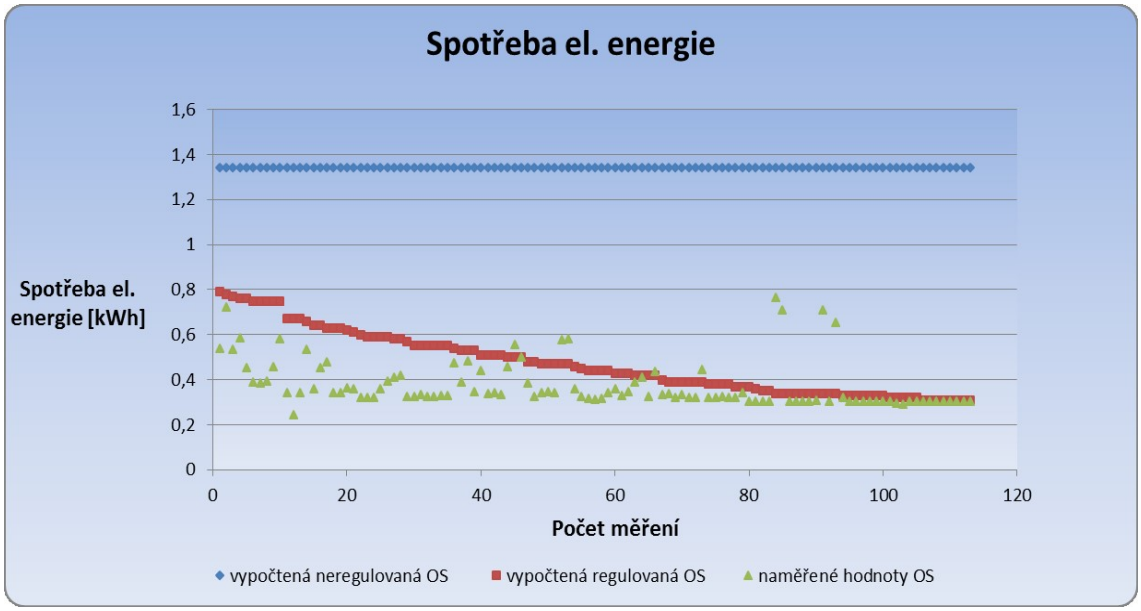
Tabulka 14: Ukázka vybraných naměřených a vypočtených hodnot spotřeby elektrické energie [P7]

Den měření	Celkový příkon el. energie [kWh]	Regulované hodnoty dle sw [kWh]	Naměřené hodnoty [kWh]
1	1,34	0,79	0,53
10	1,34	0,75	0,58
15	1,34	0,65	0,36
20	1,34	0,62	0,36
25	1,34	0,59	0,39
30	1,34	0,55	0,33
35	1,34	0,54	0,47
40	1,34	0,51	0,34
45	1,34	0,5	0,49
50	1,34	0,47	0,34
55	1,34	0,44	0,32
60	1,34	0,43	0,33
65	1,34	0,42	0,43
70	1,34	0,39	0,32
75	1,34	0,38	0,32
80	1,34	0,35	0,3
85	1,34	0,34	0,31
90	1,34	0,34	0,32
95	1,34	0,33	0,31
100	1,34	0,32	0,29

Z Tabulky 14 a z Grafu 3 jsou vidět rozdíly spotřeby elektrické energie osvětlovací soustavy bez regulace, s regulací a reálně naměřených hodnot v dané místnosti. Při použití třech svítidel bez regulace (provoz při celé pracovní době) je spotřeba elektrické energie cca 1,34 kWh za pracovní dobu.

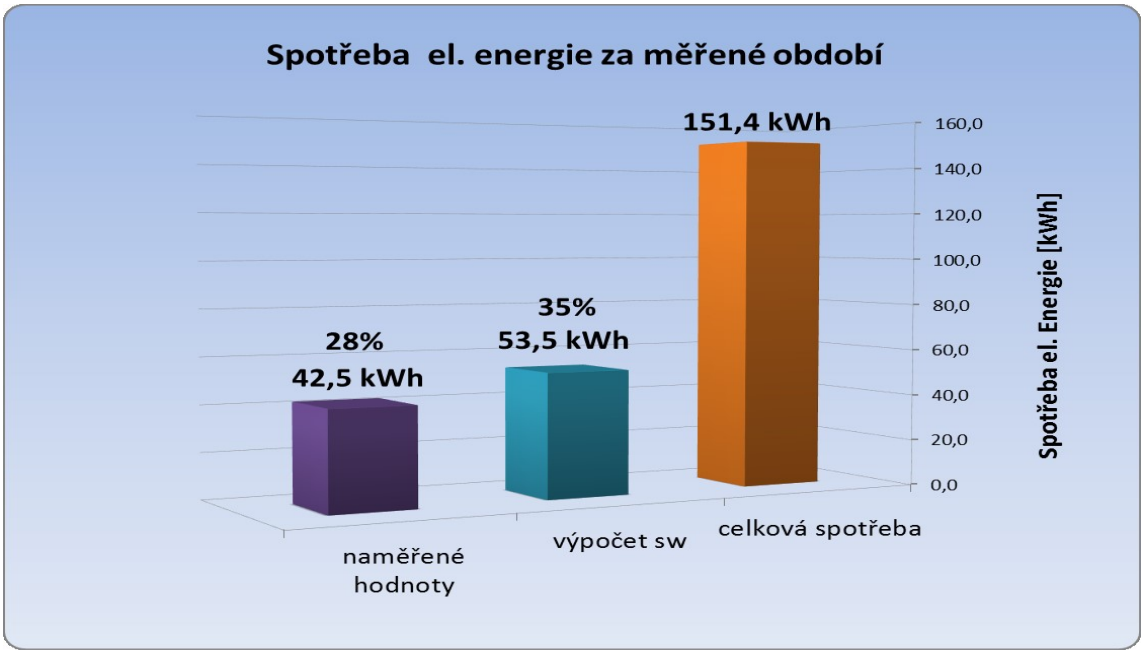
Z naměřených dat je jasně patrné, že s prodlužujícími se dny (zima - léto) dochází k vyšším úsporám elektrické energie u umělé osvětlovací soustavy.

