

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky



**Analýza mnohonásobných odrazů v soustavě
nedifuzních povrchů**

Disertační práce

Rudolf Bayer

Praha, srpen, 2016

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektroenergetika

Školitel: prof. Ing. Jiří Habel, DrSc.

Abstrakt

Disertační práce popisuje realizaci automatizovaného fotometrického systému pro měření reálných odrazných vlastností materiálů reflektometru OPTE-F3K, kdy byla řešena jak elektronická stránka reflektometru, tak softwarová umožňující jednoduchou manipulaci s přístrojem a záznam naměřených dat do počítače. Navazuje tak na předešlé realizované práce Katedry elektroenergetiky zabývajících se ručním měřením odrazných vlastností reflektometrem a měřením na fotometrické lavici. Práce se dále zabývá zpracováním naměřených odrazných vlastností materiálů a umožněním dalšího využití pro výpočty metodou sledování paprsku. Jsou zde uvedeny výsledky výpočtů sledovaných světelně technických veličin v modelové místnosti získané metodami sledování paprsku a radiosita pro difuzní a nedifuzní povrchy a provedeno porovnání s výstupy softwaru Dialux. Bylo využito metody genetického algoritmu pro generování rozmístění svítidel v modelové místnosti s ohledem na normu ČSN EN 12464-1 a preference uživatele. Vygenerované rozmístění bylo dále využito při srovnávání výstupu metodou sledování paprsku.

Abstract

The thesis describes the implementation of an automated photometric system for the measurement of real material surface reflective properties, the reflectophotometer OPTE-F3K. Electronics and an application were designed running on the computer enabling easy measurements of reflective properties and storage of the measured data. It is a continuation of previous work carried out by the Department of Electrical Power Engineering involving manual measurements using OPTE-F3K and a photometric bench. The thesis also deals with the processing of the measured reflective characteristics of real materials allowing further use for ray tracing calculations. The work also contains results of calculations regarding observed photometric quantities of a chosen model obtained by radiosity and ray tracing using diffuse and non-diffuse reflecting surfaces. The results are also compared with outcomes of the software Dialux. A genetic algorithm has been used to calculate proper placements of luminaires in a model room respecting the standard ČSN EN 12464-1 and the users requirements. The genetic algorithm output has been used also by ray tracing calculations.

OBSAH

1	Úvod	1
1.1	Světlo	3
1.2	Veličiny charakterizující světelně technické vlastnosti materiálů	4
1.2.1	Odraz světla	8
1.2.2	Dvousměrová distribuční funkce	10
1.2.3	Lom světla	12
2	Osvětlovací modely, zobrazovací metody	15
2.1	Lambertův osvětlovací model	15
2.2	Phongův osvětlovací model	18
2.3	Model Torrance-Sparrow	20
2.4	Radiosita	23
2.5	Sledování paprsku (ray tracing)	25
3	Měření fotometrických ploch jasu reálných povrchů	28
3.1	Měření na fotometrické lavici	29
3.2	Měření pomocí reflektofotometru	30
3.3	Mechanická konstrukce OPTE-F3K	30
3.4	Modernizace OPTE-F3K	33
3.4.1	Návrh a realizace řídicí a napájecí elektroniky	34
3.4.2	Reflectosoft	36
3.5	Měření vzorků pomocí OPTE-F3K	42
3.6	Vyhodnocení naměřených dat	49
4	Metoda Monte Carlo se sledováním paprsků	55
4.1	Využití metody sledování paprsku pro výpočet mnohonásobných odrazů	56
4.2	Modelová místnost	60
4.3	Výsledky výpočtů metody Monte Carlo	63
4.3.1	Srovnání difuzních a nedifuzních odrazů	64
4.3.2	Vliv mnohonásobných odrazů	68
4.3.3	Rozmístění svítidel generované genetickým algoritmem	71
4.3.4	Využití převážně nepřímých svítidel	76

5	Genetický algoritmus rozmístování svítidel	80
5.1	Základní charakteristika genetických algoritmů	81
5.2	Řešení mnohonásobných odrazů	83
5.3	Modelová místnost	87
5.4	Množina možných řešení	89
5.5	Účelová funkce	94
5.6	Realizace algoritmu	96
5.7	Výstupy genetického algoritmu	97
6	Závěr	103
A	Elektronika OPTE-F3K	109
A.1	FW pro ATmega8L	114

SEZNAM OBRÁZKŮ

1	Soustava fotometrických polorovin systému $C - \gamma$	7
2	Znázornění zrcadlového odrazu paprsků	8
3	Odrazné vlastnosti rovnoměrně rozptýlného (difuzního) povrchu po dopadu paprsku	8
4	Smíšené odrazy	10
5	Grafické znázornění úhlů, resp. veličin zastoupených ve funkci BRDF.	11
6	Prostup světla vrstvou látky	12
7	Prostup paprsku a polarizace	13
8	Fotografie hliněné vázy (vlevo) ve tvaru válce osvětlené bodovým zdrojem světla umístěným za pozorovatelem v porovnání s obrazem (vpravo) téže scény vypočteným podle Lambertova osvětlovacího modelu [12].	16
9	Hrúbost povrchu ovlivňuje výsledek při výpočtech podle Lambertova modelu. Na jeden pixel se zobrazí více náhodně orientovaných plošek.	17
10	Generované obrázky s povrchem pokrytým zářezy tvaru V. Zářezy jsou postupně zleva doprava hlubší. Levý generovaný snímek zachycuje kouli s dokonale hladkým povrchem (zářezy s hloubkou 0). Koule jsou osvětleny ze směru pozorovatele [12].	17
11	Složky Phongova modelu. Výsledkem sečtení složky vlivu okolního světla, difuzního odrazu a zrcadlového odrazu přímého světla je celkový snímek uvedený vpravo [13].	18
12	Zrcadlová složka odrazu světla zdroje Z od plochy s normálou N , maximem zrcadlové složky R a pozorovatelem ve směru P	19
13	Difuzní složka odrazu od povrchu. Intenzita ve směru pozorovatele je závislá na úhlu β mezi dopadajícím paprskem Z a normálou N povrchu.	19
14	Podle [11] je Z vektor ve směru světelného zdroje, N je normála povrchu, N_{pl} je normála sledované plošky a P je vektor ve směru pozorovatele.	21
15	Srovnání výsledků Phongova modelu a modelu Torrance-Sparrow [11].	22
16	Modelová místnost s vypočítanými mnohonásobnými odrazy [16]. První snímek zleva zachycuje scénu bez odrazů, druhý s jedním, třetí se dvěma a čtvrtý s patnácti odrazy.	24
17	Využití metody sledování paprsku pro výpočet světelně technických parametrů	26

18	Princip rekurzivního sledování paprsku v oblasti počítačové grafiky vycházejících od pozorovatele do sledované části scény, červeně primární paprsky, modře paprsky stínové	26
19	Renderovaný obrázek sklenice vína sledováním paprsků s rozšířením fotonových map, díky čemuž lze pozorovat lom paprsků procházejících sklem [17].	27
20	Fotometrická lavice s přípravkem pro měření jasu vzorku [18]	29
21	Laboratorní pracoviště pro měření jasu vzorku	30
22	Původní zapojení jednotlivých elementů pracoviště reflektofotometru	31
23	Fotografie reflektofotometru OPTE-F3K se sejmutým předním krytem pro vkládání měřených vzorků [5]	31
24	Značení a rozsah úhlů reflektometru OPTE-F3K	32
25	Jasový kontrastoměr Bruel & Kjaer typ 1100	33
26	Nové zapojení jednotlivých elementů pracoviště reflektofotometru	34
27	Schéma prvků laboratorního pracoviště reflektofotometru	35
28	Grafické uživatelské rozhraní aplikace ReflectoSoft	36
29	Nastavení nulové polohy úhlů reflektofotometru m_0 , m_1 a m_2	37
30	Pohled shora na rozdělení poloprostoru a úhlová konvence pro kulové pásy	38
31	Řešení symetrie	39
32	Úhlové soustavy používané funkcí BRDF a reflektofotometru OPTE-F3K	40
33	Laboratorní pracoviště reflektometru OPTE-F3K	43
34	Znázornění zobrazení hodnot $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ aplikací BSDFViewer	43
35	Výstup aplikace BSDFViewer pro nekorigované naměřené hodnoty vzorku Primalex Polar	44
36	Osvětlení měřeného vzorku v reflektometru a zorné pole fotočlánku	45
37	Světelný tok dopadající mimo měřený vzorek	45
38	Korigované naměřené hodnoty vzorku Primalex Polar, $\beta = 30^\circ$	48
39	Korigované naměřené hodnoty vzorku Primalex Polar, $\beta = 82,5^\circ$	48
40	Zamezení přímé viditelnosti středu plochy měřeného vzorku uchycením osy plošky pro upevnění vzorku	49
41	Zkušební měřené vzorky	50
42	Korigované naměřené hodnoty vzorků dlaždic fasády budovy FEL ČVUT v Praze v Dejvicích, vlevo šedá, vpravo růžová, $\beta = 30^\circ$	50
43	Korigované naměřené hodnoty vzorků dlaždice fasády budovy FEL ČVUT v Praze v Dejvicích, vlevo černá, vpravo plech, $\beta = 30^\circ$	51
44	Korigované naměřené hodnoty vzorků světlého dřeva vlevo nelakovaného, vpravo lakovaného, $\beta = 30^\circ$	51
45	Korigované naměřené hodnoty vzorků vlevo papír, vpravo podlahová krytina z PVC, $\beta = 30^\circ$	52

46	Vymezení elementárního prostorového úhlu [1]	57
47	Distribuční funkce dílčích prostorových úhlů $\Delta\Omega_i$	59
48	Distribuční funkce dílčích činitelů odrazu $\Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)$	60
49	Modelová místnost	61
50	Podhledové svítidlo MSTR SBL 4 × 18W	62
51	Vlevo fotografie a křivky svítivosti (vztaženy na klm) svítidla Waldmann Ataro, vpravo svítidla Waldmann Tycoon	63
52	Pravidelné rozmístění svítidel	64
53	Osvětlenost srovnávací roviny, výpočet metodou sledování paprsku	66
54	Osvětlenost srovnávací roviny získaná metodou radiosita (difuzní povrchy)	67
55	Osvětlenost srovnávací roviny získaná metodou sledování paprsku pro různý počet odrazů v modelové místnosti se stropem s nátěrem Primalex Polar, stěnami obloženými dřevem a difuzní podlahou	69
56	Osvětlenost srovnávací roviny z výpočtů softwaru Dialux pro různou volbu počtu odrazů světla	70
57	Rozmístění svítidel generované za použití metody genetického algoritmu . .	72
58	Osvětlenost srovnávací roviny z výpočtů metody sledování paprsku pro rozmístění svítidel získaného metodou genetického algoritmu	73
59	Osvětlenost srovnávací roviny z výpočtů softwaru Dialux pro rozmístění svítidel získaného metodou genetického algoritmu	74
60	Osvětlenost stěny sever a stropu při výpočtu metodou sledování paprsku, rozmístění V010S0	75
61	Rozmístění svítidel Waldmann podle návrhu softwaru Dialux	76
62	Osvětlenost srovnávací roviny získaná metodou sledování paprsku s využitím svítidel Waldmann	77
63	Osvětlenost srovnávací roviny získaná softwarem Dialux s využitím svítidel Waldmann	78
64	Porovnání osvětleností stěny sever získaných různými metodami výpočtů za použití svítidel Tycoon	79
65	Základní vývojový diagram genetického algoritmu	81
66	Soustava fotometrických rovin $C - \gamma$	83
67	Výkres modelové místnosti	88
68	Průměrná osvětlenost povrchů modelové místnosti v závislosti na počtu dopadů světla pro jedno svítidlo	90
69	Příklad návrhu splňující podmínky řešení s problémem fyzicky se překrývajících svítidel	91
70	Příklad výstupu původního GA, který sleduje pouze dosažení požadovaných hodnot \bar{E} a U_0	92
71	Příklady různých typů symetrií: a) vůči středu, b) vůči ose procházející zleva doprava, c) vůči oběma osám, d) opakování určitého vzoru.	92

72	Příklad chromozomu, vzhledu rastru a výsledného řešení pro symetrii vůči oběma osám	93
73	Hodnocení vybraných veličin účelovou funkcí - závislost výstupu části účelové funkce na hodnotě sledovaného parametru	95
74	Příklad vytváření nového potomka jednobodovým křížením a mutací	97
75	Rozmístění svítidel s totožnou preferencí parametrů \bar{E} a U_0 ($\alpha = 0,5$)	98
76	Rozmístění svítidel s rozdílnou preferencí parametrů \bar{E} a U_0	100
77	Rozmístění svítidel při použití osové symetrie, bez preference ($\alpha = 0,5$)	101
78	Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega8L	109
79	Schéma zapojení integrovaného obvodu FT232RL pro převod USB na RS-232	110
80	Návrh plošného spoje řídicího modulu	111
81	Schéma zapojení modulu optočlenů PC400T a stabilizátoru napětí 5 V	111
82	Návrh plošného spoje modulu optočlenů a stabilizátoru napětí	112
83	Schéma zapojení modulu řízení a napájení motoru	113
84	Návrh plošného spoje modulu řízení a napájení motorů	113
85	Fotografie zapojených modulů v OPTE-F3K	114

SEZNAM TABULEK

1	Spektrum elektromagnetického záření [1], [2]	3
2	Orientační hodnoty činitelů ρ , τ a α vybraných materiálů [1]	5
3	Orientační hodnoty činitele odrazu některých materiálů [1]	6
4	Index lomu různých látek [8]	14
5	Rozsahy motorů	32
6	Rozdělení poloprostoru na segmenty	38
7	Ukázka obsah korekčního souboru	47
8	Činitele odrazu $\rho(\beta)$ pro úhly dopadu paprsku β měřených vzorků	54
9	Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při zahrnutí výpočtu mnohonásobných odrazů, SP = metoda sledování paprsku	65
10	Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při různém počtu odrazů paprsků, SP = metoda sledování paprsku	71
11	Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při rozmístění svítidel metodou genetického algoritmu, SP = metoda sledování paprsku	74
12	Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při použití svítidel Waldmann, SP = metoda sledování paprsku	78
13	Výsledky metody genetického algoritmu bez preference pro středovou a osovou symetrii (obr. 75)	99
14	Výsledky metody genetického algoritmu s různými preferencemi pro osovou symetrii	100
15	Výsledky metody genetického algoritmu s osovou symetrií bez odrazů od jižní stěny a bez všech odrazů světla	102
16	Struktura rámce zjednodušeného protokolu HDLC	115
17	Únikové sekvence zjednodušeného protokolu HDLC	115
18	Přehled příkazů podporovaných FW reflektofotometru	116

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Jiřího Habela, DrSc., s použitím literatury, uvedené na konci disertační práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Rudolf Bayer

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych na tomto místě poděkoval svému školiteli prof. Ing. Jiřímu Habelovi, DrSc. za jeho vedení, trpělivost a cenné rady a pomoc při řešení řady problémů, které se během práce na disertaci objevily. Stejně tak bych rád poděkoval i Ing. Petru Žákovi, Ph.D. za konstruktivní kritiku a zpětnou vazbu při vytváření této práce.

Velké díky patří i kolegovi Ing. Michalu Brejchovi, Ph.D. za úzkou spolupráci na projektech s tematikou evolučních algoritmů a metody Monte Carlo. Bez jeho pomoci by zřejmě řada článku vůbec nevznikla.

Pomocnou ruku mi též podal kolego Ing. Marek Bálský, Ph.D., kterého jsem zasypával četnými dotazy během psaní disertace. Z psychického hlediska děkuji své drahé polovičce za podporu. Nelze pozapomenout na pomoc v minulosti kolegů Ing. Jana Zálešáka a Ing. Zuzany Pelanové.

Děkuji také všem, kteří se mnou v minulosti při doktorském studiu spolupracovali nebo mi pomáhali při řešení některého projektu nebo problému.

KAPITOLA 1

ÚVOD

Podobně jako řada technických oborů z oblasti projektování staveb, tak i obor světelná technika prošel s nástupem počítačové techniky v 80. letech minulého století velmi rychlým vývojem, jehož důsledkem bylo velmi výrazné rozšíření možností při návrzích osvětlovacích soustav. Postupně se přešlo od původních ručních výpočtů, tabulek a grafických pomůcek k počítačovým programům. Využití počítačové techniky se v oblasti osvětlení rozvinulo do dvou směrů. První směr reprezentuje výpočty světelně technických parametrů, které se používají k analýze a hodnocení navržené osvětlovací soustavy z pohledu hygienických a bezpečnostních požadavků technických norem a právních předpisů. Druhý směr představuje vizualizace navržených světelných scén, které se používají jako komunikační prostředek mezi světelným technikem a architektem, popř. investorem. Ačkoliv se vizualizace světelné scény a výpočty světelně technických parametrů mohou jevit jako dvě stránky jedné problematiky, pro jejich řešení se používají odlišné postupy. Je to dáno tím, že obecné řešení jasových poměrů ve světelné scéně by kladlo neúměrné časové a kapacitní nároky na výpočetní techniku. V současné době jsou původně samostatné vizualizační programy (např. Lightscape, Inspirer) integrovány do modelovacích programů budov jako součást 3D modelů. Programy pro výpočet světelně technických parametrů existují jako samostatné programy (Dialux, Relux, AGI32, apod.).

Problematika šíření světla vnitřním prostorem jak z pohledu výpočtu parametrů osvětlení, tak vizualizace světelné scény zahrnuje řešení dvou složek rozložení světelného toku, a to přímé a nepřímé složky. Přímá složka reprezentuje světelný tok dopadající do kontrolního bodu přímo ze svítidel. Nepřímá složka představuje světelný tok zvyšující hladinu osvětlenosti v okolí kontrolního bodu vlivem mnohonásobných odrazů mezi světelně činnými plochami uvažované scény. Přímé složky světelně technických parametrů osvětlovacích soustav závisí na prostorovém rozložení světelného toku světelných zdrojů, resp. svítidel. Naproti tomu nepřímé složky jsou ovlivněny nejen zmíněným prostorovým rozložení světelného toku svítidel, ale zejména mnohonásobnými odrazy mezi světelně činnými plochami a jejich světelně technickými vlastnostmi. V průběhu vývoje vznikly dvě základní metody pro popis šíření světla ve světelné scéně, a to metoda radiosita a metoda sledování paprsku (dopředného a zpětného).

Výpočty světelných scén, jak již bylo uvedeno, jsou náročné na čas i kapacitu výpočetní techniky a proto byly z počátku světelné scény zjednodušovány. Se zdokonalováním počítačové techniky se začaly zvyšovat požadavky na přesnější popis i vizualizaci světelných scén. Mezi hlavní aspekty, které ovlivňují vzhled i parametry světelného prostředí, patří popis optických vlastností materiálů a prostředí (odraz, lom, polarizace, rozptyl apod.). Největší význam v tomto ohledu mají odrazné vlastnosti povrchů materiálů, které ovlivňují nejen vzhled světelné scény, ale také rozložení osvětlenosti na srovnávací rovině, celkový adaptační jas, barevné vlastnosti prostředí i jevy jako je oslnění.

Zjednodušený popis spočíval v předpokladu, že všechny povrchy ve světelné scéně mají ideální difúzní charakter odrazu. Zpřesňování popisu odrazu světla od materiálů se nejprve začalo uplatňovat ve vizualizačních programech a vyústilo v řadu modelů (Phongův, Torrance-Sparrow apod.) a v popis odrazných vlastností pomocí dvousměrové odrazové distribuční funkce (BRDF). V oblasti výpočtů světelně technických parametrů se vzhledem ke složitosti popisu a délce výpočtu začínají možnosti využití reálného popisu odrazných vlastností teprve testovat a ověřovat. Mezi hlavní problémy při použití BRDF funkcí patří její určení pomocí fotometrických měření.

V současné době neexistují běžně dostupné přístroje pro měření BRDF funkcí, pouze přístroje na experimentální bázi na vědeckých, výzkumných a akademických pracovištích. V rámci fotometrické laboratoře na ČVUT FEL v Praze byly zpracovány práce na měření odrazných vlastností materiálů a navrženy postupy a metodiky měření. Hlavními problémy dosavadních postupů byly omezený rozsah údajů o reálných odrazných vlastnostech a velká časová náročnost i ruční ovládání měření, což generovalo větší pravděpodobnost chyb a obtížnou verifikaci výsledků měření vzhledem k velkému objemu dat.

Na základě uvedeného popisu problematiky vlivu mnohonásobných odrazů ve světelně technických výpočtech byly definovány tyto cíle disertační práce:

1. Návrh automatizovaného fotometrického systému pro měření reálných odrazných vlastností materiálů.
2. Změření odrazných vlastností vybraných reálných vzorků s využitím navrženého automatizovaného systému.
3. Výpočty osvětleností ve vnitřním prostoru s respektováním vlivu mnohonásobných odrazů při uvažování zjednodušeného a reálného popisu odrazných vlastností a použití různých modelů šíření světla prostorem.
4. Rozbor možností využití genetických algoritmů při výpočtech parametrů světelných scén s reálným popisem povrchů.

1.1 Světlo

Záření, někdy též radiace, je přenos energie formou elektromagnetických vln či hmotných částic (fotonů). Každé záření lze rozložit na jednotlivé složky se sinusovým průběhem charakterizované frekvencí ν či vlnovou délkou λ . Jako monofrekvenční záření se označuje záření složené pouze z jediné frekvence.

Vlnová délka je podle [1] závislá na rychlosti šíření záření. Pro vakuum lze vlnovou délku záření určit vztahem

$$\lambda = c_0 \cdot \nu^{-1} \quad (\text{m}; \text{m} \cdot \text{s}^{-1}, \text{Hz}) \quad (1)$$

kde

c_0 je rychlosti šíření elektromagnetických vln ve vakuu ($2,998 \cdot 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Přibližné rozdělení spektra elektromagnetického záření podle vlnových délek (frekvence) lze nalézt v tab 1.

druh	frekvence	vlnová délka
záření gama	nad $2,42 \cdot 10^{18}$ Hz	kratší než 124 pm
rentgenové záření	10^{17} Hz až 10^{20} Hz	10 nm až 0,1 nm
ultrafialové záření	10^{15} Hz až 10^{17} Hz	400 nm až 10 nm
viditelné záření	$384 \cdot 10^{12}$ Hz až $790 \cdot 10^{12}$ Hz	380 nm až 780 nm
infračervené záření	300 GHz až 400 THz	760 nm až 1 mm
rádiové vlny	končí hranicí IR záření 300 GHz	> 1 mm

Tab. 1. Spektrum elektromagnetického záření [1], [2]

Jako optické záření nazýváme elektromagnetické záření s vlnovými délkami od 1 nm do 1 mm [1], tj. záření s vlnovými délkami sahajícími od infračerveného záření až po část oblasti rentgenového záření. Viditelným zářením (světlo) se označuje takové optické záření, které je schopné vyvolat vizuální vjem. Přesný rozsah viditelného záření nelze stanovit, neboť hraniční hodnoty jsou ovlivněny množstvím zářivého toku dopadajícího na sítnici pozorovatele a spektrální citlivostí oka pozorovatele. Obvykle se spodní hranice viditelného záření uvažuje v rozmezí 360 nm až 400 nm a horní hranice v rozmezí 760 nm až 830 nm [1].

Přirozeným zdrojem viditelného záření je pro člověka Slunce, jehož pronikající záření zemskou atmosférou je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících životní prostředí. Prostřednictvím zraku získává člověk 80 až 90 % veškerých informací o okolí. Způsob, jak předměty ovlivňují šíření světla, nám sděluje jejich vzhled. Většina světelně činných povrchů jsou sekundárními zdroji světla. Světlo z primárních zdrojů (Slunce, umělé zdroje světla) dopadá na tyto povrchy, mění své parametry a při dopadu do oka nám sděluje informace o jejich charakteru. Ovlivnění světla interakcí s povrchem je složitý proces. Z makroskopického hlediska je dostačující řídit se empirickým popisem těchto procesů.

1.2 Veličiny charakterizující světelně technické vlastnosti materiálů

Světelně technické vlastnosti materiálů jsou důležité zejména při návrhu a konstrukci světelně činných ploch různých technických zařízení (např. svítidel) z hlediska vlivu na prostorové rozložení světelného toku, popřípadě na omezení jasů zmíněných ploch v určitých směrech, a to při zachování co nejvyšší účinnosti. Odraznosti stropu a stěn mají podstatný vliv na kvantitativní, ale i kvalitativní ukazatele vnitřního osvětlení i na hospodárnost osvětlovací soustavy.

Světelný tok dopadající na sledovaný povrch se obecně rozdělí podle následující rovnice na tři části

$$\Phi = \Phi_{\rho} + \Phi_{\tau} + \Phi_{\alpha} \quad (\text{lm}) \quad (2)$$

kde

Φ_{ρ} je odražený tok od povrchu (lm),

Φ_{τ} je tok prostupující povrchem (lm),

Φ_{α} je tok pohlcený materiálem plochy (lm).

Zmíněné rozdělení toku charakterizují tři integrální činitele určené vztahy

$$\rho = \frac{\Phi_{\rho}}{\Phi} \quad (-) \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\Phi_{\tau}}{\Phi} \quad (-) \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\Phi_{\alpha}}{\Phi} \quad (-) \quad (5)$$

kde

ρ je integrální činitel odrazu daného povrchu,

τ je integrální činitel prostupu,

α je integrální činitel pohlcení.

Ze zachování celkového světelného toku vyplývá

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (6)$$

Speciální případ neprůsvitného materiálu vykazuje $\tau = 0$, z čehož vyplývá

$$\rho + \alpha = 1 \quad (7)$$

V případě materiálu pohlcujícího veškeré dopadlé záření (černé těleso, $\rho = 0$, $\tau = 0$), platí

$$\alpha = 1 \quad (8)$$

V praxi se předpokládá, že prostředí, kterým se šíří světlo od světelných zdrojů na osvětlované plochy, je nepohlcující, tzn. $\tau = 1$, a nerozptylující. Podle [1] je tento předpoklad většinou splněn jak pro vnitřní, tak pro vnější prostředí.

Příklady hodnot integrálních činitelů odrazu, prostupu a pohlcení vybraných materiálů lze nalézt v tab. 2 a příklady integrálních činitelů odrazu pro vybrané materiály lze nalézt v tab. 3.

materiál	činitel odrazu ρ (%)	činitel prostupu τ (%)	činitel pohlcení α (%)
sklo čiré (tl. 2 až 4 mm)	6 - 8	90 - 92	2 - 4
sklo matované (tl. 2 až 3 mm)	6 - 11	75 - 91	3 - 19
sklo opálové bílé (tl. 2 až 3 mm)	29 - 52	36 - 66	3 - 10
sklo opalizované (tl. 2 až 3 mm)	13 - 28	59 - 84	3 - 13
mramor bílý lesklý (tl. 7,3 až 10 mm)	30 - 71	3 - 8	24 - 65
hedvábí bílé	28 - 38	61 - 71	asi 1
silon bílý	asi 55	asi 17	asi 28
silon šedý průhledný	asi 8	asi 79	asi 13

Tab. 2. Orientační hodnoty činitelů ρ , τ a α vybraných materiálů [1]

Integrální činitele odrazu, prostupu a pohlcení mohou být závislé na vlnové délce dopadajícího světla. Proto se v praxi zavádějí spektrální činitele zohledňující tuto skutečnost $\rho(\lambda)$, $\tau(\lambda)$ a $\alpha(\lambda)$. Pro složený zářivý tok $\Phi_e(\lambda)$, dopadající na sledovaný povrch, platí pro hodnotu integrálního činitele odrazu ρ vztah [1]

$$\rho = \frac{\int_0^{\infty} \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda} V(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda} V(\lambda) d\lambda} \quad (-) \quad (9)$$

kde

$\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda}$ je spektrální hustota zářivého toku Φ_e na vlnové délce λ (W/m),
 $V(\lambda)$ je poměrný světelný účinek monochromatického záření při denním vidění na vlnové délce λ , se kterým se obvykle pracuje (-).

Obdobné vztahy lze psát pro integrální činitele prostupu τ a činitele pohlcení α .

Integrální činitele odrazu, prostupu a pohlcení charakterizují světelně technické vlastnosti látek hodnotami vyjadřujícími celkový odraz, vstup či pohlcení sledovaného povrchu, na který dopadá světlo rovnoměrně ze všech směrů. Při nerovnoměrném rozložení světelného toku do prostoru je nutné znát prostorovou hustotu nebo prostorovou a plošnou hustotu světelného toku v různých směrech [1], t.j. svítivost zdroje či jas v různých

materiál, povrch	činitel odrazu ρ (%)	materiál, povrch	činitel odrazu ρ (%)
kovy		dřevo	
hliník plátovaný	75 – 90	javorové, surové, přírodně voskované	40 – 50
hliník leštěný	60 – 72	dubové, surové, přírodně voskované	30 – 49
matný hliníkový povrch	55 – 60	dřevo ořechové	10 – 20
stříbro leštěné	85 – 94	dřevo mahagonové	15 – 20
platina leštěná	62	dřevo mořené tmavé	10 – 30
zlato leštěné	70		
nikl leštěný	53 – 63	malba (zed')	
chrom leštěný	60 – 70	bílá	76 – 88
leštěný povrch nerez oceli	55 – 60	žlutá světlá	66 – 80
bílý smalt	85 – 90	žlutá tmavá	47 – 67
stavební materiály		hnědá světlá	30 – 48
žula	asi 44	hnědá tmavá	14 – 31
cihly žluté	asi 35	červená světlá	39 – 65
cihly červené	asi 25	červená tmavá	17 – 39
sádra	asi 80	zelená světlá	36 – 69
malta velmi jasná	asi 50	zelená tmavá	11 – 35
omítky ušlechtilé jasné	asi 40	modrá světlá	24 – 56
malta tmavá	asi 25	modrá tmavá	5 – 25
papír		růžová	35 – 61
bílý	asi 80	šedá světlá	35 – 67
světle žlutý	60 – 70	šedá tmavá	15 – 35
světle zelený	60 – 70	černá	2 – 4
světle namodralý	60 – 70		
světle modrý	35 – 45		

Tab. 3. Orientační hodnoty činitele odrazu některých materiálů [1]

směrech. Pokud se bude jednat o odraz či prostup a zmapování rozložení toku do prostoru, je navíc potřeba definovat směr dopadajícího svazku paprsků.

Prostorové rozložení svítivosti bodového světelného zdroje lze vyjádřit fotometrickou plochou (indikatrix) svítivosti. Tu lze získat podle [1] vynesemím svítivostí jako radiusvektory se středem v bodovém světelném zdroji a spojením všech koncových bodů těchto radiusvektorů. Pro zjednodušení zobrazení a zpracování dat se provádějí řezy fotometrickými plochami zpravidla rovinami procházejícími bodovým zdrojem. V těchto řezech je pak rozložení svítivosti definována křivkami svítivosti. Obecně křivky svítivosti lze zapsat matematicky ve tvaru

$$I_\gamma = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad (\text{cd}; \text{cd}, -) \quad (10)$$

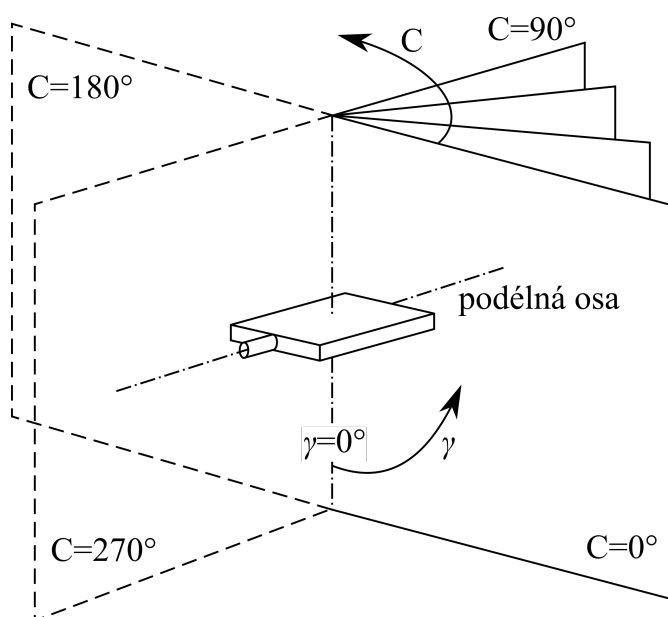
kde

I_γ je svítivost I do směru γ ,

I_0 je vztážná svítivost ve směru normály elementu plochy, tj. do úhlu $\gamma = 0^\circ$,

$f_I(\gamma)$ je charakteristická funkce svítivosti matematicky popisující křivku svítivosti.

Čáry svítivosti se obvykle udávají v soustavě fotometrických polorovin, doporučených Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE [1], nejčastěji v soustavě $C - \gamma$, viz obr 1.



Obr. 1. Soustava fotometrických polorovin systému $C - \gamma$

Osa svazku polorovin $C - \gamma$, tj. průsečnice svazku rovnoběžných rovin, je kolmá k hlavní vyzařovací ploše svítidla či světelného zdroje.

Je nutné poznamenat, že svítivost se vztahuje pouze k bodovým světelným zdrojům a tudíž je nutné uvažovat svítivost nekonečně malého elementu plochy. V praxi je ovšem všeobecně zavedeno pravidlo, že svítivost lze uvažovat u zdrojů světla ať už primárních či sekundárních, pokud největší rozměr tohoto zdroje nepřesahuje pětinu vzdálenosti zdroje od kontrolního bodu [3].

Prostorové rozložení jasu lze obdobně jako prostorové rozložení svítivosti prezentovat fotometrickou plochou rozložení jasu. Indikatrix jasu lze získat spojením koncových bodů radiusvektorů jasů sledované plochy. Řezy fotometrickou plochou rozložení jasu, obsahující uvažovanou plochu, se nazývají čáry (křivky) jasu [1]. Matematicky lze čáry jasu popsat vztahem

$$L_\gamma = L_0 \cdot f_L(\gamma) \quad (\text{cd}/\text{m}^2; \text{cd}/\text{m}^2, -) \quad (11)$$

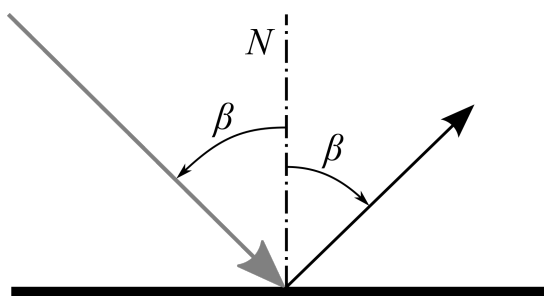
kde

- L_γ je jas L do směru γ ,
- L_0 je vztažný jas ve směru normály plochy, tj. do úhlu $\gamma = 0^\circ$,
- $f_L(\gamma)$ je charakteristická funkce jasu matematicky popisující čáru jasu.

Indikatrix svítivosti či jasu definují pouze rozložení světelného toku do prostoru z bodu a nezabývají se původem toku. Tímto způsobem lze popsat prostorové rozložení vyzařovaného světelného toku svítidla nebo odraženého či prostupujícího světelného toku od nebo skrz materiál.

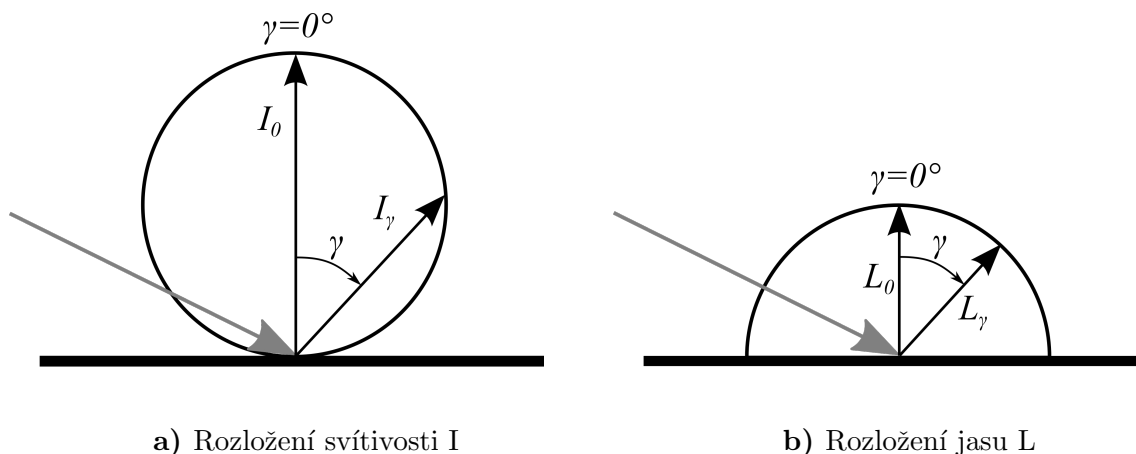
1.2.1 Odraz světla

Povrchy látek lze rozlišit podle rozložení odraženého světelného toku do prostoru. Nejjednodušším odrazem je zrcadlový odraz, kdy úhel dopadu paprsku vůči normále plochy, na kterou paprsek dopadá, je totožný s úhlem odrazu, přičemž odražený a dopadlý paprsek leží ve stejné rovině podle obr. 2. Plochy s ideálním zrcadlovým odrazem vykazují tedy nenulový jas pouze ve směrech odražených paprsků.



Obr. 2. Znázornění zrcadlového odrazu paprsků

Pokud je paprsek po dopadu na plochu odražen a rozptýlen do poloprostoru nad plochou tak, že jas elementu této plochy bude ve všech směrech totožný, označujeme tento odraz jako rovnoměrně rozptylný (difuzní) (viz obr. 3).



a) Rozložení svítivosti I

b) Rozložení jasu L

Obr. 3. Odrasné vlastnosti rovnoměrně rozptylného (difuzního) povrchu po dopadu paprsku

Pro difuzní odraz platí, že distribuce odražených paprsků od elementu plochy není závislá na úhlu dopadu svazku paprsků. Svítivost elementu této plochy je maximální v kolmém směru a mění se s úhlem podle Lambertova kosinusového zákona. Pro element čistě difuzní plochy bude fotometrická plocha svítivosti plochou kulovou. Řez touto plochou lze nalézt na obr. 3a).

Charakteristická funkce svítivosti, použitá ve vztahu (10), pro element čistě difuzní plochy bude [1]

$$f_I(\gamma) = \cos(\gamma) \quad (-) \quad (12)$$

Pro čistě difuzní plochu bude mít charakteristická funkce jasu, použitá ve vztahu (11), tvar [1]

$$f_L(\gamma) = 1 \quad (-) \quad (13)$$

Pro světelný tok Φ odražený od difuzního povrchu s charakteristickou funkcí $f_I(\gamma)$ podle vztahu (12) podle [1] platí rovnice

$$\Phi = I_0 \cdot \pi \quad (\text{lm; cd}) \quad (14)$$

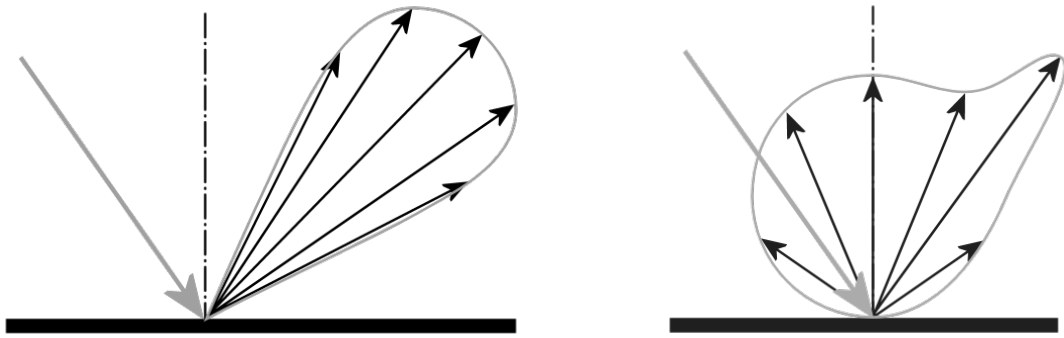
Světlení M zmíněného povrchu je dáno vztahem

$$M = \pi \cdot L \quad (\text{lm/m}^2; \text{cd/m}^2) \quad (15)$$

V praxi se ovšem nesetkáváme s dokonalými zrcadlovými ani rozptylnými odrazy. Zrcadla určená pro osvětlovací účely v různém stupni poněkud světlo rozptylují a matné povrchy, používané pro rozptýlení světla, vykazují i jistou složku zrcadlového odrazu. Obecně jde tedy o smíšené odrazy.

V současné době se podle [5] k popisu odrazných vlastností používají ideální případy odrazných povrchů. Ideálně rozptylná plocha totiž dovoluje výpočty odrazů velice zjednodušit. Počítá se s rovnoměrně svítícími stropy, transparenty, se svítidly s opálovým sklem apod. Na druhou stranu při návrhu reflektorů se počítá s ideálně zrcadlovými odrazy. Většina výpočetních software pro návrh osvětlovacích soustav, například Dialux, používá čistě difuzně odrážející povrchy pro výpočet rozložení světelného toku za použití integrálního činitele odrazu. Tím dojde ke značnému zjednodušení při výpočtech jak pro výpočetní software, tak pro sestavení simulovaného prostředí, za cenu snížené přesnosti výstupních údajů.

Ve skutečnosti však nenalezneme mnoho dokonale difuzních či zrcadlových povrchů. Matné povrchy vykazují i zrcadlové odrazy a zrcadlově odrážející povrchy vykazují i difuzní složku (obr. 4).



a) Zrcadlový odraz s rozptylnou složkou

b) Difuzní odraz se zrcadlovou složkou

Obr. 4. Smíšené odrazy

1.2.2 Dvousměrová distribuční funkce

Kvalitní výpočet světelné scény je možný pouze za použití reálných odrazných vlastností materiálů. Již nestačí znát pouze určitou, např. průměrnou, hodnotu činitele odrazu ρ , ale je potřeba mít k dispozici též prostorové rozložení jasu sledovaného povrchu, které se mění s různými směry dopadajícího svazku paprsků.

Dvousměrová distribuční funkce BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) popisuje, kolik světla, přicházejícího z daného směru, se odrazí do jiného směru. Funkce BRDF je v počítačové grafice používána pro zvýšení realističnosti renderovaných scén. Do této funkce vstupuje paprsek dopadající na povrch pod úhly θ_i, φ_i a paprsek odrážející se od povrchu pod úhly θ_r, φ_r a vrací poměr odraženého jasu ve směru θ_r, φ_r ku osvětlenosti ze směru θ_i, φ_i podle obr. 5 a vztahu

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i d\omega_i} \quad (\text{sr}^{-1}) \quad (16)$$

kde

dL_r je jas pozorovaný ze směru θ_r, φ_r (cd/m^2),

dE_i je osvětlenost plošky ze směru θ_i, φ_i (lx),

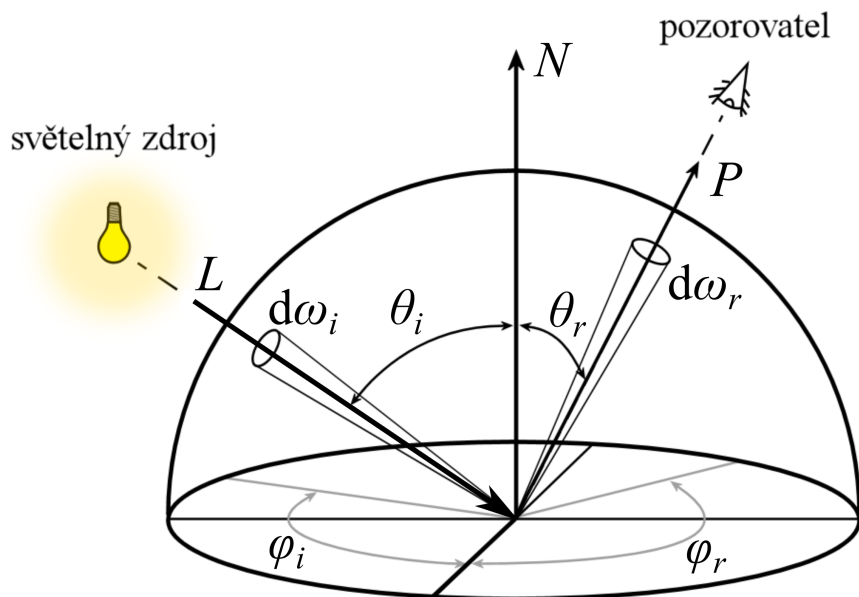
L_i je jas sbíhajícího se svazku paprsků do pozorovaného bodu povrchu ze směru θ_i, φ_i , který závisí na naklonění plochy, na kterou dopadá, podle $\cos \theta_i$ (cd/m^2).

Ze vztahu (16) vychází pro jas $L_r(\theta_r, \varphi_r)$ plošky pozorované ze směru θ_r, φ_r výraz

$$L_r(\theta_r, \varphi_r) = \int_{\Omega} f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cdot L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i d\omega_i \quad (\text{cd}/\text{m}^2) \quad (17)$$

Tento vztah se označuje pojmem **zobrazovací rovnice**. Integruje se zde přes celý prostorový úhel a sčítají se vlivy všech paprsků dopadajících do daného bodu z okolního prostoru.

BRDF tedy vyjadřuje distribuční funkci odrazu světla od povrchu. Pokud dochází k



Obr. 5. Grafické znázornění úhlů, resp. veličin zastoupených ve funkci BRDF.

průchodu světla hmotou plochy, používá se BTDF (Bidirectional Transmittance Distribution Function), dvousměrová distribuční funkce propustnosti. Popisuje totéž co BRDF s tím rozdílem, že paprsky vystupující z hmoty směřují do opačného poloprostoru než paprsky dopadající na daný povrch. Pokud bychom chtěli použít funkci, která bude obsahovat jak složku odraženou, tak prošlou plochou, použijeme BSDF (Bidirectional Scattering Distribution Function) neboli obousměrnou distribuční funkci rozptylu. Dalším termínem je tzv. BSSRDF (Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function). Tato funkce bere v potaz podpovrchový rozptyl. Pokud paprsek dopadne na povrch z průsvitného materiálu, dojde k podpovrchovému rozptylu a část světla může být vyzářena na jiném místě, než na místě dopadu původního paprsku. Je vhodná pro průsvitné materiály jako lidská pokožka či mramor. U většiny materiálů je tato funkce však zbytečná a stačí počítat pouze s povrchovým odrazem podle BRDF.