Porovnáním naměřených a modelových hodnot jsme došli k závěru, že díky vyššímu výskytu bezoblačné oblohy vykazovala naměřená data nižší spotřebu energie než předpokládal propočet navrženého modelu. Tyto výsledky jsme očekávali, protože model pracuje pouze s rovnoměrně zataženou oblohou.



Graf 3: Spotřeba elektrické energie pro modelovou místnost č.2

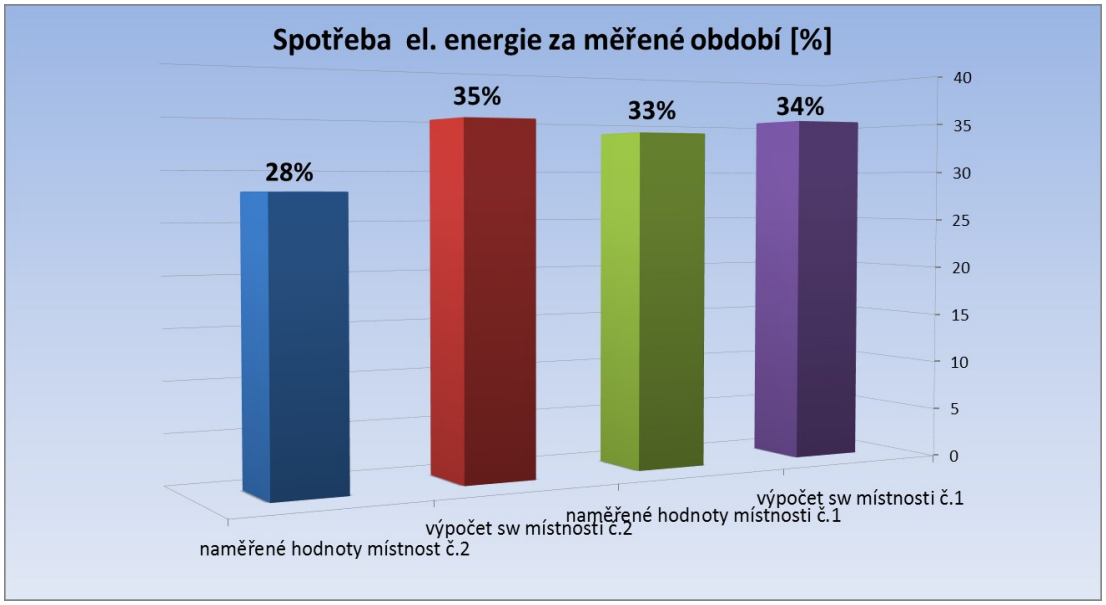
Na Grafu 3 a 4 je zobrazena spotřeba elektrické energie během 105 měřících dnů v období od února do června za pracovní dobu (viz popis výše). Celková spotřeba elektrické energie bez jakékoliv regulace v našem testovaném období činila 151,4 kWh. Spotřeba osvětlovací soustavy při regulaci pomocí vyvinutého softwaru je 53,5 kWh. Naměřené hodnoty v tomto období činily 42,5 kWh.[P24]



Graf 4: Srovnání celkové spotřeby elektrické energie s regulovanou osvětlovací soustavou a s reálnými daty v místnosti č.2

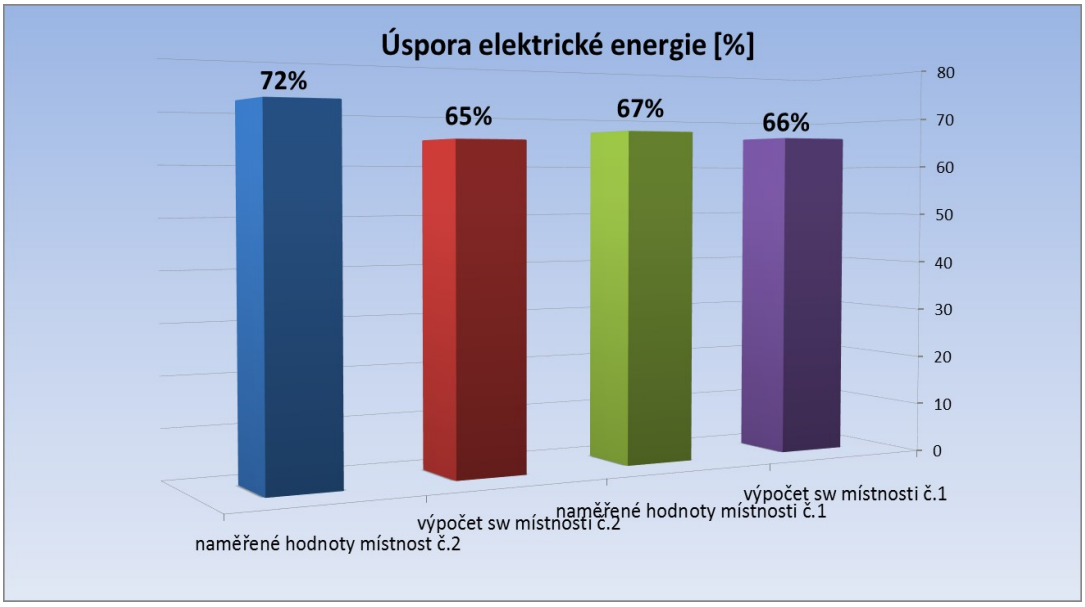
8.3 Celkové srovnání modelových místností