Do vztahu (16) vstupuje úhel φ_i , z čehož plyne závislost odrazných vlastností povrchu na otočení kolem normály plochy. Pokud bude materiál vykazovat izotropní odraz kolem normály plochy, lze vztah (16) zjednodušit na tvar

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r - \varphi_i) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r - \varphi_i)}{dE_i(\theta_i)} = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r - \varphi_i)}{L_i(\theta_i) \cdot \cos \theta_i d\omega_i} \quad (\text{sr}^{-1}) \quad (18)$$

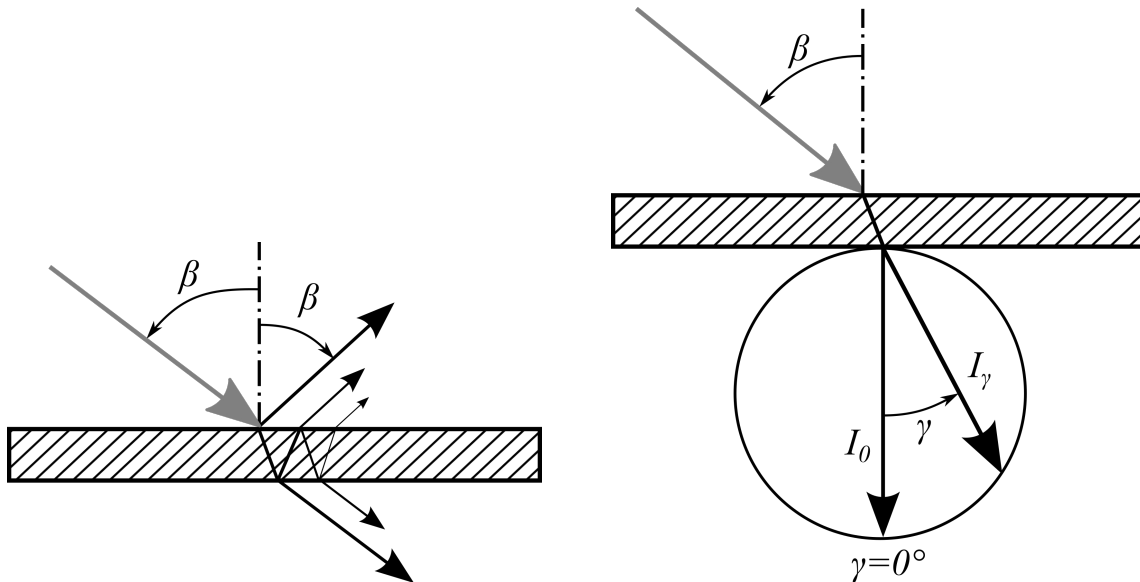
Distribuční funkce odrazu by bylo možné také rozšířit o závislost na vlnové délce. Podle [14] by kompletní funkce musela zahrnovat závislost několika parametrů na pozorovaném úhlu a úhlu dopadajícího paprsku. Tyto parametry by byly: jas, vlnová délka (mohla by se měnit po odrazu), polarizace, změna výstupního bodu z povrchu díky podpovrchovému rozptylu paprsku, časová prodleva mezi dopadem a odrazem paprsku. Zahrnovat všechny tyto parametry by však bylo neefektivní.

Základní vlastnosti funkce BRDF:

- funkce je vždy nezáporná: $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \geq 0$
- platí Helmholtzův princip reciprocity: $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = f_r(\theta_r, \varphi_r, \theta_i, \varphi_i)$
- splňuje zákon zachování energie: $\int_{\Omega} f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_r d\omega_r \leq 1$.

1.2.3 Lom světla

Podobně jako odražený tok (popsáno v odst. 1.2.1) i světelný tok prošlý vrstvou látky může vycházet různým způsobem. Vezměme látky čiré či dokonale průhledné jako např. optická skla, tenké vrstvy vody apod. U těchto látek podle [1] dochází k přímému prostupu světla. Pro šikmo dopadající paprsky dochází k rovnoběžnému posunu vycházejícího paprsku z látky podle obr. 6. Dále jsou na tomto obrázku znázorněny částečné odrazy na rozhraní látek, ke kterým může docházet podle dalších vlastností uvažované látky.

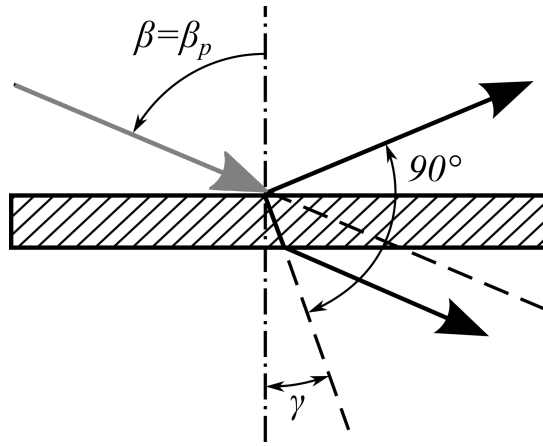


a) Prostup paprsku dokonale průhlednou vrstvou látky b) Rozložení svítivosti při rovnoměrně rozptýleném prostupu paprsků

Obr. 6. Prostup světla vrstvou látky

Některé látky procházející paprsky částečně či úplně rozptylují. Tuto vlastnost látky lze zobrazit obdobně jako pro odraz fotometrickou plochou nebo křivkami svítivosti. Pokud bude látka veškeré procházející paprsky rozptylovat dokonale rovnoměrně, bude fotometrická plocha svítivosti plochou kulovou. Řez touto plochou je znázorněn na obr. 6b). Kulovou fotometrickou plochu bude popisovat charakteristická funkce (12). Strana dané látky s vycházejícími dokonale rovnoměrně rozptýlenými paprsky bude vykazovat totožné světelně technické vlastnosti jako povrch odrážející světlo dokonale difuzně.

U většiny látek dochází ke smíšenému odrazu, tzn. že světelný tok je částečně rozptýlen dokonale difuzně po průchodu a jistá část paprsků projde látkou beze změny směru.



Obr. 7. Prostup paprsku a polarizace

Při odrazu světla od povrchu látky může docházet k polarizaci světla. Pro obecný úhel dopadu paprsku β podle obr. 7 nastává částečná polarizace odraženého světla s vektorem $\vec{\epsilon}$ v kmitové rovině převážně kolmé k rovině dopadu [6]. Odražené světlo bude plně polarizované pro polarizační úhel (Brewsterův úhel [7]) β_p pro který platí $\beta + \gamma = 90^\circ$. Tento úhel je znázorněn na obr. 7. Pro index lomu platí podle Snellova zákona [6] vztah, který lze zjednodušit, pokud prostředí přicházejícího paprsku je vzduch vykazující absolutní index lomu rovný zhruba 1

$$\frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \frac{\sin \beta}{\sin \gamma} = n \quad (19)$$

Úplná polarizace odraženého světla nastává, pokud úhel dopadu β bude roven polarizačnímu úhlu β_p , z čehož vyplývá vztah

$$n = \frac{\sin \beta_p}{\sin(90^\circ - \beta_p)} = \tan \beta_p \quad (-) \quad (20)$$

Stejně jako odražené světlo i světlo vstupující do látky může být částečně polarizováno. Indexy lomů některých vybraných látek lze nalézt v tab. 4, kde n_D je index lomu dané látky vůči vzduchu pro žluté světlo $\lambda_D = 589,3$ nm.

Jelikož se index lomu dané látky liší pro různé vlnové délky, je i polarizační úhel β_p různý pro různé vlnové délky. Bílé světlo, složené ze světla o různých vlnových délkách, nemůže být tedy dokonale polarizováno odrazem.

Na rozhraní mezi prostředími s absolutními indexy lomu N_1 a N_2 , kdy paprsek dopadá na rozhraní z prostředí opticky hustšího s vyšším indexem lomu N_1 ve srovnání s indexem lomu N_2 , nastává lom paprsku (přechod do opticky řidšího prostředí) pouze tehdy, je-li úhel dopadu paprsku β menší než tzv. mezní úhel β_m , pro který platí [1]

látka	n_D	látka	n_D
vakuum	0,999 71	ricinový olej	1,478
vodík	0,999 85	lněný olej	1,486
vodní pára	0,999 96	cedrový olej	1,505
kyslík	0,999 98	korunové sklo lehké	1,515
vzduch	1,000 00	kanadský balzám	1,542
dusík	1,000 01	flintové sklo lehké	1,608
led	1,31	korunové sklo těžké	1,615
metanol	1,329	sirouhlík	1,628
voda	1,333	α -monobromnaftalen	1,658
etanol	1,362	flintové sklo těžké	1,752
glycerin	1,469	diamant	2,417

Tab. 4. Index lomu různých látek [8]

$$\sin \beta_m = n_{21} = \frac{1}{n_{12}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (21)$$

kde

n_{21} je relativní index lomu prostředí 2 vzhledem k prostředí 1,

n_{12} je relativní index lomu prostředí 1 vzhledem k prostředí 2,

N_1, N_2 jsou absolutní indexy lomu.

Je-li úhel dopadu větší než mezní úhel β_m , nedojde k průchodu paprsku z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího, tzn. z prostředí s absolutním indexem lomu vyšším do prostředí s absolutním indexem lomu nižším. V tomto případě dojde k úplnému odrazu na rozhraní obou prostředí. Této vlastnosti se využívá např. u světlovodů [1]. Podle [9] je index lomu jádra optického vlákna vyšší než index lomu obalu jádra, z čehož plyne totální odraz paprsků dopadajících na rozhraní z jádra pod úhly vyššími než mezním úhlem β_m . Dochází tak k extrémně nízkým ztrátám přenášeného výkonu.

KAPITOLA 2

OSVĚTLOVACÍ MODELY, ZOBRAZOVACÍ METODY

Od první poloviny 80. let můžeme v architektuře stále častěji vidět uplatnění počítačového zobrazení trojrozměrných prostředí v souvislosti s vývojem počítačů a algoritmů realistických výpočtů světelných scén. Obecně se postupy, umožňující vypočítat jas různých ploch určité scény, označují jako osvětlovací modely. Některé jednodušší modely mívají omezenou škálu zobrazitelných povrchů (materiálů). Modely, které řeší šíření světla scénou podle fyzikálních zákonů, se nazývají fyzikální modely. Jiné typy modelů, které provádějí výpočty tak, aby výsledné zobrazení vypadalo co nejbližší realitě, avšak nejsou založeny na skutečných fyzikálních zákonech, se řadí do skupiny empirických modelů. Empirické modely se používají pro zobrazení scény z důvodu jednodušších výpočtů, vyžadujících obvykle i menší počet vstupních hodnot.

Lokální osvětlovací modely vypočítávají osvětlení jediného bodu na povrchu objektu [4]. Objekty ve scéně se v tomto případě navzájem neovlivňují z hlediska osvětlení. Výhodou těchto modelů je vysoká rychlost výpočtu zobrazované scény, výsledky jsou vhodné jako vizualizace. V reálné scéně však dochází k mnohonásobným odrazům světla mezi objekty. Globální charakter interakce světla s objekty postihují dvě základní zobrazovací metody, radiosita a sledování paprsku.

V této kapitole jsou uvedeny často používané osvětlovací modely v softwarech pro simulaci, tzn. pro výpočet fyzikálních veličin, či pro 3D grafiku, vizualizaci a animaci, tzn. pro zobrazení scény bez fyzikálního opodstatnění. Níže uvedený model radiosita byl použit pro výpočet mnohonásobných odrazů v modelové místnosti při výpočtech genetického algoritmu. Dále uvedený model sledování paprsku byl použit pro výpočet mnohonásobných odrazů v soustavě difuzních a nedifuzních ploch v rámci této práce.

2.1 Lambertův osvětlovací model

Lambertův osvětlovací model je založen na rovnoměrně rozptýlném odrazu světla od povrchů a je to tedy lokální fyzikální model. Lambertův kosinový zákon platí pro rovnoměrně rozptýlný (difuzní) odraz [1]. Paprsek, dopadající na povrch plochy, se rozptýlí

rovnoměrně do celého poloprostoru tak, že jas elementu uvažované plošky bude ve všech směrech konstantní (viz obr. 3b)). Rozdílné jasy jsou potom dány různou osvětleností ploch danou jejich vzdáleností od zdroje světla a natočením vůči zdroji. Jas povrchu plošky je úměrný kosinu úhlu mezi normálou plošky a paprskem vycházejícím ze zdroje světla a směřující do středu sledované plošky.

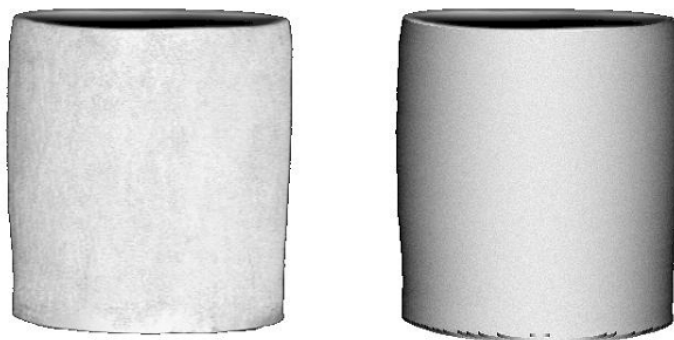
Většinou se navíc uvažuje složka okolního světla [11], což je zjednodušením mnohonásobných odrazů ve scéně. Znamená to, že ke všem osvětlenostem ploch scény se přičte jistá hodnota, ať už mají tyto plochy jakoukoliv orientaci. Obecně pak lze s užitím vztahu (15) pro jas difuzně odrážející plošky psát rovnici

$$L = L_a + L_d = \frac{M_a + M_d}{\pi} = \frac{\rho}{\pi} \cdot (E_a + E_d) = \frac{\rho}{\pi \cdot A} \cdot (\Phi_a + \Phi_d) \quad (22)$$

kde

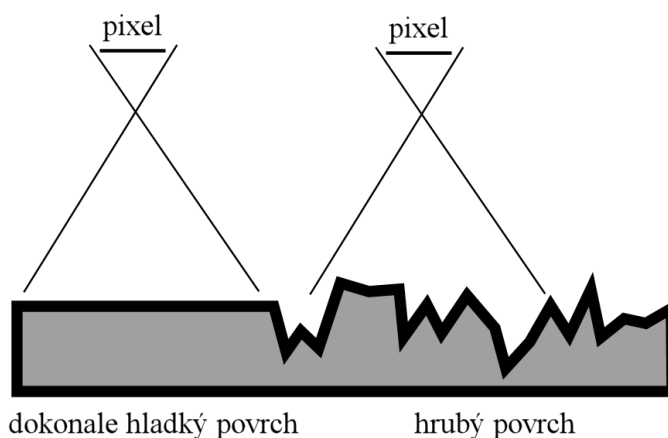
- L je jas plošky odpovídající vlivu daných zdrojů (cd/m^2),
- L_a je jas plošky odpovídající vlivu nepřímého světelného toku (sekundární zdroj světla) (cd/m^2),
- L_d je jas plošky odpovídající vlivu přímého světelného toku (primární zdroj světla) (cd/m^2),
- M je světlení plošky odpovídající vlivu daných zdrojů (lm/m^2),
- ρ je integrální činitel odrazu plošky (-),
- E je osvětlenost plošky odpovídající vlivu daných zdrojů (lx),
- A je plocha plošky (m^2),
- Φ je světelný tok odpovídající vlivu daných zdrojů (lm),

Srovnání skutečného a vygenerovaného obrazu ukazuje obr. 8 [12]. V obou případech je hliněná válcová váza osvětlena bodovým zdrojem světla, umístěným za pozorovatelem. Na vygenerovaném snímku vpravo je vidět, že jas, jak bylo předpokládáno, klesá postupně od nejbližších míst vázy k pozorovateli ke stranám. Oproti tomu je jas skutečné vázy poněkud rovnoměrnější a celkový dojem je plošší.



Obr. 8. Fotografie hliněné vázy (vlevo) ve tvaru válce osvětlené bodovým zdrojem světla umístěným za pozorovatelem v porovnání s obrazem (vpravo) téže scény vypočteným podle Lambertova osvětlovacího modelu [12].

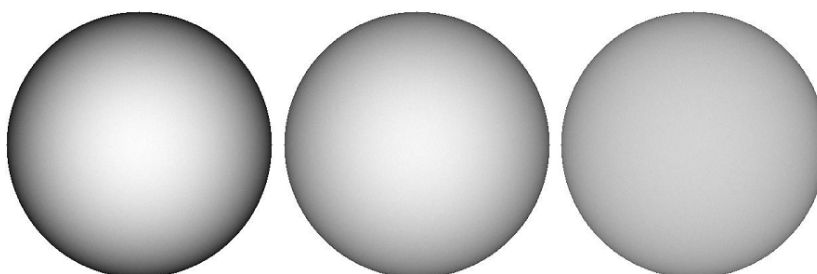
Podobné odchylky od Lambertovského modelu najdeme u materiálů jako je beton, písek, textilie, aj. Podle [12] je rozdíl dán hrubostí povrchu, který lze rozdělit na menší plošky s různou orientací (viz obr. 9).



Obr. 9. Hrubost povrchu ovlivňuje výsledek při výpočtech podle Lambertova modelu. Na jeden pixel se zobrazí více náhodně orientovaných plošek.

Na obr.9 vidíme vlevo dokonale hladký povrch, vpravo povrch hrubý. Levá i pravá část se při výpočtech simulačního softwaru či vyfotografování digitálním fotoaparátem zobrazí na jeden obrazový bod (pixel) výsledného obrázku.

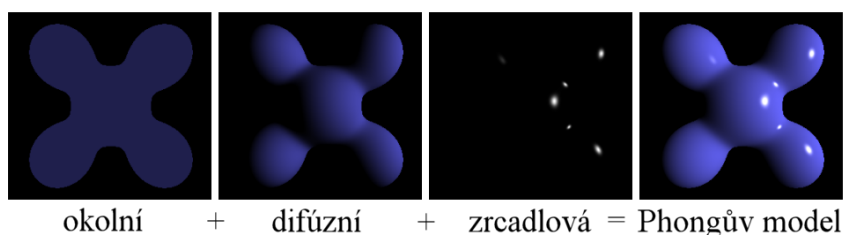
Mějme povrch skládající se ze symetrických zářezů tvaru písmene V , ležících v jedné rovině, jejichž stěny odrážejí světlo difuzně [12]. Uvažujme dále povrch, který světlo odráží isotropně a má tedy zářezy tvaru V rozmístěny náhodně s nulovou střední odchylkou a se směrodatnou odchylkou σ . Výsledný model byl použit při generaci obrázku koule. Na obr. 10 vidíme vlevo kouli s dokonale hladkým povrchem ($\sigma = 0^\circ$), uprostřed se směrodatnou odchylkou $\sigma = 20^\circ$ a vpravo s odchylkou $\sigma = 40^\circ$. Levý obrázek koule odpovídá povrchu podle Lambertovského modelu. Se zvyšující se směrodatnou odchylkou úhlů normál plošek zářezů od normál dokonale hladkého povrchu se celkový dojem objektu zplošťuje.



Obr. 10. Generované obrázky s povrchem pokrytým zářezy tvaru V . Zářezy jsou postupně zleva doprava hlubší. Levý generovaný snímek zachycuje kouli s dokonale hladkým povrchem (zářezy s hloubkou 0). Koule jsou osvětleny ze směru pozorovatele [12].

2.2 Phongův osvětlovací model

Phongův empirický osvětlovací model byl vytvořen pro realističtější zobrazení zakřivených povrchů ve srovnání s modelem dokonale hladkého difuzního povrchu přidáním dalších složek odrazů. Využívá se přitom poznatku, že skutečné materiály nemají pouze čistě difuzní složku odrazu světla dopadajícího přímo z primárních světelných zdrojů, ale že mají též přímou zrcadlovou složku. Tato zrcadlová složka může být do značné míry rozptýlená. Navíc se k difuznímu a zrcadlovému odrazu připočte globální složka nepřímého okolního světla sekundárních zdrojů světla (obr. 11), která je zjednodušením mnohonásobných odrazů a osvětluje povrchy objektů scény ze všech stran rovnoměrně.



Obr. 11. Složky Phongova modelu. Výsledkem sečtení složky vlivu okolního světla, difuzního odrazu a zrcadlového odrazu přímého světla je celkový snímek uvedený vpravo [13].

Ve Phongově modelu se pracuje s intenzitami zrcadlové, difuzní složky a složky okolního světla, přičemž intenzitu lze ve fotometrii přirovnat k jasů. Podle [13] lze intenzitu zrcadlové složky vyjádřit vztahem

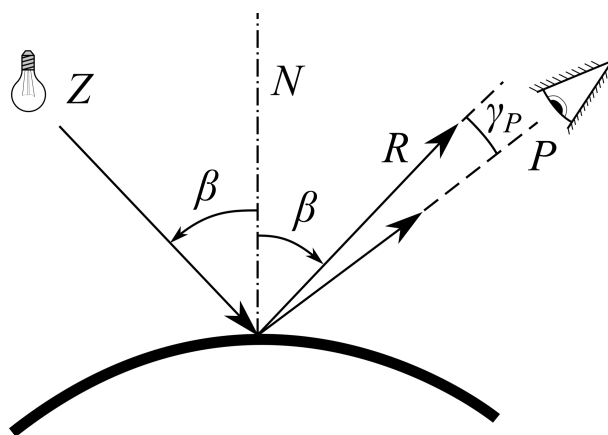
$$i_s = i_L \cdot r_s \cdot \cos^h \gamma_P \quad (23)$$

kde

- i_L je intenzita dopadajícího paprsku,
- r_s je koeficient zrcadlového odrazu, který určuje míru zastoupení zrcadlové složky v celkově odraženém světle (dílní činitel odrazu zrcadlové složky),
- h je exponent určující rozšíření zrcadlového odrazu, který se pohybuje v intervalu $\langle 1, \infty \rangle$; podle [11] se často volí hodnota 50 nebo 60,
- γ_P je úhel mezi maximem zrcadlového odrazu a směrem pozorovatele (obr. 12), přičemž vektor maxima \vec{R} a dopadající paprsek \vec{Z} svírají s normálou \vec{N} úhly totožné velikosti a leží v téže rovině.

Při simulování barevných povrchů dochází k ovlivnění složek odrazu okolního světla a difuzního odrazu. Odlesky zrcadlové složky si však ponechávají ve Phongově modelu barvu zdroje světla [11].

Vztah pro difuzní složku i_d , odpovídající přímému dopadu světla z primárních světelných zdrojů a rozptylující se od povrchů objektů ve scéně rovnoměrně do všech směrů (difuzně), lze vyjádřit vztahem [5]



Obr. 12. Zrcadlová složka odrazu světla zdroje Z od plochy s normálou N , maximem zrcadlové složky R a pozorovatelem ve směru P

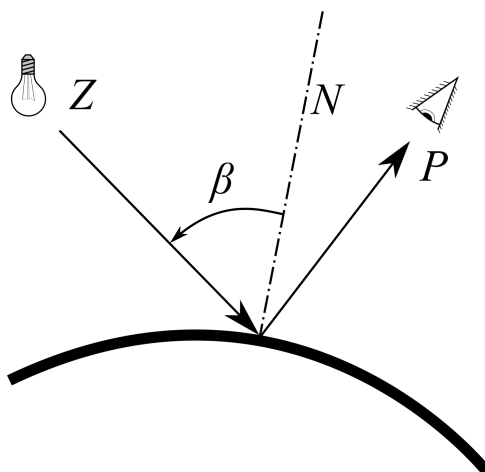
$$i_d = i_L \cdot r_d \cdot \cos(\beta) \quad (24)$$

kde

i_L je intenzita dopadajícího paprsku,

r_d je koeficient difuzní složky odrazu z celkového odraženého světla (dílní činitel difuzního odrazu přímého světla primárních zdrojů),

$\cos(\beta)$ vychází z kosinového zákona (obr. 13) pro difuzní povrchy.



Obr. 13. Difuzní složka odrazu od povrchu. Intenzita ve směru pozorovatele je závislá na úhlu β mezi dopadajícím paprskem Z a normálou N povrchu.

Jak do Lambertova zobrazovacího modelu, tak i do Phongova modelu se přidává složka okolního světla [5], která je nepřímou složkou osvětlení způsobenou mnohonásobnými odrazy. Tuto složku, která se šíří rovnoměrně ze všech stran na objekty ve scéně, lze vyjádřit vztahem

$$i_a = i_A \cdot r_a \quad (25)$$

kde

i_A je intenzita dopadajícího okolního světla, je pro všechny objekty pro jakýkoliv bod povrchu ve scéně totožná,

r_a je koeficient vyjadřující schopnost povrchu odrazet nepřímé světlo sekundárních zdrojů světla (dílní činitel odrazu nepřímého světla).

Koeficienty r_a a r_d bývají o totožných hodnotách.

Sečtením složek zrcadlové, difuzní a okolní získáme vztah pro celkovou intenzitu i sledovaného povrchu, resp. pro zdánlivý jas povrchu vnímaný pozorovatelem [5]

$$i = i_s + i_d + i_a \quad (26)$$

Pokud máme n světelných zdrojů, bude mít vztah pro celkovou intenzitu pozorovaného bodu povrchu tvar

$$i = i_a + \sum_{k=1}^n (i_{Lk} \cdot r_s \cdot \cos^h \gamma_{sk} + i_{Lk} \cdot r_d \cdot \cos(\beta)) \quad (27)$$

Indexy k vyjadřují veličiny vztahující se ke k -tému zdroji světla. Okolní složka se přičítá pouze jedenkrát.

2.3 Model Torrance-Sparrow

Při experimentálních měřeních, prováděných v rámci [11], bylo zjištěno, že Phongovým osvětlovacím modelem zobrazené světelné scény vypadají vizuálně blízké realitě, avšak jsou zřejmé jisté rozdíly. Hlavním problémem je měnící se intenzita odražené zrcadlové složky v závislosti na úhlu dopadu paprsku na zkoumaný povrch. Pro úhly mezi normálou a dopadajícím paprskem blížícím se 90° (dopadajícím pod malým úhlem) vzniká navíc posun maxima intenzity odražených paprsků od předpokládaného směru zrcadlového odrazu \vec{R} podle obr. 12. Proto v roce 1967 navrhli Torrance a Sparrow model, jehož výsledky jsou v mnoha ohledech bližší realitě.

Tento model vychází ze skutečnosti, že povrchy jsou složeny z malých různě orientovaných plošek, vykazujících zrcadlový odraz. Přímá difuzní složka odrazu od vzniká díky mnohonásobným odrazům mezi ploškami povrchu. Vzájemné stínění plošek a překrývání je v tomto modelu také zahrnuto.

Složku difuzního odrazu lze získat totožným způsobem jako tomu bylo v případě Phongově modelu vztahem (24) a složku okolního světla vztahem (25). Zrcadlová složka s (specular) odraženého světla pozorovaného bodu povrchu ze směru pozorovatele \vec{P} je dána podle [11] vztahem

$$s = \frac{D \cdot G \cdot F}{\vec{N} \cdot \vec{P}} \quad (28)$$

a celkově pro složku zrcadlové intenzity i_s je dán vztah

$$i_s = i_L \cdot r_s \cdot s \quad (29)$$

kde

D je distribuční funkce orientací normál plošek povrchu (Torrance a Sparrow použili normální rozdění),

G udává míru stínění a překrývání plošek,

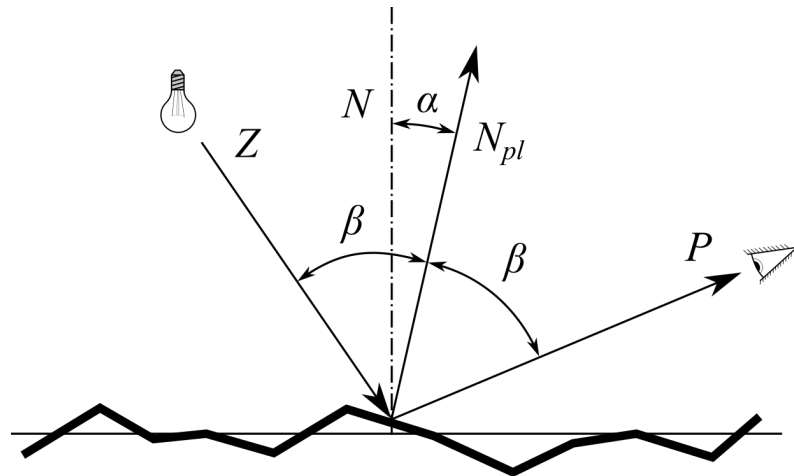
F je odraz podle Fresnelových vzorců,

\vec{N} je jednotková normála povrchu bez uvažování různě orientovaných plošek,

\vec{P} je jednotkový vektor směřující k pozorovateli (viz obr. 14),

i_L je intenzita dopadajícího paprsku,

r_s je součinitel zrcadlového odrazu, který určuje míru zastoupení zrcadlové složky v celkově odraženém světle.



Obr. 14. Podle [11] je Z vektor ve směru světelného zdroje, N je normála povrchu, N_{pl} je normála sledované plošky a P je vektor ve směru pozorovatele.

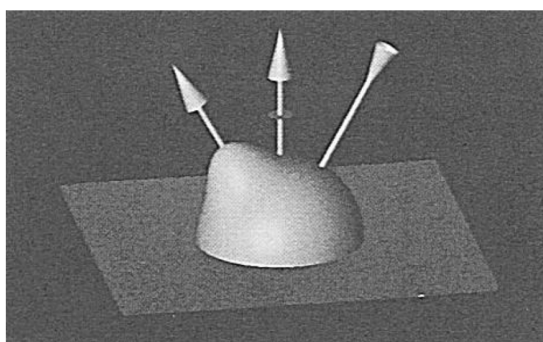
Na zrcadlovém odrazu se podle obr. 14 podílejí pouze plošky s orientací normál rovnoběžně s \vec{N}_{pl} . Model Torrance-Sparrow používá distribuční funkci normálního rozdění

$$D = e^{-(\alpha c)^2} \quad (30)$$

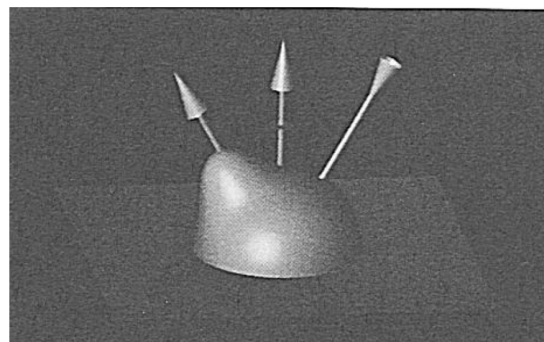
kde

α je úhel mezi normálou povrchu \vec{N} a normálou sledované plošky \vec{N}_{pl} (obr. 14),

c je směrodatná odchylka úhlů plošek pro daný povrch. Velké hodnoty vytvářejí povrchy matné, malé hodnoty povrchy s ostrou zrcadlovou složkou.

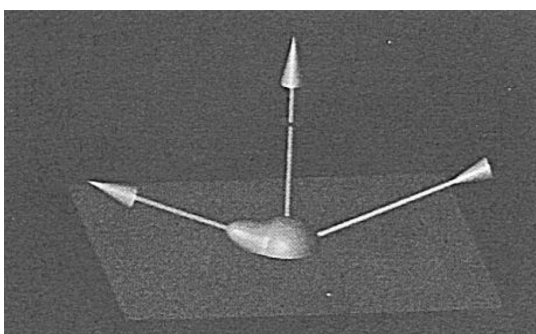


Phong Model

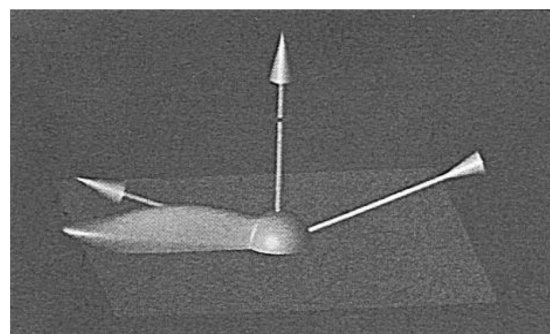


Torrance-Sparrow Model

a) Dopad paprsku s úhlem 30° vůči normále plochy.



Phong Model



Torrance-Sparrow Model

b) Dopad paprsku s úhlem 70° vůči normále plochy.

Obr. 15. Srovnání výsledků Phongova modelu a modelu Torrance-Sparrow [11].

Na obr. 15 je zobrazeno prostorové rozložení intenzity odraženého světla po dopadu paprsku pod malým úhlem vůči povrchu. Paprsek zde dopadá zprava a jsou zde zobrazeny normála plochy a vektor zrcadlového odrazu. Srovnáme-li model Phongův a Torrance-Sparrowa je největší rozdíl v zrcadlové složce odrazu pro velké úhly dopadu vůči normále plochy.

2.4 Radiosita

Radiosita je metoda pro popis mnohonásobných odrazů, která se vyvinula původně pro simulaci přenosu tepla v roce 1950, později byla upravena pro výpočty světelných scén a představena na Cornellově univerzitě roku 1984 [15]. Jde o fyzikální model, neboť vychází ze zákona o zachování energie. Dochází zde k vyhodnocení scény zobrazovací rovnicí (odst. 17), přičemž se povrchy rozdělí na konečný počet menších dokonale difuzně odrazujících plošek a počítají se několikanásobné odrazy. Tato globální zobrazovací metoda nedokáže pracovat s průhlednými objekty a povrchy s nedifuzními odrazy. Výsledky výpočtů osvětlení scény jsou nezávislé na směru pohledu pozorovatele oproti modelům Phong (odst. 2.2) a Torrance-Sparrow (odst. 2.3), protože výstupem jsou osvětlenosti plošek vykazujících difuzní odraz s konstantním jasem do všech směrů.

Celkový světelný tok Φ_i dopadající na i -tou plošku lze vyjádřit podle [1] vztahem

$$\Phi_i = \Phi_{i0} + \sum_{k \neq i}^n \Phi_{k \rightarrow i} = \Phi_{i0} + \sum_{k \neq i}^n f_{k \rightarrow i} \rho_k \Phi_k \quad (\text{lm}) \quad (31)$$

kde

Φ_{i0} je tok dopadající na plošku i přímo ze zdroje světla (lm),

$\Phi_{k \rightarrow i}$ je tok dopadající na plošku i z plošky k (lm),

$f_{k \rightarrow i}$ je činitel vazby k -té plochy s i -tou plochou (poměrná hodnota toku zachyceného plochou i z celkového vyzářeného toku plochou k) (-),

ρ_k je činitel odrazu plochy k (-),

Φ_k je tok dopadající na plošku k (lm).

Máme-li tedy světelnou scénu rozdělenou na plošky, bude první dopad světelného toku $\Phi_{i,1}$, vyzářeného přímo pouze primárními světelnými zdroji, dopadající na i -tou plošku roven Φ_{i0} . Pro výpočet světelných toků, dopadajících na plošky scény po prvním odrazu, využijeme hodnoty toků $\Phi_{i,1}$ všech plošek. Světelný tok dopadající na i -tou plošku s uvažováním jednoho odrazu od všech ostatních plošek scény bude tedy

$$\Phi_{i,2} = \Phi_{i0} + \sum_{k \neq i}^n \Phi_{k,1 \rightarrow i} = \Phi_{i0} + \sum_{k \neq i}^n f_{k \rightarrow i} \rho_k \Phi_{k,1} \quad (\text{lm}) \quad (32)$$

kde

$\Phi_{k,1 \rightarrow i}$ je tok dopadající na plošku i z plošky k při započítání dopadu světelného toku pouze z primárních zdrojů na plošku k (lm),

$\Phi_{k,1}$ je tok dopadající na plošku k pouze z primárních zdrojů (Φ_{k0}) (lm).

Výpočet toků dopadajících na plošku i scény při uvažování dvou odrazů od plošek lze vyjádřit vztahem

$$\begin{aligned}
\Phi_{i,3} &= \Phi_{i0} + \sum_{k \neq i}^n \Phi_{k,2 \rightarrow i} = \Phi_{i0} + \sum_{k \neq i}^n f_{k \rightarrow i} \rho_k \Phi_{k,2} \\
&= \Phi_{i0} + \sum_{k \neq i}^n f_{k \rightarrow i} \rho_k \left(\Phi_{k0} + \sum_{l \neq k}^n f_{l \rightarrow k} \rho_l \Phi_{l,1} \right) \quad (\text{lm})
\end{aligned} \tag{33}$$

kde

$\Phi_{k,2 \rightarrow i}$ je tok dopadající na plošku i z plošky k při započítání dopadu světelného toku z primárních a sekundárních zdrojů (ostatních plošek) na plošku k (lm),

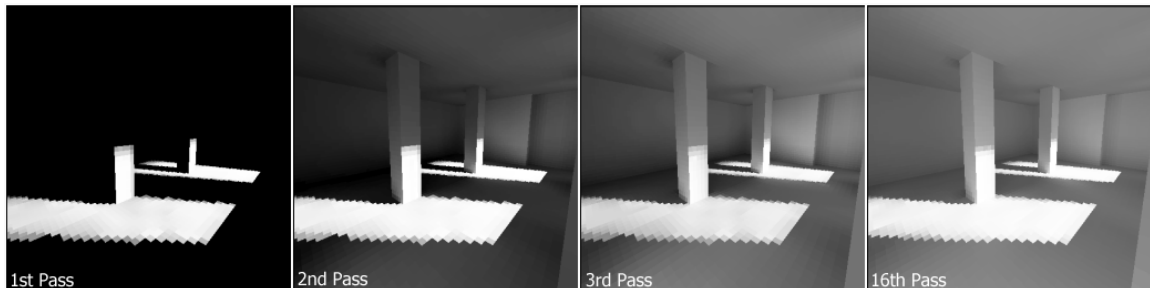
$\Phi_{k,2}$ je tok dopadající na plošku k s uvažováním primárních světelných zdrojů a prvního odrazu od ostatních plošek (lm),

$f_{l \rightarrow k}$ je číselný koeficient vazby l -té plochy s k -tou plochou (-),

ρ_l je číselný koeficient odrazu plochy l (-),

$\Phi_{l,1}$ je tok dopadající na plošku l pouze z primárních světelných zdrojů (Φ_{i0}) (lm).

Je tedy zřejmé, že pro výpočet světelného toku dopadajícího na plošku i po r odrazech je třeba vypočítat $r+1$ dopadů světelného toku všech plošek dané scény. Pro číselný koeficient odrazu ρ plošek menší než 1 bude odražený světelný tok každým odrazem ubývat a rozložení světelného toku ve scéně se bude měnit pomaleji. Výsledek několikanásobných odrazů lze vidět na obr. 16.



Obr. 16. Modelová místnost s vypočítanými mnohonásobnými odrazy [16]. První snímek zleva zachycuje scénu bez odrazů, druhý s jedním, třetí se dvěma a čtvrtý s patnácti odrazy.

Na obr. 16 je znázorněna totožná modelová místnost z jednoho pohledu osvětlená vnějším zdrojem okny umístěných v pravé stěně. Rozdíl v osvětlenostech plošek místnosti je způsobena započítáním různého počtu odrazů. Na levém obrázku lze vidět dopad přímé složky světelného toku primárního světelného zdroje. Na druhém obrázku již dochází k prvnímu odrazu od plošek, které se stávají sekundárními zdroji a stejně jako primární zdroj osvětlují ostatní plošky místnosti. Na třetím snímku je scéna po dvou odrazech a na posledních po patnácti odrazech. Postupně odražený tok ploškami klesá a dochází k menším změnám osvětleností plošek (rozdíl mezi prvním a druhým obrázkem je mnohem

markantnější než mezi třetím a čtvrtým). Na obrázcích je zřetelně vidět rozdělení povrchů modelové místnosti na menší plošky.

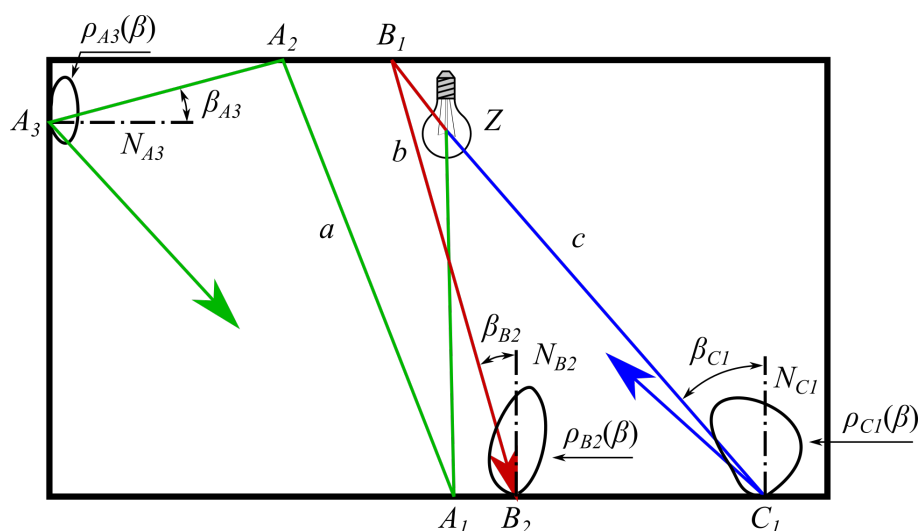
2.5 Sledování paprsku (ray tracing)

Metoda sledování paprsku vychází z fyzikální podstaty světla. Jedná se o globální zobrazovací metodu zahrnující mnohonásobné odrazy světla mezi objekty scény. Dopřednou metodu sledování paprsku lze využít pro výpočet světelně technických veličin vybrané scény. Tato metoda byla využita v rámci této práce pro výpočet difuzních a nedifuzních odrazů od povrchů modelové místnosti. V případě metody dopředného sledování paprsku jsou sledovány paprsky počínaje zdrojem světla. Podle vyzařovacích charakteristik primárních světelných zdrojů jsou vybrány směry paprsků, reprezentující jistou hodnotu světelného toku. Při zjednodušeném použitém přístupu uvažování pouze odrazů od povrchů scény dochází po dopadu paprsku na povrch objektu ve scéně ke ztrátě části světelného toku paprsku, je zaznamenáno místo dopadu paprsku a jím reprezentovaný světelný tok a paprsek pokračuje vybraným směrem se světelným tokem daným odraznými vlastnostmi povrchu dál. Paprsek zanikne po určitém počtu odrazů nebo pokud jeho světelný tok klesne pod definovanou mezní hodnotu. Jiným možným přístupem, použitým v této práci, je konstantní světelný tok reprezentovaný všemi paprsky i po odrazech. Činitel odrazu povrchu, od kterého se paprsky odrážejí, nemá v tomto případě vliv na jimi reprezentovaný světelný tok po odrazu, ale má vliv na pravděpodobnost jejich odrazu či pohlcení. Část paprsků se tedy od povrchu neodrazí tak, aby byl splněn vztah (3).

Tímto způsobem je vygenerováno tolik paprsků, aby součet jimi reprezentovaného světelného toku byl celkovým světelným tokem vybraného světelného zdroje. Na obr. 17 je znázorněno šíření tří paprsků vyzářených světelným zdrojem. Pravděpodobnost vyzáření paprsku ze světelného zdroje v určitém směru je dána fotometrickou plochou svítivosti zdroje. Pravděpodobnost odrazu paprsku od povrchu v určitém směru je dána fotometrickou plochou činitele odrazu $\rho(\beta)$ (viz odst. 4.1) daného materiálu pro úhel dopadu paprsku β .

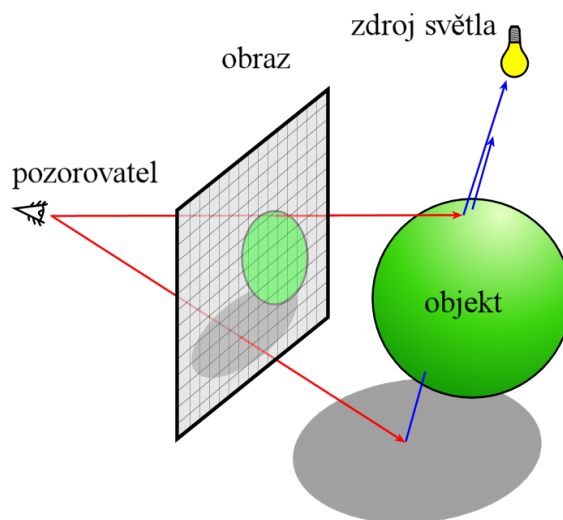
Paprsek a podle obr. 17 pokračuje po třetím odrazu od stěn v náhodně vybraném směru s pravděpodobností podle fotometrické plochy činitele odrazu $\rho_{A3}(\beta)$ daného úhlem β . Body odrazu $A1$, $A2$ a $A3$ jsou zaznamenány. Po vyzáření všech paprsků primárními zdroji scény lze vypočítat např. osvětlenost plošek scény. Toho lze dosáhnout rozdělením scény na plošky (metoda konečných prvků). Osvětlenost vybrané plošky bude potom součtem světelných toků všech dopadajících paprsků vydělený velikostí plochy této plošky. Čím více paprsků s nižším světelným tokem je svítidly vyzářeno, tím přesnější budou výsledky této metody.

V oblasti počítačové grafiky se modeluje šíření světla opačným směrem, než by se ve skutečnosti paprsky šířily (obr. 18). Pro renderování obrazu potřebujeme znát hlavně paprsky procházející plochou obrazu, proto jsou paprsky sledovány od pozorovatele. Každým



Obr. 17. Využití metody sledování paprsku pro výpočet světelně technických parametrů

bodem obrazu se tedy proloží primární paprsek, který má svůj počátek v bodě pozorovatele, dále prochází bodem obrazu a končí v místě, kde narazí na objekt scény. Pokud by vedl do nekonečna, získává barvu pozadí. Pokud je průsečík nalezen, vyhodnotí se pro tento bod osvětlovací model, tzn. vedou se z tohoto bodu tzv. stínové paprsky ke všem zdrojům světla. Tyto stínové paprsky sledují, zda neprocházejí nějakým objektem a jejich vlivy na daný bod se sčítají.



Obr. 18. Princip rekurzivního sledování paprsku v oblasti počítačové grafiky vycházejících od pozorovatele do sledované části scény, červeně primární paprsky, modře paprsky stínové

Typické pro rekurzivní sledování paprsku jsou ostré stíny vržené tělesy ve scéně, protože tato metoda nerespektuje nepřímé osvětlení (difuzní odraz). Proto se často v oblasti počítačové grafiky kombinuje s metodou radiosity.

Z metody sledování paprsku je odvozena i metoda tzv. fotonových map (photon mapping), která vykazuje ještě větší míru realističnosti renderovaných obrázků oproti

jednoduché metodě sledování paprsku. Rozšiřuje klasické sledování paprsku o paprsky vycházející ze zdrojů světla. Renderovaný výstup této rozšířené metody lze nalézt na obr. 19.



Obr. 19. Renderovaný obrázek sklenice vína sledováním paprsků s rozšířením fotonových map, díky čemuž lze pozorovat lom paprsků procházejících sklem [17].

KAPITOLA 3

MĚŘENÍ FOTOMETRICKÝCH PLOCH JASU REÁLNÝCH POVRCHŮ

V současné době je k dispozici pro projektanty osvětlovacích soustav celá řada výpočetních programů pro výpočet sledovaných světelně technických veličin v daném navrhovaném objektu. Z důvodu zjednodušení jsou při výpočtech zpravidla používány povrchy s odraznými vlastnostmi vykazujícími rovnoměrně rozptylné odrazy definovanými integrálním činitelem odrazu (viz kapitola 1.2).

Za účelem dosažení výsledků bližších reálným hodnotám je potřeba použít nejen přesné fyzikální osvětlovací modely, ale také skutečný popis reálných fotometrických vlastností materiálů. Zpravidla největší vliv na rozložení světelného toku ve sledované scéně co do interakce světla a materiálu mají odrazy od povrchů.

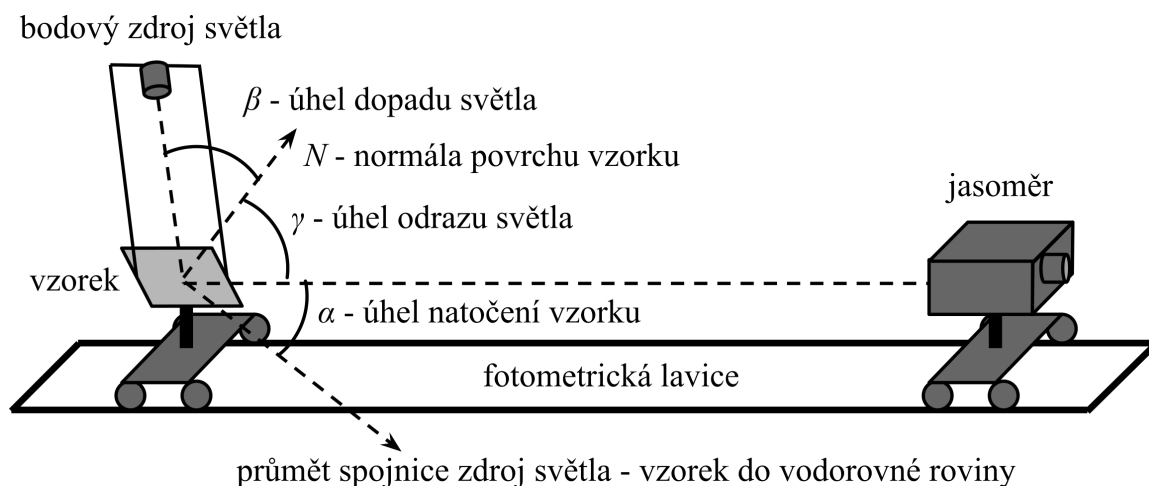
Při studiu skutečných odrazných vlastností materiálů je třeba provést jasovou analýzu povrchů materiálů jakožto sekundárních zdrojů světla. Rozložení odraženého světelného toku do prostoru po odrazu od zkoumaného povrchu lze nejlépe vyjádřit fotometrickou plochou jasu. Na rozdíl od primárních zdrojů světla je fotometrická plocha jasu sekundárních zdrojů závislá na směru dopadu paprsku světla na daný povrch materiálu. Získání těchto fotometrických ploch jasu tedy vyžaduje rozsáhlá měření jasů vzorků světelně činných ploch v závislosti na úhlech dopadu svazků paprsků.

V této kapitole se popisují dosavadní postupy při získávání odrazných vlastností povrchů v laboratoři fotometrie FEL ČVUT v Praze nové řešení, jehož realizace je součástí této práce. Naměřené hodnoty jasů vzorků povrchů v různých směrech v závislosti na směrech dopadů světla jsou nezbytné pro sestavení fotometrických ploch jasů těchto povrchů, případně fotometrických ploch svítivosti a dále jsou nezbytné pro sestavení dvousměrové odrazové distribuční funkce.

Tato kapitola obsahuje základní technické údaje laboratorního pracoviště reflektofotometru OPTE-F3K, čehož lze využít v případě potřeby úpravy či rozšíření technické či softwarové stránky. Součástí kapitoly jsou jak použitá schémata, tak návrhy desek plošných spojů reflektometru. Dále jsou zde uvedeny základní vlastnosti zvoleného komunikačního protokolu a postup při měření fotometrických ploch jasu vzorků.

3.1 Měření na fotometrické lavici

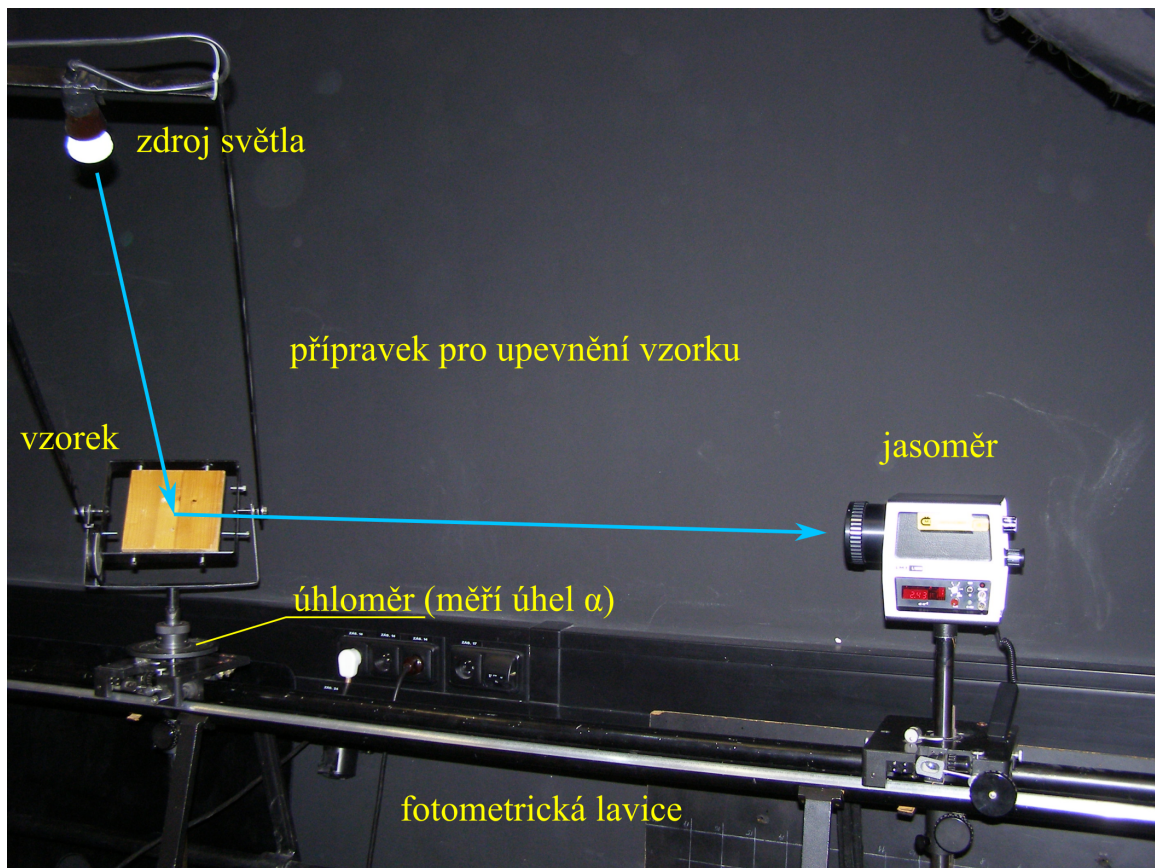
Jednou z možností, jak získat hodnoty jasů sekundárních zdrojů světla, tj. světelně aktivních povrchů materiálů, pro následné sestavení fotometrické plochy jasů, je ruční měření na fotometrické lavici pomocí jasoměru [18]. Náčrtek měřicího pracoviště s fotometrickou lavicí na obr. 20 zachycuje vlevo posuvný vozík upevněný na kolejích fotometrické lavice, na kterém je připevněn měřený vzorek, který lze otáčet kolem svislé osy a naklánět. Spolu se vzorkem se otáčí kolem svislé osy i upevněný světelný zdroj. Tímto mechanickým uspořádáním lze měřit povrchy vykazující opticky izotropní odraz, neboť vzorek nelze libovolně naklánět a současně nelze zdroj světla nezávisle otáčet kolem měřeného vzorku. Toto laboratorní pracoviště vzniklo rozšířením původního pracoviště určeného pro měření křivek jasů povrchů vozovek [5], kdy byly měřeny pouze řezy fotometrickými plochami jasů bez možnosti otáčet vzorky a zdroj světla kolem svislé osy. V této předešlé verzi byl úhel α neměnný podle obr. 20 o hodnotě 0° , tzn. že zdroj světla, jasoměr a střed povrchu měřeného materiálu (kontrolní bod) ležely po celou dobu měření v jedné rovině.



Obr. 20. Fotometrická lavice s přípravkem pro měření jasů vzorku [18]

Obr. 21 je fotografie uspořádání rozšířeného laboratorního pracoviště podle [18] pro jasovou analýzu vzorků na fotometrické lavici. Směr svazku paprsků vycházejícího ze světelného zdroje a odrážejícího se směrem k jasoměru je naznačen modrými šipkami.

Přestože je v práci [18] uvedeno, že laboratorní pracoviště na fotometrické lavici bylo snadné na obsluhu, bylo potřeba měřit velké množství hodnot pro získání fotometrické plochy jasů jednoho vzorku z čehož plyne velká časová náročnost. Dále je potřeba nepřetržitá přítomnost obsluhy. V [18] byl zvolen krok úhlů $\Delta\alpha = \Delta\beta = \Delta\gamma = 10^\circ$. Zmiňované pracoviště umožňovalo měřit rozsahy úhlů $\alpha \in \langle 0^\circ; 360^\circ \rangle$, $\beta \in \langle 0^\circ; 70^\circ \rangle$ a $\gamma \in \langle 0^\circ; 80^\circ \rangle$, což činí ve výsledku 2664 kombinací jednotlivých úhlů pro každý měřený vzorek. Jinými slovy pro každou kombinaci úhlů z celkového počtu 2664 je potřeba provést nastavení úhlů a změření jasů. Když by v ideálním případě každé nastavení a odečtení hodnoty trvalo 10 vteřin, bude celé měření trvat 7,4 hodin.



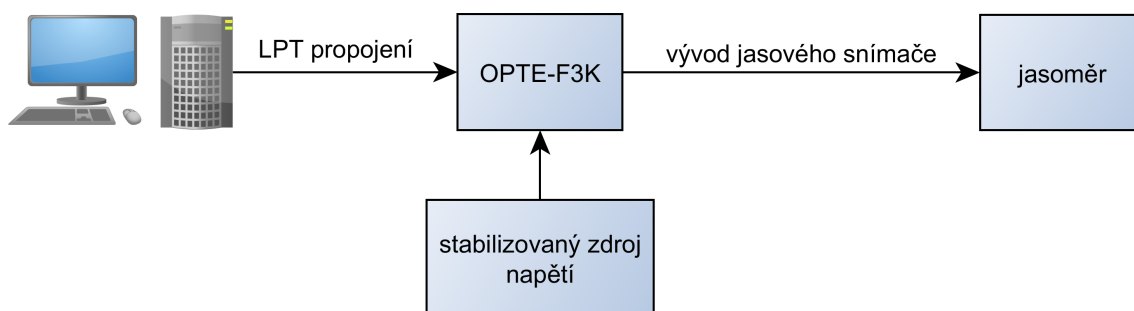
Obr. 21. Laboratorní pracoviště pro měření jasu vzorku

3.2 Měření pomocí reflektofotometru

Další možností pro stanovení fotometrických ploch jasů sekundárních zdrojů světla lze použít reflektofotometr. Příklad tohoto typu byl vyvinut a sestaven na Katedře elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze s označením OPTE-F3K. Celé laboratorní pracoviště reflektofotometru lze nalézt na obr. 22. V disertační práci [5] se tímto přístrojem zabýval Ing. Jan Málek, Ph.D. Byla vyvinuta aplikace pro operační systém DOS v jazyku QBasic sloužící k ovládní tohoto zařízení, která však nastavovala pouze úhly prvků reflektofotometru, tj. rameno se zdrojem světla, otáčení a náklon měřeného vzorku, takže obdobně jako na fotometrické lavici (kapitola 3.1) byla potřeba přítomnost obsluhy během měření a odečet hodnot z použitého jasoměru byl prováděn taktéž obsluhou z displeje. Komunikace mezi počítačem s běžícím programem pro ovládní OPTE-F3K a reflektometrem probíhala přes paralelní rozhraní, které není příliš použitelné v dnešní době na současných počítačích.

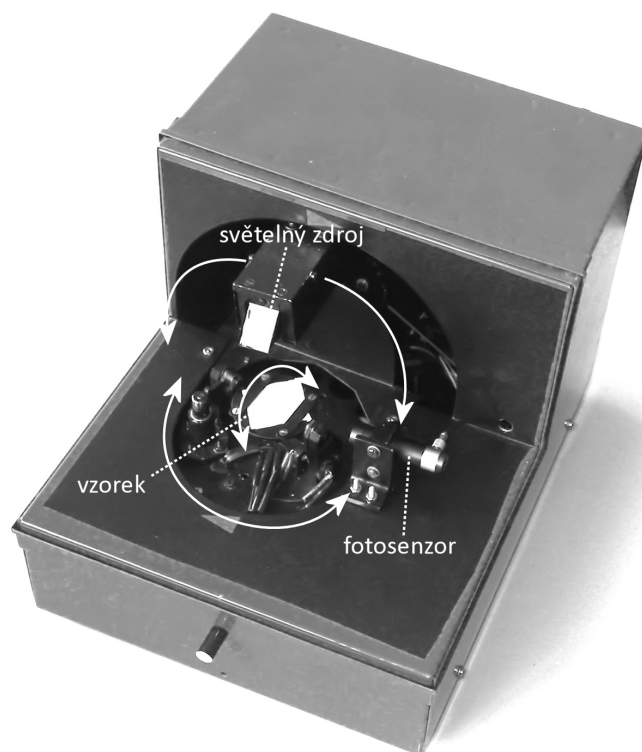
3.3 Mechanická konstrukce OPTE-F3K

Reflektofotometr OPTE-F3K je zobrazen na fotografii na obr. 23. Jde o přístroj vybavený třemi synchronními motory, světelným zdrojem osvětlujícím měřený vzorek, základnou na které je připevněn mechanismus s možností náklonu a uchycení vzorku. Na obr. 23 je



Obr. 22. Původní zapojení jednotlivých elementů pracoviště reflektofotometru

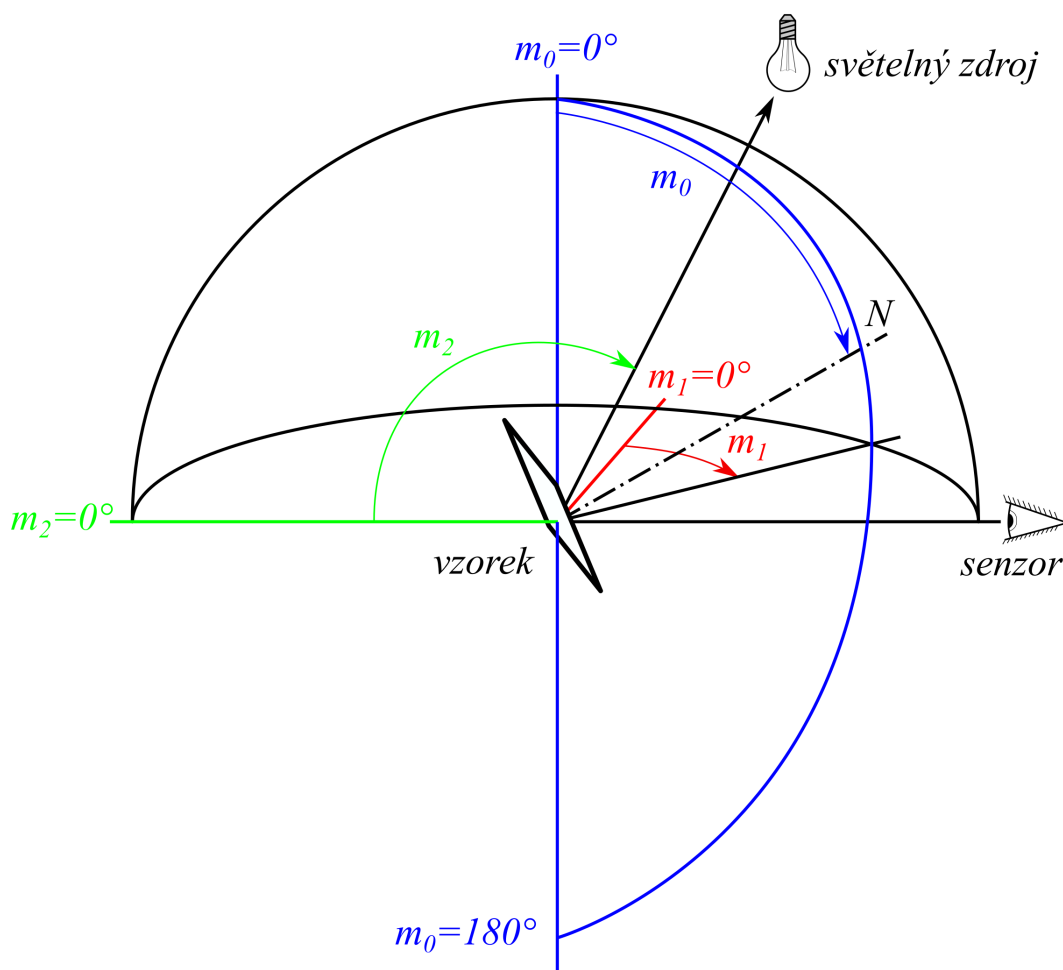
reflektofotometr zobrazen bez horního krytu. Bez krytu probíhá výměna vzorků a kalibrace jednotlivých úhlů, s krytem pak vlastní měření. Kryt je přichycen k reflektometru tak, aby nemohlo dojít k vlivu okolního světla na výsledné hodnoty měření.



Obr. 23. Fotografie reflektofotometru OPTE-F3K se sejmutým předním krytem pro vkládání měřených vzorků [5]

OPTE-F3K umožňuje náklon měřeného vzorku povrchu podle obr. 24 s úhlem m_0 od polohy normálou směřující svisle nahoru až po polohu normály směřující svisle dolů, tzn. v intervalu $\langle 0^\circ; 180^\circ \rangle$ podle tab. 5. Vzorek lze otáčet s úhlem m_1 v rozmezí $\langle 0^\circ; 90^\circ \rangle$ kolem svislé osy točnou. Světelným zdrojem lze osvětlovat měřený vzorek z konstantní vzdálenosti od středu vzorku. Úhel světelného zdroje m_2 lze volit z rozmezí $\langle 0^\circ; 150^\circ \rangle$. Horní mez 150° je dána mechanickým omezením, kdy po překročení tohoto úhlu do sebe narazí senzor jasoměru s optickou soustavou vestavěného světelného zdroje. Úhly m_0 , m_1 a m_2 lze nastavit s odlišnými kroky podle tab. 5.

Mechanická konstrukce reflektofotometru OPTE-F3K nedovoluje nastavit libovolnou



Obr. 24. Značení a rozsah úhlů reflektometru OPTE-F3K

kombinaci úhlu dopadajícího paprsku ze světelného zdroje a úhlu snímače. Proto lze měřit pouze vzorky vykazující izotropní odraz, tzn. že fotometrická plocha jasu měřeného vzorku pro daný úhel dopadu není závislá na otočení vzorku kolem své normály. Zařízení je poměrně malých rozměrů (20 x 26 x 18 cm). Lze měřit vzorky pouze malých rozměrů, tj. maximální velikost měřených vzorků materiálů nesmí přesáhnout 2 x 2 cm s tloušťkou do 0,5 cm. Navíc lze měřit pouze povrchy s nepříliš hrubým povrchem, neboť zařízení osvětluje pouze malou část povrchu měřeného vzorku [5]. K vyhodnocení množství odraženého světla od měřeného vzorku v určitém směru je použit přístroj pro měření kontrastu jasu Brüel & Kjaer typ 1100 obr. 25. Toto zařízení je schopné měřit jasy až do 199 kcd/m^2 při snímaném úhlu $2,2^\circ$.

motor	rozsah kroky	rozsah úhel
M_0	0 až 4200	0° až 180°
M_1	0 až 400	0° až 90°
M_2	0 až 620	0° až 150°

Tab. 5. Rozsahy motorů



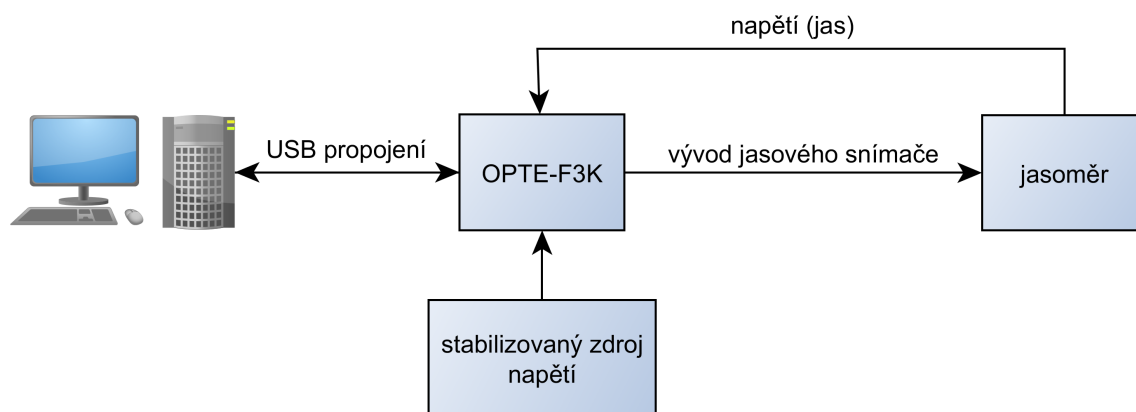
Obr. 25. Jasový kontrastoměr Bruel & Kjaer typ 1100

Pro pohon reflektofotometru je použito tří synchronních elektrických motorů typu SMR 300-100 firmy Regulace-Automatizace Bor, s.r.o. Tyto 10-ti pólpárové motory mají příkon 2 W při napětí 12 V.

3.4 Modernizace OPTE-F3K

Součástí disertační práce byla modernizace elektronického vybavení reflektometru OPTE-F3K, jejímž cílem bylo zrychlení a zvětšení rozsahu měření. Z původního reflektofotometru bylo odstraněno řízení a napájení motorů a paralelní rozhraní a tyto části byly nahrazeny obvody vlastního návrhu. V nově navržených obvodech je použit mikroprocesor, jehož firmware bylo potřeba naprogramovat. Součástí modernizace bylo vytvořit aplikaci ReflectoSoft, která řídí reflektofotometr OPTE-F3K ze strany počítače a je tedy pro automatizovaná měření nezbytná [20]. V budoucnu bude možné celé toto měřicí pracoviště včetně softwaru použít pro účely výuky.

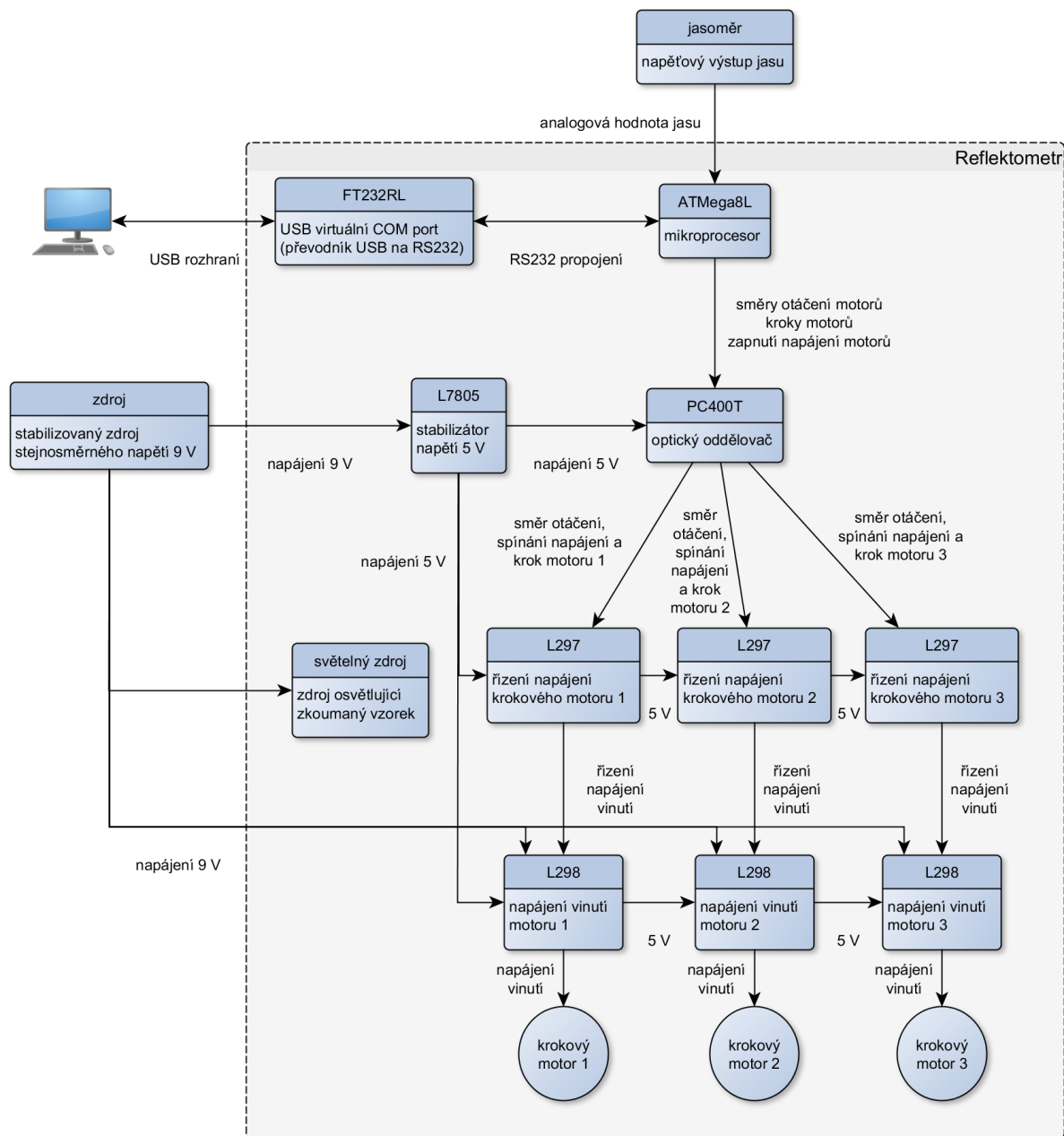
Modernizovaný reflektofotometr OPTE-F3K umožňuje automatizované měření jasů vzorků měřených povrchů ze kterých je možné složit fotometrické plochy jasů těchto sekundárních zdrojů. V nové verzi OPTE-F3K jsou analogově-číslíkové převody napětíového výstupu prováděny automaticky přímo reflektometrem a převedené hodnoty napětí posílány číslicově přes obousměrné rozhraní USB do připojeného počítače. Modernizované laboratorní pracoviště reflektofotometru lze nalézt na obr. 26.



Obr. 26. Nové zapojení jednotlivých elementů pracoviště reflektofotometru

3.4.1 Návrh a realizace řídicí a napájecí elektroniky

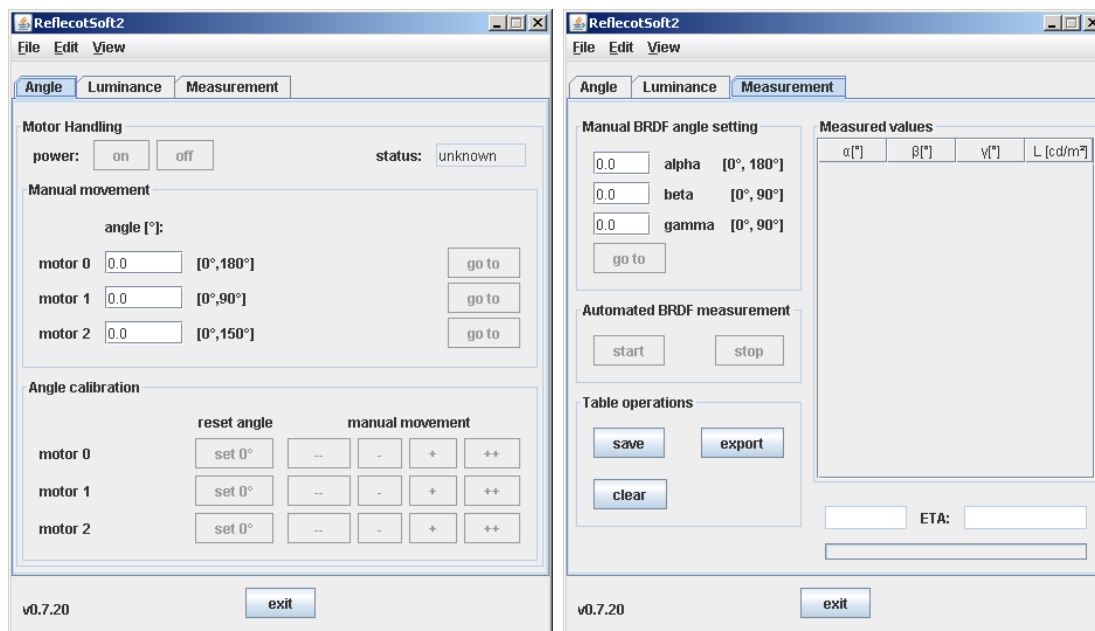
Jedním z nedostatků původního reflektometru OPTE-F3K bylo paralelní rozhraní pro komunikaci s počítačem. Jako náhradu jsem zvolil hodně rozšířené rozhraní USB přes které mezi reflektometrem a počítačem probíhá přenos příkazů týkajících se nastavování, načítání a ukládání úhlů, vyčítání aktuální hodnoty napětí od analogově-číslicového převodníku reflektometru apod. Části celku nového laboratorního pracoviště reflektofotometru lze nalézt na obr. 27.



Obr. 27. Schéma prvků laboratorního pracoviště reflektofotometru

3.4.2 Reflectosoft

Pro automatizované měření a zpracování naměřených dat bylo zapotřebí vytvořit aplikaci, která bude schopna komunikovat s reflektometrem a procesorem ATmega8L. K tomuto účelu byla naprogramována aplikace ReflectoSoft v jazyce Java (zdrojové soubory aplikace ReflectoSoft lze nalézt na přiloženém CD).



a) Okno pro kalibraci

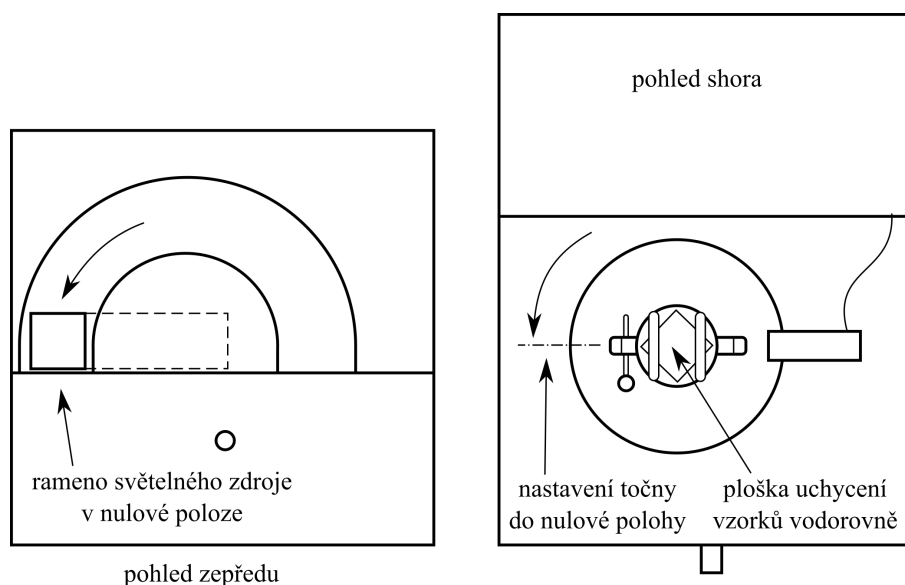
b) Okno automatického měření

Obr. 28. Grafické uživatelské rozhraní aplikace ReflectoSoft

Hlavním úkolem ReflectoSoftu je automatizované nastavování úhlu dopadu paprsku světelného zdroje, nastavování úhlu senzoru pro detekci množství odraženého světla v určitém směru, záznam naměřených dat a jejich export do souboru BSDF formátu LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) [19] pro další využití aplikací BSDFViewer, případně do formátu CSV. Hlavní prvky grafického rozhraní lze nalézt na obr. 28.

Po spuštění ReflectoSoftu a fyzickému připojení reflektometru k počítači je nejprve potřeba otevřít komunikační sériový port dialogovým oknem, které se otevře po spuštění. Po otevření portu je vyslán ReflectoSoftem příkaz *naživu* a pokud je přijata odpověď od reflektometru, aplikace odemkne tlačítka související s komunikací s reflektometrem. Poněvadž reflektometr po zapnutí, tj. po připojení napájeného USB kabelu, neví polohu světelného zdroje a natočení vzorku, je potřeba pomocí nástrojů v záložce hlavního okna ReflectoSoftu *Angle* nejprve zadat aktuální polohy zmíněných částí reflektometru. Nejvhodnější postup nastavení úhlů je následující (viz obr. 28a)):

- nastavení ramene světelného zdroje a vzorku do nulové polohy, vzorek též, viz obr. 29
- zapnutí napájení motorů tlačítkem *power: on*
- doladění polohy tlačítka v části *Angle calibration* po krocích motorů
- nastavení aktuálního úhlu na 0° tlačítka *set 0°*
- ověření kalibrace použitím prvků z části *Manual movement*



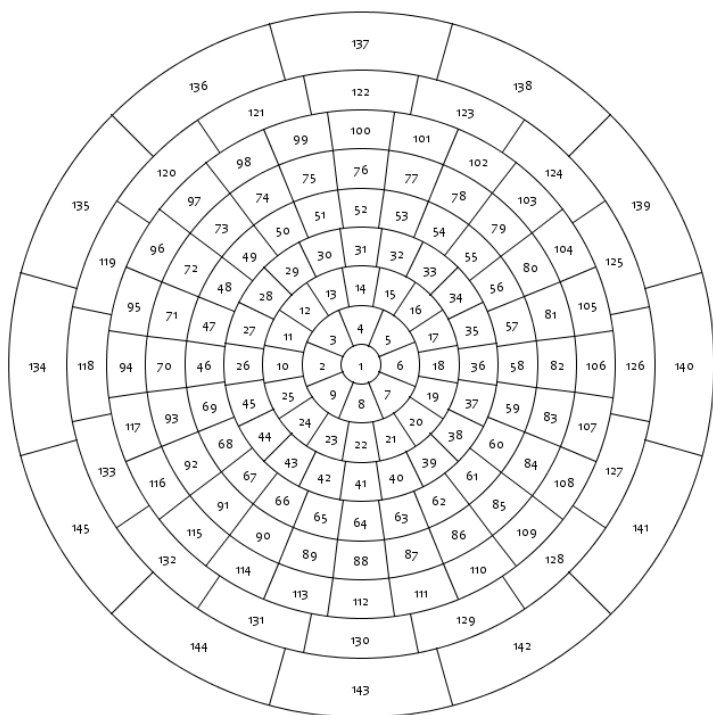
Obr. 29. Nastavení nulové polohy úhlů reflektometru m_0 , m_1 a m_2

Dalším nutným krokem před zahájením měření je kalibrace hodnoty napětí jasoměru. Pro tento krok je zapotřebí opsat hodnotu jasu z displeje jasoměru do kolonky okna záložky *Luminance* hlavního okna aplikace. Jelikož aplikace dokáže měřit jas pouze při nastavení pevného rozsahu jasu na jasoměru, je pro co největší přesnost měření nutné zjistit nejvhodnější rozsah pro daný měřený vzorek. Postup pro kalibraci jasu ReflectoSoftu:

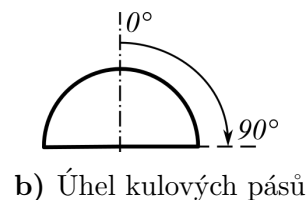
- upevnění měřeného vzorku do reflektometru, uzavření reflektometru krytem
- nastavení odhadem úhlu s nejvyšší hodnotou jasu pro daný měřený vzorek za pomoci tlačítek v části *Manual movement* okna 28a)
- nastavení vhodného rozsahu na jasoměru
- zadat hodnotu jasu z displeje jasoměru do políčka kalibrace v okně záložky *Luminance* ReflectoSoftu

Po vykonání výše uvedených kroků je možné získávat hodnoty jasu přímo z přeposílané hodnoty napětí z reflektometru.

Zatímco v záložce *Angle* na obr. 28a) lze nastavovat úhly jednotlivých pohyblivých prvků reflektometru, v okně *Measurement* lze nastavovat úhly podle konvence funkce



a) Klemsovy segmenty hemisféry



b) Úhel kulových pásů

Obr. 30. Pohled shora na rozdělení poloprostoru a úhlová konvence pro kulové pásy

BRDF (viz obr. 32a)). Před odesláním povelu do reflektometru dochází k transformaci ze soustavy úhlů $[\alpha, \beta, \gamma]$ do soustavy $[m_0, m_1, m_2]$.

Automatizované měření hodnot funkce BRDF lze spustit v záložce hlavního okna *Measurement* (obr. 28b)). Měřené úhly jsou voleny tak, aby bylo možné vytvořit soubor XML formátu LBNL pro zobrazení v aplikaci BSDFViewer. Tento soubor obsahuje data pro anizotropní materiály, je tudíž potřeba doplnit chybějící data fotometrických ploch BRDF otáčených kolem normály vzorku, jelikož reflektometr je schopen měřit pouze odrazné vlastnosti izotropních povrchů. Poloprostor je rozdělen na tzv. Klemsovy segmenty (obr. 30a)). Nastavení dopadajícího paprsku a měření odrazu je prováděno ve středech těchto segmentů. Rozdělení hemisféry je patrné z tab. 6, obr. 30 a obr 31b).

rozsah kulového pásu	od	0°	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°
	do	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°	75°	90°
počet segmentů		1	8	16	20	24	24	24	16	12
Ω_s (10^{-2} sr)		2,39	2,38	2,34	2,74	2,93	3,50	3,95	6,43	13,55

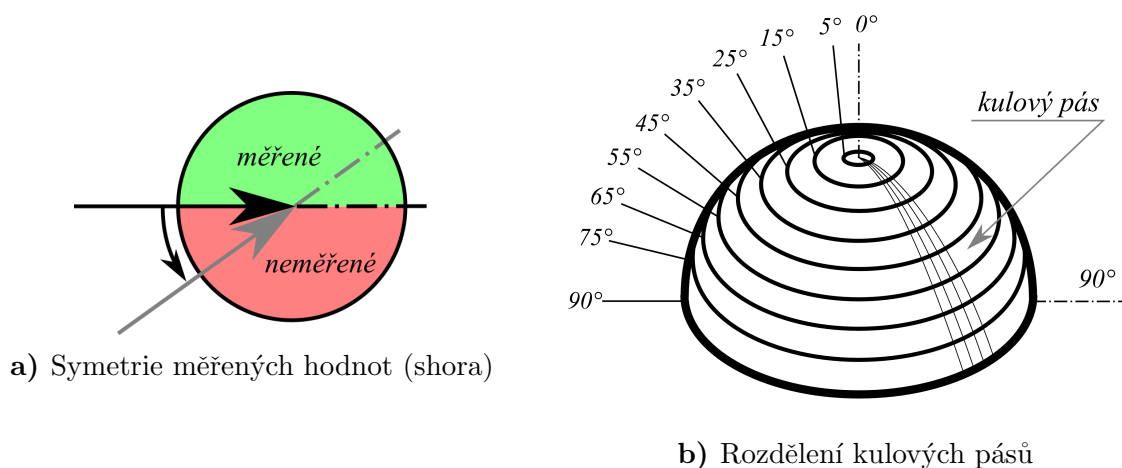
Tab. 6. Rozdělení poloprostoru na segmenty

V tab. 6 obsahuje řádek Ω_s prostorové úhly jednotlivých segmentů daných kulových pásů.

Doplnění chybějících hodnot je patrné z obr. 31a). Zeleně je vyznačena oblast změřených odrazných vlastností zkoušeného vzorku při pohledu shora. Červenou část je nutné doplnit přes osovou souměrnost hodnotami ze zelené části. Pro užití aplikace BSDF-

Viewer na prohlížení naměřených hodnot jasů je třeba doplnit hodnoty pro dopad paprsku skrz všechny ostatní Klemsovy segmenty daného kulového pásu, poněvadž LBNL formát souboru XML užívaný aplikací BSDFViewer předpokládá data z měření neizotropních povrchů. Protože tyto hodnoty jasů po rotaci zdroje světla kolem normály plošky nejsou měřeny a předpokládá se, že reflektometr bude použit pouze pro měření izotropních vzorků, je třeba provést rotaci naměřených hodnot pro daný Klemsov segment v daném kulovém pásu.

Protože krok rotace je pro většinu kulových pásů odlišný, byla by nutná interpolace hodnot sousedních Klemsových segmentů pro pásma s odlišným krokem rotace při měření hodnot pouze ve středech Klemsových segmentů. Z důvodu větší přesnosti hodnot uložených v souboru byla zvolena varianta, kdy je krok při měření odrazných vlastností zvolen pro všechny kulové pásy totožný. Tím je hodnota nejmenšího společného násobitele o hodnotě 240. Podle obr. 31b) je tedy každý kulový pás rozdělen na 240 segmentů, které se překrývají a mají totožný obsah plochy jako původní Klemsovy segmenty z obr. 30a) pro daný kulový pás.



Obr. 31. Řešení symetrie

Během automatizovaného měření je pro každý úhel dopadu zaznamenáno z každého kulového pásu pouze 121 hodnot z jedné poloviny kulového pásu podle obr. 31a) vyjma segmentu 1 (viz obr. 30a)), u kterého postačuje změřit pouze jednu hodnotu jasů pro každý kulový pás. Vzorek není možno otáčet kolem vlastní normály v celém rozsahu úhlů β a γ podle obr. 32a). Pro každý kulový pás je tedy uvažován pouze jeden dopadající paprsek. Počet měřených hodnot se v tomto smyslu velmi zredukuje na teoretických 8721 hodnot. Tato hodnota je dána 9 úhly pro dopadající paprsek, pro každý z těchto paprsků je pro 8 kulových pásů měřeno 121 hodnot jasů (polovina kulového pásu + 1), pro kulový pás $0^\circ \rightarrow 5^\circ$ pouze jedna hodnota jasů. Pokud budeme uvažovat i mechanická omezení reflektometru, dojde k další redukci měřených dat na 6490 hodnot jasů, které se skutečně měří.

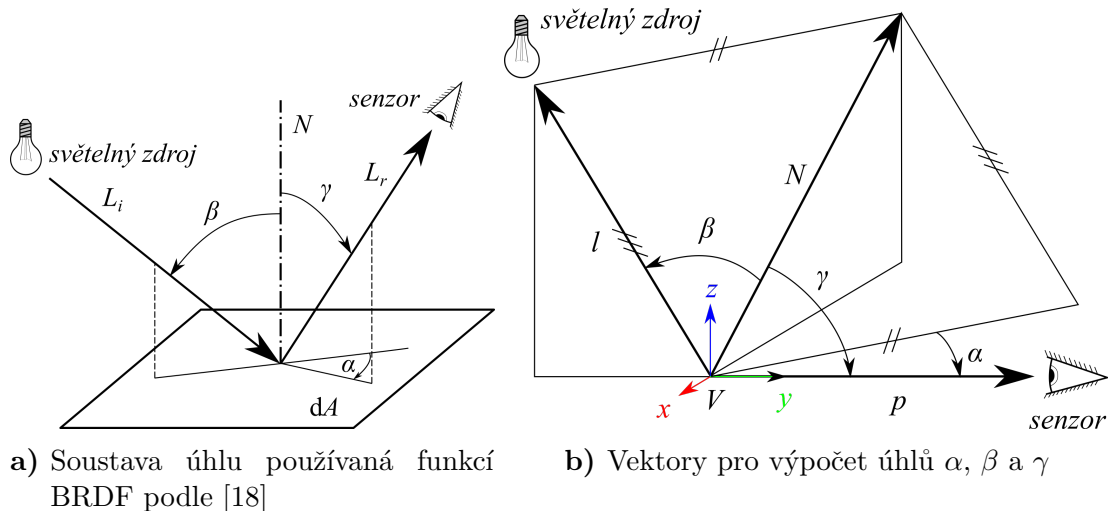
Během měření se naměřené hodnoty ukládají do tabulky záložky *Measurement* hlavního okna. V poli *ETA* je vypisována odhadovaná doba do konce měření. Dokončení měření

je oznámeno dialogovým oknem. Naměřené hodnoty lze uložit do textového formátu CSV tlačítkem *save*, což je prakticky formát zobrazovaný v tabulce. Pro export do formátu LBNL souboru XML pro využití aplikací BSDFViewer je potřeba stisknout tlačítko *export*. V obou případech se zobrazí dialog pro zadání cílového souboru. V případě exportu do formátu XML dojde k doplnění chybějících hodnot podle zrcadlové souměrnosti a rotací, kterou je možno provést bez interpolace díky 121 naměřeným hodnotám, resp. 240 hodnotám celkově pro každý kulový pás pro daný úhel dopadu paprsku β (obr. 32a)).