Pro přiblížení jakých úspor lze dosáhnout za použití regulačních systémů pro řízení osvětlovacích soustav díky příspěvkům denního světla jsou modelové místnosti č.1 a č.2 vloženy do jednoho grafu. V Grafu 5 je názorně vidět, že rozdíly procentuální spotřeby elektrické energie mezi reálnými a vypočtenými hodnotami jsou hodně podobné.[P3]



Graf 5: Porovnání spotřeb elektrických energií pro modelové místnosti č.1 a č.2

Graf 6 zobrazuje procentuální úsporu spotřeby elektrické energie za námi měřené období (rozmezí asi půl roku), je vidět, že úspory jsou značné a z toho plynoucí úspora finančních prostředků. I přes počáteční vysokou investici do stmívatelných osvětlovacích soustav a jejich řízení je návratnost těchto prostředků velice rychlá. Všechno záleží, na tom jak se nastaví regulace a řízení celého systému pro osvětlovací soustavy. Úspory jsou především závislé na velikosti a počtu osvětlovacích otvorů. Díky simulaci v softwaru WDLS a následně i v softwaru WILS lze jednoduše zjistit, jaká úspora bude pro daný prostor a zda se případná investice do systému regulací finančně vyplatí, popř. za jak dlouho se nám vrátí.



Graf 6: Porovnání úspor elektrických energií pro modelové místnosti č.1 a č.2

9 Shrnutí dosažených výsledků a přínosů disertační práce

Při návrhu vhodného modelu pro výpočet úspor elektrické energie jsem použil model rovnoměrně zatažené oblohy, který je méně příznivý než průměrné typy obloh během roku a umožňuje při výpočtu eliminovat orientaci osvětlovacích otvorů vůči světovým stranám. Díky tomuto modelu oblohy a pomocí odborné literatury jsem vytvořil matematický model, který by mohl být vhodný pro výpočty regulujících osvětlovacích soustav, a tím k získání pravděpodobných příkonů svítidel během celého roku za různých venkovních světelných podmínek. Tento výpočet byl spojen s výpočetními programy pro osvětlovací soustavy WDLS a WILS od firmy ASTRA. V tomto modelu bylo důležité vypočítat průběhy denních osvětleností na venkovní nezastíněné rovině pro naše zeměpisné souřadnice s využitím již zmiňované rovnoměrně zatažené oblohy. Po výpočtu hodnot denních osvětleností v časovém intervalu od východu po západ Slunce jsem přepočítal hodnoty na vnitřní intenzitu osvětlení denního světla. Hodnoty vnitřních osvětleností v průběhu celého dne ukazují, kolik je potřeba, během tohoto časového intervalu, použít složky umělého osvětlení, aby byly dodrženy předepsané hodnoty hladin osvětlení dle normy ČSN EN 12 464-1 Osvětlení pracovních prostor - vnitřní pracovní prostory.

V návaznosti na předcházející teoretický rozbor jsem si ve výpočetním programu WILS zvolil vhodnost rozdělení soustav umělého osvětlení. Není dobré, aby každé svítidlo regulovalo samo, a to z důvodů náročnosti pro výpočetní úkon programu. Vhodné je zvolit jednotlivé sekce svítidel vůči vzdálenosti od osvětlovacích otvorů, aby byly dosaženy podobné podmínky dopadajícího denního světla pod jednotlivá svítidla.

Následně byly zvoleny prostory, kde bylo možné testovat a měřit skutečný stav. Jeden prostor byl v budově firmy TRIMR a druhý v areálu VŠB-TU Ostrava, Fakulty stavební. I když hodnoty nejsou z celého roku, i tak se mi podařilo pokrýt jak zimní, tak jarní hodnoty měření. Delší měření nebylo možné z důvodů potřeby firmy simulovat a zaškolovat své zaměstnance a obchodní partnery a v druhém případě z důvodu probíhající výuky v tomto inteligentním domku.

Z naměřených dat vyplývá, že při verifikaci s výpočtem v programu WILS jsem se přiblížil ke shodnosti v řádu několika procent. Tento nástroj je vhodný pro projektanty, kteří dostanou relevantní výsledky o příkonu osvětlovací soustavy a mohou konkrétními čísly zaručit investorovi návratnost investice do osvětlovací soustavy. Na základě zhodnocení finančních nákladů je dána možnost investorovi rozhodnout se, zda se mu opravdu vyplatí zainvestovat do regulovaných osvětlovacích soustav nebo ne.

10 Návrh dalšího směrování výzkumu a vývoje

Z navržených teorií je dosaženo předpokladu vhodnosti návrhu výpočetního modelu, který se při verifikaci s reálnými hodnotami liší v řádu jednotek procent. Tato situace je postačující pro základní předpoklady regulace osvětlovacích soustav vhodná. V dalším kroku je potřeba si uvědomit, že jsem spoustu aspektů nebral v úvahu z důvodů snadnějšího ověření vhodnosti mého navrženého modelu. V další fázi je potřeba se na tyto aspekty zaměřit, a tím vyřešit problém automatického řízení celých budov tzv. „smart home“.

Dnešní automatizace systémů obsahuje i další možnosti regulace, a to například pohybové čidla, přítomnostní senzory a pak i další kombinace chytrých domů jako regulace žaluzií, změny barevného tonu svítidel během dne atd.

Zjištěné informace pro další výzkum – standardně řízené osvětlovací soustavy s čidly osvětleností umístěnými na stropech místností umožňují v některých případech i regulaci na hodnoty pod normativními požadavky, což je z hygienického hlediska naprosto neakceptovatelné.