Transformace soustav úhlů

Nastavování úhlů m_0 , m_1 a m_2 reflektometru je možné provádět přímo příkazy z aplikace ReflectoSoft. Pro měření v úhlové soustavě používané ve funkci BRDF [18] (obr. 32a)) je potřeba zadávat úhly α , β a γ .

Vztahy pro transformaci ze soustavy úhlů $[\alpha, \beta, \gamma]$ do soustavy $[m_0, m_1, m_2]$ jsou odvozeny pomocí vektorů na obr. 32b) a obr. 24.



Obr. 32. Úhlové soustavy používané funkcí BRDF a reflektometru OPTE-F3K

Mějme jednotkové vektory \vec{l} , \vec{N} a \vec{p} podle obr. 32b), kde \vec{l} je vektor zdroje světla reflektometru, \vec{N} je normála měřeného vzorku umístěného v reflektometru a \vec{p} je vektor fotosenzoru jasoměru. Vektor \vec{l} ovlivňuje pouze velikost úhlu m_2 a lze jej zapsat jako jednotkový vektor v soustavě x, y, z podle obr. 32b) ve tvaru

$$\vec{l}_{xyz} = [0; -\cos(m_2); \sin(m_2)] \quad (34)$$

Jednotkový vektor \vec{N} je závislý pouze na úhlech m_0 a m_1 a lze jej zapsat jako jednotkový vektor v soustavě x, y, z ve tvaru

$$\vec{N}_{xyz} = [-\sin(m_0) \cdot \cos(m_1); \sin(m_0) \cdot \sin(m_1); \cos(m_0)] \quad (35)$$

Jednotkový vektor \vec{p} nebude záviset na žádném z úhlů m , poněvadž čidlo není pohyblivé. Jednotkový vektor \vec{p} v soustavě x, y, z lze zapsat ve tvaru

$$\vec{p}_{xyz} = [0; 1; 0] \quad (36)$$

Z uvedených jednotkových vektorů můžeme vypočítat úhly α , β a γ použitých ve funkci BRDF dle [18].

$$\cos(\beta) = \frac{\vec{l} \cdot \vec{N}}{|\vec{l}| \cdot |\vec{N}|} = \vec{l} \cdot \vec{N} \quad (37)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\vec{N} \cdot \vec{p}}{|\vec{N}| \cdot |\vec{p}|} = \vec{N} \cdot \vec{p} \quad (38)$$

Protože dané vektory jsou jednotkové, bude ve vztazích (37) a (38) jmenovatel roven 1 a závislosti se zjednoduší. Pro získání úhlu α mezi rovinami definovanými vektory \vec{l} , \vec{N} a \vec{N} , \vec{p} je třeba získat normály těchto rovin, neboť odchylka dvou rovin je rovna odchylce jejich normál. Pro normály můžeme psát

$$\vec{N}_{lN} = \vec{l} \times \vec{N} \quad (39)$$

$$\vec{N}_{Np} = \vec{N} \times \vec{p} \quad (40)$$

Pak můžeme vyjádřit vztah pro velikost úhlu α

$$\cos(\alpha) = \frac{\vec{N}_{lN} \cdot \vec{N}_{Np}}{|\vec{N}_{lN}| \cdot |\vec{N}_{Np}|} = \frac{\vec{N}_{lN} \cdot \vec{N}_{Np}}{\sin(\beta) \cdot |\vec{l}| \cdot |\vec{N}| \cdot \sin(\gamma) \cdot |\vec{N}| \cdot |\vec{p}|} = \frac{\vec{N}_{lN} \cdot \vec{N}_{Np}}{\sin(\beta) \cdot \sin(\gamma)} \quad (41)$$

$$\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) = \vec{N}_{lN} \cdot \vec{N}_{Np} \quad (42)$$

Za předpokladu že vektory \vec{l} a \vec{N} jsou jednotkové bylo možno vztah (41) zjednodušit. Pokud dosadíme vektory (34), (35) a (36) do vztahů (37), (38) a (41), získáme vztahy

$$\cos(\gamma) = \sin(m_0) \cdot \sin(m_1) \Rightarrow m_1 = \arcsin\left(\frac{\cos(\gamma)}{\sin(m_0)}\right) \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \cos(\beta) &= -\cos(m_2) \cdot \sin(m_0) \cdot \sin(m_1) + \sin(m_2) \cdot \cos(m_0) \\ &= -\cos(m_2) \cdot \cos(\gamma) + \sin(m_2) \cdot \cos(m_0) \\ \Rightarrow m_0 &= \arccos\left(\frac{\cos(m_2) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\beta)}{\sin(m_2)}\right) \end{aligned} \quad (44)$$

$$\vec{N}_{LN} = \begin{bmatrix} -\cos(m_2) \cdot \cos(m_0) - \sin(m_2) \cdot \sin(m_1) \cdot \sin(m_0) \\ -\sin(m_2) \cdot \sin(m_0) \cdot \cos(m_1) \\ -\cos(m_2) \cdot \sin(m_0) \cdot \cos(m_1) \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\vec{N}_{Np} = [-\cos(m_0); 0; -\sin(m_0) \cdot \cos(m_1)] \quad (46)$$

Dosazením vektorů \vec{N}_{LN} a \vec{N}_{Np} do vztahu (42) dostaneme

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) &= \cos^2(m_0) \cdot \cos(m_2) + \sin(m_2) \cdot \sin(m_1) \cdot \sin(m_0) \cdot \cos(m_0) \\ &+ \sin^2(m_0) \cdot \cos^2(m_1) \cdot \cos(m_2) \\ &= \cos(m_2) (\cos^2(m_0) + \sin^2(m_0) \cdot 1 - \sin^2(m_1)) \\ &+ \sin(m_2) \cdot \sin(m_1) \cdot \sin(m_0) \cdot \cos(m_0) \\ &= \cos(m_2) \cdot (\cos^2(m_0) + \sin^2(m_0) - \sin^2(m_1) \cdot \sin^2(m_0)) \\ &+ \sin(m_2) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(m_0) \\ &= \cos(m_2) - \cos(m_2) \cdot \cos^2(\gamma) + \sin(m_2) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(m_0) \\ &= \cos(m_2) + \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma) \\ \Rightarrow m_2 &= \arccos(\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) \cdot \sin(\gamma) - \cos(\beta) \cdot \cos(\gamma)) \end{aligned} \quad (47)$$

Za použití vztahů (44), (43) a (47) je tedy možno vypočítat pro požadované úhly α , β a γ potřebné úhly m_0 , m_1 a m_2 reflectometru.

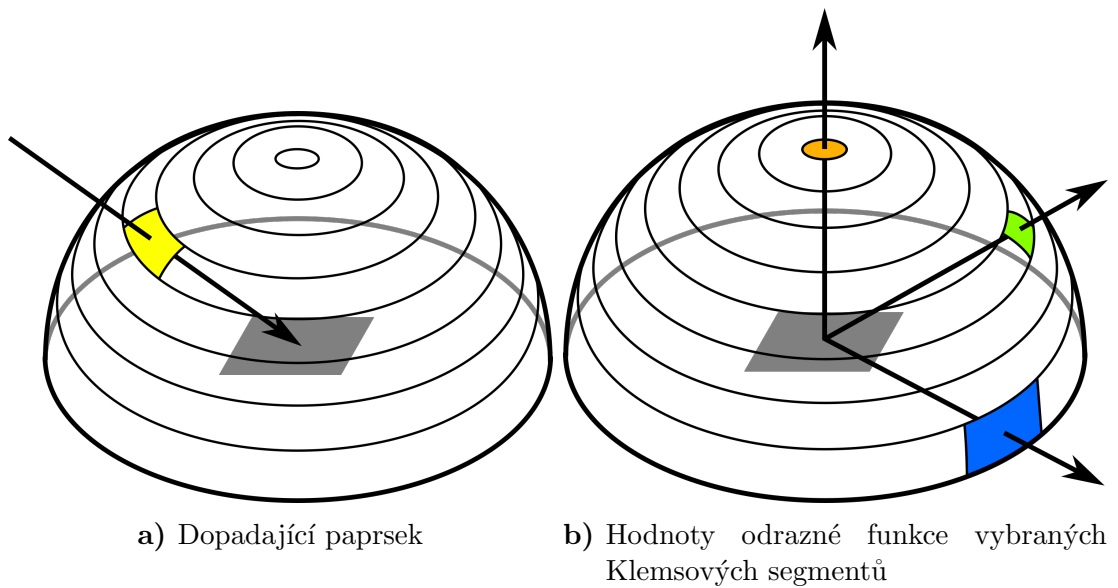
3.5 Měření vzorků pomocí OPTE-F3K

Na fotografii celého pracoviště reflektometru (viz. obr. 33) jsou zachyceny jednotlivé použité přístroje. Postupně zprava je zde vidět nejprve externí zdroj se dvěma výstupy o odlišných napětích. Jedním je napájen světelný zdroj reflektometru, druhým synchronní motory. Zařízení modré barvy je vlastní reflektometr s uzavřeným krytem připravený k měření vzorku. Dále doleva je umístěn jasoměr s vývodem k čidlu koaxiálním kabelem připojeného zepředu. Vlevo je počítač s připojeným reflektometrem přes USB rozhraní se spuštěnou aplikací ReflectoSoft, jejíž hlavní okno je zobrazeno na monitoru.

Naměřené fotometrické plochy jasu lze zobrazit pomocí aplikace BSDFViewer, které je nejprve třeba převést na $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$, tj. funkci BRDF, podle vztahu (16). Výstupní hodnoty $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ vybraného úhlu dopadu paprsku β jsou promítnuty aplikací BSDFViewer na plášť polokoule rozdělené na Klemsovy segmenty. Způsob zobrazení vybraného úhlu β a jemu odpovídajících funkčních hodnot $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ je uveden na obr. 34, kde je vlevo zobrazen žlutě Klemsov segment vybraného dopadajícího paprsku, vpravo několik naznačených odražejících se paprsků a zobrazení funkční hodnoty barevně podle definované barevné stupnice.



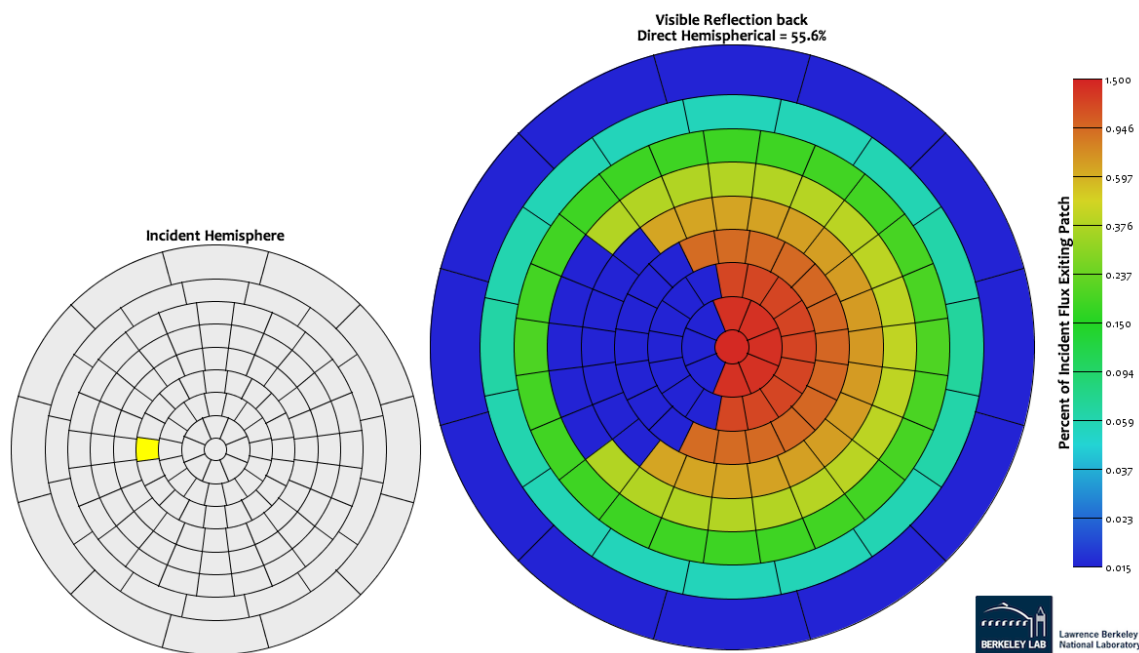
Obr. 33. Laboratorní pracoviště reflektometru OPTE-F3K



Obr. 34. Znázornění zobrazení hodnot $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ aplikací BSDFViewer

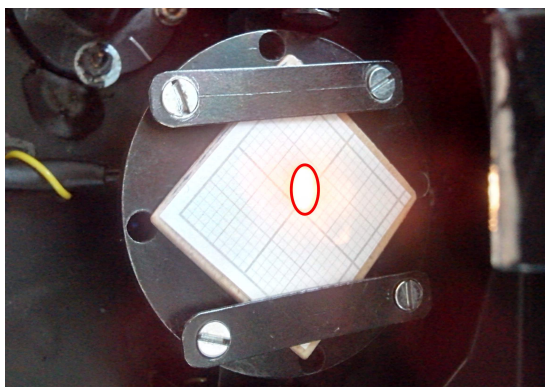
Pro ověření měřených hodnot byly nejprve změřeny fotometrické plochy jasu vzorku s nátěrem Primalex Polar. U tohoto vzorku byly předpokládány odrazné vlastnosti blízké difuznímu povrchu z důvodu vysokého obsahu BaSO_4 , což je látka používaná např. v kulovém integrátoru, kde je nanášena na vnitřní stěně tohoto zařízení s cílem dosáhnout co nejvíce rozptýlných odrazů světla.

Na obr. 35 jsou zobrazena naměřená data vzorku s nátěrem Primalex Polar pomocí aplikace BSDFViewer pro úhel dopadajícího paprsku $\beta = 30^\circ$ podle konvence značení úhlů na obr. 32a). V pravé části jsou zobrazeny hodnoty $f_r(\alpha, \beta = 30^\circ, \gamma)$ barvami Klemsových segmentů. Modrá oblast s nízkou výstupní hodnotou $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ je dána mechanickým omezením reflektofotometru OPTE-F3K, kdy se rameno zdroje světla nemůže více přiblížit fotočlátku jasoměru. Výstupní hodnoty této funkce jsou přímo úměrné jasů vzorku v daném směru. Pokud se tedy očekává pro difuzní povrch jas daného vzorku konstantní do všech směrů pro daný dopadající paprsek s úhlem dopadu β , musí být i hodnoty $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ daného úhlu β konstantní.

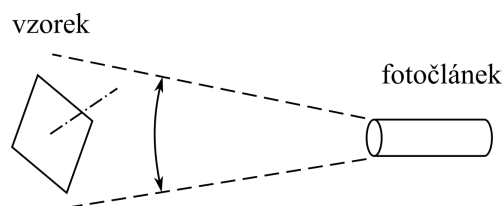


Obr. 35. Výstup aplikace BSDFViewer pro nekorigované naměřené hodnoty vzorku Primalex Polar

Výpočtem byla zjištěna závislost naměřeného jasu pro konstantní úhel dopadu paprsku a různé úhly pohledu jasoměru podle funkce $\cos(\gamma)$, což je úhel mezi normálou měřeného vzorku a směru pohledu jasoměru. Aby byl měřený jas rovnoměrně rozptýlného povrchu konstantní pro konstantně osvětlenou plochu pro různé úhly pohledu jasoměru γ , je třeba aby jasoměr měl v celém zorném poli měřenou plochu. Tato podmínka v reflektometru OPTE-F3K není splněna jak znázorněno na obr. 36b). Měřený vzorek není osvětlen rovnoměrně v celém zorném poli jasoměru. Při změně úhlu γ dojde ke změně velikosti průmětu sledované osvětlené části plošky do směru pohledu podle funkce $\cos(\gamma)$, z čehož plyne i zmíněná závislost jasu na úhlu γ .



a) Osvětlení měřeného vzorku



b) Zorné pole fotočlánku jasoměru

Obr. 36. Osvětlení měřeného vzorku v reflektometru a zorné pole fotočlánku

Další faktor ovlivňující měřené jasy se projevuje při velkých úhlech β , tj. pro úhly mezi normálou vzorku a dopadajícím paprskem $\beta = 82,5^\circ$ při měření v Klemsových segmentech. Při těchto hodnotách úhlu β totiž dochází k dopadu světelného toku zdroje reflektometru mimo vzorek podle obr. 37. Během měření velkých úhlů β tedy není možné určit velikost dopadajícího světelného toku ze zdroje na vzorek.



Obr. 37. Světelný tok dopadající mimo měřený vzorek

Pro získání funkce BRDF (f_r) povrchů vzorků je tedy nutné zavést korekční koeficienty pro všechny měřené kombinace úhlů α , β a γ . Poněvadž by odhad korekčních koeficientů na základě zmíněných závislostí byl nepřesný, bylo provedeno měření fotometrických ploch jasu pro povrch opatřeného vrstvou Primalex Polar na fotometrické lavici, tzn. bylo provedeno měření téhož povrchu na lavici i v reflektometru aby bylo možné hodnoty mezi sebou porovnat.

Měření fotometrických ploch jasů vzorku s nátěrem Primalex Polar na fotometrické lavici bylo prováděno přípravkem používaným Ing. Markem Bálským, Ph.D. [18] tak, aby celé zorné pole jasoměru zabíralo rovnoměrně osvětlený povrch vzorku. Tato podmínka

byla splněna pro naprostou většinu měřených jasů daného vzorku, přičemž pro zbytek hodnot docházelo ke stínění konstrukcí přípravku a tyto hodnoty byly nahrazeny hodnotami získanými interpolací či odhadem. Protože je prakticky nemožné naměřit na fotometrické lavici jasy všech kombinací úhlů α , β a γ měřených reflektometrem (6490 hodnot), bylo provedeno pouze několik měření řezů fotometrických ploch jasu a zbylé hodnoty byly interpolovány. Pokud jasy v určitých směrech vykazovaly náhlé změny, byly tyto oblasti měřeny podrobněji.

Pro měření jasů na fotometrické lavici v soustavě úhlů fotometrické lavice α' , β' a γ' podle obr. 20 je třeba provést transformaci do soustavy úhlů použitých ve funkci $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ dle obr. 32a). Za tímto účelem byly odvozeny vztahy

$$\alpha = 90^\circ - \arctan\left(\frac{\cos(\alpha') \cdot \sin(\gamma')}{\sin(\alpha')}\right) \quad (48)$$

$$\beta = \beta' \quad (49)$$

$$\gamma = \arccos(\cos(\gamma') \cdot \cos(\alpha')) \quad (50)$$

kde

- α' je úhel natočení vzorku a světelného zdroje na fotometrické lavici kolem svislé osy s hodnotou podle stupnice uvedené na přípravku,
- β' je úhel mezi normálou plošky a dopadajícím paprskem na fotometrické lavici,
- γ' je úhel mezi normálou měřeného vzorku a vodorovnou rovinou na fotometrické lavici.

Z naměřených jasů na fotometrické lavici pro vzorek s nátěrem Primalex Polar byly získány hodnoty funkce $f_{r,p}$. Pro hodnoty jasů tohoto vzorku pro reflektometr jsou tedy známy hodnoty $f_{r,p}$ a pro měření jiných vzorků lze hodnoty funkce $f_{r,vzorek}$ získat vztahem

$$f_{r,vzorek}(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{L_{refl}(\alpha, \beta, \gamma)}{L_{refl,p}(\alpha, \beta, \gamma)} \cdot f_{r,p}(\alpha, \beta, \gamma) \quad (\text{sr}^{-1}) \quad (51)$$

kde

- L_{refl} je jas měřeného vzorku pro danou kombinaci úhlů α , β a γ naměřeného reflektometrem (cd/m^2),
- $L_{refl,p}$ je jas vzorku Primalex Polar naměřeného reflektometrem (cd/m^2),
- $f_{r,p}$ je hodnota funkce BRDF vypočítaná pro danou kombinaci úhlů α , β a γ z hodnot naměřených na fotometrické lavici vzorku Primalex Polar (sr^{-1}).

Dokument obsahující naměřená data lze nalézt na přiloženém CD. Tento soubor pro tabulkový procesor Calc z balíčku kancelářských aplikací LibreOffice spolu s Java aplikací

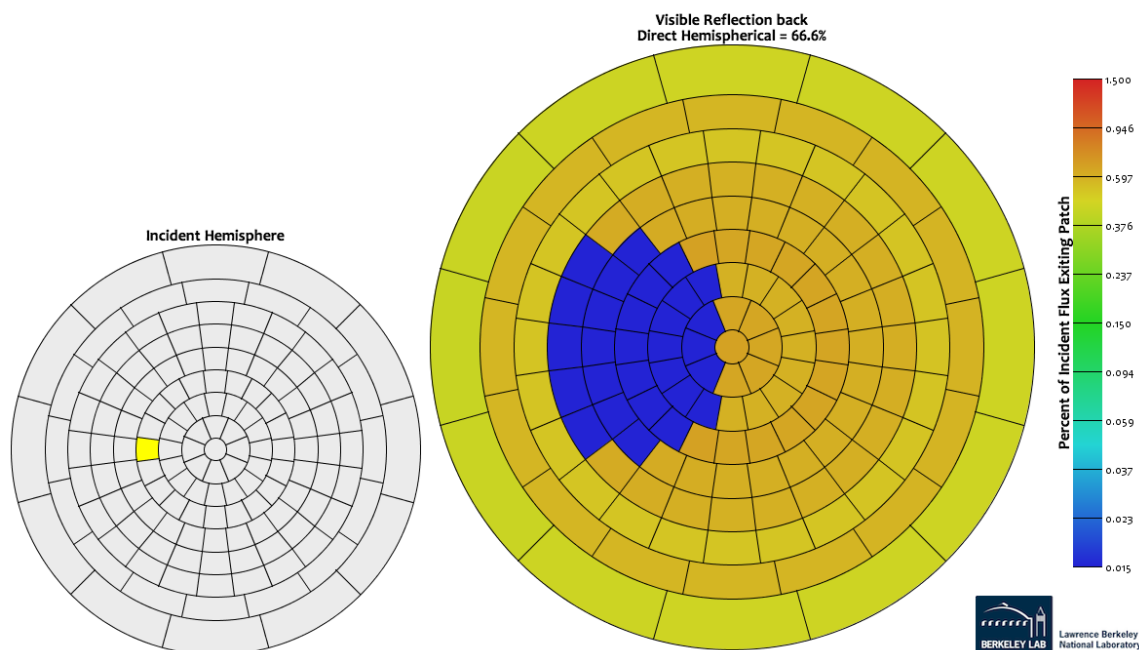
Refl2BSDF, kterou také lze nalézt v příloze, byl použit pro vytvoření korekčního souboru pro reflektometr OPTE-F3K. Tento korekční soubor formátu CSV obsahuje naměřené hodnoty $L_{refl,p}(\alpha, \beta, \gamma)$ a vypočítané hodnoty $f_{r,p}(\alpha, \beta, \gamma)$ (viz. tab 7), čímž je umožněno vypočítat požadovanou hodnotu $f_{r,vzorek}(\alpha, \beta, \gamma)$ podle vztahu (51) pro libovolný vzorek s naměřenými fotometrickými plochami jasu reflektometrem.

α (°)	β (°)	γ (°)	$L_{lav,p}$ (cd · m ⁻²)	$f_{r,p}$ (sr ⁻¹)	$L_{refl,p}$ (cd · m ⁻²)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.0	0.0	30.0	46.8	0.276759314	1985.0
0.0	0.0	40.0	45.9	0.2714370195	1750.0
0.0	0.0	50.0	45.1	0.2667060911	1470.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Tab. 7. Ukázka obsah korekčního souboru

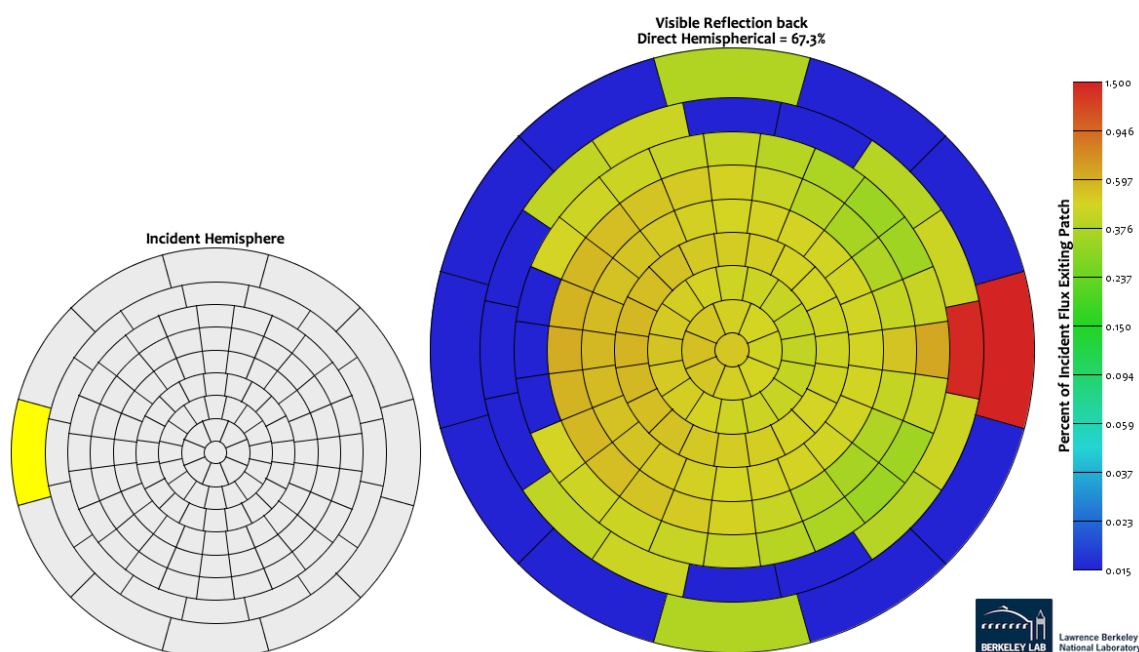
Java aplikace Refl2BSDF byla dále využita k vypočítání hodnot $f_{r,vzorek}(\alpha, \beta, \gamma)$ pro naměřená data vzorku s nátěrem Primalex Polar aplikací ReflectoSoft. Aplikace Refl2BSDF tedy využila obsahu korekčního souboru a spolu se soubory CSV, obsahujícími jasy vzorků měřených reflektometrem, byly vygenerovány soubory hodnot $f_{r,vzorek}(\alpha, \beta, \gamma)$ ve formátu XML LBNL (Lawrence Barkeley National Laboratory) pro zobrazení aplikací BSDF-Viewer.

Hodnoty $f_{r,vzorek}$ vzorku s nátěrem Primalex Polar za použití korekčních hodnot jsou pro dopadající úhel paprsku $\beta = 30^\circ$ zobrazeny aplikací BSDFViewer na obr. 38. Barevná interpretace hodnot $f_{r,vzorek}$ byla nastavena totožná s obr. 35 pro umožnění srovnání. Oproti nekorigovanému měření je tedy patrné přiblížení fotometrické plochy jasu pro daný úhel dopadu paprsku k hodnotám rovnoměrně rozptýlně odrážejícího povrchu. Poněvadž fotometrické plochy jasu vzorku Primalex Polar byly využity též pro korekci, jsou zde zobrazeny prakticky hodnoty $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ vypočítané z hodnot jasu naměřeného vzorku Primalex Polar na fotometrické lavici.



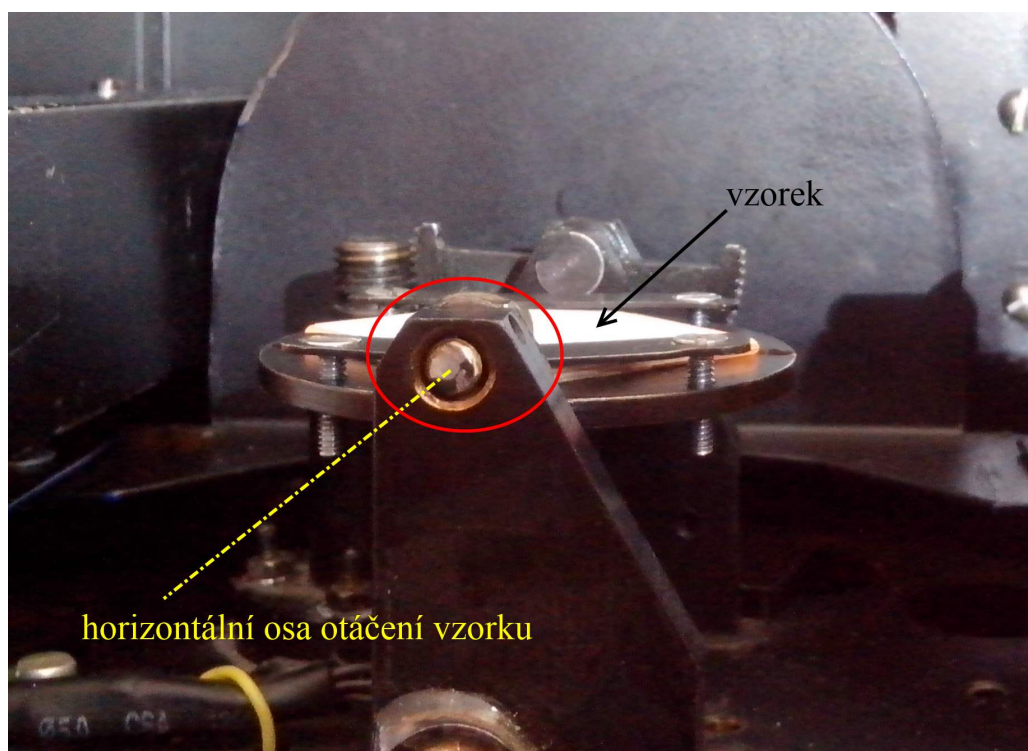
Obr. 38. Korigované naměřené hodnoty vzorku Primalex Polar, $\beta = 30^\circ$

Pro tentýž vzorek je uveden na obr. 39 výstup aplikace BSDFViewer pro zvolený úhel $\beta = 82,5^\circ$, tj. úhel mezi normálou plošky a dopadajícím paprskem (obr. 32a)). Jak patrné z obrázku, vykazuje tento vzorek lehce rozptýlenou zrcadlovou složku vyznačenou červenou barvou Klemsových segmentů. Patrná je zde též jistá rozptýlená složka světelného toku odrážejícího se zpět do levého poloprostoru světelného zdroje podle obr. 39.



Obr. 39. Korigované naměřené hodnoty vzorku Primalex Polar, $\beta = 82,5^\circ$

Na obr. 39 je patrný další konstrukční vliv reflektometru na měřené hodnoty jasu. K neměřitelné oblasti viditelné vlevo na pravém obrázku (obr. 39) přibylo další množství nulových hodnot jasů, které již není možno korigovat zavedením korekčního součinitele, neboť nelze dosadit do vztahu (51) hodnotu jasu $L_{refl,p}(\alpha, \beta, \gamma) = 0$. Jak patrné na obr. 40, dochází ke stínění světelného zdroje reflektometru úchytem pro osu plošky pro umístění měřeného vzorku. Pro využití naměřených fotometrických ploch jasů je třeba chybějící hodnoty doplnit. Toho může být dosaženo interpolací z hodnot jasů sousedních Klemsových segmentů.

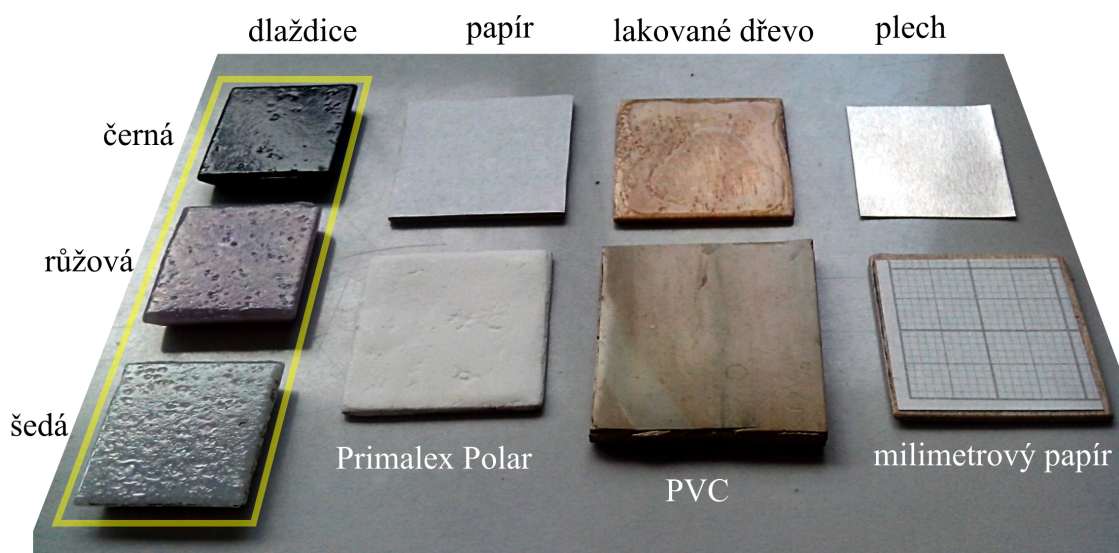


Obr. 40. Zamezení přímé viditelnosti středu plochy měřeného vzorku uchycením osy plošky pro upevnění vzorku

3.6 Vyhodnocení naměřených dat

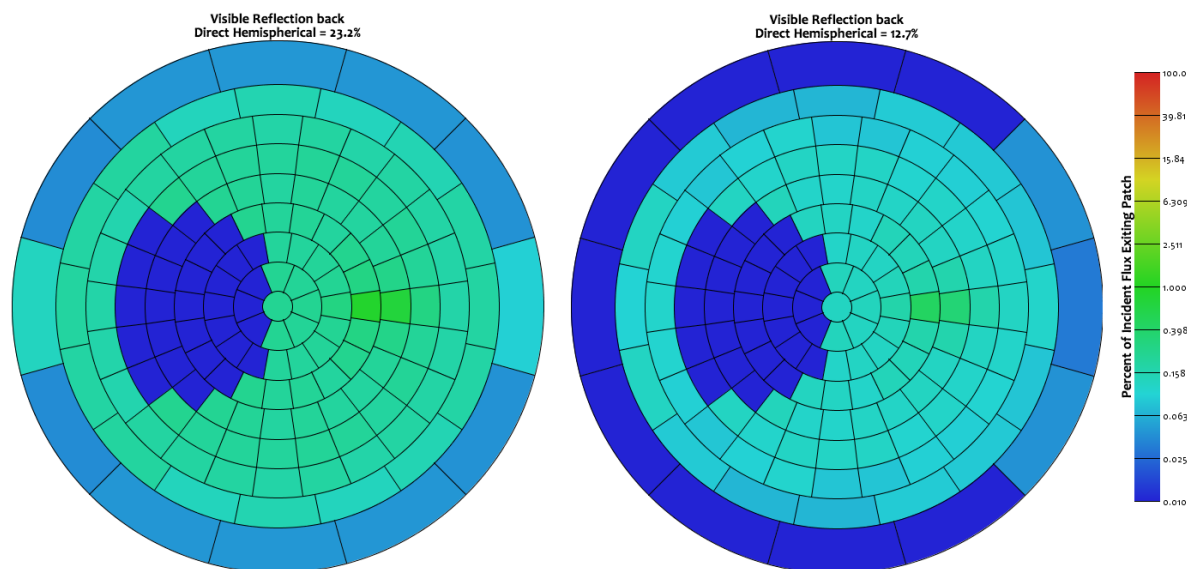
Bylo provedeno několik měření fotometrických ploch jasů vybraných vzorků povrchů uvedených na obr. 41, mezi nimiž byl vzorek dlaždice fasády FEL ČVUT v Praze budovy v Dejvicích šedé, růžové a černé barvy, papír, světlého nelakovaného dřeva, vzorek téhož dřeva opatřen vrstvou lesklého laku, podlahové krytiny z PVC šedé barvy a vzorek leštěného hliníku.

Na následujících obrázcích lze nalézt naměřené hodnoty $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$ s úhly dopadu paprsku $\beta = 30^\circ$ skrz prostorový úhel uvedený na obr. 38 některých vzorků uvedených na obr. 41. Všechny soubory naměřených dat z aplikace ReflectoSoft a výstupy ve formátu LBNL XML pro využití aplikací BSDFViewer lze nalézt na příloženém CD.



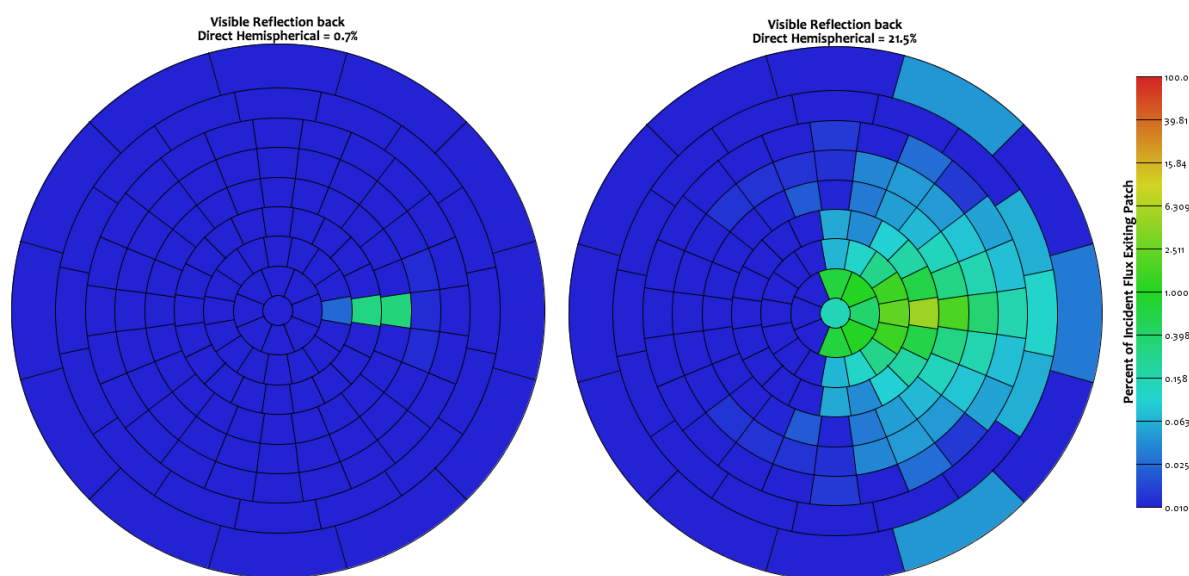
Obr. 41. Zkušební měřené vzorky

Na obr. 42 jsou zobrazeny výstupy aplikace BSDFViewer s hodnotami funkce BRDF pro dlaždice fasády FEL ČVUT v Praze barvy šedé a růžové, na obr. 43 barvy černé a pro plech. Tyto lesklé dlaždice vykazují zrcadlový odraz s lehce rozptylnou složkou, která zůstává zachována při změně barvy materiálu dlaždice, zatímco difuzní složka odrazu ubývá s tmavší barvou dlaždice.



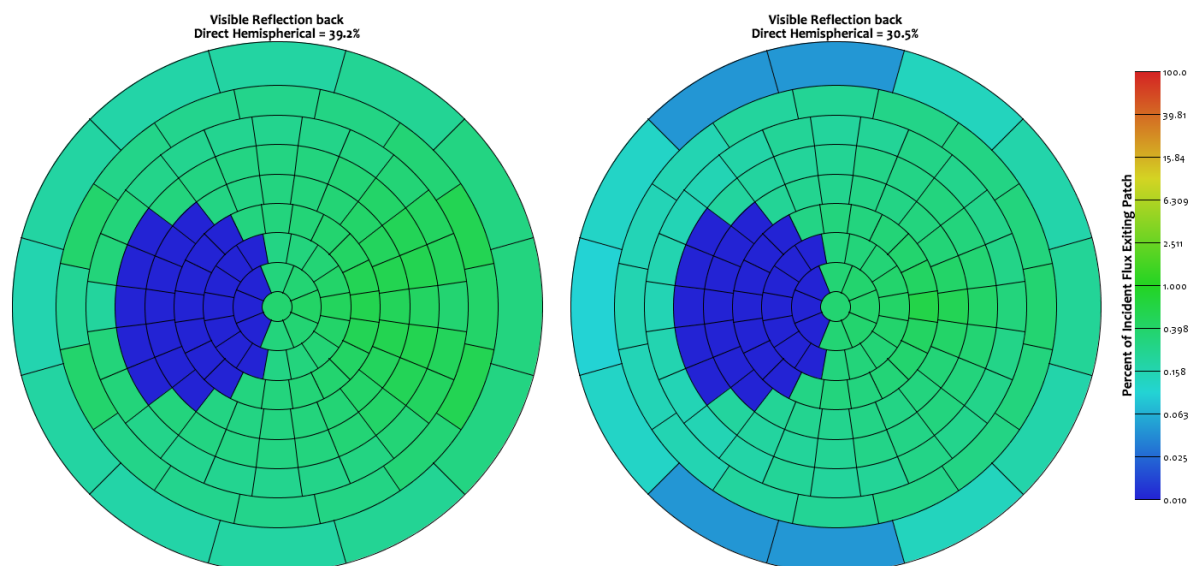
Obr. 42. Korigované naměřené hodnoty vzorků dlaždic fasády budovy FEL ČVUT v Praze v Dejvicích, vlevo šedá, vpravo růžová, $\beta = 30^\circ$

Vzorek plechu na obr. 43 vykazuje, jak též patrné z obr. 41 podle odrazu světla z pozadí, zrcadlový odraz s širokou rozptylnou složkou.



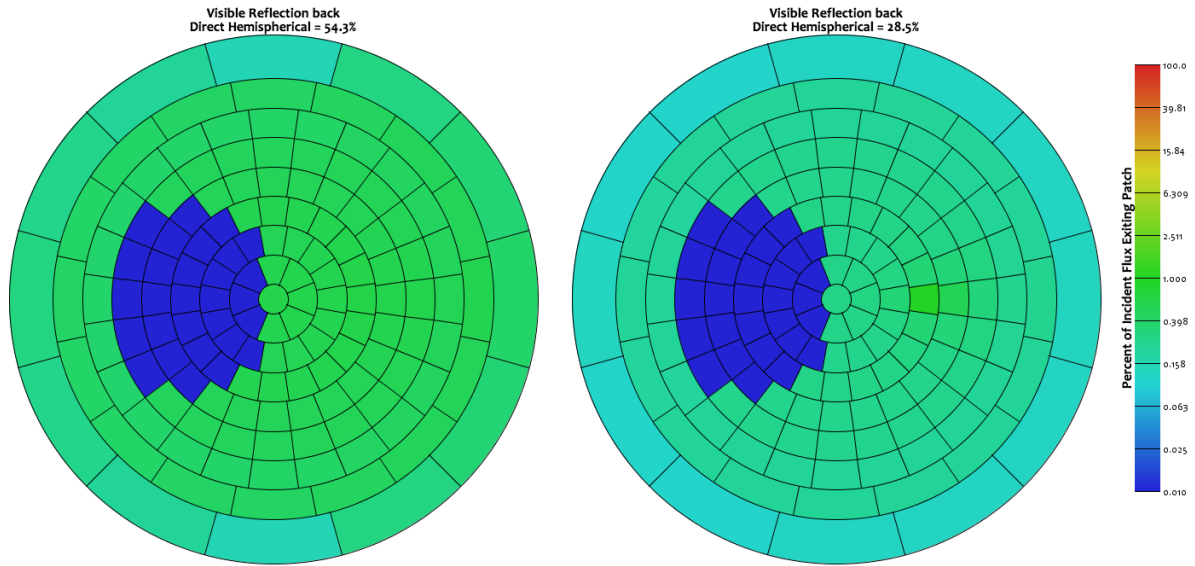
Obr. 43. Korigované naměřené hodnoty vzorků dlaždice fasády budovy FEL ČVUT v Praze v Dejvicích, vlevo černá, vpravo plech, $\beta = 30^\circ$

Zobrazení funkce BRDF vzorku nelakovaného a lakovaného vzorku téhož dřeva je uvedena na obr. 44. Nalakováním došlo pro daný úhel dopadu β paprsku ke snížení dílčího integrálního činitele odrazu $\rho(\beta)$.



Obr. 44. Korigované naměřené hodnoty vzorků světlého dřeva vlevo nelakovaného, vpravo lakovaného, $\beta = 30^\circ$

U vzorku papíru na obr. 45 je zřejmý poměrně rovnoměrně difuzní odraz světla pro daný úhel dopadu paprsku, oproti vzorku PVC, který vykazuje malou zrcadlovou složku.



Obr. 45. Korigované naměřené hodnoty vzorků vlevo papír, vpravo podlahová krytina z PVC, $\beta = 30^\circ$

Pro výpočet činitelů odrazu jednotlivých vzorků je nejprve potřeba získat hodnoty světlení. Hodnoty jasů $L_r(\alpha, \beta, \gamma)$ v systému úhlů podle obr. 32a) měřených vzorků povrchů byly využity pro výpočet dílčích světlení podle vztahu [18]

$$\Delta M_P(\alpha, \beta, \gamma) = L_r(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \cos(\gamma) \cdot \Delta\Omega \quad (\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, ^\circ, \text{sr}) \quad (52)$$

kde

$L_r(\alpha, \beta, \gamma)$ je jas svazku paprsků vycházejících v prostorovém úhlu $\Delta\Omega(\alpha, \gamma)$ ze sledovaného bodu plochy,

γ je úhel mezi normálou plošky a svazkem paprsků vycházejících prostorovým úhlem $\Delta\Omega$,

$\Delta\Omega$ je velikost prostorového úhlu daná konkrétním Klemsovým segmentem.

Dále je potřeba vypočítat dílčí činitele odrazu $\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$, tedy činitele odrazu pro paprsky dopadající pod úhlem β na plochu, ve směrech určených úhly α a γ . Při měření reflektometrem je známa normálová osvětlenost E_N měřeného vzorku pro výpočet dvousměrové odrazové distribuční funkce $f_r(\alpha, \beta, \gamma)$. Získat osvětlenost vzorku při daném úhlu dopadu svazku paprsků β lze provést použitím vztahu

$$E_P(\beta) = E_N \cdot \cos(\beta) \quad (\text{lx}; \text{lx}, ^\circ) \quad (53)$$

Integrální činitel odrazu, definovaný vztahem (3), lze rozdělit na jeho dílčí části, tedy dílčí činitele odrazu $\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$. Máme-li dílčí světlení $\Delta M_P(\alpha, \beta, \gamma)$ v bodě P plošky

získané z naměřených fotometrických ploch jasu vzorku podle vztahu (52) a hodnotu E_P podle vztahu (53), bude pro dílčí činitel odrazu platit vztah

$$\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\Delta M_P(\alpha, \beta, \gamma)}{E_P(\beta)} \quad (-; \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}, \text{lx}) \quad (54)$$

Jestliže činitel odrazu ρ určuje poměr celkového odraženého světelného toku od daného povrchu ku dopadajícímu světelnému toku na danou plochu, potom získaný dílčí činitel odrazu $\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$ určuje poměr dopadajícího světelného toku pod úhlem β ku odraženému světelnému toku vycházejícímu v prostorovém úhlu $\Delta\Omega$ ze vztahu (52). Pro konkrétní úhel dopadu β paprsku na povrch daného materiálu je tedy definována fotometrická plocha jasu $L_{r,\beta}(\alpha, \gamma)$, z níž lze získat pro jednotlivé hodnoty jasů dílčí činitele odrazu $\Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)$ a lze tedy vynést pomocí radiusvektorů fotometrickou plochu činitele odrazu. Hodnotu celkového činitele odrazu ρ_β pro úhel dopadu paprsku β na uvažovaný povrch lze získat sečtením jednotlivých dílčích činitelů odrazů $\Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)$ pro úhel β . Platí tedy

$$\rho(\beta) = \sum_{\alpha=0^\circ, \gamma=0^\circ}^{\alpha=360^\circ, \gamma=90^\circ} \Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma) \quad (-; -) \quad (55)$$

Činitel odrazu ρ lze podle [18] získat jako střední hodnotu dílčích činitelů odrazu ρ_β pro úhly dopadu paprsku β dle vztahu

$$\rho = \frac{\sum_{\beta=0^\circ}^{\beta=90^\circ} \rho(\beta)}{\frac{90}{\Delta\beta} + 1} = \frac{\sum_{\beta=0^\circ}^{\beta=90^\circ} \sum_{\alpha=0^\circ, \gamma=0^\circ}^{\alpha=360^\circ, \gamma=90^\circ} \Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)}{\frac{90}{\Delta\beta} + 1} \quad (-) \quad (56)$$

kde

$\Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)$ je dílčí činitel odrazu pro úhel dopadu paprsku od normály plochy β a směru odrazu určeném úhly α a γ (-),

$\frac{90}{\Delta\beta} + 1$ je počet měřených fotometrických ploch jasu s krokem $\Delta\beta$.

Činitele odrazu vzorků materiálů získané měřením reflektofotometrem jsou uvedeny v tab. 8.

vzorek	$\rho(\beta)(-)$									ρ
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	$82,5^\circ$	
Primalex Polar	0,84	0,86	0,84	0,87	0,87	0,87	0,90	0,92	0,75	0,86
dlaždice šedá	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,32	0,38	0,55	0,66	0,37
dlaždice růžová	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,22	0,39	0,50	0,23
dlaždice černá	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,13	0,34	0,46	0,11
PVC	0,35	0,36	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,41	0,39	0,37
papír	0,69	0,69	0,67	0,69	0,73	0,75	0,77	0,75	0,76	0,72
dřevo světlé	0,43	0,57	0,55	0,48	0,44	0,43	0,44	0,48	0,50	0,48

Tab. 8. Činitele odrazu $\rho(\beta)$ pro úhly dopadu paprsku β měřených vzorků

KAPITOLA 4

METODA MONTE CARLO SE SLEDOVÁNÍM PAPRSKŮ

Výpočet rozložení světelného toku ve zvolené světelné scéně lze realizovat za pomoci osvětlovacích modelů používajících difuzních či nedifuzních odrazů. Použití povrchů s difuzními odraznými vlastnostmi zjednodušuje výpočet a povrchy jsou co do světelně technických vlastností definovány integrálním činitelem odrazu ρ popsáním v odst. 1.2. Skutečné odrazné vlastnosti povrchů používaných v interiérech a exteriérech se však mohou výrazně lišit od rovnoměrně rozptylných povrchů, proto se i výsledky výpočtů rozložení toku mohou vzdalovat od skutečných hodnot.

Užití nedifuzních odrazů je složitější ve srovnání s použitím odrazů difuzních již i při zadávání světelně technických parametrů povrchů, ale zejména při vlastních výpočtech rozložení odraženého světelného toku. Zatímco difuzní povrchy vykazují konstantní jas nehladě na pozorovaném směru podle obr. 3b), je pro nedifuzní povrchy obecně jas proměnný v závislosti na pozorovaném směru, tj. fotometrická plocha jasu není tvaru polokoule. Dále je tvar této plochy závislý na směru dopadu paprsku. Zjednodušení lze dosáhnout u opticky izotropních povrchů, které vykazují totožné fotometrické plochy jasu co do tvaru po dopadu všech paprsků s tímž úhlem β mezi normálou plochy a dopadajícím paprskem (viz obr. 32a)). Pro tyto povrchy je tedy tvar fotometrické plochy jasu závislý pouze na úhlu dopadu β . Fotometrické plochy jasu zvoleného povrchu materiálu lze získat měřením pomocí reflektofotometru popsaného v kap. 3.

Pro výpočet rozložení světelného toku ve scéně s difuzními povrchy lze použít metodu radiosity popsanou v odst. 2.4, kdy jsou světelně činné plochy rozděleny na konečný počet plošek, pro které se provádí výpočet dopadajícího toku. Každá z těchto plošek s nenulovým integrálním činitelem odrazu se stává po dopadu světla sekundárním zdrojem světla, čímž dojde k ovlivnění rozložení toku ve sledovaném prostoru. Fotometrická plocha jasu či svítivosti je přitom pro tyto plochy definována pouze hodnotou jasu L konstantního do všech směrů, či hodnotou vztahné svítivosti I_0 ve směru normály plošky (viz obr. 3).

Využití tohoto postupu pro výpočet rozložení světelného toku scény pro nedifuzní odrazy by obnášelo s totožným přístupem rozdělení scény metodou konečných prvků definovat pro každou plošku, která se stává sekundárním světelným zdrojem, fotometrickou

plochu jasu, která by se s každým dalším světelným tokem odraženým od jiné plošky či vyzářeným ze světelného zdroje dopadajícím na uvažovanou plošku měnila. Pro celou scénu by bylo tedy definováno n fotometrických ploch jasu pro n plošek scény. Vliv dopadajícího světelného toku z daného směru na konkrétní fotometrickou plochu jasu vybrané plošky by byl odvozen z odrazných vlastností této plošky definovaných hodnotami fotometrických ploch jasu pro různé směry dopadu, resp. úhly dopadu β pro izotropní povrchy.

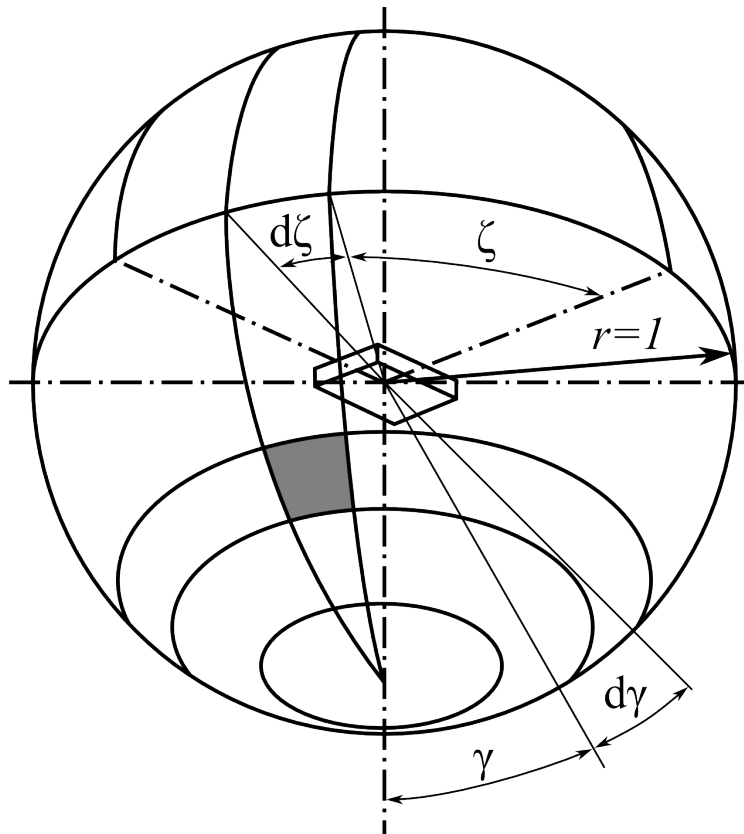
Jiným způsobem, jak získat rozložení světelného toku v soustavě nedifuzních povrchů výpočtem, je využití metody sledování paprsku, jejíž popis lze nalézt v odst. 2.5. Tato metoda sleduje dráhy paprsků světelnou scénou vysílaných pouze z primárních zdrojů světla, přičemž při odrazech dochází k ovlivnění drah paprsků, případně změn hodnot světelných toků, které paprsky reprezentují. Počet odrazů paprsků může být omezen, např. maximálním počtem odrazů nebo může být sledována hodnota světelného toku paprsků, přičemž dojde k zániku paprsků reprezentujících nižší než definovanou mez hodnoty světelného toku. Lehce odlišný přístup, použitý při řešení výpočtů rozložení světelného toku v modelové místnosti v této práci, spočívá v konstantním světelném toku reprezentovaným každým paprskem, kdy celková hodnota odraženého světelného toku od vybrané plošky je řešena statisticky. V tomto případě je paprsek vyzářen primárním světelným zdrojem a při každém odrazu od plošek scény je nenulová pravděpodobnost zániku tohoto paprsku.

Metoda Monte Carlo je numerická stochastická simulační metoda. Její rozvoj byl podmíněn vývojem moderní počítačové techniky. Obecně lze říci, že metodu Monte Carlo lze použít tam, kde je řešení možné nalézt pomocí opakování náhodných pokusů. V případě této práce bylo třeba řešit dráhu paprsku, tzn. směr paprsku při vyzáření svítidlem a dále jeho směr po odrazu od povrchu.

4.1 Využití metody sledování paprsku pro výpočet mnohonásobných odrazů

V této práci byla pro výpočet rozložení světelného toku v modelové místnosti použita metoda sledování paprsku (odst. 2.5). Spočívá ve sledování dráhy paprsků definovaným prostředím vycházejících z primárních zdrojů světla, tj. ze svítidel modelové místnosti. Jak směry vycházejících paprsků z primárních zdrojů světla, tak směry paprsků po odrazu od povrchů byly řešeny metodou Monte Carlo. Výběr těchto směrů byl řešen na základě fotometrických ploch svítivosti svítidel a změřených odrazných fotometrických ploch jasů povrchů, ze kterých byly získány fotometrické plochy činitele odrazu.

Při použití metody sledování paprsku, kdy každý paprsek reprezentuje světelný tok totožné velikosti, je pro světelný zdroj potřeba zajistit, aby byly paprsky vyzařovány s pravděpodobností respektující vyzařovací charakteristiku zdroje. Prostor, do kterého bude svítidlo bodového typu vyzařovat světelný tok, lze rozdělit na dílčí prostorové úhly $d\Omega_{\gamma\zeta}$ podle obr. 46.



Obr. 46. Vymezení elementárního prostorového úhlu [1]

Velikost elementu prostorového úhlu $d\Omega_{\gamma\zeta}$ bude potom dána vztahem

$$d\Omega_{\gamma\zeta} = \sin(\gamma) d\gamma d\zeta \quad (57)$$

Mějme tedy prostor, do kterého svítidlo vyzařuje světelný tok, rozdělen na dílčí prostorové úhly $\Delta\Omega_i$. Dílčí světelný tok $\Delta\Phi_i$, vyzářený svítidlem do daného prostorového úhlu $\Delta\Omega_i$, je roven

$$\Delta\Phi_i = I_i \cdot \Delta\Omega_i \quad (58)$$

kde

I_i je svítivost ve směru osy dílčího prostorového úhlu $\Delta\Omega_i$.

Hodnoty získaných dílčích světelných toků pro všechny uvažované dílčí prostorové úhly určují pravděpodobnost, s jakou jsou paprsky s konstantními světelnými toky vyzářeny ze svítidla do okolního prostoru. Pro metodu Monte Carlo obecně platí, že čím více výpočtů se provede, tím je výsledek přesnější. V případě svítidla se jedná o počet paprsků, které

jsou svítidlem vyzářeny. Čím větší množství paprsků s menší hodnotou světelného toku je svítidlem vyzářeno, tím přesnější bude výpočet rozložení světelného toku do prostoru. Součet zmíněných dílčích toků je přitom dán celkovým světelným tokem svítidla. Pro vyzáření paprsku svítidlem do daného dílčího prostorového úhlu je dále třeba uvažovat zavedení náhodné volby směru v rámci tohoto prostorového úhlu, aby paprsky nevycházely pouze osami těchto prostorových úhlů.

Mějme realizaci náhodné veličiny $\eta \sim R(0, 1)$ a realizaci spojitě náhodné veličiny ξ se zadanou distribuční funkcí F a hustotou f . Podle [23] je potom náhodná veličina $\eta = F(\xi)$ rovnoměrně rozdělena v intervalu $(0, 1)$, $\xi \sim R(0, 1)$. Základní algoritmus pro získání spojitě náhodné veličiny se provádí následujícími kroky

1. generace náhodné veličiny $\eta \sim R(0, 1)$
2. nalezení řešení ξ rovnice $F(\xi) = \eta$
3. získání čísla ξ , což je realizace náhodné veličiny s distribuční funkcí F

Generaci náhodné (resp. pseudonáhodné) veličiny η v rozmezí $R(0, 1)$ lze provádět algoritmičticky. Je-li celkový prostorový úhel z pohledu svítidla rozdělen na elementy $\Delta\Omega_i$ s definovanými světelnými toky $\Delta\Phi_i$, lze spojitou distribuční funkci aproximovat diskrétní pravděpodobnostní funkcí

$$F(\Phi_x) = P(\Phi \leq \Phi_x) \approx \sum_{i=1}^{i=x} \frac{\Delta\Phi_i}{\Phi_s} = \sum_{i=1}^{i=x} \varphi_i \quad (-) \quad (59)$$

kde

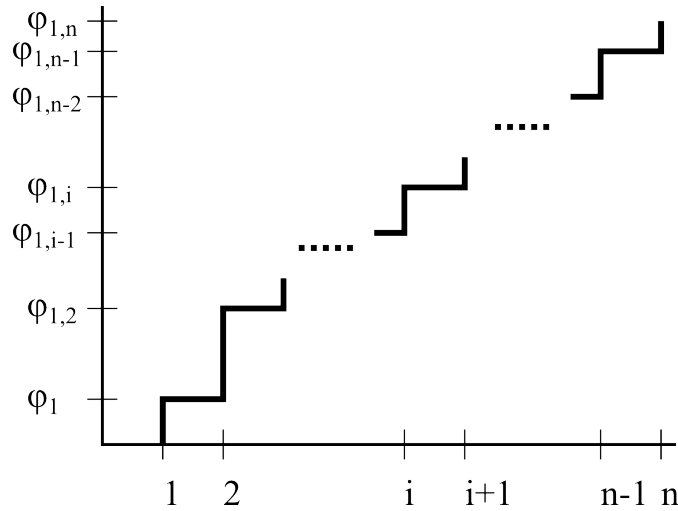
Φ_s je celkový světelný tok svítidla (lm),

φ_i je poměrný světelný tok $\frac{\Delta\Phi_i}{\Phi_s}$ elementu i dílčího prostorového úhlu $\Delta\Omega_i$ (-).

Distribuční funkce pravděpodobnostního rozdělení volby $\Delta\Omega_i$ je uvedena na obr. 47. Index i je zde uveden na horizontální ose, zatímco na ose vertikální součty poměrných toků $\varphi_{1,x} = \sum_{i=1}^{i=x} \varphi_i$, přičemž φ_i je poměrný světelný tok vyzářený do dílčího prostorového úhlu $\Delta\Omega_i$.

K získání indexu i z náhodné veličiny $\eta \sim R(0, 1)$ bylo použito inverzní funkce k distribuční funkci F uvedené na obr. 47. Vygenerované hodnoty η tedy určují polohu na ose s relativními světelnými toky, pro které platí $\varphi_{i,x} \sim R(0, 1)$. Vygenerovaná náhodná veličina z oboru reálných čísel s hodnotami v rozmezí 0 až 1 tedy s větší pravděpodobností určí prostorový úhel $\Delta\Omega_{i1}$ než prostorový úhel $\Delta\Omega_{i2}$, pokud světelný tok $\Delta\Phi_{i1}$, vyzářený svítidlem ve směru $\Delta\Omega_{i1}$, je větší než světelný tok $\Delta\Phi_{i2}$, vyzářený svítidlem ve směru $\Delta\Omega_{i2}$.

Pro konkrétní světelný zdroj lze získat svítivost $I_{C,\gamma}$ do směru definovaného polovinou C a úhlem γ (viz obr. 1) ze souboru Eulumdat, který se používá pro specifikaci parametrů svítidel.



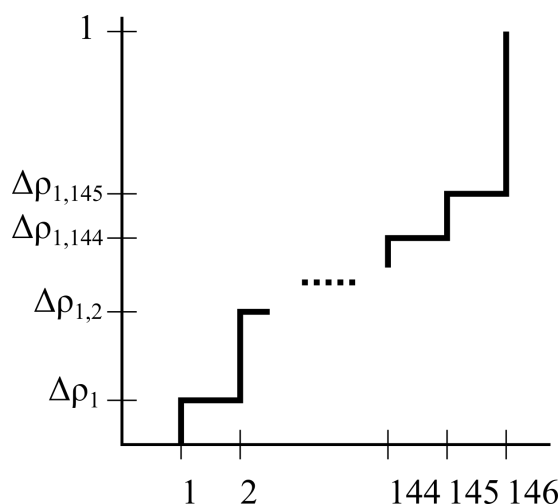
Obr. 47. Distribuční funkce dílčích prostorových úhlů $\Delta\Omega_i$

Odraz paprsku od povrchu byl řešen obdobným způsobem jako generování paprsků svítidly. Oproti svítidlům je však třeba řešit nejen směr odraženého paprsku, ale i pravděpodobnost zániku paprsku po dopadu, a tím ukončení dráhy paprsku. Zatímco pro svítidla jsou k dispozici soubory Eulumdat obsahující jejich fotometrické parametry, je pro uvažování reálných povrchů ve světelné scéně potřeba fotometrické parametry povrchů získat měřením. Za tímto účelem je možné použít reflektofotometr popsany v odst. 3.2.

Na rozdíl od úhlového systému zvoleného ve vybrané metodě Monte Carlo pro generování paprsku svítidlem bylo pro definování úhlů při odrazech paprsků od povrchů využito Klemsových segmentů popsanych v odst. 3.4.2. Bylo tak učiněno z důvodu měřených fotometrických ploch jasů reflektometrem právě v soustavě Klemsových segmentů. Poloprostor, do kterého se může odražený paprsek šířit, byl tedy rozdělen na 145 dílčích prostorových úhlů $\Delta\Omega_i$ o velikostech definovaných v tab. 6. Postup výpočtu dílčích činitelů odrazu lze nalézt v odst. 3.6 a vypočítané hodnoty činitelů odrazu z naměřených hodnot reflektofotometrem pro vybrané vzorky jsou uvedeny v tab. 8.

Při použití sledování paprsku s konstantním tokem určuje činitel odrazu $\rho(\beta)$ pro daný úhel dopadu paprsku β pravděpodobnost, s jakou se dopadající paprsek odrazí a bude pokračovat dále na vypočítané dráze. Tento přístup byl zvolen pro použitou metodu sledování paprsku. Celkový činitel odrazu ρ_β pro daný úhel dopadu paprsku β lze získat součtem všech dílčích činitelů odrazu $\Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)$. Složení distribuční funkce činitele odrazu je uvedena na obr. 48. Na vertikální ose jsou uvedeny součty dílčích činitelů odrazu $\Delta\rho_{1,x} = \sum_{i=1}^{i=x} \Delta\rho_i$, kde $\Delta\rho_i$ je dílčí činitel odrazu vykazovaný do směru Klemsova segmentu i pro daný úhel dopadu paprsku β . Na horizontální ose jsou uvedeny číselná označení Klemsových segmentů.

Jak patrně z obr. 48, součástí distribuční funkce je i interval od indexu 145 do 146, který je doplňkem součtu dílčích činitelů odrazu $\Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)$ do hodnoty 1. Zavedením inverzní distribuční funkce je opět získán nástroj volby indexu Klemsova segmentu, který určuje směr pokračování dráhy odraženého paprsku. Pokud však platí $\eta \sim R(\Delta\rho_{145}, 1)$, tzn. že generovaná náhodná veličina leží v intervalu $\Delta\rho_{145}$ až 1, dojde k pohlcení paprsku



Obr. 48. Distribuční funkce dílčích činitelů odrazu $\Delta\rho_\beta(\alpha, \gamma)$

povrchem. Tímto způsobem dojde tedy k pohlcení části světelného toku definovaného činitelem pohlcení α ze vztahu (5), přičemž v daném algoritmu jsou řešeny pouze odrazy a pohlcení a platí tedy vztah (7).

Je-li vybrán Klemsův segment i , definovaný úhly α a γ pro paprsek odrážející se od povrchu, je vybrán realizací náhodné veličiny směr v rámci prostorového úhlu Ω_i daného Klemsova segmentu i . Tím je zabezpečeno, že paprsek nebude po odrazu opouštět danou plochu pouze po ose vybraného segmentu.

Při výpočtech bylo zavedeno pro získání vlivu mnohonásobných odrazů na výsledné sledované veličiny omezení na počet odrazů paprsků. Výpočty byly prováděny pro paprsky vyzařované svítidly bez odrazů, pro paprsky odrážející se pouze jednou a dále pro paprsky bez omezení počtu odrazů. Pro mnohonásobné odrazy paprsky tedy zanikaly čistě podle pravděpodobnosti dané činitelem odrazu povrchu pro směr dopadu paprsku. Hodnoty naměřených činitelů odrazů jsou uvedeny v tab. 3.

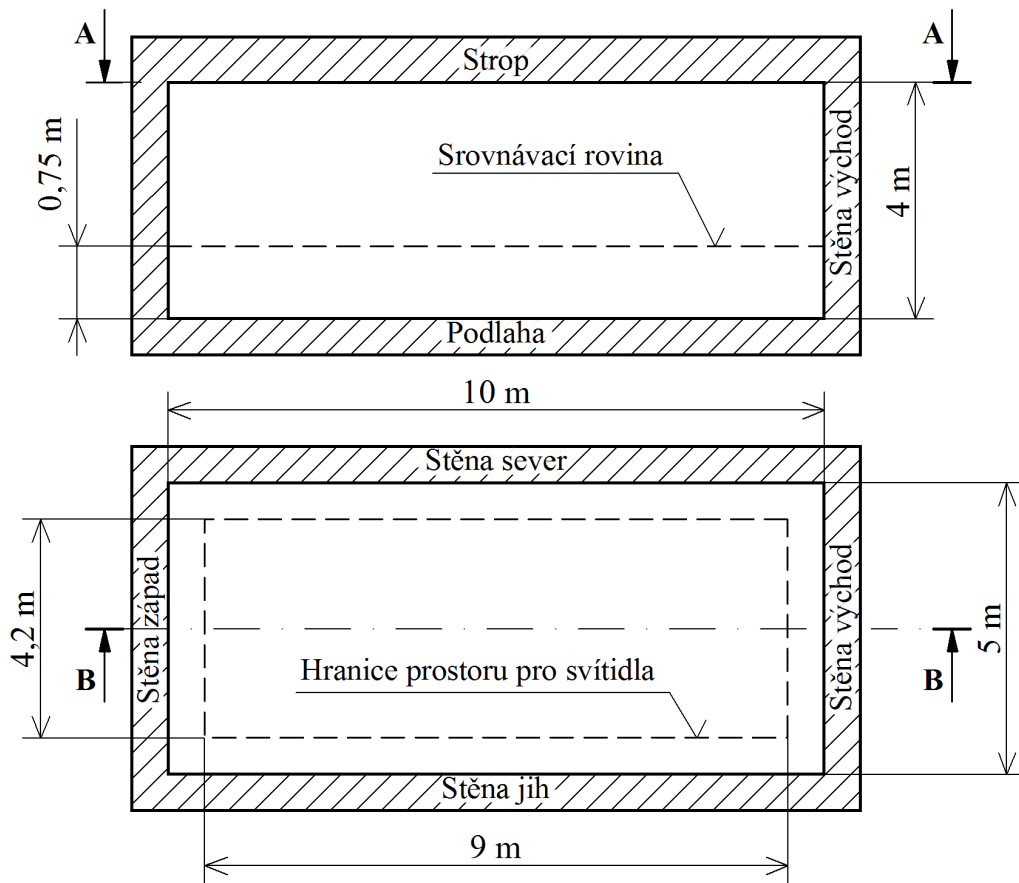
Popsaná metoda sledování paprsku s použitím metody Monte Carlo byla realizována jako skript pro software Matlab. Použité soubory skriptů jsou přiloženy k této práci na CD.

4.2 Modelová místnost

Pro aplikace metody sledování paprsku s použitím metody Monte Carlo byla vybrána místnost o rozměrech $10 \times 5 \times 4$ m dle obr. 49.

Povrchy modelové místnosti byly zvoleny s integrálními činiteli odrazu o hodnotách

$$\begin{aligned} \rho_{str} &= 0,7 && \text{činitel odrazu stropu,} \\ \rho_{ste} &= 0,5 && \text{činitel odrazu všech stěn,} \\ \rho_p &= 0,2 && \text{činitel odrazu podlahy.} \end{aligned}$$



Obr. 49. Modelová místnost

Pro difuzní povrchy jsou činitele odrazu $\rho(\beta)$ pro všechny úhly dopadu paprsku β konstantní, tj. dílčí činitel odrazu není pro difuzní povrchy závislý na úhlu dopadu. Pokud tedy při použití metody sledování paprsku paprsek dopadne na takovouto difuzní plochu z kteréhokoliv směru, s pravděpodobností odpovídající ρ bude odražen. Dílčí činitele odrazu $\rho(\beta)$ jsou tedy totožné s integrálním činitelem odrazu ρ .

Fotometrické plochy jasu pro různé úhly dopadu paprsku β pro vybrané vzorky povrchů byly získány měřením na reflektofotometru (viz tab. 8). Z nich byly dále vypočítány činitele odrazu ρ_β a jejich průměrné hodnoty ρ . Pro modelovou místnost byly však požadovány určité hodnoty činitelů odrazu pro strop, stěny a podlahu, tj. $\rho_{str} = 0,7$, $\rho_{ste} = 0,5$ a $\rho_p = 0,2$. Použitím vztahu (60) pro fotometrické plochy činitele odrazu lze získat povrch s požadovaným činitelem odrazu.

$$\Delta\rho_v(\alpha, \beta, \gamma) = \Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma) \cdot \frac{\rho}{\rho_v} \quad (-; -, -, -) \quad (60)$$

kde

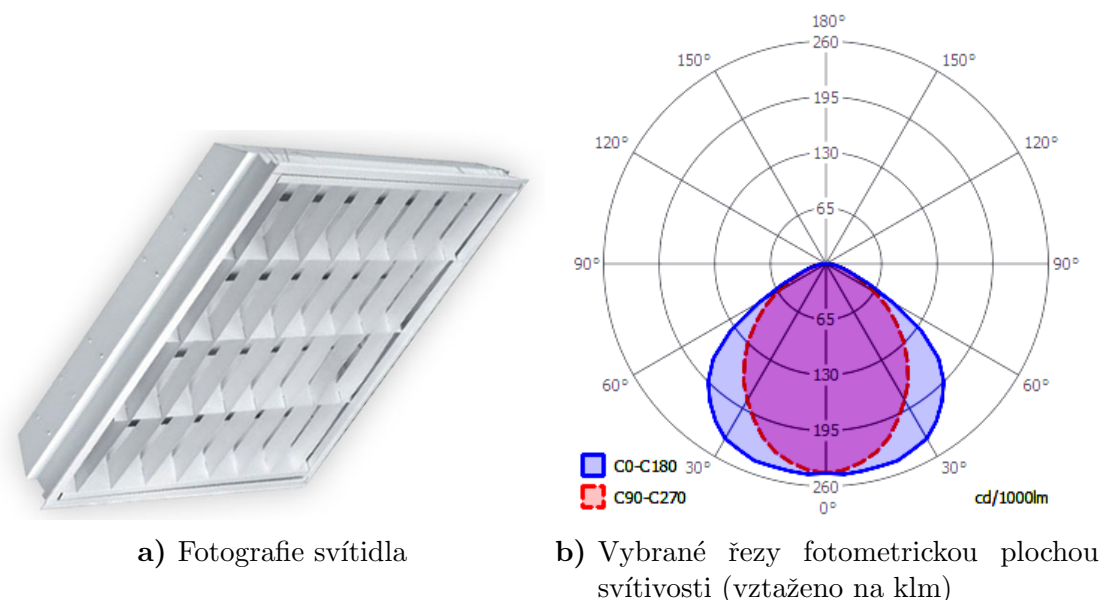
$\Delta\rho_v(\alpha, \beta, \gamma)$ je korigovaná hodnota (požadovaná) dílčího činitele odrazu vzorku,

$\Delta\rho(\alpha, \beta, \gamma)$ je hodnota dílčího činitele odrazu získaná měření z reflektofotometru,

ρ je požadovaný výsledný činitel odrazu,

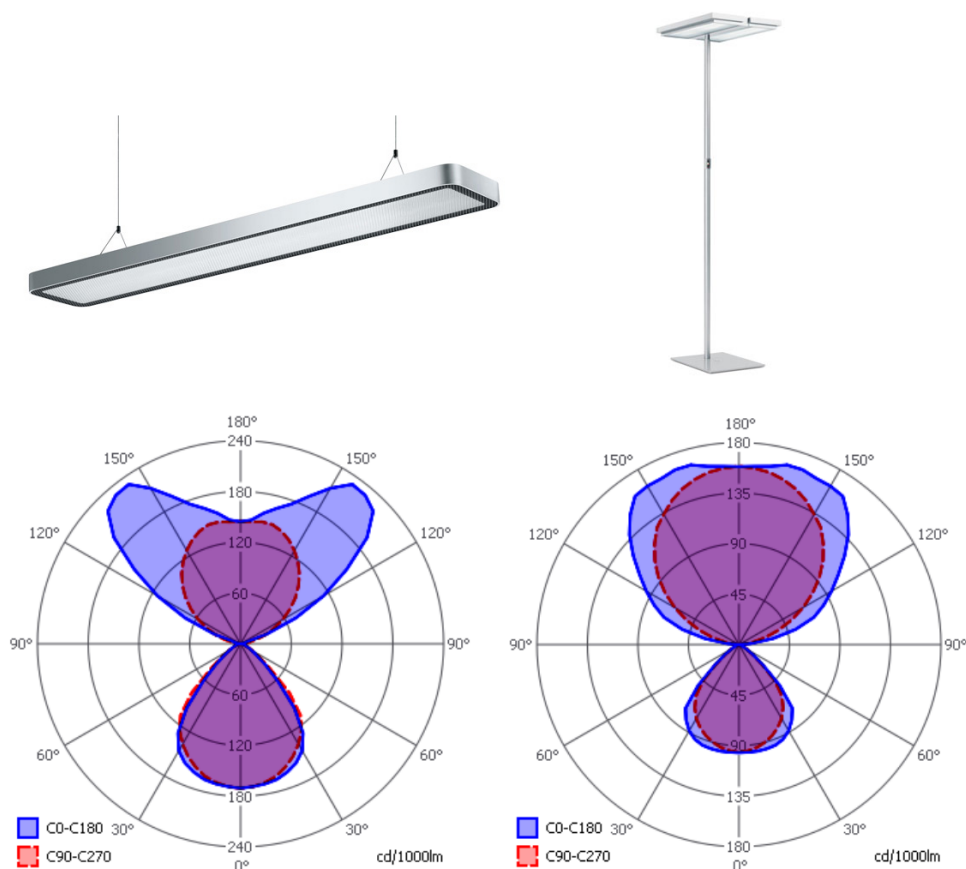
ρ_v je činitel odrazu vzorku vypočítaný ze změřených hodnot.

Pro osvětlení místnosti byly vybrány tři typy svítidel použitá vždy zvlášť. Nejčastěji byla používána podhledová svítidla MSTR SLB 4 × 18W (viz obr. 50) se světelnými zdroji s celkovým světelným tokem 5400 lm. Tato svítidla řadíme podle rozložení světelného toku do přímých svítidel, poněvadž všechen světelný tok je vyzářen do dolního poloprostoru.



Obr. 50. Podhledové svítidlo MSTR SBL 4 × 18W

Dále byla použita svítidla s převážně nepřímým rozložením světelného toku, tzn. že 60 % až 90 % světelného toku je vyzářováno do horního poloprostoru. Jedná se o svítidla Waldmann Ataro-DUP 254/R s celkovým světelným tokem instalovaných lineárních zářivek 8900 lm a Waldmann Tycoon-DYS 455/2 s kompaktními zářivkami s tokem 19200 lm. Svítidla s křivkami svítivosti jsou uvedena na obr. 51. Jak patrně, svítidla Ataro jsou závěsná, která byla v použitých výpočtech zavěšována 0,7 m pod strop. Svítidla Tycoon jsou volně stojící a jejich světelný střed byl uvažován 2 m nad podlahou.



Obr. 51. Vlevo fotografie a křivky svítivosti (vztaženy na klm) svítidla Waldmann Ataro, vpravo svítidla Waldmann Tycoon

4.3 Výsledky výpočtů metody Monte Carlo

Rozmístění svítidel v modelové místnosti (obr. 49) bylo využito jednak z návrhu softwarem Dialux pro svítidla MSTR SLB (obr. 50), Waldmann Ataro a Tycoon (obr. 51), a také z návrhu metody genetického algoritmu popsané v kap. 5 pro svítidla MSTR SLB.

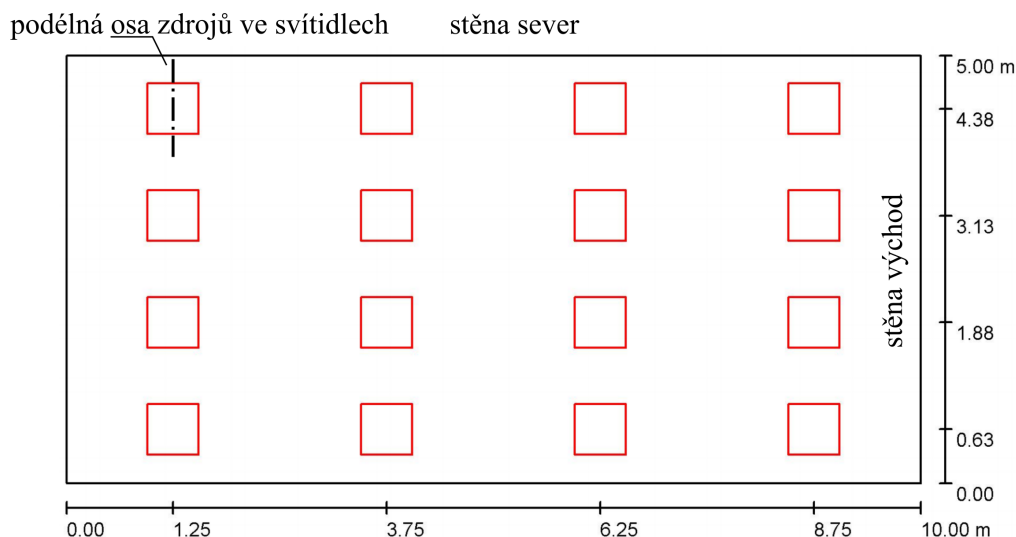
Za využití metody Monte Carlo a sledování paprsku bylo provedeno několik výpočtů rozložení světelného toku v modelové místnosti. Výpočty byly prováděny pro povrchy místnosti s rovnoměrně rozptýlně odrážejícími povrchy a s reálnými povrchy, jejichž odrazné vlastnosti byly naměřeny reflektofotometrem. Činitele odrazu měřených nedifuzních ploch byly korigovány podle vztahu (60) pro danou plochu místnosti s požadovanou hodnotou činitele odrazu. Byl zkoumán vliv mnohonásobných odrazů na výsledné sledované hodnoty omezením počtu odrazů od povrchů. Bylo provedeno srovnání s výstupy softwaru Dialux, který používá k výpočtu rozložení světelného toku v prostoru metodu radiosita. Dále bylo provedeno porovnání s použitou metodou radiosita, implementované v metodě genetického algoritmu v kap. 5. Při všech prováděných výpočtech metody sledování paprsku bylo každým svítidlem generováno 100000 paprsků.

Při výběru počtu svítidel všech tří použitých typů a návrhu pravidelného rozmístění těchto svítidel softwarem Dialux byl zadán udržovací činitel $z = 0,75$, požadovaná udržovaná průměrná osvětlenost srovnávací roviny $\bar{E}_m = 500$ lx a rovnoměrnost osvětlení

srovnávací roviny $U_0 = 0,6$, což jsou kritéria pro administrativní prostory pro psaní, psaní na stroji, čtení a zpracování dat podle [25] označeno referenčním číslem 5.26.2. Po návrhu rozmístění svítidel při výpočtech sledovaných světelně technických veličin již nebyl v softwaru Dialux použit udržovací činitel ($z = 1$). Výsledky tak mohly být srovnávány přímo s metodou sledování paprsku pro tutéž modelovou místnost. Při rozmísťování svítidel genetickým algoritmem byly též požadovány kritéria pro místnost s referenčním číslem 5.26.2.

4.3.1 Srovnání difuzních a nedifuzních odrazů

První výpočty byly provedeny pro pravidelně rozmístěná svítidla podle obr. 52, přičemž návrh byl proveden softwarem Dialux. Bylo použito 16 svítidel typu MSTR SLB (obr. 50) zabudovaných do stropu. Svítidla byla orientována tak, aby osy světelných zdrojů (zářivek) ve svítidlech byly kolmé na podélnou osu místnosti. Podle obr. 50b) byly tedy rovinné řezy $C0 - C180$ fotometrickou plochou svítivosti svítidel orientovány podél delšího rozměru místnosti.



Obr. 52. Pravidelné rozmístění svítidel

Pro výpočet metodou sledování paprsku s pouze difuzními povrchy nebyl použit algoritmus využitý při nedifuzních odrazech využívající Klemsových segmentů a soubor s naměřenými hodnotami dílčích činitelů odrazů daného povrchu. Po dopadu paprsku byla vyhodnocena pravděpodobnost odrazu na základě činitele odrazu ρ . Pravděpodobnost volby směru odraženého paprsku byla volena pomocí funkce $\cos(\gamma)$, kdy γ je úhel mezi odraženým paprskem a normálou plochy odrazu podle obr. 32a). Bylo tedy využito vztahů (10) a (12), jejichž výsledkem je distribuce paprsků podle obr. 3a) (řez fotometrickou plochou svítivosti bodu sekundárního zdroje světla). Poněvadž je fotometrická plocha svítivosti difuzního povrchu osově symetrická, je pravděpodobnost volby směru odrazu paprsku α kolem normály plochy rovnoměrně rozložena v celém rozsahu úhlů α .

Na obr. 53 jsou zobrazeny vypočítané hodnoty osvětleností srovnávací roviny metodou sledování paprsku pro místnost s rovnoměrně rozptýlně odražejícími povrchy (obr. 53a)), s nedifuzním odrazem všech povrchů za použití naměřených hodnot vzorku opatřeného nátěrem Primalex Polar (obr. 53b)) a s kombinací difuzního odrazu od podlahy, naměřených nedifuzních odrazů od stěn obložené dřevem a stropu opatřeného nátěrem Primalex Polar (obr. 53c)).

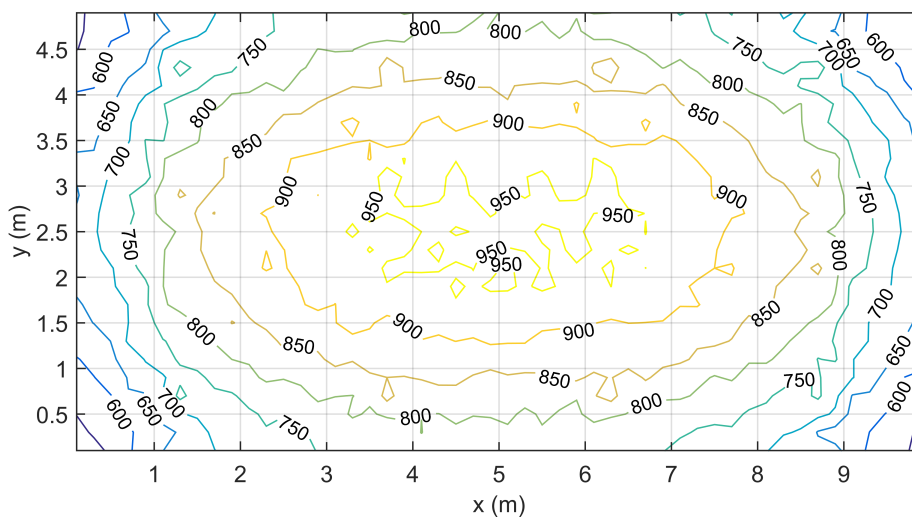
Na obr. 54 jsou uvedeny vypočítané hodnoty osvětleností srovnávací roviny pomocí metody radiosita, která používá difuzní povrchy. Na obr. 54a) je uveden výstup z metody radiosita implementovaného v metodě genetického algoritmu uvedené v kap. 5. V tomto případě byly plochy místnosti rozděleny na plošky o rozměrech 25×25 cm. Výstupy ze softwaru Dialux jsou uvedeny na obr. 54b) se standardní přesností výpočtů a na obr. 54c) s vyšší přesností.

Výsledky průměrných osvětleností E_{AV} , minimální E_{min} a maximální osvětlenosti E_{max} srovnávací roviny a rovnoměrnosti osvětlení U_0 jsou uvedeny v tab. 9.