Tento nástroj by bylo vhodné otestovat ve větších prostorech, jako jsou výrobní haly nebo velkokapacitní kanceláře, kde není komplexní regulace osvětlení, vytápění, chlazení, větrání atd.

Základní řízení osvětlovacích soustav se finančně přibližuje uživatelům, proto je to jedno z důležitých témat, kterým je potřeba se dále věnovat.

11 Závěr

V teoretické části je provedeno základní seznámení s problematikou denního světla a jeho pozitivním vlivem na lidský organismus. Denní světlo je jedna z mála energií, která je zdarma a přesto se příliš nevyužívá ke zvýšení úspor elektrické energií. Elektrickou energii je třeba vyrobit a to za přispění značných finančních nákladů s negativním vlivem na přírodu.

Pro vnitřní pracovní prostory nám ale nestačí znát pouze prostup denního světla přes osvětlovací otvory, ale je potřeba denní osvětlení doplnit umělým a to hlavně v zimních měsících, kdy je Slunce odvráceno od našich zeměpisných souřadnic a je ho méně, nebo při vícesměnném provozu ve výrobních podnicích. Umělé osvětlení se potřeba i pro orientaci v prostoru v nočních hodinách. Umělému osvětlení je věnovaná kapitola v teoretickém seznámení s problematikou mé disertační práce.

Nesmíme opomenout ani značně se zpřísňující legislativu Evropské unie. Ve své práci jsem uvedl základní normy, přepisy a vyhlášky, které se zabývají výpočty jak energetických náročností osvětlovacích soustav, tak i tlakem na snižování příkonů elektrické energie.

V další části práce je proveden stručný přehled výpočetních programů, které umí nejen výpočet denní a umělé složky osvětlovacích soustav, ale i výpočet energetické náročnosti na jejich provoz. Tyto výpočetní programy vycházejí z výpočtů dané legislativou Evropské unie a jsou velice náročné na zadání vstupních parametrů, které by vedly k pravdivým výsledkům.

Klíčovou částí mé práce, a tudíž i přínosem je navržený matematický model a jeho následná implementace do výpočetního programu WILS.

Navržený matematický model vychází z rovnoměrně zatažené oblohy. Je to stav oblohy, který je z energetického hlediska méně výhodný než průměrná obloha během roku. Tento stav oblohy je náročné měřit. Model rovnoměrně zatažené oblohy jsem zvolil z důvodu eliminace světových stran vůči osvětlovacím otvorům projektovaných místností. Dalším krokem mého modelu bylo spočítat hodnotu denního osvětlení na venkovní nezastíněné rovině právě s využitím rovnoměrně zatažené oblohy. Tyto hodnoty denního osvětlení bylo potřeba vypočítat pro naše zeměpisné souřadnice během celého roku a to od východu po západ Slunce. Z těchto hodnot venkovní osvětlenosti jsem pak přes známý činitel denního osvětlení D přepočítal hodnoty na vnitřní intenzitu osvětlení denního světla. Díky těmto hodnotám vnitřních denních osvětleností ve zvolené síti pro celý prostor jsem pak schopen dopočítat potřebnou složku umělého osvětlení. Složky denního a umělého osvětlení jsou stanoveny dle daného prostoru normou ČSN EN 12-464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory. Při zjištění potřebné složky umělého osvětlení během zvolené doby získám potřebný příkon osvětlovací soustavy. Ve výpočtech jsem zanedbával některé vlivy, které jsou dnes už samozřejmostí v inteligentních budovách, jako jsou přítomnostní senzory, pohybová čidla, automaticky ovládané žaluzie atd. Ve výpočetním programu při implementaci bylo základním problémem zajistit správnou reakci osvětlovacích soustav na okamžitý stav denního osvětlení. Při umístění čidel regulačního systému ve vnitřním prostoru měří čidla součet denního a umělého osvětlení na různých místech zrakového úkolu a systém reguluje na nastavenou hodnotu hladiny osvětlenosti. V tomto případě je ale potřeba většího počtu světelných čidel a i jiného způsobu regulace. Při načtení modelu do výpočetního programu můžeme simulovat různé stavy v interiéru. Při rozmístění kontrolních výpočetních bodů v místech zrakového úkolu bylo potřeba najít vhodnou kombinaci pro regulování

soustav svítidel, aby byla dodržena požadovaná hladina osvětlenosti ve všech těchto stanovených bodech při dosažení co největších energetických úspor. Zvolil jsem postup pro řízení celé osvětlovací soustavy a je na projektantovi, jak vhodně zvolí sdružení svítidel do jednotlivých soustav. Zvolil jsem krok světelného toku 10 %. Výpočetní program počítá nejvhodnější kombinaci nastavení regulace svítidel tak aby došlo k co největším úsporám při spotřebě elektrické energie za dodržení nastavených hladin osvětleností ve všech bodech zrakového úkolu. Základní vstupní hodnotou je venkovní horizontální osvětlenost a jedinou podmínkou použitelnosti varianty regulace je, aby součtová osvětlenost ve všech bodech sítě byla rovna nebo větší než je nastavená. Závislost mezi příkonem a světelným tokem není lineární, ale pro zjednodušení výpočtů předpokládám, že svítidla mají křivku téměř lineární a při svitu pod 10 % přestávají svítidla svítit. Při řešení konkrétních případů modelových místností bylo třeba se zamyslet nad vhodným rozdělením svítidel do samostatně regulovaných soustav. Teoreticky je možné rozdělení do nekonečného počtu soustav, ale prakticky pro výpočetní algoritmus doporučuji maximálně 4 osvětlovací soustavy a to z hlediska doby, kterou bude program potřebovat pro výpočet. Analytické řešení výpočetního programu nabízí dvě možnosti. První počítá kombinaci zregulování jednotlivých soustav (vhodné pro nastavení regulačních programů). Druhá počítá příkony osvětlovací soustavy pro jednotlivé dny jak při regulované, tak i při neregulované osvětlovací soustavy. Výsledkem je i celková roční spotřeba elektrické energie.