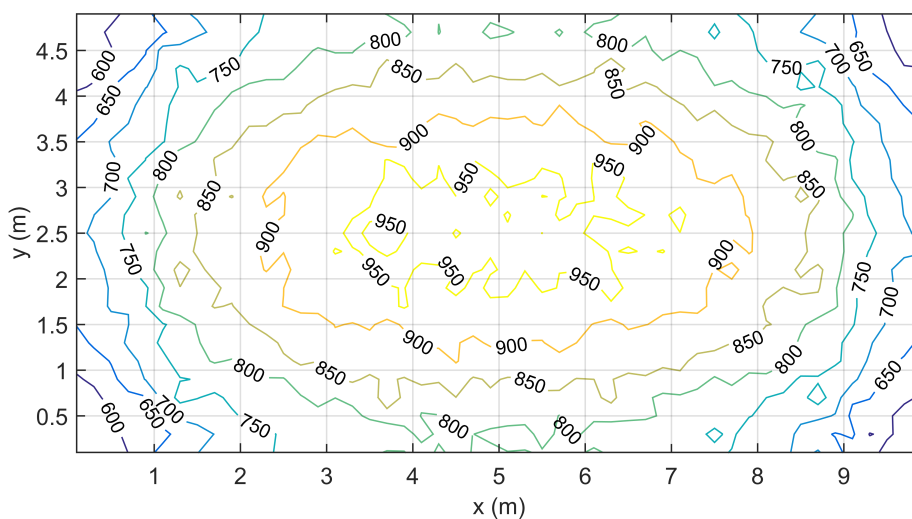
zdroj hodnot	E_{AV} (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	U_0 (-)	
SP difuzní	806	498	987	0,618	obr. 53a)
SP Primalex Polar	812	551	988	0,678	obr. 53b)
SP dřevo	804	557	967	0,691	obr. 53c)
radiosita	720	376	902	0,523	obr. 54a)
Dialux (standard)	724	475	903	0,656	obr. 54b)
Dialux (vysoká přesnost)	726	420	906	0,579	obr. 54c)

Tab. 9. Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při zahrnutí výpočtu mnohonásobných odrazů, SP = metoda sledování paprsku

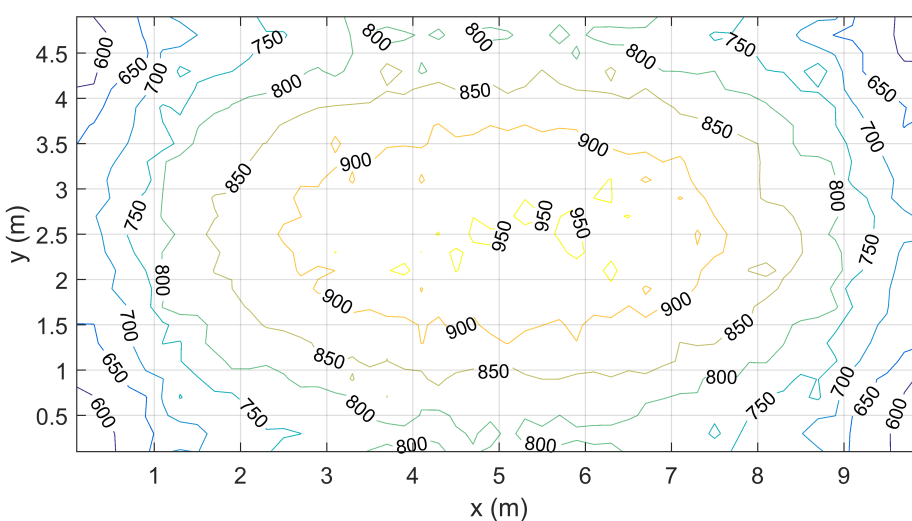
V tab. 9 je patrný rozdíl minimálních osvětleností E_{min} mezi výsledky metody sledování paprsku při použití difuzních povrchů a při použití povrchů nedifuzních s nátěrem Primalex Polar či s kombinací stropu s nátěrem Primalex Polar, stěn obložené dřevem a podlahy difuzní. Vyšší hodnota E_{min} s nedifuzními povrchy je dosažena zrcadlovou složkou odrazů, projevující se při velkých úhlech β dopadu paprsku podle obr. 32a). Výpočetně dojde tedy i ke zlepšení rovnoměrnosti osvětlení U_0 . Porovnáním průměrných osvětleností E_{AV} a maximálních osvětleností E_{max} srovnávací roviny jsou zřejmé rozdíly při výpočtech metodou radiosita, ať už softwarem Dialux či vlastní implementací v rámci metody genetického algoritmu, a metodou sledování paprsku. Rozdíl hodnot E_{min} a z toho plynoucí rozdíly hodnot U_0 vlastní implementace metody radiosita a výpočtů softwarem Dialux mohou být způsobené rozdílným dělením povrchů místnosti. V rámci této práce byly povrchy modelové místnosti rozděleny na plošky konstantních rozměrů 25×25 cm, zatímco software Dialux používá adaptivní dělení ploch, tzn. plochy jsou rozděleny podle potřeby na menší plošky v místech s většími změnami osvětleností.



a) Difuzní povrchy, E (lx)

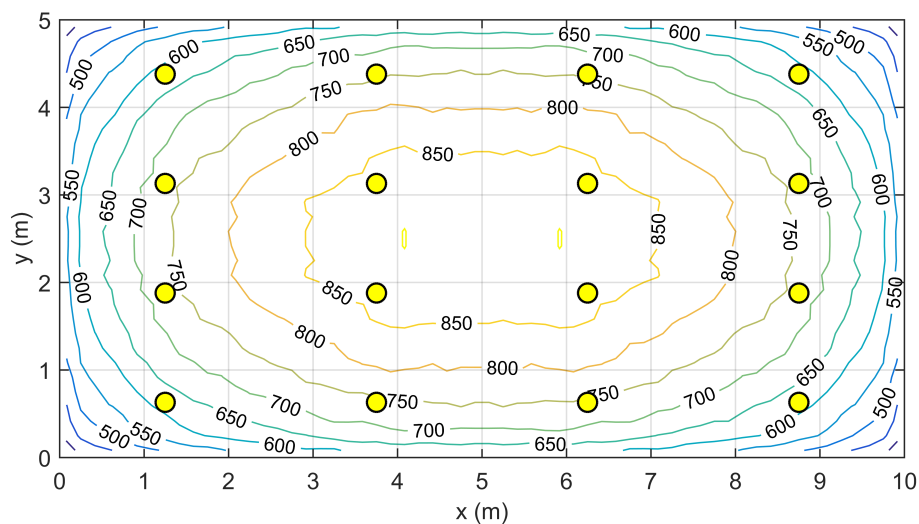


b) Povrchy natřeny Primalexem Polar (nedifuzní), E (lx)

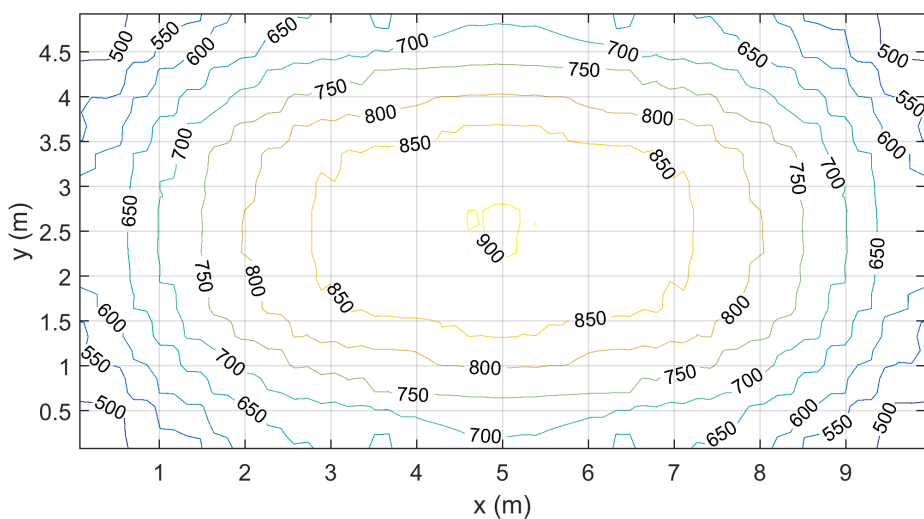


c) Podlaha difuzní, stěny obložené dřevem (nedifuzní), strop natřen Primalexem Polar (nedifuzní), E (lx)

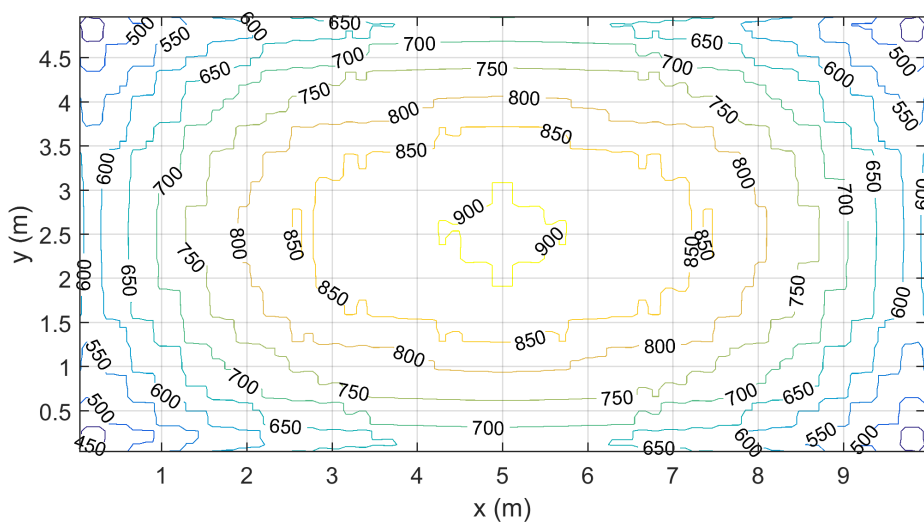
Obr. 53. Osvětlenost srovnávací roviny, výpočet metodou sledování paprsku



a) Výsledky z metody použité v genetickém algoritmu, E (lx)



b) Dialux, standardní přesnost ("Standard"), E (lx)



c) Dialux, vysoká přesnost ("Very accurate"), E (lx)

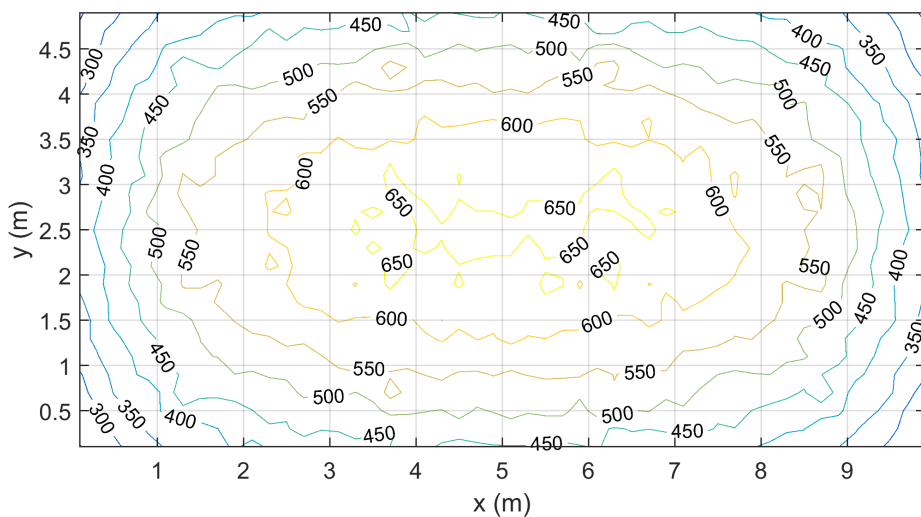
Obr. 54. Osvětlenost srovnávací roviny získaná metodou radiosita (difúzní povrchy)

4.3.2 Vliv mnohonásobných odrazů

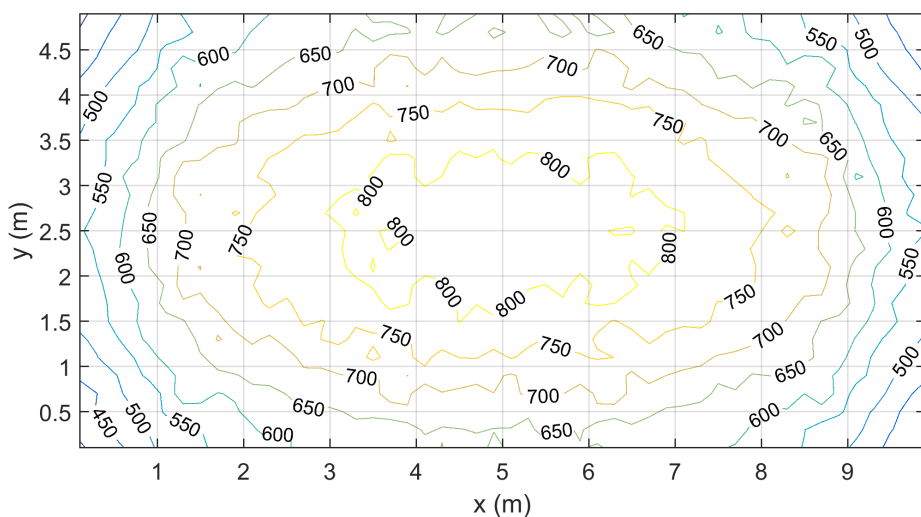
Pro získání vlivu mnohonásobných odrazů na výsledné hodnoty osvětleností v kontrolních bodech a z nich plynoucí ostatní sledované parametry byly provedeny výpočty jak metodou sledování paprsku za využití místnosti se stropem opatřeným nátěrem Primalex Polar, stěn obložených dřevem a podlahy s difuzním odrazem, tak s využitím softwaru Dialux, tzn. metodou radiosity a difuzních povrchů. V obou případech bylo respektováno zadání činitelů odrazu z odst. 4.2. Bylo využito opět rozmístění svítidel MSTR SLB (obr. 50) navržené softwarem Dialux podle obr. 52. Výpočty bez uvažování odrazů světla od povrchů a s uvažováním pouze jednoho odrazu byly v metodě sledování paprsku získány úpravou algoritmu. V případě softwaru Dialux byl pro získání osvětleností srovnávací roviny přímou složkou světelného toku vyzařovaného primárními zdroji světla nastaven integrální činitel odrazu stěn, stropu a podlahy na hodnotu $\rho = 0$, takže nedocházelo k odrazům. Pro výpočet osvětlenosti srovnávací roviny odpovídající přímé složce z primárních zdrojů světla a prvnímu odrazu světla od povrchů místnosti byly nejprve vypočítány softwarem Dialux osvětlenosti povrchů místnosti vždy pouze pro jednu stěnu s nenulovým integrálním činitelem odrazu $\rho = 0,5$. Byly tak získána čtyři pole osvětleností kontrolních bodů srovnávací roviny. Sečtením těchto čtyř polí osvětleností v kontrolních bodech byla získána hodnota odpovídající čtyřem přímým složkám světelného toku od svítidel. Jelikož bylo získáno i pole osvětleností v kontrolních bodech srovnávací roviny pouze pro přímou složku, bylo možné tuto složku pro každý bod odečíst třikrát, přičemž zbyla v každém kontrolním bodě srovnávací roviny pouze osvětlenost odpovídající jedné přímé složce a jednomu prvnímu odrazu od všech stěn. V případě výpočtu pouze prvního odrazu nebyl vliv podlahy uvažován, poněvadž neovlivňoval osvětlenost srovnávací roviny. První odraz od stropu nemusel být též započítáván, protože při volbě podhledových svítidel se světelným tokem vyzařovaným pouze do dolního poloprostoru nebyl strop sekundárním světelným zdrojem.

Na obr. 55 a v tab. 10 jsou zobrazeny výsledky výpočtů metodou sledování paprsku s použitím místnosti s uvedenými povrchy pro různý počet odrazů světla. Srovnáním osvětleností srovnávací roviny při výpočtech bez odrazů světla a s jedním odrazem je patrné navýšení průměrné osvětlenosti pro danou místnost o více než 30 %. Při uvažování dalších odrazů paprsků se hodnota průměrné osvětlenosti navýší o dalších 20 %. Dále je v tab. 10 patrný nárůst rovnoměrnosti osvětlení. Celkově se rovnoměrnost osvětlení zvýší při porovnání výpočtů bez odrazů a s mnohonásobnými odrazy o téměř 44 % na srovnávací rovině.

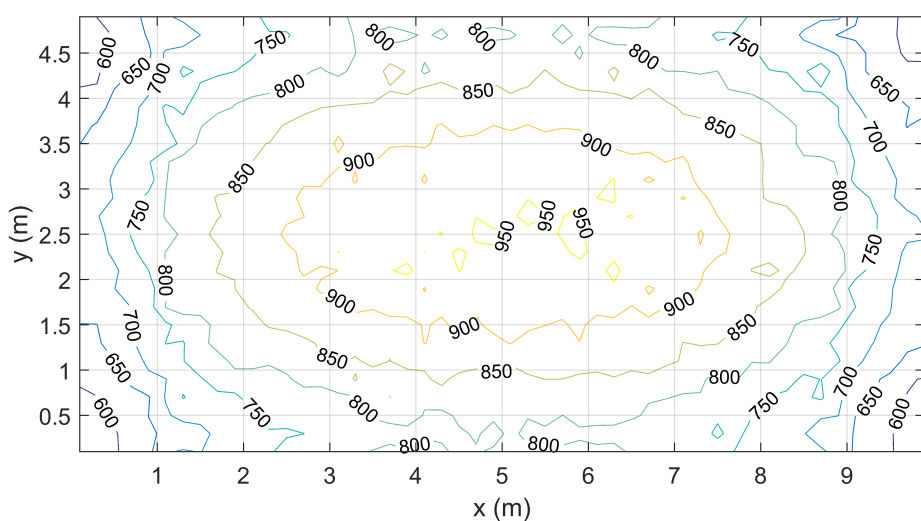
Výsledky výpočtů softwaru Dialux sledovaných veličin modelové místnosti v tab. 10 a na obr. 56 pro difuzní povrchy vykazují též zvýšení rovnoměrnosti osvětlení při uvažování mnohonásobných odrazů ve výpočtech. Zatímco se průměrná osvětlenost srovnávací roviny E_{AV} , vypočtená metodou sledování paprsku, zvýší při uvažování mnohonásobných odrazů o 60 % vztaženo k výpočtu bez odrazů, je pro tentýž případ při výpočtech v softwaru Dialux metodou radiosity dosaženo navýšení průměrné osvětlenosti pouze o 30 %.



a) Bez odrazů, E (lx)

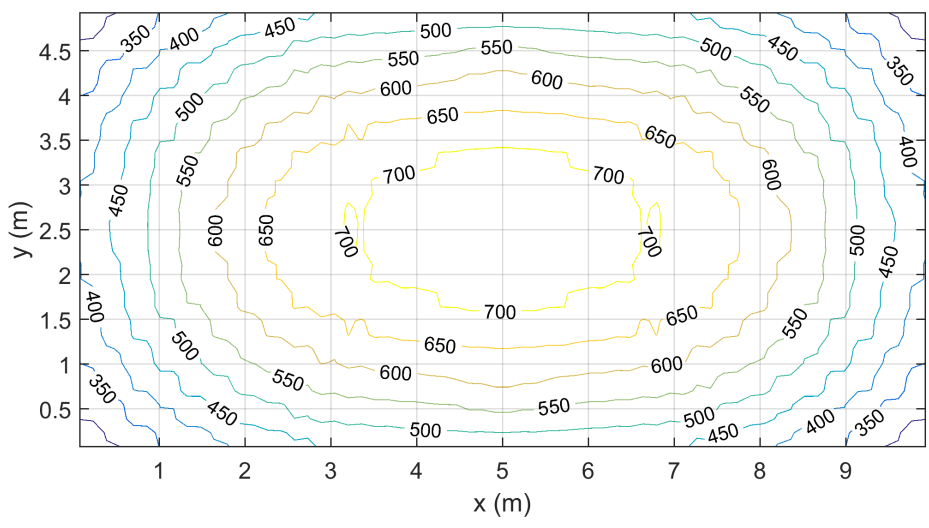


b) Jeden odraz, E (lx)

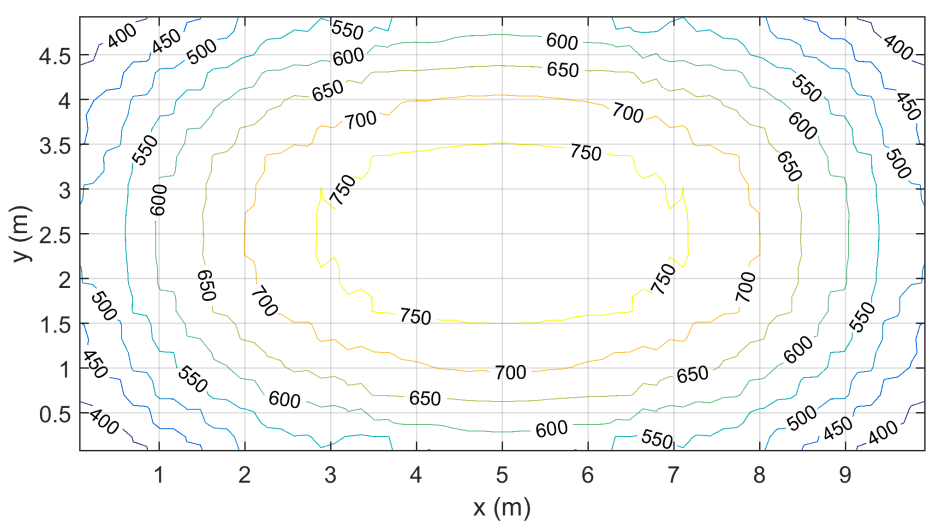


c) Mnohonásobné odrazy, E (lx)

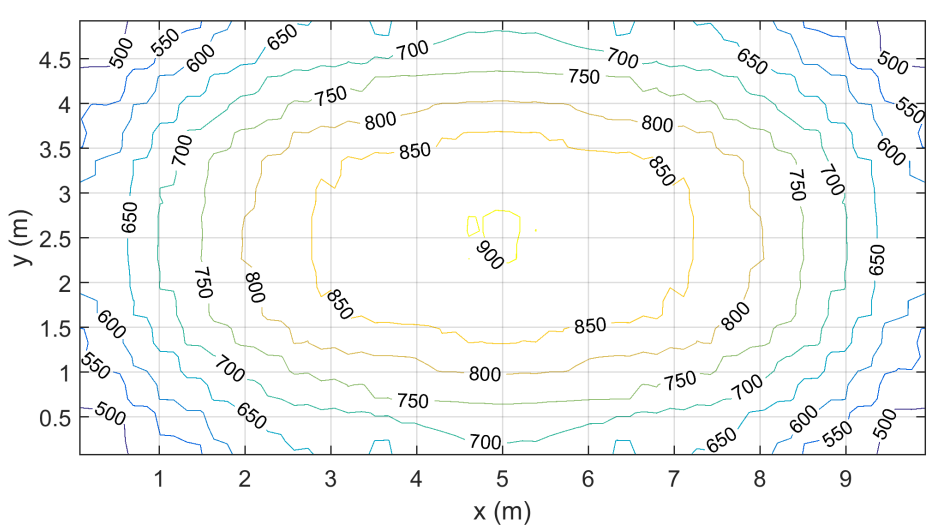
Obr. 55. Osvětlenost srovnávací roviny získaná metodou sledování paprsku pro různý počet odrazů v modelové místnosti se stropem s nátěrem Primalex Polar, stěnami obloženými dřevem a difuzní podlahou



a) Bez odrazů, E (lx)



b) Jeden odraz, E (lx)



c) Mnohonásobné odrazy, E (lx)

Obr. 56. Osvětlenost srovnávací roviny z výpočtů softwaru Dialux pro různou volbu počtu odrazů světla

zdroj hodnot	E_{AV} (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	U_0 (-)	
SP bez odrazů	507	239	681	0,471	obr. 55a)
SP jeden odraz	673	383	848	0,570	obr. 55b)
SP mnohon. odrazy	804	557	967	0,691	obr. 55c)
Dialux bez odrazů	548	268	735	0,364	obr. 56a)
Dialux jeden odraz	621	355	798	0,445	obr. 56b)
Dialux mnohon. odrazy	724	475	903	0,656	obr. 56c)

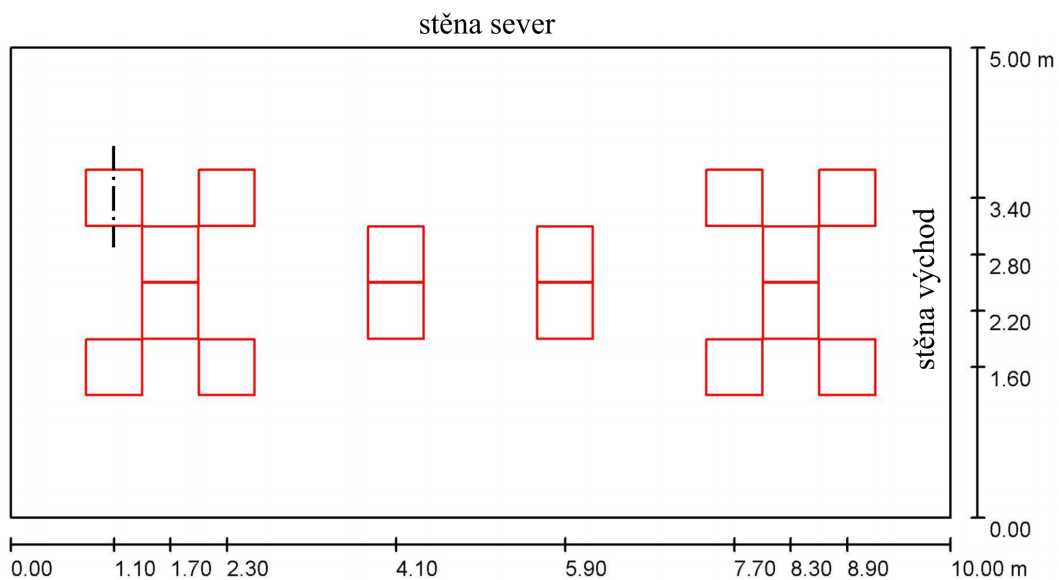
Tab. 10. Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při různém počtu odrazů paprsků, SP = metoda sledování paprsku

Celkově je tedy patrný významný vliv mnohonásobných odrazů na výsledné sledované světelně technické veličiny srovnávací roviny. Největší vliv z odrazů paprsků na rozložení světelného toku v modelové místnosti má první odraz. Pro každý další odraz se světelný tok zmenšuje nepřímo úměrně integrálnímu činiteli odrazu použitých povrchů.

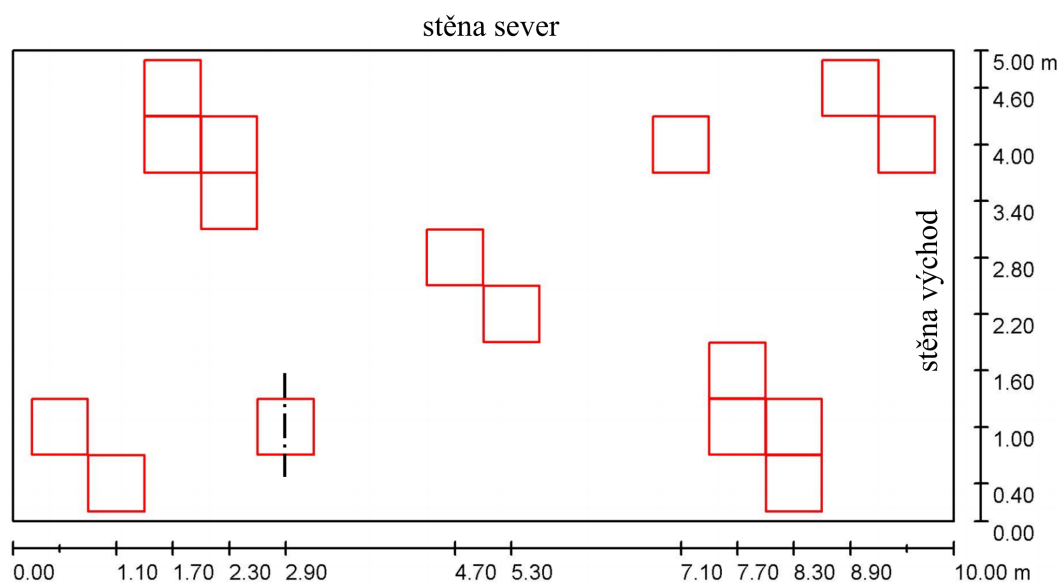
4.3.3 Rozmístění svítidel generované genetickým algoritmem

Rozmístění svítidel navržené genetickým algoritmem (viz kap. 5) bylo použito v modelové místnosti a výsledky výstupů ze softwaru Dialux s difuzními povrchy a metody sledování paprsku se stropem s nátěrem Primalex Polar, stěnami obloženými dřevem a podlahou s difuzním odrazem byly srovnány s pravidelným rozmístěním dle obr. 52.

Na obr. 57a) je uvedeno rozmístění svítidel optimalizované genetickým algoritmem s větší váhou na vyšší osvětlenost než na rovnoměrnost osvětlení. V tomto případě genetický algoritmus umisťoval svítidla pouze do jednoho kvadrantu místnosti, přičemž do celé místnosti byl zbytek svítidel doplněn zrcadlením na šířku a na délku místnosti. Na obr. 57b) je uvedeno rozmístění bez zvýhodnění osvětlenosti či rovnoměrnosti se středovou symetrií, přičemž algoritmus rozmisťoval pouze polovinu uvedených svítidel a zbytek byl doplněn středovou symetrií.



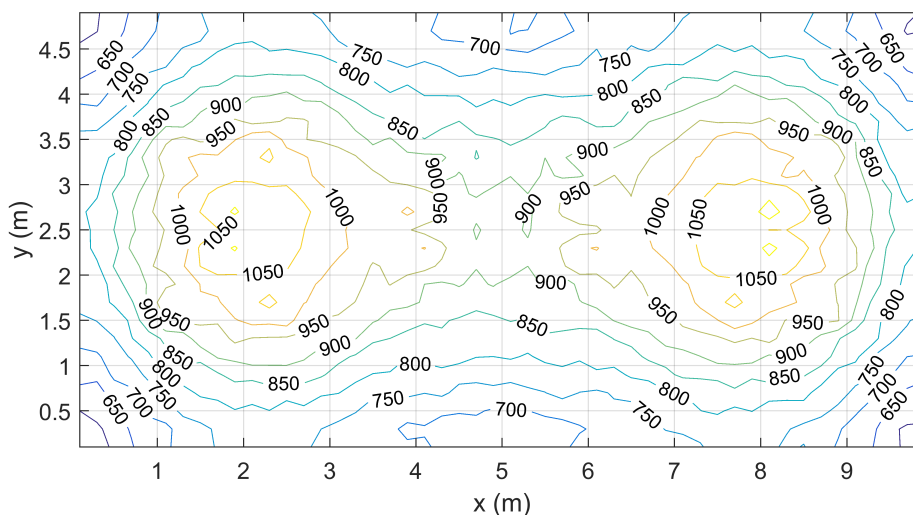
a) Rozmístění s větší vahou na vyšší osvětlenost, osově symetrické, ozn. EV010S1



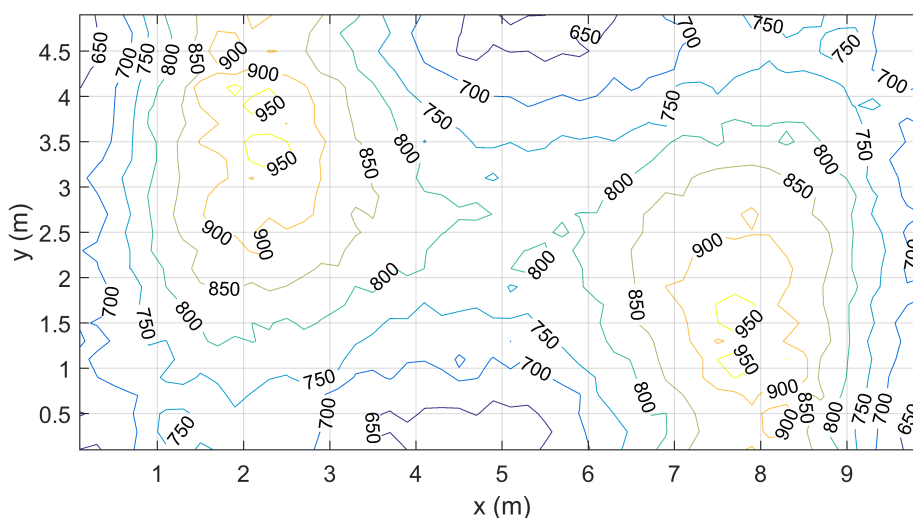
b) Rozmístění bez preferencí, středově symetrické, ozn. V010S0

Obr. 57. Rozmístění svítidel generované za použití metody genetického algoritmu

Při srovnání výsledků rovnoměrného rozmístění svítidel (obr. 52) a rozmístění generované metodou genetického algoritmu s označením EV010S1 (obr. 57a)) je patrné, že pokud jsou porovnány zvláště hodnoty v tab. 11 získané softwarem Dialux a zvláště hodnoty získané metodou sledování paprsku, je zřejmý nárůst průměrné osvětlenosti srovnávací roviny zhruba o 6 % v obou případech za cenu poklesu rovnoměrnosti osvětlení. Na druhou stranu návrh s označením V010S0 (obr. 57b)) metody genetického algoritmu vykazuje jak v případě výpočtů metody sledování paprsku, tak softwaru Dialux, snížení hladiny osvětlenosti srovnávací roviny. Došlo však ke zvýšení rovnoměrnosti osvětlení téměř o 20 %. Nastavení koeficientu preference osvětlenosti či rovnoměrnosti při návrhu rozmístění svítidel metodou genetického algoritmu v kap. 5 je velice obtížné vyvážit. Pro totožný koeficient s návrhem pomocí osové symetrie či středové symetrie se mohou tedy výsledky výrazně lišit co do průměrné osvětlenosti a rovnoměrnosti osvětlení.

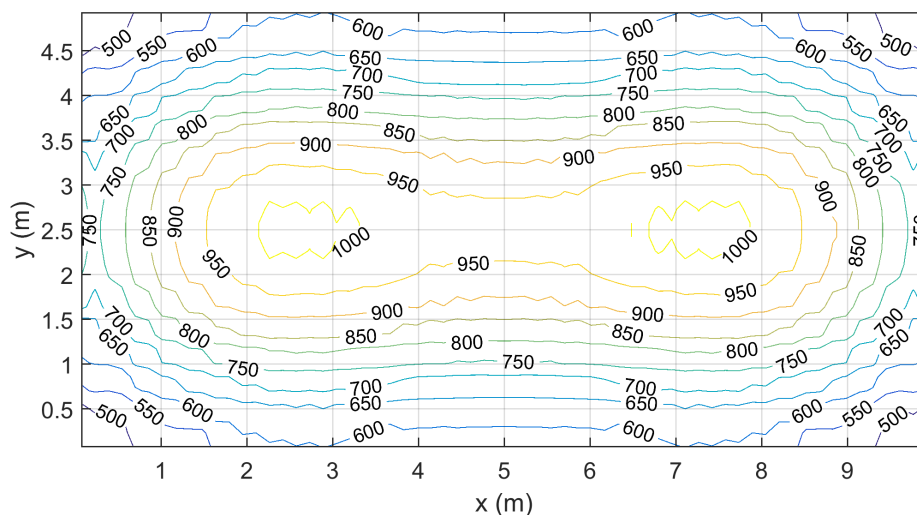


a) Rozmístění s preferencí vyšší osvětlenosti, osová symetrie, ozn. EV010S1, E (lx)

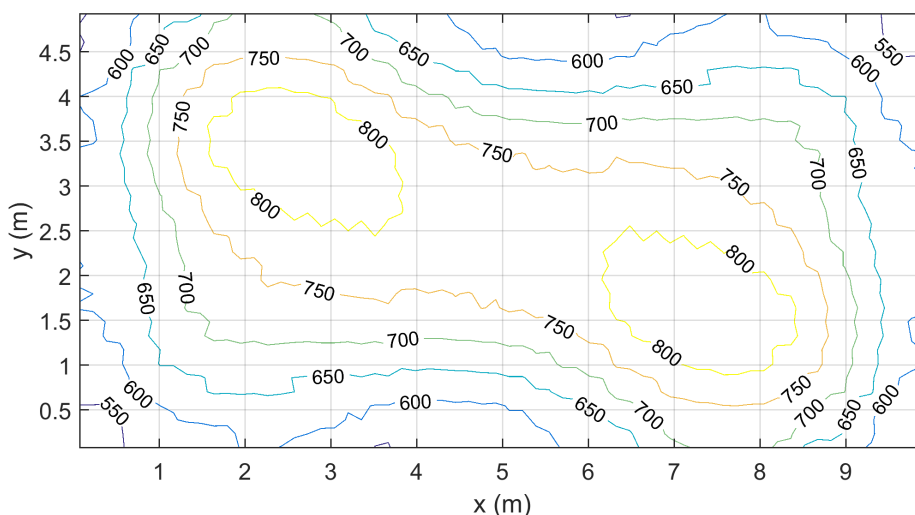


b) Bez preference, středově symetrické rozmístění, ozn. V010S0, E (lx)

Obr. 58. Osvětlenost srovnávací roviny z výpočtů metody sledování paprsku pro rozmístění svítidel získaného metodou genetického algoritmu



a) Rozmístění s preferencí vyšší osvětlenosti, osová symetrie, ozn. EV010S1, E (lx)



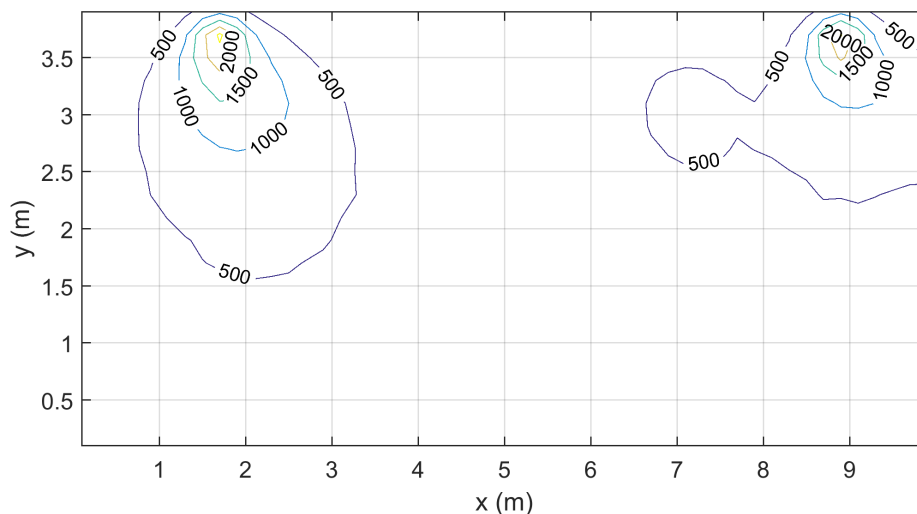
b) Bez preference, středově symetrické rozmístění, ozn. V010S0, E (lx)

Obr. 59. Osvětlenost srovnávací roviny z výpočtů softwaru Dialux pro rozmístění svítidel získaného metodou genetického algoritmu

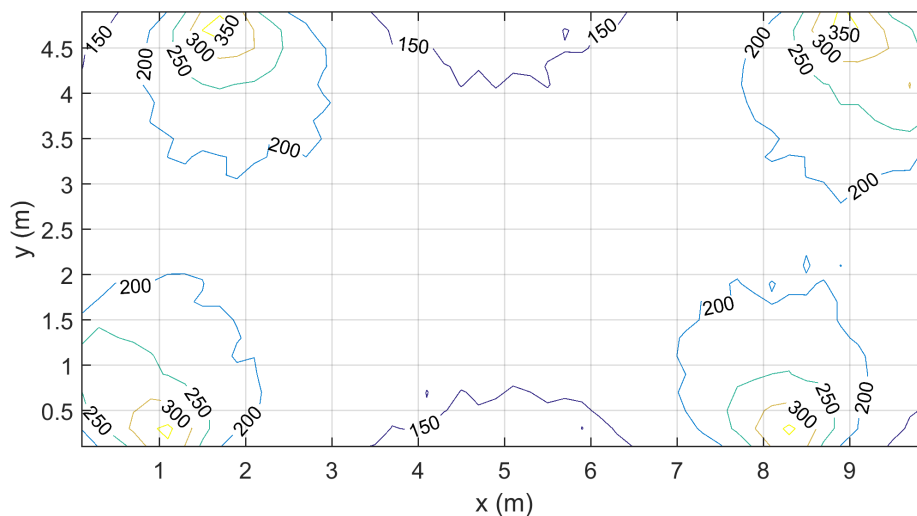
zdroj hodnot	E_{AV} (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	U_0 (-)	
SP rovn. rozm.	812	551	988	0,678	obr. 53c)
SP EV010S1	864	565	1153	0,654	obr. 58a)
SP V010S0	790	617	1043	0,781	obr. 58b)
Dialux rovn. rozm.	724	475	903	0,656	obr. 54b)
Dialux EV010S1	767	470	1017	0,613	obr. 59a)
Dialux V010S0	695	541	842	0,779	obr. 59b)

Tab. 11. Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při rozmístění svítidel metodou genetického algoritmu, SP = metoda sledování parů

Na obr. 60 jsou zobrazeny výsledky osvětlenosti severní stěny a stropu pro rozmístění svítidel generované metodou genetického algoritmu s označení V010S0 (obr. 57b)). Je zde patrné nesymetrické osvětlení uvedených ploch s místy na severní stěně s vysokou hladinou osvětlenosti. Genetickým algoritmem byla hodnocena pouze průměrná osvětlenost a rovnoměrnost osvětlenosti srovnávací roviny.



a) Stěna sever, E (lx)

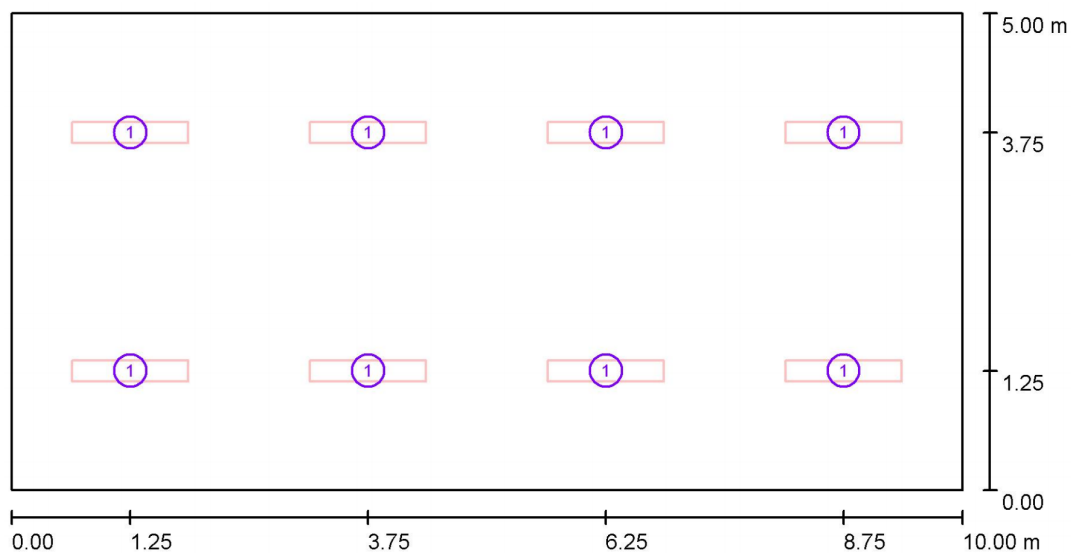


b) Strop, pohled shora, E (lx)

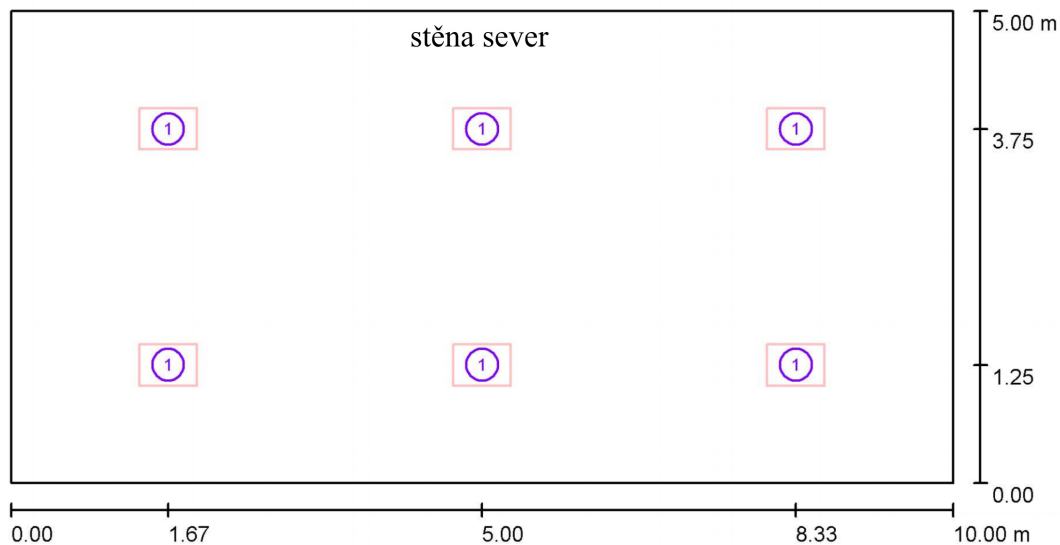
Obr. 60. Osvětlenost stěny sever a stropu při výpočtu metodou sledování paprsku, rozmístění V010S0

4.3.4 Využití převážně nepřímých svítidel

Pro porovnání výsledků za užití svítidel s vyzařováním světelného toku převážně do horního poloprostoru (svítidla s převážně nepřímým světelným tokem [1]) byla použita svítidla Waldmann Ataro a Tycoon v modelové místnosti dle obr. 51. Jak uvedeno v odst.4.2, závěsná svítidla Ataro byla zavěšena co možná nejdále od stropu, což bylo 0,7 m pod strop. Výška volně stojícího svítidla Tycoon byla uvažována 2 m.



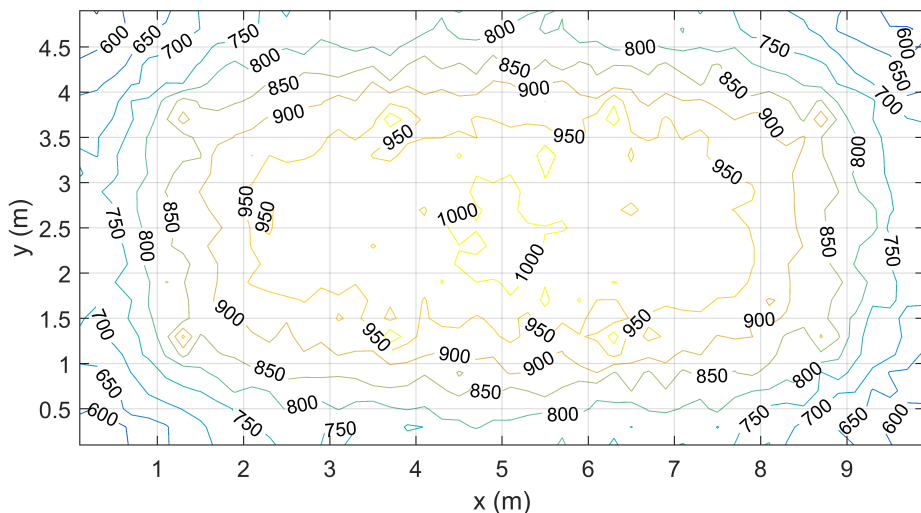
a) Rozmístění svítidel Ataro



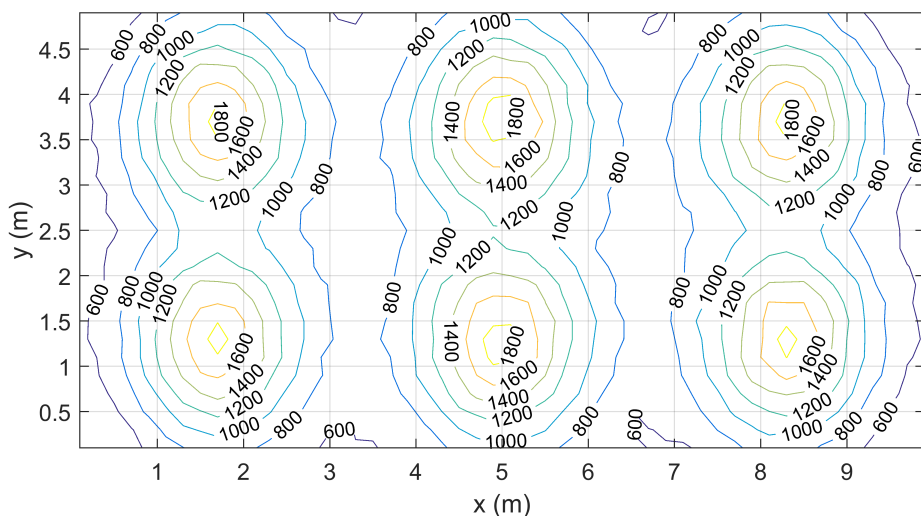
b) Rozmístění svítidel Tycoon

Obr. 61. Rozmístění svítidel Waldmann podle návrhu softwaru Dialux

Na obr. 62a) je uvedená osvětlenost srovnávací roviny při použití svítidel Ataro v modelové místnosti při výpočtech metodou sledování paprsku. Na obr. 62b) je uvedená osvětlenost srovnávací roviny při použití svítidel Tycoon. Poněvadž jsou tato svítidla umístěna 1,25 m nad srovnávací rovinu, je rovnoměrnost osvětlení nevyhovující z hlediska splnění požadavků [25] na místnost zvolené funkce. V této kapitole jde však pouze o posouzení výsledků různých metod výpočtů.



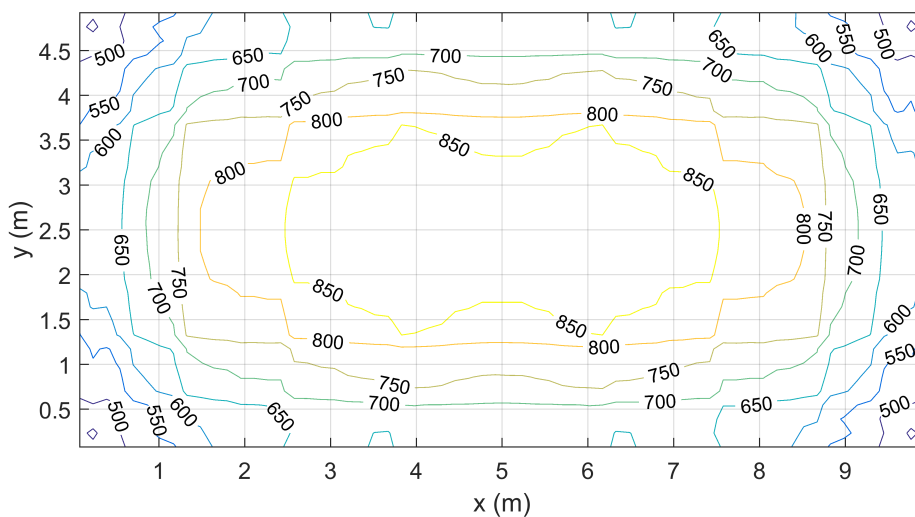
a) Použití svítidla Ataro, E (lx)



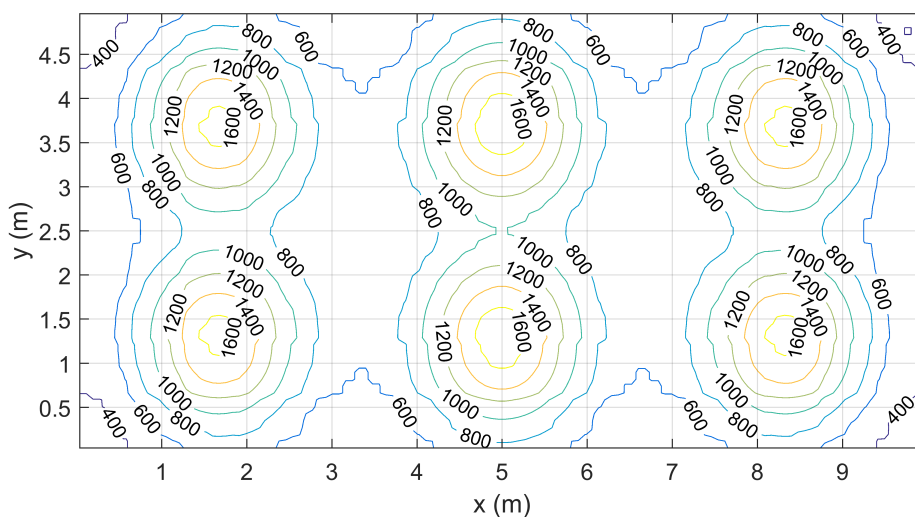
b) Použití svítidla Tycoon, E (lx)

Obr. 62. Osvětlenost srovnávací roviny získaná metodou sledování paprsku s využitím svítidel Waldmann

Na obr. 63 jsou uvedeny výsledky výpočtů osvětlenosti srovnávací roviny softwarem Dialux. V tab. 12 jsou uvedeny hodnoty sledovaných parametrů pro místnost se stěnami obloženými dřevem, stropem s nátěrem Primalex Polar a podlahou difuzní (**dřevo**). Dále jsou zde uvedeny hodnoty pro místnost s difuzními povrchy (**difuzní**). Porovnáním výsledků obou použitých metod v tab. 12 jsou patrné vyšší hodnoty průměrných, minimálních a maximálních osvětleností při výpočtu metodou sledování paprsku.



a) Použití svítidla Ataro, E (lx)



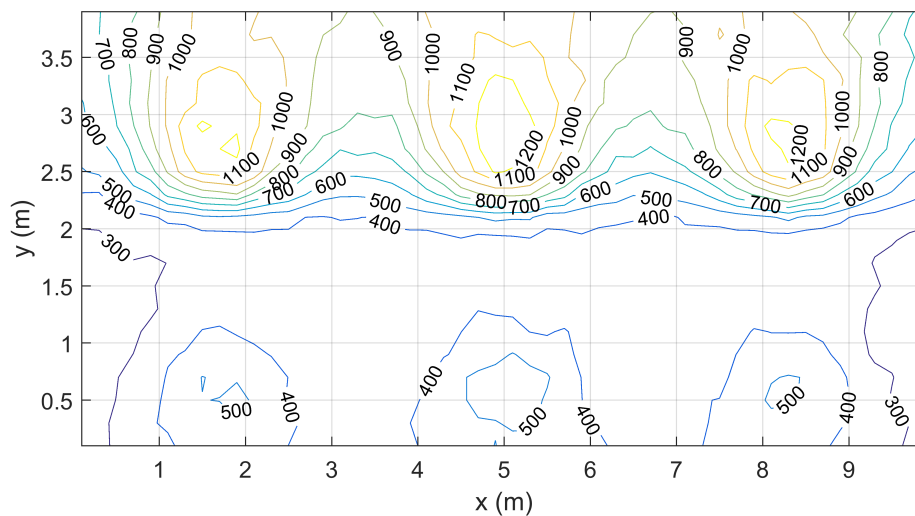
b) Použití svítidla Tycoon, E (lx)

Obr. 63. Osvětlenost srovnávací roviny získaná softwarem Dialux s využitím svítidel Waldmann

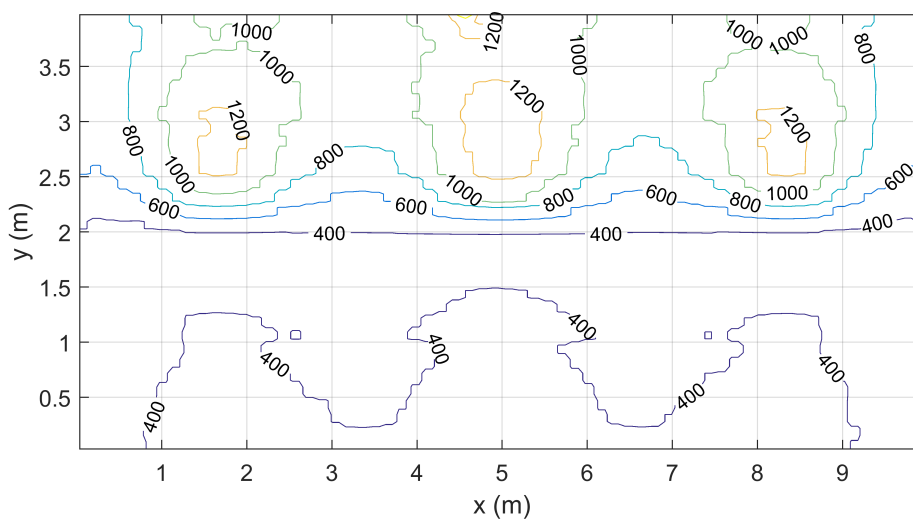
zdroj hodnot	E_{AV} (lx)	E_{min} (lx)	E_{max} (lx)	U_0 (-)	
SP Ataro dřevo	841	546	1039	0,649	obr. 62a)
SP Ataro difuzní	834	508	1042	0,609	
SP Tycoon dřevo	1002	441	1992	0,440	obr. 62b)
SP Tycoon difuzní	1004	391	1969	0,390	
Dialux Ataro	727	476	892	0,655	obr. 63a)
Dialux Tycoon	875	365	1738	0,210	obr. 63b)

Tab. 12. Srovnání sledovaných parametrů srovnávací roviny při použití svítidel Waldmann, SP = metoda sledování paprsku

Pro porovnání osvětleností severní stěny modelové místnosti s použitými svítidly Tycoon jsou na obr. 64 zobrazeny výstupy metody sledování paprsku a softwaru Dialux.



a) Výsledky získané metodou sledování paprsku (nedifuzní stěny a strop), E (lx)



b) Výsledky ze softwaru Dialux (difuzní povrchy), E (lx)

Obr. 64. Porovnání osvětleností stěny sever získaných různými metodami výpočtů za použití svítidel Tycoon

KAPITOLA 5

GENETICKÝ ALGORITMUS ROZMÍSTOVÁNÍ SVÍTIDEL

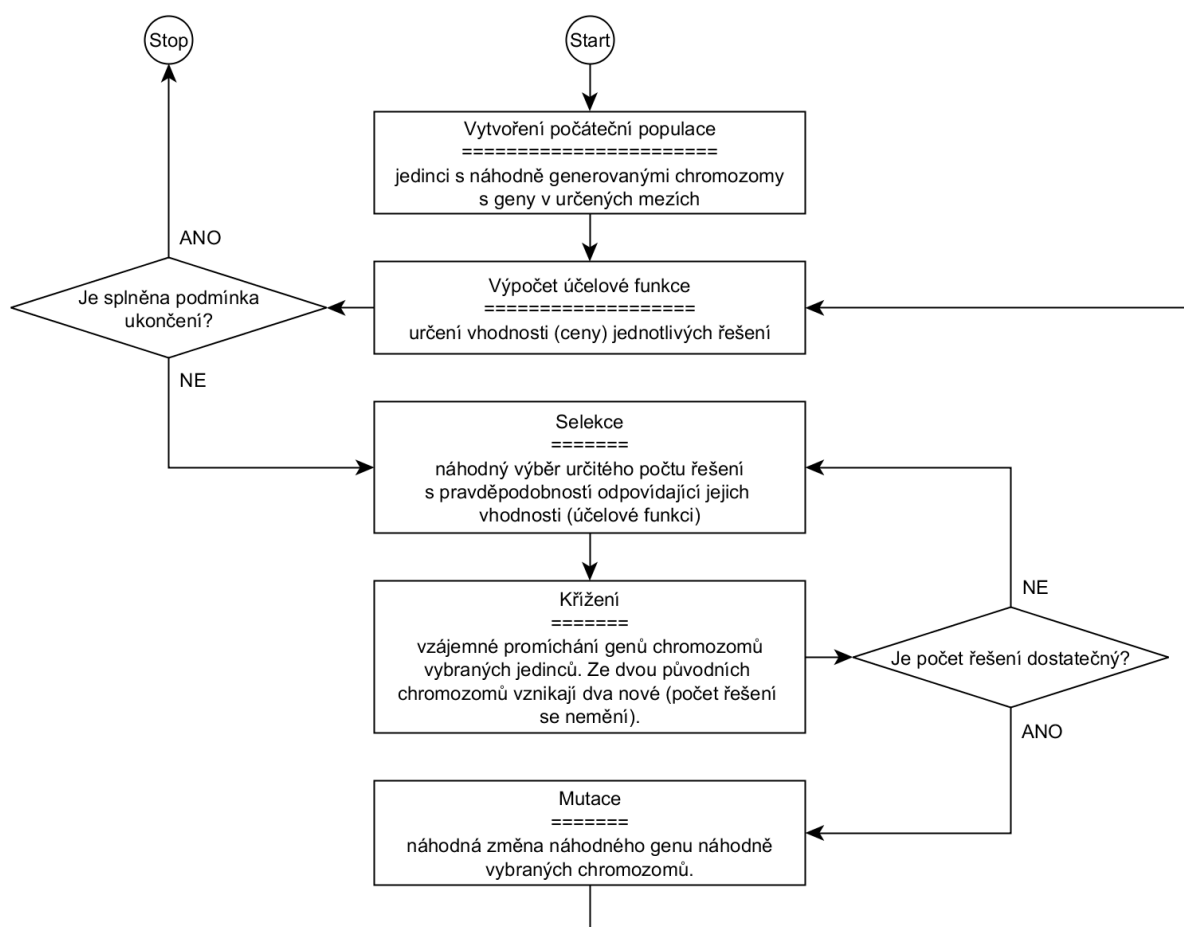
Při návrhu osvětlovacích soustav je třeba řešit problém rozmístění svítidel ať už pro vnější či vnitřní prostory. Dostupné počítačové programy pro návrhy osvětlovacích soustav umožňují výpočet některých světelně technických veličin a tím velice ulehčují práci projektanta. Zmiňované počítačové programy nabízejí též funkci návrhu rozmístění svítidel, která spočívá ve vyzkoušení řady standardních rozmístění svítidel z nichž se uživateli nabídnou konfigurace splňující požadované parametry. Prakticky tedy nedochází k vlastnímu návrhu ani optimalizaci rozmístění svítidel.

Komerčně dostupný software, který by optimalizoval rozmístění a počet svítidel v daném prostoru na základě daných požadavků a při výpočtech zahrnoval mnohonásobné odrazy, neexistuje. Byla tedy zvolena vlastní cesta a to za užití genetického algoritmu a metody radiosita pro výpočet sledovaných světelně technických veličin (viz odst. 2.4), která uvažuje povrchy vykazující difuzní odraz světla. Pro velkou časovou náročnost výpočtů metodou Monte Carlo se sledováním paprsků (viz kapitola 4) nebylo možné implementovat tuto metodu a počítat sledované veličiny při nedifuzních mnohonásobných odrazech od povrchů.

Z důvodů snazšího vývoje byl algoritmus vytvářen formou skriptu pro software Matlab (viz CD). Dále prezentované výstupy pocházejí jednak ze zmiňovaného skriptu a z jeho dřívějších implementací, které se nejevily jako příliš vhodné.

5.1 Základní charakteristika genetických algoritmů

Genetický algoritmus (GA) řeší specifickou úlohu na základě mechaniky přírodní selekce a genetiky. Jde o optimalizační techniku kdy algoritmus nehledá jakákoliv řešení, ale pouze ta, která leží v extrému určité funkce. Tato funkce se nazývá účelovou funkcí a popisuje hodnotu (cenu, vhodnost) každého řešení (viz odst. 5.5). Příkladem optimalizace může být hledání vhodného nastavení regulátoru, přičemž může být požadována rychlá reakční doba při zachování stability. Účelová funkce by zde hodnotila oba požadavky například pomocí integrálního kritéria. Řešení s nejnižší hodnotou účelové funkce by bylo nejlepší. Podobně však může být pro jiný příklad hledáno maximum účelové funkce.



Obr. 65. Základní vývojový diagram genetického algoritmu

Výhodou genetického algoritmu je, že není potřebná exaktní znalost závislosti hodnoty řešení na jednotlivých parametrech (argumentech). Je třeba znát pouze hodnoty výstupů dané úlohy pro určité nastavení parametrů, což velmi usnadňuje řešení komplexních problémů. Příkladem může být řešení úloha optimálního rozmístění svítidel. Pro dané rozmístění svítidel a definovanou místnost je poměrně snadné vypočítat osvětlenost srovnávací roviny. Naproti tomu určit osvětlenost jako funkci závisující na počtu a souřadnicích jednotlivých svítidel je prakticky nemožné.

Argumenty řešení jsou pro účely algoritmu určitým způsobem kódovány nebo zapisovány. Tento zápis nese genetické znaky řešení a nazývá se genotypem. Nejčastější

podobou je binární nebo numerický vektor. Pokud je myšlen konkrétní vektor argumentů, hovoříme obvykle o chromozomu a o jeho jednotlivých částech (o argumentech, o částech argumentů - záleží na kódování) jako o genech. Vlastnosti řešení v dané úloze jsou nazývány fenotypem. V prezentované úloze optimalizace rozmístění svítidel patří souřadnice svítidel do genotypu, zatímco výsledné hodnoty osvětleností ve sledovaných bodech srovnávací roviny jsou fenotypem.

Hledání řešení probíhá v tzv. generacích. Každé generaci náleží skupina řešení, která se nazývá populace. V první počáteční generaci jsou vstupní argumenty jednotlivých řešení získány stochasticky. Získaná řešení jsou ohodnocena účelovou funkcí a na základě výsledků této funkce následuje selekce jednotlivých řešení. Selekcce musí být do jisté míry stochastická, neboť méně kvalitní řešení zajišťují různorodost populace a její schopnost se vyvíjet. Pokud je hledáno maximum, resp. minimum, účelové funkce, pak nejvyšší pravděpodobnost výběru mají vždy řešení s nejvyšší, resp. nejnižší, hodnotou účelové funkce. Metod selekce je celá řada [24]. Nejjednodušší je výběr úměrný výstupu účelové funkce, také známý jako metoda rulety, který lze vyjádřit vztahem

$$P(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (61)$$

kde

- x_i je výstup řešení i ,
- $f(x_i)$ je hodnota účelové funkce řešení x_i ,
- N je celkový počet řešení v populaci.

Výběr řešení probíhá vždy po dvojicích. Dva vybraní jedinci postoupí s určitou pravděpodobností v nezměněné formě do budoucí populace příští generace nebo mezi nimi dojde ke křížení. Křížení může mít opět různou formu. Nejobvyklejší je jednobodová případně vícebodová výměna části řetězce chromozomu. Po výměně vzniknou z původních rodičovských chromozomů dva nové chromozomy potomků a tedy i dvě nová řešení v následující generaci.

S přibývajícím počtem generací členové populace postupně konvergují k nejvhodnějšímu řešení. Zároveň však dochází i k jejich degeneraci, jelikož roste podobnost mezi jednotlivými řešeními. V extrémním případě mohou být dokonce všechna řešení populace totožná. Kvůli zachování, případně zvýšení, různorodosti se do algoritmu zavádí ještě prvek mutace. Jejím hlavním účelem je s určitou pravděpodobností měnit hodnoty náhodně vybraných genů chromozomů různých řešení. Jakým způsobem je mutace prováděna obvykle závisí na druhu kódování chromozomu a v některých případech i na druhu řešeného problému. Více o mutaci v odst. 5.6.

5.2 Řešení mnohonásobných odrazů

Osvětlenost byla v použité metodě genetického algoritmu určována pomocí bodové metody. Povrchy stěn, stropu a podlahy jsou rozděleny na menší plošky o definovaném obsahu a jejich střed je považován za pozici kontrolního bodu. Každá taková ploška je definována plochou A a normálovým vektorem \vec{n} . Počáteční osvětlenost těchto plošek je dána přímým tokem ze svítidel a je určena pro všechny kontrolní body v modelové místnosti dle vztahu [1]

$$E = \frac{I_{C,\gamma} \cdot \cos(\beta)}{|\vec{l}|^2} \quad (62)$$

kde

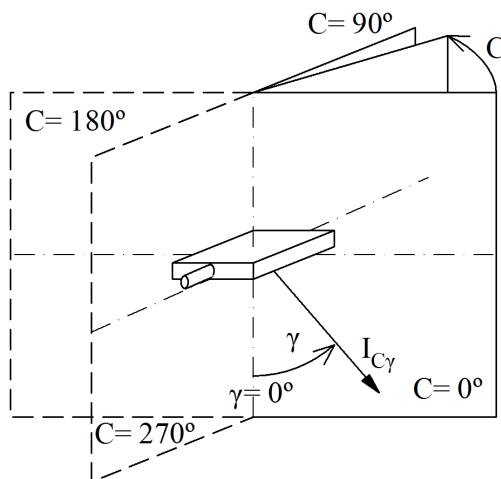
$I_{C,\gamma}$ svítivost ve směru C, γ ,

$\cos(\beta)$ je kosinus úhlu mezi normálovým vektorem plošky \vec{n} a směrovým vektorem dopadajícího paprsku \vec{l} ,

$|\vec{l}|$ je délka směrového vektoru paprsku, tj. vzdálenost mezi svítidlem a kontrolním bodem.

Hodnoty svítivosti $I_{C,\gamma}$ jsou získávány z elektronického souboru fotometrických údajů svítidla. Algoritmus předpokládá záznam křivek svítivosti v souboru elumdat v soustavě rovin $C - \gamma$ (viz obr. 66), což je pro interiérová svítidla běžné. Z uvedeného plyne, že orientace svítidla musí být definována v prostoru minimálně dvěma vektory k určení konkrétní roviny a úhlu. V algoritmu jsou použity normálový vektor \vec{v}_{ax} roviny $C0$ a normálový vektor \vec{v}_{rd} roviny $C90$. Oba vektory jsou vždy definovány jako jednotkové, nebo jsou na jednotkové upraveny. Směr paprsku odpovídající vztažné svítivosti I_0 se určuje pomocí vektorového součinu

$$\vec{v}_{I_0} = \vec{v}_{rd} \times \vec{v}_{ax} \quad (63)$$



Obr. 66. Soustava fotometrických rovin $C - \gamma$

Jelikož jsou oba vektory jednotkové a úhel mezi nimi je 90° , pak i výsledný vektor má jednotkovou velikost. Směrový vektor paprsku je získáván z rozdílu souřadnic či polohových vektorů svítidla \vec{r}_s a bodu \vec{r}_b

$$\vec{l} = \vec{r}_b - \vec{r}_s \quad (64)$$

Vektor \vec{l} směřuje od svítidla k bodu a jeho velikost v absolutní hodnotě určuje vzdálenost mezi svítidlem a tímto bodem. Velikost vektoru lze nejjednodušeji určit pomocí skalárního součinu nebo pomocí Pythagorovy věty

$$|\vec{l}| = \sqrt{\vec{l} \cdot \vec{l}} = \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2} \quad (65)$$

Konkrétní úhel γ a polorovinu C lze určit pomocí skalárních součinů určitých vektorů. Pro určení úhlu γ lze využít skalárního součinu již definovaných vektorů \vec{v}_{I0} a \vec{l} podle vztahu

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\vec{v}_{I0} \cdot \vec{l}}{|\vec{l}|}\right) \quad (66)$$

Rovnice (66) platí za předpokladu, že je vektor \vec{v}_{I0} jednotkový. Ke stanovení poloroviny C je třeba určit vektor, který je průmětem vektoru \vec{l} do roviny s normálovým vektorem \vec{v}_{I0} . V algoritmu je to řešeno pomocí průsečíku kolmo vedené přímky, která prochází sledovaným bodem s polohovým vektorem \vec{r}_b . Rovnice roviny je určena dle vztahu

$$A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0 \quad (67)$$

a pro rovinu s normálovým vektorem \vec{v}_{I0} , která prochází pozicí svítidla s polohovým vektorem \vec{r}_s , jsou koeficienty A , B , C a D určeny následovně

$$A = \vec{v}_{I0x} \quad (68)$$

$$B = \vec{v}_{I0y} \quad (69)$$

$$C = \vec{v}_{I0z} \quad (70)$$

$$D = -\vec{v}_{I0} \cdot \vec{r}_s \quad (71)$$

Přímku, tedy polohový vektor \vec{r}_p každého bodu na přímce, lze vyjádřit parametricky s parametrem t

$$\vec{r}_s = \vec{r}_b + t \cdot \vec{v}_{I0} \quad (72)$$

Dosazením rovnice (72) do rovnice roviny (67) lze vyjádřit hodnotu parametru, pro průsečík přímky a roviny

$$t = \frac{\vec{v}_{I_0} \cdot \vec{r}_s - \vec{v}_{I_0} \cdot \vec{r}_s}{\vec{v}_{I_0} \cdot \vec{v}_{I_0}} \quad (73)$$

Pro jednotkový vektor \vec{v}_{I_0} je jmenovatel rovnice (73) roven 1. Dosazením vypočteného parametru zpět do rovnice (72) je obdržen polohový vektor průsečíku, ze kterého je již možné vypočítat vektor průmětu

$$\vec{l}_p = \vec{r}_p - \vec{r}_s \quad (74)$$

Úhel natočení roviny C lze následně určit podobně jako u γ skalárním součinem

$$\gamma = \arccos \left(\frac{\vec{v}_{ax} \cdot \vec{l}_p}{|\vec{l}_p|} \right) \quad (75)$$

Rovnice (75) opět předpokládá, že vektor \vec{v}_{ax} je jednotkový. Do vztahu (62) zbývá určit hodnotu $\cos(\beta)$. Za tímto účelem lze využít opět skalární součin mezi normálovým vektorem kontrolního bodu (plošky) \vec{n} a směrovým vektorem paprsku \vec{l}

$$\cos(\beta) = -\frac{\vec{n} \cdot \vec{l}}{|\vec{l}|} \quad (76)$$

Vztah (76) platí pro jednotkový normálový vektor \vec{n} . Změna znaménka je zde kvůli obrácení smyslu směrového vektoru \vec{l} .

Uvedeným postupem jsou určeny všechny hodnoty proměnných rovnice (62). Pro obecnou orientaci svítidla vůči kontrolním bodům je tedy možné určit přímou složku osvětlenosti od svítidel.

Dále je třeba stanovit nepřímou složku osvětlenosti danou mnohonásobnými odrazy. Za tímto účelem se stává každý kontrolní bod sekundárním světelným zdrojem s čistě difuzní vyzařovací charakteristikou, tzv. Lambertův zářič. Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, modelová místnost s povrchy s nedifuzními odrazy nebyla uvažována. Svítivost I_0 ve směru normály je odvozena ze vztahů pro světlení M , což je světelný tok vycházející z plochy vztažený na jednotkovou plochu, a tok Φ Lambertova zářiče [1]

$$M = \rho \cdot E \quad (\text{lm/m}^2) \quad (77)$$

kde

ρ je činitel odrazu povrchu, na kterém se kontrolní bod nachází (-),

E je osvětlenost plošky obsahující kontrolní bod (lx).

Světelný tok Lambertova zářiče je určen dle [1] jako součin konstanty π a vztažné svítivosti I_0 dle vztahu

$$\Phi = I_0 \cdot \pi \quad (78)$$

Vztažnou svítivost I_0 je tedy možné získat využitím vztahů (77) a (78)

$$I_0 = \frac{\rho \cdot E \cdot dA}{\pi} \quad (79)$$

Pro rovnoměrně rozptýlně odrážející povrchy lze psát vztah vztažné svítivosti a charakteristické funkce f_I

$$I_\gamma = I_0 \cdot f_I(\gamma) = I_0 \cdot \cos(\gamma) \quad (80)$$

Pro určení svítivosti I_γ kontrolního bodu plošky tedy postačí znát úhel γ podle vztahu (80). Úhel γ lze určit jako v předchozích případech pomocí skalárního součinu mezi normálovým vektorem svítící plošky a směrovým vektorem paprsku. Výpočet osvětleností plošek je tudíž dále totožný s již popsáním postupem pro použité primární světelné zdroje. Při odrazu se vypočítává vždy přírůstek osvětlenosti dané plošky. Znamená to tedy, že s každým dalším započítaným odrazem světla se pro všechny povrchy vypočítají nové hodnoty osvětleností těchto plošek. Po započítání daného počtu odrazů světla tedy mohou osvětlenosti plošek narůst nebo zůstat na původní hodnotě, nemohou však klesnout. Výsledná osvětlenost dané plošky je tedy dána součtem jednotlivých přírůstků pro použitý počet odrazů. Pro vybraný kontrolní bod plošky platí

$$E_{pl} = E_{pl,0} + E_{pl,1} + E_{pl,2} + \dots + E_{pl,n} \quad (81)$$

kde $E_{pl,n}$ značí přírůstek osvětlenosti sledované plošky pl pro n -tý výpočet rozložení světelného toku. Pro výpočet osvětlenosti dané plošky $E_{pl,n}$ musejí být známy osvětlenosti $E_{i,n-1}$ (plošky i) všech ostatních plošek, z čehož plyne že osvětlenosti $E_{pl,n}$ a $E_{i,n}$ jednotlivých plošek musejí být vypočítány současně. $E_{pl,0}$ je tedy přímá složka osvětlenosti plošky pl od svítidel. $E_{pl,1}$ je přírůstek osvětlenosti plošky po prvním výpočtu odraženého toku od ostatních plošek, tj. každá ploška se stává sekundárním zdrojem světla a spolu se svítidly ovlivní výslednou osvětlenost uvažované plošky. $E_{pl,2}$ je přírůstek osvětlenosti plošky po druhém výpočtu odraženého toku od ostatních plošek, tj. osvětlenost plošky ovlivní opět primární a sekundární zdroje světla, avšak světelný tok sekundárních zdrojů se od minulého výpočtu zvýšil z hodnoty úměrné osvětleností plošek $E_{i,0}$ na osvětlenosti $E_{i,0} + E_{i,1}$. Tímto postupem lze pokračovat až po výpočet osvětlenosti $E_{pl,n}$ plošky pl .

Jelikož je činitel odrazu menší než jedna, musí zákonitě postupně klesat i hodnoty přírůstků osvětleností. Řada ze vztahu (81) tedy konverguje.

Pro ohodnocení kvality daného návrhu rozmístění svítidel je v místnosti umístěna srovnávací rovina (viz obr. 67) se sítí kontrolních bodů, ve kterých je vyhodnocována osvětlenost. Srovnávací rovina nemá vliv na šíření světla v místnosti, slouží pouze pro vyhodnocení osvětlenosti této roviny po vypočítání osvětleností plošek místnosti. Mámeli síť kontrolních bodů $m \times n$ srovnávací roviny s vypočítanými osvětlenostmi $E_{x,y}$ pro $x \in \{1, 2, \dots, m\}$ a $y \in \{1, 2, \dots, n\}$ odpovídajících primárním a sekundárním zdrojům světla v místnosti, lze průměrnou hodnotu osvětlenosti srovnávací roviny získat podle vztahu

$$\bar{E} = \frac{\sum_{x=1,y=1}^{x=m,y=n} E_{x,y}}{m \cdot n} \quad (\text{lx}) \quad (82)$$

5.3 Modelová místnost

Algoritmus byl testován na modelové místnosti o rozměrech $10 \times 5 \times 4$ m, tj. na téže místnosti použité při výpočtech metodou Monte Carlo a sledování paprsků. Modelová místnost byla zvolena co nejjednodušší, tzn. nezařízená bez oken a dveří. Cílové parametry byly zvoleny podle normy [25] pro místnost určenou pro administrativní práci:

\bar{E}_m	průměrná udržovaná osvětlenost 500 lux
UGR_L	činitel oslnění 19
U_0	činitel rovnoměrnosti 0,6
R_a	index podání barev 80

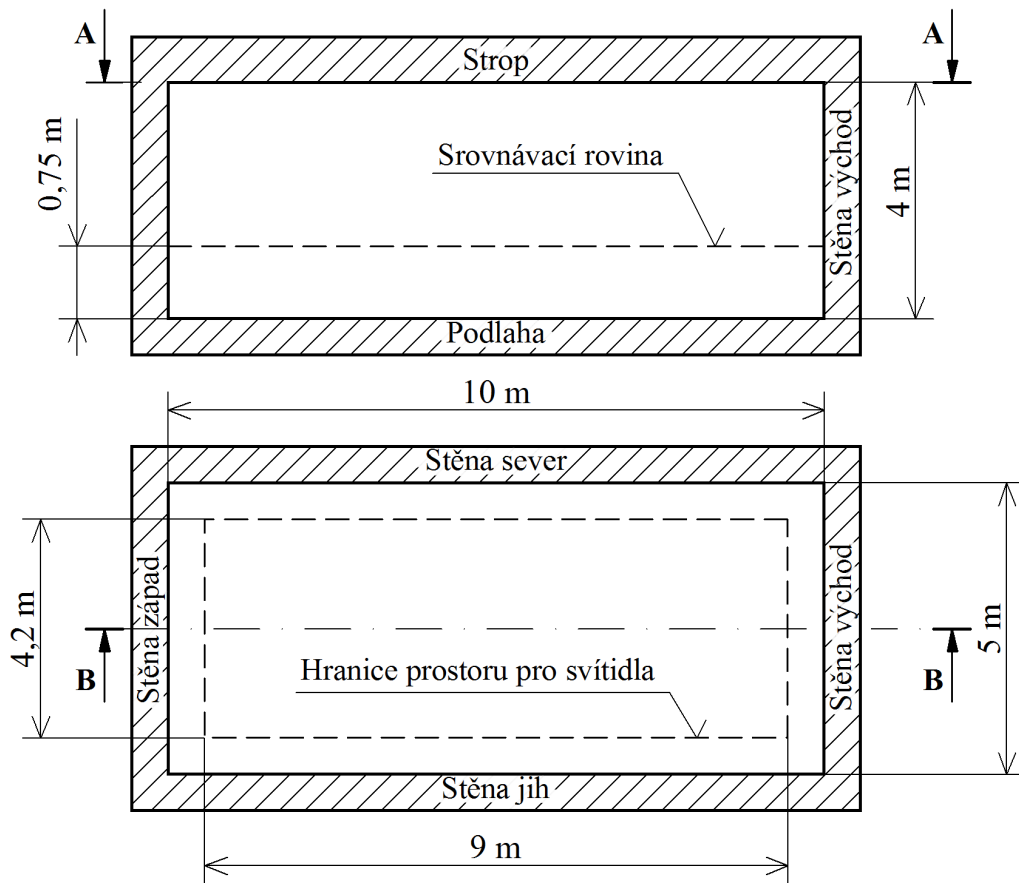
Průměrná udržovaná osvětlenost \bar{E}_m musí být zajištěna po celou uvažovanou dobu provozu svítidel. Jelikož dochází stárnutím a znečištěním prvků osvětlovací soustavy během provozu k poklesu průměrné osvětlenosti, je počáteční navrhovaná osvětlenost vždy vyšší. Poměr mezi průměrnou osvětleností na konci udržovacího období a počáteční osvětleností je dán udržovacím činitelem z (v zahraniční literatuře též MF). Pokud jde pouze o ověření funkce algoritmu, má hodnota z jen malý význam. Nicméně pro dosažení obvyklých počtů konkrétních svítidel v dané modelové místnosti byla jeho hodnota zvolena 0,75. Algoritmem sledovaná hodnota průměrné osvětlenosti srovnávací roviny \bar{E} v modelové místnosti proto byla:

$$\bar{E} = \frac{\bar{E}_m}{z} = \frac{500}{0,75} = 667 \text{ lx} \quad (83)$$

Udržovací činitel U_0 byl zahrnut do fenotypu a podle normy [25] je jeho hodnota určena poměrem skutečných hodnot minimální E_{min} a průměrné \bar{E} osvětlenosti:

$$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}} \quad (84)$$

V průběhu testování bylo zjištěno, že rovnoměrnost osvětlení U_0 je relativně málo omezující. V uvedené modelové místnosti (bez oken, dveří a zařízení) lze očekávat symetrické rozmístění svítidel pro dosažení požadované rovnoměrnosti. Omezení dané parametrem U_0 však symetrický výsledek nezaručuje. Výstupy algoritmu obvykle splňovaly požadavky rovnoměrnosti, avšak rozmístění svítidel nebylo téměř nikdy symetrické. Většina svítidel byla zpravidla uskupena v určité části místnosti, kde bylo dosaženo vysoké osvětlenosti, čímž byla zajištěna požadovaná průměrná osvětlenost. Zbývající svítidla byla řídko rozmístěna v dalších částech místnosti tak, aby osvětlenost nepoklesla v žádném uvažovaném



Obr. 67. Výkres modelové místnosti

bodě srovnávací roviny pod úroveň E_{min} o hodnotě vyplývající z rovnice (84) pro zadané hodnoty \bar{E} a U_0 . Uvedená řešení byla z pohledu vhodnosti návrhu v podstatě nepřijatelná. Na pohled vhodnějších rozmístění svítidel bylo dosaženo hodnocením rovnoměrnosti metodou součtu čtverců odchylek osvětlenosti od střední hodnoty. Tento problém je dále řešen v odst. 5.4 a 5.5. V konečném důsledku však vyplynulo, že kromě výše uvedené definice rovnoměrnosti (84) je třeba do fenotypu nebo oblasti řešení zahrnout prvek vnášející symetrii.

Další normou [25] sledovaný parametr modelové místnosti dané funkce je činitel oslnění UGR_L . Výpočet tohoto parametru se provádí pro místa zrakových úkolů a jelikož tyto nebyly v modelové místnosti známy, nebyl tento parametr do výpočtů zahrnut. Dalším argumentem pro nezahrnutí toho parametru je výběr vestavného podhledového svítidla s mřížkou pro zamezení oslnění, přičemž by nedošlo k nesplnění parametrů pro jakékoliv rozmístění těchto svítidel.

Též index podání barev R_a nebyl zahrnut do výpočtů. Jde o parametr související pouze s použitými světelnými zdroji, případně související s kombinací světelného zdroje a svítidla. Rozmístění případně počet svítidel index podání barev v místnosti neovlivní.

Hodnota osvětlenosti byla vždy počítána na vodorovné srovnávací rovině ve výšce 0,75 m nad podlahou zastupující desky psacích stolů. Výpočet byl prováděn bodovou metodou s uvažováním 4 odrazů od stěn, stropu a podlahy. Metoda výpočtu je popsána

v odst. 5.2. Vhodný počet odrazů byl určen z výsledků modelové místnosti s jedním centrálním svítidlem, kdy byly sledovány přírůstky osvětlenosti v jednotlivých fázích výpočtu. Pro více jak 4 odrazy byl přírůstek osvětlenosti na všech stěnách menší než 10 % celkové osvětlenosti (viz obr. 68). Hodnoty jednotlivých činitelů odrazů byly s ohledem na obvykle volené hodnoty definovány následující:

$$\begin{aligned}\rho_{str} &= 0,7 && \text{činitel odrazu stropu} \\ \rho_{ste} &= 0,5 && \text{činitel odrazu všech stěn} \\ \rho_p &= 0,2 && \text{činitel odrazu podlahy}\end{aligned}$$

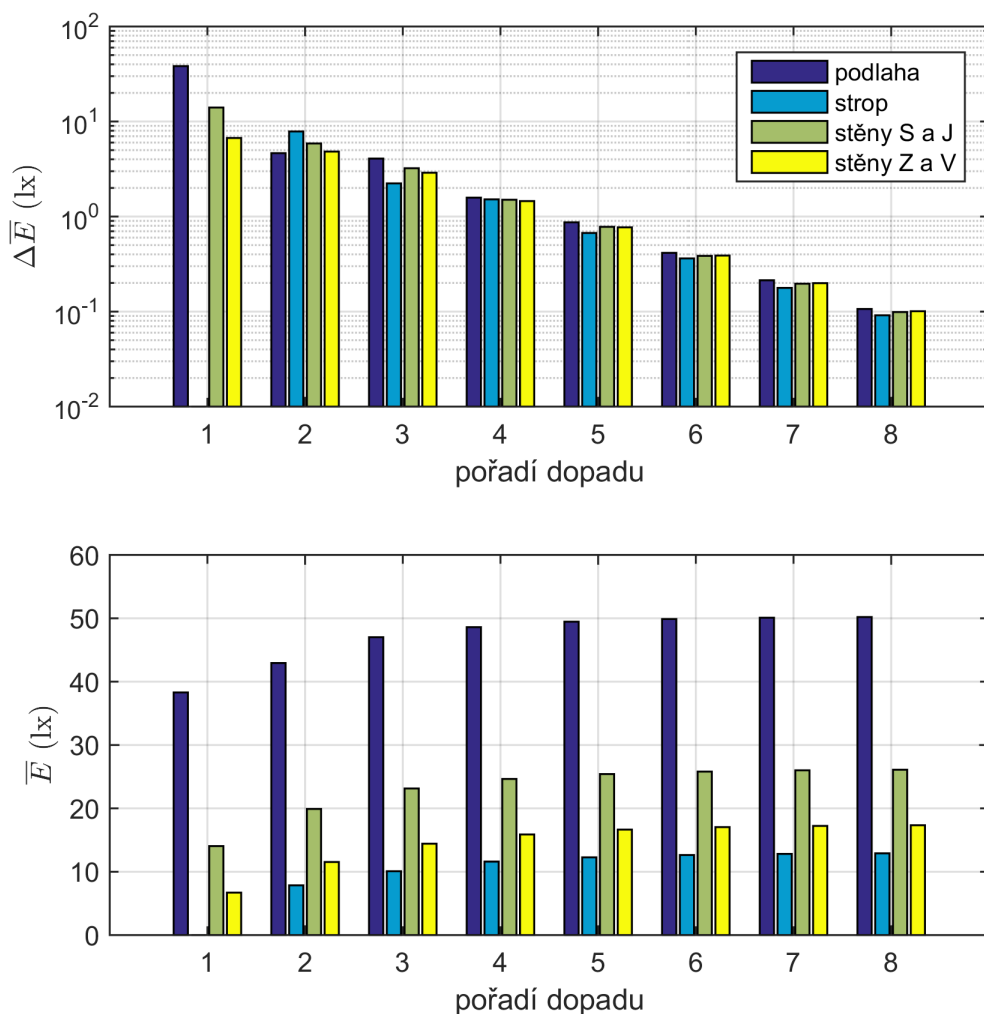
Síť kontrolních bodů, ve kterých se prováděly výpočty rozložení světelného toku v místnosti, byla rozmístěna po stěnách, podlaze a stropu s roztečí kontrolních bodů 0,25 m. Vzdálenost krajních kontrolních bodů od hranic místnosti byla vždy poloviční. Pro rozmístování svítidel byl určen prostor na stropě s okraji vzdálenými 0,5 m od západní a východní stěny a 0,4 m od severní a jižní stěny (viz obr. 67).

Na obr. 68 jsou znázorněny přírůstky průměrné osvětlenosti a výsledné průměrné osvětlenosti jednotlivých stěn, stropu a podlahy v závislosti na počtu vypočítaných dopadů světla v modelové místnosti. Výpočet byl proveden pro jedno svítidlo umístěné uprostřed modelové místnosti které je totožné se svítidlem využívaným dále v GA pro rozmístování v modelové místnosti. Je zřejmé, že při 5. dopadu je přírůstek osvětlenosti pro všechny povrchy modelové místnosti nižší než 10 % výsledné osvětlenosti. Jelikož výpočet odrazů je pro mnoho kontrolních bodů (plošek) velice časově náročný, počítá GA z tohoto důvodu pouze 4 odrazy. Pro jinou modelovou místnost a jiné svítidlo by však tento počet mohl být nedostatečný.

5.4 Množina možných řešení

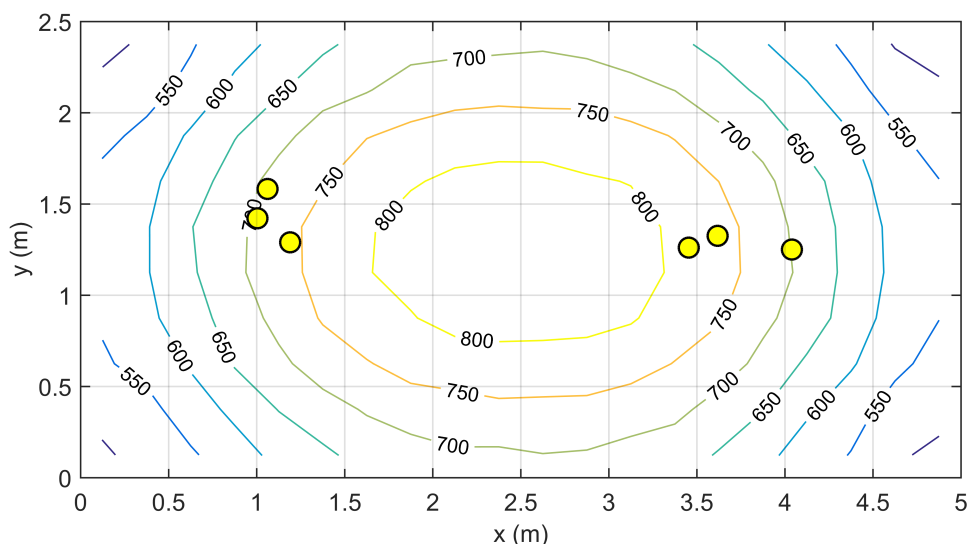
Počáteční verze algoritmu rozmísťovala svítidla v definovaném prostoru s libovolnou souřadnicí v osách x a y . Genotypem byla dvojice čísel ke každému svítidlu, která reprezentovala souřadnice. Všechny dvojice byly uspořádány do vektoru. Délka vektoru odpovídala tudíž dvojnásobku počtu svítidel. Výška zavěšení svítidla se předpokládala neměnná a uvažovala se jako parametr daný konkrétním typem svítidla. Jelikož se délka chromozomu uvažovala konstantní, neměl algoritmus možnost sám navrhnout optimální počet svítidel a optimalizováno bylo pouze jejich rozmístění.