V řešené části ověřování výpočtů jsou v současné době k dispozici data ze zimních měsíců (prosinec - březen), kdy se pohybuje Slunce nejníž během celého roku a denní průběhy osvětleností se mění nejčastěji, popř. jejich stav je energeticky méně optimální než námi navrhovaný model pro rovnoměrně zataženou oblohu. Díky úpravě softwaru WILS, který spolupracuje s vypočtenými daty, je možno provádět výpočet regulace jednotlivých soustav umělého osvětlení. Významné také je, že počítá jak celkový příkon umělé osvětlovací soustavy neregulované, tak i příkon soustavy regulovatelné s využitím příspěvků denního světla.

Porovnání průběhů vypočtených dat (regulovatelná osvětlovací soustava a neregulovatelná, resp. stmívatelná a nestmívatelná osvětlovací soustava) a reálně naměřených dat je uvedeno v poslední kapitole této disertační práce. Z tohoto porovnání vyplývá, že pro výpočty během toto období stačí počítat s rovnoměrně zataženou oblohou. Vypočtená data jsem verifikoval s naměřenými daty a z porovnání zjistil, že se hodnoty liší v řádu několika procent, což má značný přínos a zpřesnění výpočtů energetické bilance osvětlovacích soustav.

Důležitá je rovněž optimalizace softwaru s možností vložení teoretických výpočtů a posléze zjednodušení uživatelského rozhraní pro vstupní a výstupní parametry.

Seznam literatury

[1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.

[2] KITTLER, Richard. *Daylight science and daylighting technology*. New York: Springer, 2011. ISBN 978-1-4419-8815-7.

[3] DARULA, Stanislav. *Daylighting: In the exterior and in the interior*. Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2011. ISBN 978-80-227-3553-7.

[4] DILAURA, David, Kevin HOUSER, Richard MISTRICK and Gary STEFFY. *The Lighting Handbook: Reference and Application*. 10th edition. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011. ISBN 978-0-87995-241-9.

[5] DARULA, Stanislav. *Osvětlování světlovody*. Praha: Grada, 2009. Stavitel. ISBN 978-80-247-2459-1.

[6] MUNEER, Tariq, Christian GUEYMARD and Harry KAMBEZIDIS. *Solar radiation and daylight models: (with software available from companion web site)*. 2nd ed. Burlington, MA: Elsevier Butterworth Heinemann, c2004. ISBN 0-7506-5974-2.

[7] RYBÁR, Peter. *Denní osvětlení a oslunění budov*. Brno: ERA group, 2002. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-865-1733-0.

[8] HABEL, Jiří. *Světelná technika a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1995. ISBN 80-901985-0-3.

[9] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Jaroslav ŠNOBL, Daniel DIVIŠ a Dionýz GAŠPAROVSKÝ. *Úspory energie v osvětlování při hodnocení energetické náročnosti budov*-MPO,2009

[10] RUSNÁK, Anton. *Meranie a hodnotenie spektrálnych charakteristík slnečného žiarenia*. Bratislava, 2014. Dizertačná práca. Slovenská technická univerzita v Bratislavě.

[11] KAPLAN, Vít. *Moderní řízení osvětlovacích soustav*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta elektrotechniky a informatiky.

[12] CHIUGNA. Monica, Andy MAHDAVI, Rossano ALBATICI and Antonio FRATTARI, "*Energy efficiency of alternative lighting control systems,*" Lighting Research & Technology, vol. 44, pp. 397-415, Dec 2012

[13] MARDALJEVIC, John, Martin ANDERSEN and Jeppe CHRISTOFFERSEN. *Dynamic light retreat*. In: CIE 27th Session • Sun City/*ZA*. SUN CITY/SOUTH AFRICA, 2011, s. 93-111. ISBN 978 3 901906 99 2.

[14] ALIAKSEYEU, Dzmitry, John MASON, Bernt MEERBEEK, Henry van ESSEN and Stefan. OFFERMANS, "*The Role of Ambient Intelligence in Future Lighting Systems*," in Ambient Intelligence. vol. 7040, ed, 2011, pp. 362-363.

[15] BYUN, Ji, Ivo HONG, Boseok KANG and Sohee PARK, "*Implementation of an Adaptive Intelligent Home Energy Management System using a Wireless Ad-hoc and Sensor Network in Pervasive Environments*," in 2011 20th International Conference on Computer Communications and Networks, ed, 2011.

[16] STANĚK, Pavel. Výpočty energetických úspor v budovách při využití denního světla. In: Kurz osvětlovací techniky XXIX. s. 29-34. ISBN 978-80-248-2832-9.

[17] HARDARDOTTIR, Pordis. DYNAMIC LIGHT RETREAT. In: *Proceedings of CIE 2010 "Lighting Quality and Energy Efficiency*. Vienna, Austria, 2010, s. 541-549. ISBN 978 3 901906 83 1.

[18] DVOŘÁČEK, Karel. *Energetické požadavky na osvětlení podle ČSN EN 15193*. Časopis světlo., 2008(4), 42-44. ISSN 1212-0812.

[19] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATION a INTERNATIONALE BELEUCHTUNGS KOMMISSION. 26th session of the CIE(1955): 4 July - 11 July, 2007, Beijing, China : proceedings. Vienna, Austria: CIE Central Bureau, 2007. ISBN 9783901906596.

[20] JIRÁSKOVÁ, Milena a Lubor JIRÁSEK. Lidský organismus a záření. *Časopis Světlo*. 2007(4).

[21] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2002/91/ES ze dne 16. prosince 2002 o energetické náročnosti budov, Úřední věstník Evropské unie 12/sv. 2 Brusel, 4.1.2003*

[22] Vyhláška 148/2007 o energetické náročnosti budov. In: *Sbírka zákonů*. 2007, ročník 2007, částka 53, číslo 148.

[23] ČSN 73 0580-1 *změna Z2 Denní osvětlení budov*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

[24] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení: Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[25] TNI 73 0327. *Energetická náročnost budov: Energetické požadavky na osvětlení*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

[26] ČSN EN 730581. *Oslunění budov a venkovních prostor – Metoda stanovení hodnot*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2009

[27] ČSN EN 15193. *Energetická náročnost budov: Energetické požadavky na osvětlení*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2008

[28] TNI 15193 *Energetická náročnost budov – Energetické požadavky na osvětlení* (Technická normalizační informace 1.návrh 2008) – 17-22

[29] *Optické záření* [online]. [cit. 2017-08-10]. Dostupné z: http://madico.cz/aktuality/skodi-okenni-folie-rostlinam/

[30] *Informační stránky Českého hydrometalurgického ústavu* [online]. [cit. 2015-08-14]. Dostupné z: http://www.infomet.cz/index.php?id=read&idd=1293892370

[31] *Vizualizační a optické metody* [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/

[32] HABEL, Jiří a Petr ŽÁK. *Elektrické světlo 1* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2011 [cit. 2015-02-10]. Dostupné z: https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/ES1/A5M15ES1_final.pdf

[33] ASTRA MS SOFTWARE s.r.o. Wils 6.3.12.1: Manual. Olomouc, 2011. [online]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz.old/mpsd/files/manuals/Wils_manual.pdf

[34] DIAL GMBH. DIALux Version 4.9: User manual. Německo, 2011. [online]. Dostupné z: http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/manuais/dialux_manual_ingles.pdf

[35] RELUX INFORMATIK AG. Relux vision 1.1: Manual. Švýcarsko, 2007. [online]. Dostupné z: http://www.relux.biz/pdf/manual_vision_09.pdf

[36] *Úspory elektřiny* [online]. [cit. 2015-09-04]. Dostupné z: http://energetika.cz/?id=71&cl=356

Seznam vlastních publikací a ostatních výstupů

Soupis publikací souvisejících s tématem práce

Web of Science a Scopus

[P1] NOVÁK, Tomáš, Jan VAŇUŠ, Jan ŠUMPICH, Jiří KOZIOREK, Karel SOKANSKÝ a Roman HRBÁČ. Possibility to Achieve the Energy Savings by the Light Control in Smart Home. In: *The 7th International Scientific Symposium ELEKTROENERGETIKA*. 2013, s. 260-263. ISBN 978-80-553-1441-9

[P2] ŠUMPICH, Jan, Tomáš NOVÁK, Zbyněk CARBOL a Karel SOKANSKÝ. Software calculation tool for light savings in the buildings compared with real measured data. In: *Electric Power Engineering*. 2013, s. 677-680. ISBN 978-80-248-2988-3.

[P3] NOVÁK, Tomáš, Karel SOKANSKÝ a Jan ŠUMPICH. Software calculation tool for light savings in the buildings. In: *CIE Centenary Conference „Towards a New Century of Light*. 2013, s. 928-933. ISBN 978-3-902842-44-2.

[P4] ŠUMPICH, Jan, Zbyněk CARBOL, Tomáš NOVÁK a Karel SOKANSKÝ. Electrical energy savings possibilities in lightening of indoor workplace while using both daylight and artificial light. In: *Electric Power Engineering 2012*. Brno, 2012, s. 1165-1168. ISBN 978-80-214-4514-7.

Scopus

[P5] ŠUMPICH, Jan, Tomáš NOVÁK, Zbyněk CARBOL a Karel SOKANSKÝ. Calculation of saving possibilities in interior lighting system using both daylight and artificial light. *Przeglad elektrotechniczny*. Warszawa, 2013(6), 345-347. ISSN 0033-2097.

[P6] NOVÁK, Tomáš, Petr BOS, Jan ŠUMPICH a Karel SOKANSKÝ. Statistical evaluation of dimmable interior lighting system consumption using daylight. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. VŠB—Technical University of Ostrava: Springer Verlag, 2016, s. 171-180. DOI: 10.1007/978-3-319-27644-1_16. ISBN 978-331927642-7.

[P7] NOVÁK, Tomáš, Petr BOS, Jan ŠUMPICH a Karel SOKANSKÝ. Statistical Evaluation of Dimmable Interior Lighting System Consumption Using Daylight. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing.*, 2015, s. 171-180. ISBN 978-3-319-27642-7.

Ostatní

[P8] ŠUMPICH, Jan, Karel SOKANSKÝ, Tomáš NOVÁK a Zbyněk CARBOL. Stanovení denní osvětlenosti pod rovnoměrně zataženou oblohou za účelem snížení energetické náročnosti v budovách. In: *Světlo 2011*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, s. 207-209. ISBN 978-80-248-2480-2.

[P9] CARBOL, Zbyněk a Jan ŠUMPICH. POSSIBILITIES OF INCREASING THE SHARE OF ELECTRICITY GENERATED BY RENEWABLE SOURCES. In: *SEKEL 2011 and SEKEL 2011 - Green*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011.

[P10] ŠUMPICH, Jan, Zbyněk CARBOL a Karel SOKANSKÝ. Determination of Daylight Illuminance under Uniformly Overcast Sky in order to Reduce Energy Consumption in Buildingss. In: *Wofex 2011*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, s. 83-88.

[P11] ŠUMPICH, Jan, Zbyněk CARBOL, Tomáš NOVÁK a Karel SOKANSKÝ. Potenciál úspor elektrické energie využitím denního světla v budovách. In: *Kurz osvětlovací techniky XXIX*. Dlouhé Stráně, 2012, s. 243-249. ISBN 978-80-248-2833-6.

[P12] ŠUMPICH, Jan, Karel SOKANSKÝ a Zbyněk CARBOL. Výpočet potenciálních úspor energie ve vnitřních osvětlovacích soustavách s využitím denního a umělého osvětlení. In: *LUMEN V4 2012*. Bratislava, 2012, s. 55-60. ISBN 978-80-89275-32-8.

[P13] ŠUMPICH, Jan a Karel SOKANSKÝ. Možnosti predikce úspor elektrické energie u stmívatelných osvětlovacích soustav modelováním příspěvku denního světla. In: *Technická diagnostika strojů a výrobních zařízení - DIAGO® 2013*. Ostrava, 2013, s. 372-376. ISSN 1210-311X.

[P14] ŠUMPICH, Jan, Tomáš NOVÁK, Zbyněk CARBOL a Karel SOKANSKÝ. Potenciál úspor energie ve vnitřním osvětlení při využití denního světla. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public s.r.o, 2013(3), 56-59. ISSN 1212-0812.

[P15] NOVÁK, Tomáš, Jan VAŇUŠ, Jan ŠUMPICH, Jiří KOZIOREK a Luděk TRAWINSKI. Zvýšení úspor elektrické energie v inteligentní budově pomocí regulace osvětlení. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public s.r.o, 2013(6), 44-47. ISSN 1212-0812.

[P16] ŠUMPICH, Jan, Karel SOKANSKÝ a Tomáš NOVÁK. Příklady úspor vzniklých využitím denního osvětlení. In: *Kurz osvětlovací techniky XXX*. DLOUHÉ STRÁNĚ, 2013, s. 316-319. ISBN 978-80-248-3174-9.

[P17] ŠUMPICH, Jan, Zbyněk CARBOL a Karel SOKANSKÝ. Measures to achieve energy savings of lighting systems using daylight. In: *Wofex 2013*. Ostrava, 2013, s. 213-218. ISBN 978-80-248-3073-5.

[P18] VAŇUŠ, Jan, Jan ŠUMPICH, Tomáš NOVÁK, Zbyněk CARBOL, Karel SOKANSKÝ a Jiří KOZIOREK. The Power Savings Possibilities by Light in the Smart Home Care. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS & TECHNOLOGY*. 2013, 1401-1409. ISSN 22773061.

[P19] ŠUMPICH, Jan, Zbyněk CARBOL, Karolína CHMELÍKOVÁ a Tomáš NOVÁK. Calculation of Energy Savings in Artificial Lighting Using Daylight-Based Dimming. In: *II.workshop NETFEI: Rozvoj a partnerství mezi FEI a podnikatelským sektorem a institucemi terciálního vzdělávání*. Ostrava, 2013, s. 133-135. ISSN 978-80-248-3188-6.

[P20] ŠUMPICH, Jan, Zbyněk CARBOL, Tomáš NOVÁK a Karel SOKANSKÝ. Options for Calculating Energy Savings in Systems of Artifikal lighting whit Daylight,. In: *Results and Solutions of Young R&S for Innovations and Progress*. 2013, s. 124-126. ISBN 978-80-248-3292-0.

[P21] VAŇUŠ, Jan, Jan ŠUMPICH, Tomáš NOVÁK, Zbyněk CARBOL, Karel SOKANSKÝ, Jiří KOZIOREK a Dušan SKOPAL. Možnosti úspor elektrické energie osvětlovacího systému v Smart Home Care. *ELEKTRO: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC PUBLIC, 2014(3), 66-69. ISSN 1210-0889.

[P22] VAŇUŠ, Jan, Jan ŠUMPICH, Tomáš NOVÁK a Karel SOKANSKÝ. Modelování denního osvětlení v budovách za účelem snížení energetické náročnosti osvětlovacích soustav jejich řízením. In: *Kurz osvětlovací techniky XXXI*. Dlouhé Stráně: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014, s. 289-293. ISBN 978-80-248-3553-2.

[P23] ŠUMPICH, Jan, Karel SOKANSKÝ a Tomáš NOVÁK. Potenciál úspor energie vo vnútornom osvetlení. In: *SLOVALUX 2015*. 2015. ISBN 978-80-972014-7-0.

[P24] BOS, Petr, Jan ŠUMPICH, Tomáš NOVÁK a Karel SOKANSKÝ. Daylight Statistical Evaluation of Dimmable Interior Lighting System Consumption. In: *Wofex 2015: proceedings of the 13th annual workshop*. Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3787-1.

Knižní publikace (spoluautor)

[P25] Sokanský, K., a kol. Světelná technika, ČVUT v Praze, 2011, stran 41, ISBN:978-80-01-04941-9

Soupis publikací a řešených projektů nesouvisejících s tématem práce

Web of Science a Scopus

[P26] BALEJA, Richard, Jan ŠUMPICH, Petr BOS, Barbara HELŠTÝNOVÁ, Karel SOKANSKÝ a Tomáš NOVÁK. Comparison of LED properties, compact fluorescent bulbs and bulbs in residential areas. In: *Electric Power Engineering, EPE 2015*. 2015, s. 566-571. DOI: 10.1109/EPE.2015.7161181. ISBN 978-1-4673-6788-2.

[P27] CARBOL, Zbyněk, Tomáš NOVÁK a Jan ŠUMPICH. The LED tubes as a replacement of fluorescent tubes. In: *Electric Power Engineering 2012*. Brno, 2012, s. 1175-1179. ISBN 978-80-214-4514-7.

[P28] ŠUMPICH, Jan a Tomáš NOVÁK. End of incandescent bulbs in the EU – is there a full replacement of these lamps? In: *Electric Power Engineering 2011*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, s. 516-519. ISBN 978-80-248-2393-5.

Scopus

[P29] CARBOL, Zbyněk, Tomáš NOVÁK, Jan ŠUMPICH a Karel SOKANSKÝ. Complex assessment of LED tubes. *Przeglad elektrotechniczny*. Warszawa, 2013(6), 331-333. ISSN 0033-2097.

Ostatní

[P30] ŠUMPICH, Jan a Tomáš NOVÁK. Existují plnohodnotné náhrady žárovek. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public s.r.o, 2011, 2011(3), 44-47. ISSN 1212-0812.

[P31] CARBOL, Zbyněk a Jan ŠUMPICH. Možnosti ve vývoji LED svítidel. In: *Světlo 2011*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011, s. 186-188. ISBN 978-80-248-2480-2.

[P32] CARBOL, Zbyněk, Jan ŠUMPICH a Tomáš NOVÁK. Komplexní pohled na provoz LED trubic. In: *Kurz osvětlovací techniky XXIX*. Dlouhé Stráně, 2012, s. 298-305. ISBN 978-80-248-2833-6.

[P33] CARBOL, Zbyněk, Tomáš NOVÁK a Jan ŠUMPICH. Hodnocení jasů LED svítidel typu downlight. In: *LUMEN V4 2012*. Bratislava, 2012, s. 113-119. ISBN 978-80-89275-32-8.

[P34] CARBOL, Zbyněk, Tomáš NOVÁK a Jan ŠUMPICH. Are LED tubec adequate replacemtof linear fluorescent tubes? In: *LUMEN V4 2012*. Bratislava, 2012, s. 304-308. ISBN 978-80-89275-32-8.

[P35] CARBOL, Zbyněk, Jan ŠUMPICH a Karel SOKANSKÝ. Assessment of LED Tubes Usage in Luminaires Designed for Linear Fluorescent Lamps. In: *Wofex 2012*. Ostrava, 2012, s. 3-8. ISBN 978-80-248-2769-8.

[P36] CARBOL, Zbyněk, Jan ŠUMPICH a Tomáš NOVÁK. Provoz trubicových LED zdrojů. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public s.r.o, 2013(3), 48-52. ISSN 1212-0812.

[P37] NOVÁK, Tomáš, Karel SOKANSKÝ, Zbyněk CARBOL a Jan ŠUMPICH. Navrhování a posuzování osvětlovacích soustav s LED svítidly. In: *Svetlo 2013: 20 medzinárodná konferencia, Podbanské*. Slovensko, 2013, s. 58-67. ISSN 978-80-89275-35-9.

[P38] CARBOL, Zbyněk a Jan ŠUMPICH. Lineární světelné trubice s LED pro použití v zářivkových svítidlech. In: *Workshop na podporu sítí*. Ostrava, 2013, s. 31-35. ISSN 978-80-248-2986-9.

[P39] CARBOL, Zbyněk, Jan ŠUMPICH a Tomáš NOVÁK. Provoz trubicových LED zdrojů. *SVĚTLO: odborný časopis pro světelnou techniku*. Praha: FCC PUBLIC, 2013(4), 48-52. ISSN 1212-0812.

[P40] NOVÁK, Tomáš, Karel SOKANSKÝ, Jan ŠUMPICH, Barbara HELŠTÝNOVÁ a Zdeněk BLÁHA. Public lighting system restoring based on the European Union grants. In: *LUMEN V4*. Budapest, 2014, s. 203-208. ISBN 978-963-9299-21-4.

[P41] NOVÁK, Tomáš, Zbyněk CARBOL a Jan ŠUMPICH. Retrofit - aneb možnosti využití LED ve svítidlech konstruovaných pro výbojky. In: *Kurz osvětlovací techniky XXXI*. Dlouhé Stráně: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014, s. 279-282. ISBN 978-80-248-3553-2

Účast na projektech:

NOVÁK, Tomáš, Karel SOKANSKÝ, Jan ŠUMPICH, et al. *Optimalizace spotřeby elektrické energie využitím moderních světelných zdrojů*. SGS SP2011/135. Ostrava, 2011.

NOVÁK, Tomáš, Vladimír VAŠÍNEK, Jan ŠUMPICH, et al. *Nové možnosti LED technologií v osvětlování*. SGS SP2012/160. Ostrava, 2012

NOVÁK, Tomáš, Karel SOKANSKÝ, Jan ŠUMPICH, et al. *Výzkum využití LED a OLED světelných zdrojů ve speciálních aplikacích*. SGS SP2013/88. Ostrava, 2013.

NOVÁK, Tomáš, Vladimír VAŠÍNEK, Jan ŠUMPICH, et al. *Možnosti využití LED technologií v průmyslových aplikacích*. SGS SP2014/77. Ostrava, 2014.

SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Jan ŠUMPICH a Zbyněk CARBOL. *Vývoj svítidla do extrémních teplot pro průmyslové využití (typ reflektor, typ závěsné): Metasport*. HS 410316. Ostrava, 2014.

SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Barbara HELŠTÝNOVÁ, Jan ŠUMPICH, Richard BALEJA a Petr BOS. *Výběr vhodných typů LED svítidel: ČEPS a.s*. HS 4101410. Ostrava, 2014.

SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Barbara HELŠTÝNOVÁ, Jan ŠUMPICH a Petr BOS. *Metodika pro výpočet potenciálu energetických úspor ve vnitřních osvětlovacích soustavách využitím denního světla ve fázi projektu*. HS4101414. Ostrava, 2015.