Návrh optimálního počtu svítidel bylo v budoucnu možné řešit proměnnou délkou chromozomu (vektoru souřadnic). Původně by vektor získal charakter seznamu souřadnic, který by bylo možné rozšiřovat a zkracovat o další prvky. Nevýhodou tohoto přístupu by byla vyšší programová složitost. Například mutace by musela mít také, kromě změny vybrané souřadnice v seznamu, možnost přidat další nebo odebrat stávající prvek. Při křížení by se také často vyměňovaly nestejně délky částí chromozomů. Bylo by proto třeba získávat pozici bodu křížení pro každého rodiče zvlášť.



Obr. 68. Průměrná osvětlenost povrchů modelové místnosti v závislosti na počtu dopadů světla pro jedno svítidlo

Během testování se ukázala řada problémů s počáteční koncepcí algoritmu. Účelová funkce byla navržena tak, aby pro stanovený počet svítidel maximalizovala hodnotu osvětlenosti a rovnoměrnosti. Přitom dosažení cílových hodnot bylo zvýhodněno. Podrobnější popis a rozbor návrhu účelové funkce lze nalézt v odst. 5.5. Základním problémem řešení byla blízkost svítidel. Při větším počtu svítidel docházelo k blízké shodě souřadnic více svítidel. Příkladem takového výstupu algoritmu je rozmístění svítidel znázorněné na obr. 69. Tento výstup byl získán pro svítidlo MSTR SLB $4 \times 18W$, jehož křivky svítivosti jsou uvedeny na obr. 50, a místnost o rozměrech $10 \times 5 \times 4$ m, tj. byla použita tatáž místnost metodou řešení rozmístění svítidel genetickým algoritmem a metodou Monte Carlo se sledováním paprsků. Podobná řešení lze vysvětlit jednoduchým způsobem. Určené svítidlo v daných pozicích dostatečně rovnoměrně osvětluje celý prostor a není proto nutné ostatní svítidla přesouvat jinam. Zbývá tedy jen dosáhnout dostatečné úrovně udržované osvětlenosti, což je zajištěno příslušným počtem svítidel. Řešení na obr. 69 by bylo pravděpodobně stejně kvalitní, pokud by byla použita jen dvě svítidla se stejnými



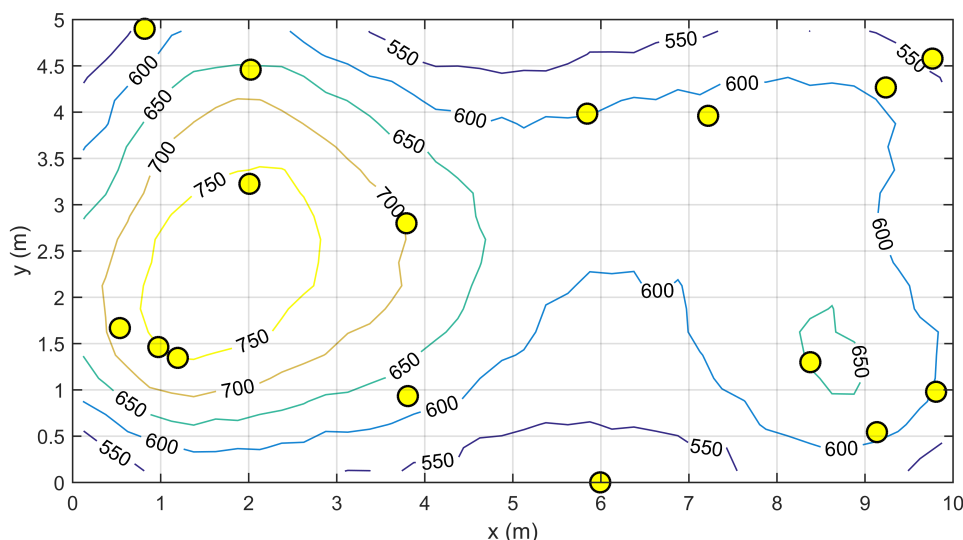
Obr. 69. Příklad návrhu splňující podmínky řešení s problémem fyzicky se překrývajících svítidel

křivkami svítivosti ale s trojnásobným světelným tokem. Běžným jevem bylo také umísťování svítidel do krajních poloh, tj. na hranu stěny. Uvedená řešení nebylo tudíž možné realizovat.

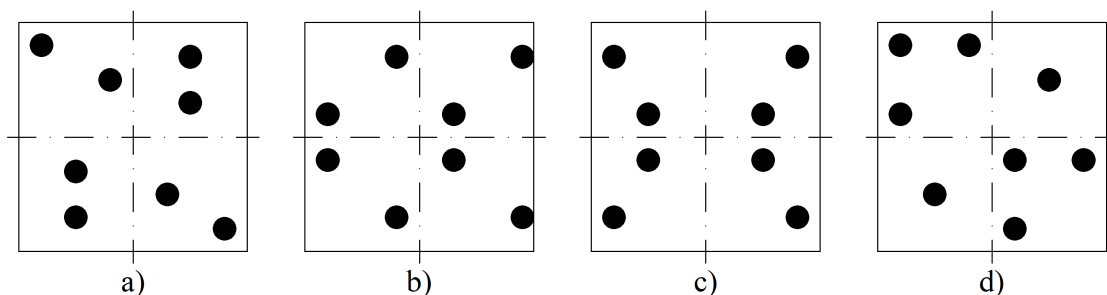
Dalším problémem bylo řešení symetrie. Pro symetrické místnosti je obvykle očekáváno symetrické rozmístění svítidel. V původním řešení algoritmu některé výsledky skutečně vykazovaly určitou symetrii¹. Většinou se však jednalo spíše o rovnoměrné nahodilé rozmístění svítidel podobné rozmístění uvedenému na obr. 70. Z toho důvodu byly učiněny pokusy, jak zvýhodnit v účelové funkci právě symetričtější výsledky. Nicméně samotné programové zhodnocení, zda je výsledek nějakým způsobem symetrický, bylo velice obtížné. Symetrie totiž může být hodnocena různými způsoby. Může se jednat o symetrii vůči středu, vůči osám nebo se jednat o opakování určitého vzoru. Složitost problému nastiňuje obr. 71. Všechny znázorněné ukázky by byly z pohledu návrhu přijatelné. Avšak najít jednotný společný vztah (hodnotící ukazatel, sledovanou veličinu) jen mezi těmito vybranými symetriemi je téměř nemožné.

Stejně tak bylo obtížné upřednostňování těchto symetrických řešení. To muselo zajistit v počátečních generacích zvýhodnění těch jedinců, kteří splnili požadavky udržované osvětlenosti a rovnoměrnosti a zároveň měli symetricky rozmístěná svítidla. Musí však docházet k postupné evoluci a nikoliv ke skokovému vyřazování členů populace, které tyto požadavky nesplňují. Pokud existují dva jedinci, kdy jeden nedosahuje cílových hodnot \bar{E} a U_0 , avšak je plně symetrický a druhý jedinec je nesymetrický, avšak cílové hodnoty s velkou rezervou přesahuje, pak mají oba nárok na postup do další generace. Oba jedinci totiž ve svých chromozomech obsahují geny potřebné v dalších populacích. Nicméně samotné křížení nebylo schopné při dané definici chromozomu zajistit přenos „toho lepšího“ z obou rodičů na potomka. Symetrie byla totiž vlastností vznikající mezi dvojicemi genů, které

¹Symetrie byla více obvyklá při návrhu osvětlovací soustavy s malým počtem svítidel, tj. zhruba pro počet menší nebo roven 6. Při velkých počtech byla spíše výjimečná



Obr. 70. Příklad výstupu původního GA, který sleduje pouze dosažení požadovaných hodnot \bar{E} a U_0



Obr. 71. Příklad různých typů symetrií: a) vůči středu, b) vůči ose procházející zleva doprava, c) vůči oběma osám, d) opakování určitého vzoru.

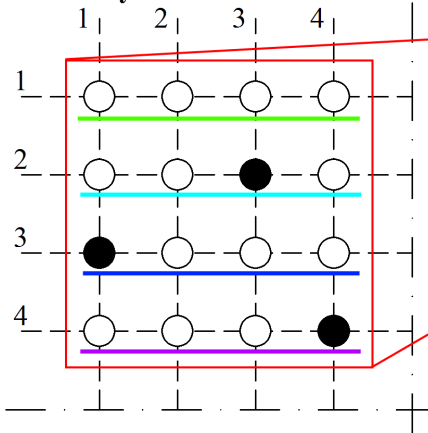
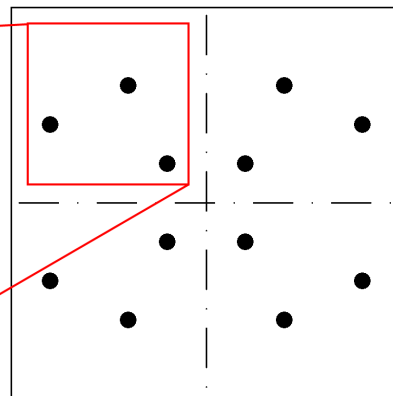
mohly být v chromozomu na různých pozicích. Roztržení chromozomu a jeho navázání částí chromozomu jiného řešení mohlo tuto informaci úplně zničit, nebo ji vůbec tímto způsobem nebylo možné přenést.

Pokud jde o jednoduché symetrie vůči středu nebo osám, pak nejlepších výsledků bylo dosaženo zařazením minimalizace součtu čtverců odchylek osvětlenosti. Maximálně rovnoměrná řešení byla obvykle také symetrická. Problematické bylo však vytlačování svítidel ke stěnám, jelikož zde by jinak byla osvětlenost nízká. Kvůli tomu se i toto řešení nakonec ukázalo jako nevhodné.

Jelikož měl být algoritmus používán pro hodnocení vlivu difuzního a nedifuzního odrazu povrchů, bylo nutné také zajistit opakovatelnost nebo alespoň podobnost výsledku výpočtu pro stejné vstupní hodnoty. To však nebylo s původním algoritmem možné. Pouze splnění hraničních hodnot \bar{E} a U_0 (při neuvažování symetrie) lze dosáhnout nekonečným množstvím řešení. Tato řešení si mohou být velmi podobná. Na druhou stranu mohou být ovšem zcela odlišná. Například řešení s maximální osvětleností a malou rovnoměrností bude pravděpodobně málo podobné řešení s minimální osvětleností a vysokou rovnoměrností. Tento a výše uvedené problémy nakonec vedly k požadavku omezení

Chromozom:

11	12	13	14	21	22	23	24	31	32	33	34	41	42	43	44
0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1

Návrhový rastr:**Výsledné rozmístění:**

Obr. 72. Příklad chromozomu, vzhledu rastru a výsledného řešení pro symetrii vůči oběma osám

množiny možných řešení a novému návrhu genotypu.

Bylo rozhodnuto, že pro jednoduchost bude řešena pouze středová symetrie (obr. 71a)) a symetrie vůči oběma osám (obr. 71c)). Podle toho je návrh pozic svítidel omezen pouze na polovinu nebo čtvrtinu plochy stropu modelové místnosti. Souřadnice ostatních svítidel ve zbylém prostoru stropu se získávají pomocí zrcadlení vůči středu nebo osám. Pochopitelně by podobným způsobem bylo možné získat i jiné typy symetrií. Zřejmě zde dochází i k jistému omezení počtu rozmísťovaných svítidel. Ten nemůže být v případě středové symetrie lichý a v případě symetrie vůči oběma osám musí být dokonce násobkem čtyř.

Nežádoucí blízkost svítidel byla eliminována zavedením rastru (sítě, množiny) povolených pozic. Rastr je vždy volen tak, aby respektoval rozměry svítidla. Zároveň může tímto způsobem projektant vymezit prostor, kde svítidla být nemohou například kvůli nábytku. Genotyp byl zaveden jako binární (logický) vektor o délce odpovídající počtu povolených pozic. Obsazení pozice svítidlem je reprezentováno hodnotou 1. V opačném případě je na dané pozici hodnota 0. Příklad rastru a kódování genotypu je uveden na obr. 72. Je zřejmé, že uvedené řešení genotypu dovoluje algoritmu zároveň optimalizovat počet svítidel pro daný typ symetrie. Toto řešení skýtá další výhody. U předchozího chromozomu se střídaly číselné hodnoty pozice x a y . Pro křížení je však výhodnější, když mají všechny geny stejný význam, což je podobné i pro případ mutace. Navíc binární kódování je mnohem úspornější na použité paměť, jelikož lze využít přímo bitovou reprezentaci čísel v počítači.

Po zavedení rastru se významně zlepšila opakovatelnost řešení. Stále však algoritmus pro dané vstupy nevrací totožný optimalizovaný výsledek. Obvykle existuje totiž více než jedno řešení dané úlohy. Výsledky si jsou nicméně více podobné a nebo mají alespoň velmi patrné společné rysy. Například pro jeden typ svítidla jsou upřednostňovány pozice

v blízkosti středu místnosti, pro jiný naopak na krajích. Znatelně se začal také projevovat vliv odrazu stěn. Podrobnější rozbor výsledků algoritmu lze nalézt v odst. 5.7.

5.5 Účelová funkce

Účelová funkce oceňuje míru splnění požadavků generovaných řešení. Hodnota funkce může pro vhodnější řešení růst nebo klesat, závisí na její definici. Podle toho je hledáno minimum nebo maximum této funkce. Nejsou zavedena obecná pravidla pro její sestavení, pouze jsou k dispozici určitá doporučení.

V této práci byla v poslední verzi algoritmu účelovou funkcí sledována hodnota průměrné osvětlenosti \bar{E} srovnávací roviny, rovnoměrnosti osvětlení U_0 a počet použitých svítidel. Definovaná účelová funkce oceňovala lepší jedince populací nižšími hodnotami. Řešení, jejichž hodnota průměrné osvětlenosti či rovnoměrnosti osvětlení dosahovaly menších než požadovaných minimálních hodnot, byla oceněna vztahem

$$f(p_{sv}, \bar{E}, U_0) = l_{ch} \quad (85)$$

kde

p_{sv} je počet použitých svítidel,

l_{ch} je délka chromozomu, která je konstantní pro všechna řešení dané symetrie.

Vztah (85) odpovídá výsledku účelové funkce pro řešení se všemi obsazenými pozicemi pro svítidla. V zásadě se jedná o maximum účelové funkce, kdy optimální počet svítidel je menší než maximální možný počet. V důsledku toho je pravděpodobnost pokračování těchto řešení do dalších generací minimální.

Řešení, přesahující minimální požadované hodnoty průměrné osvětlenosti a rovnoměrnosti osvětlení, jsou oceněna vztahem

$$f(p_{sv}, \bar{E}, U_0) = p_{sv} + f_{\bar{E}, U_0}(\bar{E}, U_0) = p_{sv} + (1 - \alpha) \cdot \frac{\bar{E}_T}{\bar{E} + \epsilon} + \alpha \cdot \frac{U_{0T}}{U_0 + \epsilon} \quad (86)$$

kde

p_{sv} je počet použitých svítidel, udává celočíselnou část výsledku funkce,

$f_{\bar{E}, U_0}(\bar{E}, U_0)$ udává neceločíselnou část výsledku funkce,

α je parametr preference, $\alpha \in \langle 0, 1 \rangle$,

\bar{E}_T je požadovaná minimální hodnota průměrné osvětlenosti \bar{E} ,

U_{0T} je požadovaná minimální hodnota rovnoměrnosti osvětlení U_0 ,

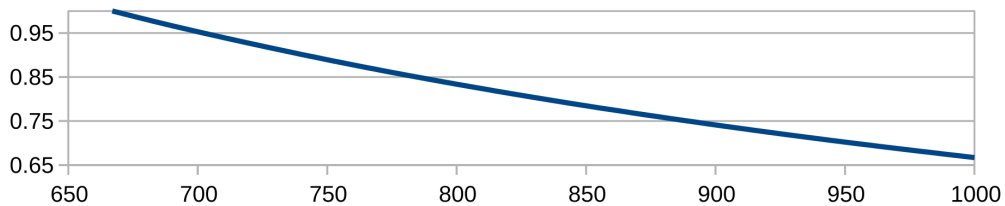
ϵ je konstanta zanedbatelně malé kladné hodnoty pro zamezení dělení 0.

Je zřejmé, že výsledek účelové funkce roste s rostoucím počtem svítidel. Jelikož funkci minimalizujeme, plyne z toho i snaha minimalizovat počet rozmísťovaných svítidel. Počet svítidel tvoří celočíselnou část výsledku účelové funkce, neceločíselnou část tvoří ocenění sledovaných světelně technických parametrů. Průběhy dílčích funkcí hodnotících \bar{E} a U_0 jsou uvedeny na obr. 73. Tyto dílčí výsledky ovlivňují výstup účelové funkce volbou koeficientu α , kterým lze měnit váhu hodnocení průměrné osvětlenosti srovnávací roviny \bar{E} a rovnoměrnosti osvětlení U_0 dle preferencí návrháře. Cílový poměr hodnot $\frac{\bar{E}}{\bar{E}_T}$ a $\frac{U_0}{U_{0T}}$ obou hodnocených parametrů lze získat parciální derivací účelové funkce, z níž získáme vztah

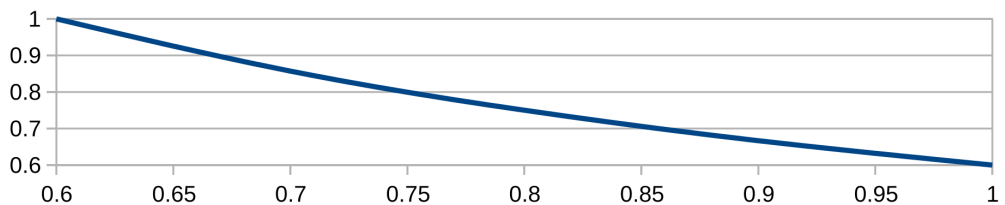
$$R_T = \sqrt{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \quad (-; -, -) \quad (87)$$

Preference jsou vzájemně rovnocenné, pokud $\alpha = 0,5$. Pouze průměrná osvětlenost je hodnocena pro $\alpha = 0$ a pouze rovnoměrnost osvětlení pro $\alpha = 1$. Poměr R výsledného řešení se však může ve skutečnosti lišit od požadované hodnoty R_T . Důvodem je, že cena optimalizace jednoho ze sledovaných parametrů může být výrazně nižší než cena optimalizace druhého parametru. Pro genetický algoritmus je pak jednodušší změnit levnější parametr, i když je preferován jiný. Skutečnou hodnotu R lze získat vztahem

$$R = \frac{\bar{E}}{\bar{E}_T} \cdot \frac{U_{0T}}{U_0} \quad (-; \text{lx}, \text{lx}, -, -) \quad (88)$$



a) Závislost výstupu části účelové funkce $\frac{\bar{E}_T}{\bar{E}+\epsilon}$ na průměrné osvětlenosti \bar{E} (lx)



b) Závislost výstupu části účelové funkce $\frac{U_{0T}}{U_0+\epsilon}$ na rovnoměrnosti osvětlení U_0 (-)

Obr. 73. Hodnocení vybraných veličin účelovou funkcí - závislost výstupu části účelové funkce na hodnotě sledovaného parametru

Vztah (85) eliminuje v počátečních generacích řešení nesplňující minimální požadované hodnoty sledovaných parametrů průměrné osvětlenosti \bar{E} a rovnoměrnosti osvětlení U_0 . Po dosažení alespoň minimálních povolených hodnot sledovaných parametrů je získán optimální nebo vyšší počet svítidel. Hodnota neceločíselné části účelové funkce $f_{\bar{E}, U_0}$ ve vztahu (86) je tudíž vždy menší nebo rovna 1.

Pro další snížení účelové funkce je tedy potřeba

- snížit počet svítidel, pokud jejich počet není minimální,
- zvýšit průměrnou osvětlenost \bar{E} anebo
- zvýšit rovnoměrnost osvětlení U_0 srovnávací roviny.

Užitím účelové funkce tvaru (85) by teoreticky nemuselo být nalezeno řešení splňující minimální požadované hodnoty sledovaných parametrů. Za předpokladu, že první generace je složena z náhodně generovaných řešení, může nastat situace, ve které ani jeden člen populace nesplňuje požadavky, přičemž v tomto případě celá generace vykazuje tutéž hodnotu účelové funkce rovnou délce chromozomu l_{ch} . Pokud se mutací ani křížením nepovede při vytváření nové generace získat jedince splňující oba parametry současně, není touto metodou získáno vhodné řešení. Výskyt tohoto problému je pravděpodobnější pro malé populace a malý počet generací. V případě této práce byla však velikost populace natolik rozsáhlá, že bylo pokaždé nalezeno několik vhodných řešení hned od první generace. Druhou možností by bylo modifikovat vztah (85) tak, aby zvýhodňoval řešení s větším počtem svítidel. Vycházíme přitom z předpokladu, že nulový počet svítidel nemůže nikdy splnit požadavky a jakýkoliv vyšší počet svítidel je tudíž lepší.

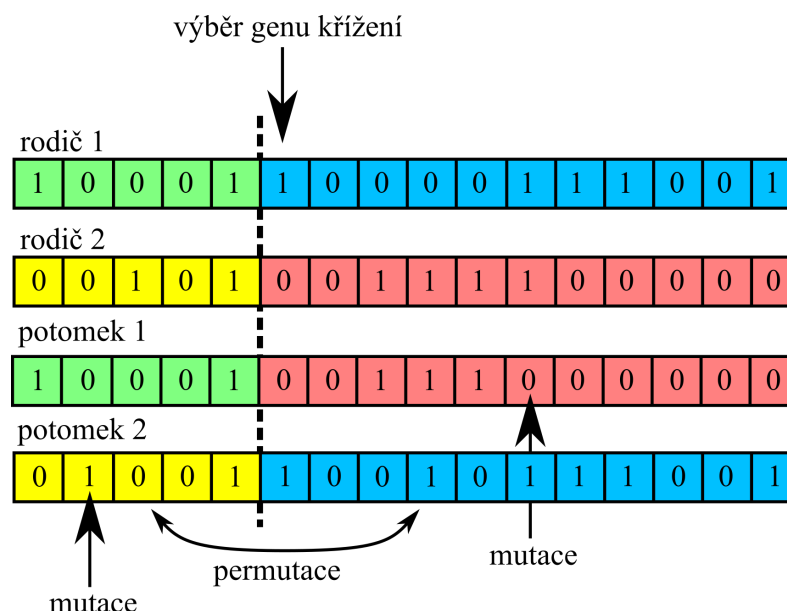
5.6 Realizace algoritmu

Genetický algoritmus byl nastaven tak, že obsahoval v každé generaci 100 jedinců, tj. velikost populace byla 100. První generace byla tvořena jedinci s náhodně generovanými chromozómy podoby binárního vektoru podle obr. 72.

Nejlepší člen populace, tzn. jedinec s nejnižší hodnotou účelové funkce, byl přenesen do další generace ve dvou exemplářích. První byl vždy ponechán nezměněn, takže nejlepší jedinec z populace se pokaždé dostal do další generace bez zásahu do jeho genetického kódu. Tento princip se nazývá elitizmus. Druhý z těchto jedinců mohl být s definovanou pravděpodobností zmutován.

Byly použity dva druhy mutace. První spočíval v inverzi náhodně zvoleného genu chromozómu, tudíž bylo na náhodně vybrané pozici přidáno či ubráno svítidlo. Tato mutace probíhala s pravděpodobností 1 %. Druhý typ mutace spočíval v permutaci chromozómu. Dva náhodně vybrané geny jednoho jedince byly vzájemně prohozeny. Toto prohození mohlo proběhnout až 3×, každé s pravděpodobností 3,5 %. Pravděpodobnost nejméně jedné permutace u každého jedince byla zhruba 10 %. Pomocí permutace nebyl měněn počet svítidel. Změnilo se pouze jejich rozmístění.

Křížení jedinců probíhalo s 90% pravděpodobností. Výběr jedinců pro křížení byl prováděn formou soutěže. V každém výběru byly získáni 4 náhodní jedinci z dané populace, přičemž nejlepší z nich postoupil do procesu křížení. Systém soutěže má oproti ruletě výhodu, že nedochází k tak rychlé konvergenci k dobrým řešením. Neoptimální řešení totiž zajišťují budoucí vývoj populace. Po výběru dvou jedinců zmíněnou metodou soutěže byly zplodeny dva potomci tak, že s pravděpodobností 90 % byl vybrán gen



Obr. 74. Příklad vytváření nového potomka jednobodovým křížením a mutací

v chromozomu rodičů, od kterého proběhlo přehození částí chromozómu dle obr. 74. Na potomky byl dále aplikován proces dříve popsané mutace. Tento postup byl opakován do získání požadovaného počtu jedinců v nové populaci.

Hodnocení každého řešení, tj. každého jedince dané populace, bylo prováděno účelovou funkcí, jejíž vstupy byl počet svítidel daného řešení, průměrná osvětlenost srovnávací roviny a rovnoměrnost osvětlení. Tyto světelně technické veličiny byly získány metodou radiosita (odst. 2.4), kterou jsem implementoval jako skript do softwaru Matlab. Tato metoda zahrnuje do výpočtů mnohonásobné odrazy za užití difuzních povrchů modelové místnosti. Pokud je tedy prováděno těchto výpočtů zpětné vazby mnoho, je vhodné, aby výpočty pro jednoho jedince netrvaly příliš dlouhou dobu. Snížením počtu generací či zmenšením populace lze zrychlit získání konečného výsledku genetického algoritmu, avšak za cenu horších konvergence k optimálnímu řešení. V konečném důsledku se získají obvykle méně kvalitní řešení.

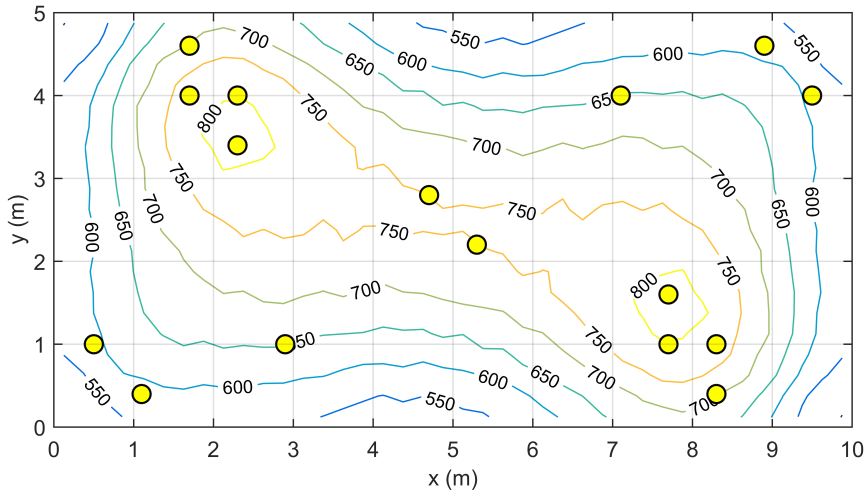
Genetický algoritmus byl ukončován dosažením 25, generace z níž jako výstupní řešení byl prezentován elitní jedinec. Tento počet generací byl nalezen zkusmo, přičemž je dostatečný pro nalezení optimálního výsledku. Celkově bylo tedy prováděno 25×100 výpočtů metodou radiosita.

5.7 Výstupy genetického algoritmu

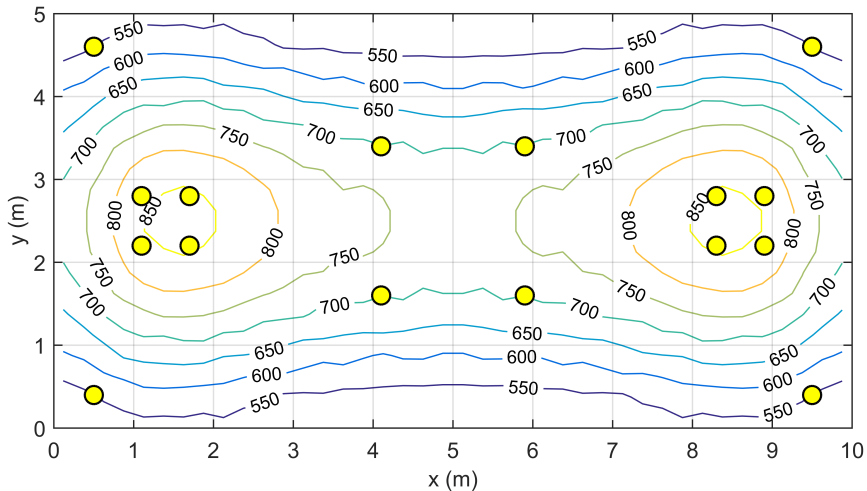
Účelovou funkcí byla hodnocena v průběhu hledání nejlepšího řešení genetickým algoritmem průměrná osvětlenost \bar{E} o hodnotě získané vztahem (83). Na obrázcích v tomto odstavci jsou zobrazeny přímo tyto hodnoty, avšak v tabulkách jsou přepočítány na průměrnou udržovanou osvětlenost \bar{E}_m pro možnost přímého porovnání s požadavky normy [25].

Zadáním totožné hodnoty parametru preference α ve vztahu (86) nezaručuje totožný výsledek návrhu rozmístění svítidel. Proto jsou uvedené vygenerované výsledky pouze jedním z mnoha možných odlišných návrhů.

Na obr. 75 jsou zobrazeny vygenerovaná rozmístění s nastavením parametru preference $\alpha = 0,5$, tzn. s totožnou váhou pro sledovanou průměrnou osvětlenost srovnávací roviny \bar{E} a rovnoměrnost osvětlení srovnávací roviny U_0 .



a) Rozmístění svítidel se středovou symetrií, ozn. V010S0, E (lx)



b) Rozmístění svítidel se osovou symetrií, ozn. V010S1, E (lx)

Obr. 75. Rozmístění svítidel s totožnou preferencí parametrů \bar{E} a U_0 ($\alpha = 0,5$)

V tab. 13 jsou uvedeny hodnoty průměrné udržované osvětlenosti \bar{E}_m a rovnoměrnosti osvětlení U_0 srovnávací roviny modelové místnosti. Algoritmem bylo nalezeno řešení s udržovanou průměrnou osvětleností \bar{E}_m těsně nad minimální povolenou hodnotou normou [25]. Rovnoměrnost osvětlení U_0 byla vyšší o více jak 20% nad minimální vyžadovanou mezí. Dosazením získaných hodnot z vygenerovaných výsledků do vztahu (88) získáme hodnoty R uvedené v tab. 13. Z těchto hodnot je patrná preference rovnoměrnosti výsledného návrhu rozmístění svítidel. Znamená to tedy, že během selekcí řešení přecházejících do dalších generací nebyl k dispozici lépe vyhovující jedinec, anebo byl, ale během procesu

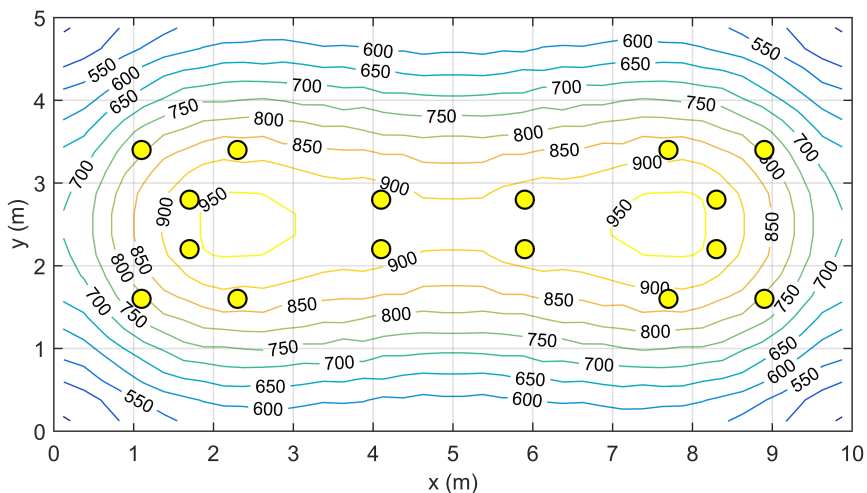
mutace a křížení ztratil svou kvalitu. V tab. 13 je patrná podobnost sledovaných parametrů obou použitých symetrií. Obecně má však středová symetrie větší volnost (přidává do místnosti po dvou svítidlech, osová po čtyřech) a při testování algoritmu na místnostech jiných rozměrů může vykazovat řešení lépe hodnocené účelovou funkcí.

Na obr. 75a) je patrné rozmístění do tvaru písmene **X**. Toto seskupení se objevovalo velice často pro středovou symetrii i pro místnosti jiných rozměrů. Cílová hodnota poměru preference byla zvolena $R_T = 1$, avšak v obou případech symetrií se pohybovala její aktuální hodnota kolem 0,8. Znamená to, že zvýšení rovnoměrnosti osvětlení je jednodušší docílit než vyšší hladiny průměrné osvětlenosti srovnávací roviny. Toto platí pro dané svítidlo. Pro svítidla jiných vyzářovacích charakteristik se hodnoty poměru preference mohou lišit.

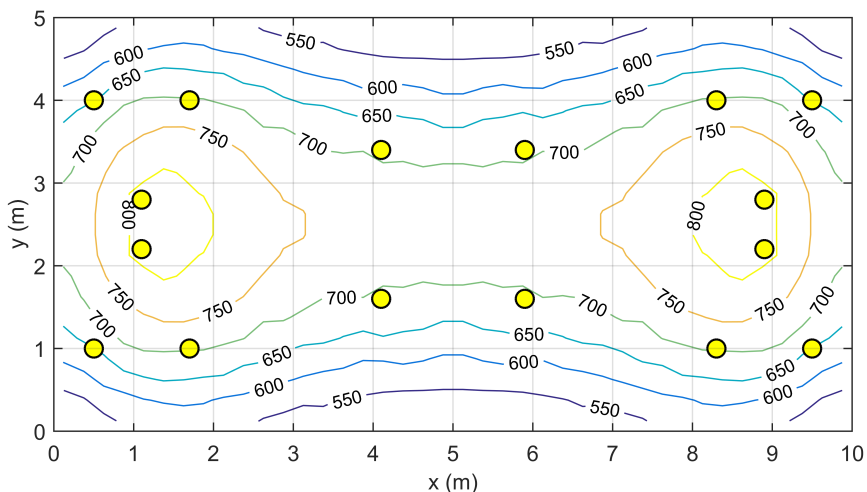
	středová symetrie	osová symetrie
	ozn. V010S0	ozn. V010S1
\bar{E}_m (lx)	501	506
U_0 (-)	0,74	0,74
p_{sv} (-)	16	16
R (-)	0,80	0,82

Tab. 13. Výsledky metody genetického algoritmu bez preference pro středovou a osovou symetrii (obr. 75)

Dále bylo využito metody genetického algoritmu pro získání řešení při nastavení parametru preference $\alpha = 0$ a $\alpha = 1$, tzn. pro hodnocení pouze průměrné osvětlenosti \bar{E} a rovnoměrnosti osvětlení U_0 účelovou funkcí. Výsledná řešení jsou uvedena na obr. 76 a v tab. 14. Jak patrné, rozmístění svítidel si jsou velmi podobná. Při uvažování pouze průměrné osvětlenosti \bar{E} (obr. 76a)) bylo algoritmem vybráno rozmístění se svítidly soustředěnými spíše na podélné ose místnosti, což vedlo ke zvýšení osvětlenosti srovnávací roviny z důvodu větší přímé složky světelného toku dopadající přímo ze svítidel na tuto rovinu, zatímco při uvažování pouze rovnoměrnosti osvětlení U_0 (obr. 76b)) bylo vybráno řešení rovnoměrnějšího rozmístění svítidel v místnosti za cenu menší účinnosti osvětlovací soustavy. V tab. 14 je patrné, že nesledovaný parametr účelovou funkcí výsledného řešení vykazoval minimální povolenou hodnotu, tj. při výběru pouze na základě průměrné osvětlenosti byla rovnoměrnost osvětlení rovna 0,6, kdežto při výběru pouze na základě rovnoměrnosti byla průměrná hodnota osvětlenosti lehce přes 500 lx.



a) Rozmístění svítidel s osovou symetrií s preferencí vyšší hladiny průměrné udržované osvětlenosti \bar{E} , ozn. EV010S1, E (lx)



b) Rozmístění svítidel osovou symetrií s preferencí vyšší rovnoměrnosti osvětlení U_0 , ozn. UV010S1, E (lx)

Obr. 76. Rozmístění svítidel s rozdílnou preferencí parametrů \bar{E} a U_0

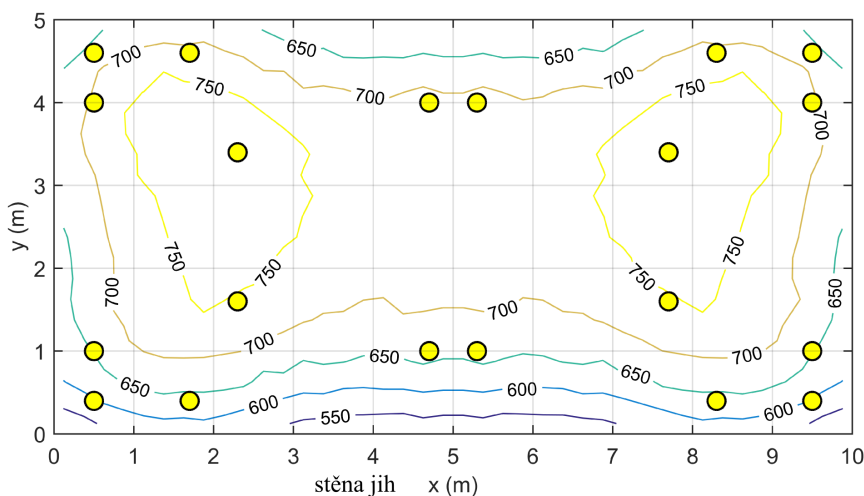
	$\alpha = 0$	$\alpha = 1$
	ozn. EV010S1	ozn. UV010S1
\bar{E}_m (lx)	555	504
U_0 (-)	0,6	0,76
p_{sv} (-)	16	16
R (-)	1,11	0,80

Tab. 14. Výsledky metody genetického algoritmu s různými preferencemi pro osovou symetrii

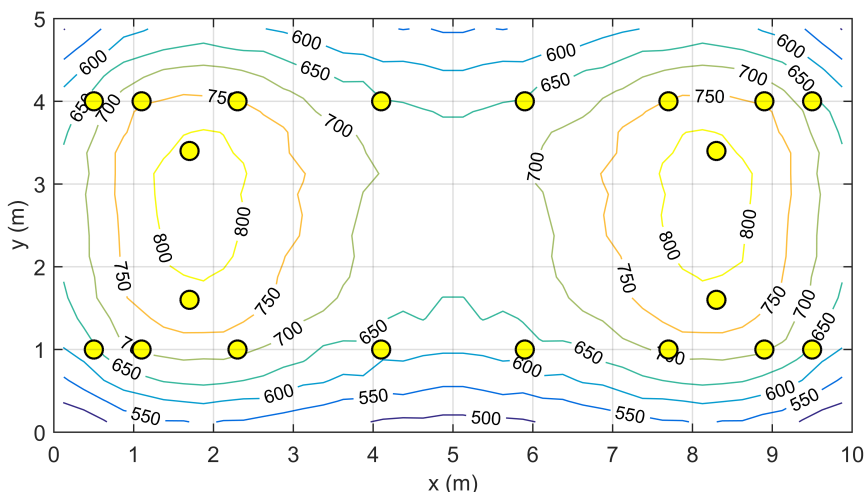
Srovnáním poměrných preferencí R řešení s osově symetrickými rozmístěními svítidel lze dospět k závěru, že nejvyšší hodnoty lze dosáhnout při preferenci pouze co nejvyšší

průměrné osvětlenosti \bar{E} . V případě preference rovnoměrnosti osvětlení U_0 a vyrovnané preference vykazovala řešení poměr preference R o hodnotě okolo 0,8.

Dále byly provedeny simulace pro místnost bez odrazů od jedné stěny a také pro místnost bez veškerých odrazů (pouze svítidla a srovnávací rovina). Na obr. 77 je zobrazen případ, kdy nedocházelo k odrazům od jižní stěny. Na obrázku je patrná tmavší oblast (nižší osvětlenost) na srovnávací rovině v blízkosti této stěny kterou lze považovat za dokonale černou nebo za chybějící. Jelikož v této místnosti docházelo ke ztrátě části světelného toku, vybíral algoritmus s větší pravděpodobností řešení s více svítidly než v předešlých případech (viz tab. 15). Díky zavedené symetrii nebylo možné vytvořit takové řešení, které by na místa s menší osvětleností umístilo zvlášť svítidla.



a) Rozmístění svítidel bez odrazů od jižní stěny, ozn. NSWV010S1, E (lx)



b) Rozmístění svítidel bez odrazů od stěn a stropu, ozn. NR010S1, E (lx)

Obr. 77. Rozmístění svítidel při použití osové symetrie, bez preference ($\alpha = 0,5$)

Na obr. 77b) je patrný návrh rozmístění svítidel pro místnost bez odrazů světla, tj. pro případ osvětlení srovnávací roviny pouze přímou složkou světelného toku ze svítidel. Opět bylo použito podle tab. 15 20 svítidel. Porovnáme-li oba případy uvedené na obr. 77 zjistíme, že celková hladina osvětlenosti pro případ pouze jedné černé stěny (obr. 77a)

je vyšší ve srovnání s případem celé černé místnosti (obr. 77b)). Ubrání jednoho svítidla v chromosomu by však v tomto případě použité osově symetrie vedlo k odebrání 4 svítidel a řešení by nesplnilo minimální požadovanou hodnotu průměrné osvětlenosti.

	černá jižní stěna	bez odrazů
	ozn. NSWV010S1	ozn. NR010S1
\overline{E}_m (lx)	521	509
U_0 (-)	0,75	0,67
p_{sv} (-)	20	20
R (-)	0,83	0,91

Tab. 15. Výsledky metody genetického algoritmu s osovou symetrií bez odrazů od jižní stěny a bez všech odrazů světla

Porovnáním obr. 77a) a obr. 77b) je také patrné rozmístění svítidel pro první případ blíže k podélným stěnám. Je to výsledek snahy algoritmu dosáhnout alespoň minimální rovnoměrnosti osvětlení při nesymetrických odrazných vlastnostech místnosti.

KAPITOLA 6

ZÁVĚR

Disertační práce byla zaměřena na problematiku mnohonásobných odrazů v reálném prostředí, které mají ve vnitřním prostředí významný vliv na světelné prostředí a významně ovlivňují jak parametry osvětlení z pohledu zrakového úkolu, tak celkové osvětlení prostoru, které má vliv na základní adaptaci zrakového systému člověka. V současné době se při světelně technických výpočtech v interiéru zjednodušuje popis odrazných vlastností na popis ideálního difúzního zářiče. Reálný popis odrazných vlastností se využívá téměř výhradě pro vizualizaci světelné scény, která slouží k jejímu zobrazení, ale není určena ke stanovení světelně technických parametrů světelného prostředí. Hlavním cílem práce byl návrh automatizovaného systému pro měření reálných odrazných vlastností a jejich prostorového vyjádření pomocí dvousměrové odrazové distribuční funkce (BRDF). Na nově navrženém automatizovaném systému bylo provedeno měření fotometrických ploch odrazu vybraných vzorků pro různé směry dopadu světelných paprsků. Následně byly údaje o odrazných vlastnostech vybraných materiálů využity při výpočtu světelně technických parametrů reálné světelné scény se zahrnutím mnohonásobných odrazů pro různé metody výpočtu. V závěru práce byly ověřeny možnosti využití genetických algoritmů při návrhu osvětlovacích soustav v prostředí s mnohonásobnými odrazy.

Teoretické přínosy práce

1. Výsledky měření odrazných vlastností reálných povrchů navrženým automatizovaným systémem potvrdily významnou závislost tvaru fotometrických ploch odrazu jak na směru dopadu paprsků na měřený povrch, tak na povrchové úpravě zkoumaného materiálu.
2. Naměřené fotometrické plochy odrazu byly vyjádřeny metodou Klemsových segmentů a byly stanoveny pásmové a průměrné činitele odrazu.
3. Výpočty světelně technických veličin metodami radiosity a sledováním paprsku ve světelné scéně s difúzními povrchy při uvažování mnohonásobných odrazů prokázaly významné rozdíly výsledků v rozsahu desítek procent. Obdobné rozdíly ve výsledcích řešení se projeví i při porovnání výsledků výpočtů s využitím dopředného sledování

paprsku metodou Monte Carlo a výsledků výpočetních programů využívajících metodu radiosity.

4. Z porovnání výsledků výpočtů světelně technických parametrů za předpokladu difúzního a reálného popisu činitelů odrazu vybraných povrchů metodou sledování paprsku byly zjištěny minimální rozdíly (jednotky procent) v průměrných a maximálních hodnotách osvětlenosti a významnější rozdíly (desítky procent) v minimálních hodnotách osvětlenosti, což ovlivňuje rovnoměrnost hladin osvětlenosti.
5. Testování genetického algoritmu pro výpočty reálných scén popsaných dvousměrovými odraznými distribučními funkcemi se ukázalo, při současných možnostech výpočetní techniky a rychlostech řešení, jako nerealizovatelné.

Praktické přínosy práce

1. Návrh nového automatizovaného systému na měření reálných odrazných vlastností materiálů.
2. Zrychlení měření reálných odrazných vlastností materiálů automatizovaným fotometrickým systémem, který umožňuje snadnější studium a analýzu fotometrických ploch odrazu větších souborů různých povrchů.
3. Potvrzení možnosti použití Klemsových segmentů pro vyjádření fotometrických ploch odrazu.
4. Prokázání významných rozdílů při výpočtech osvětlení s mnohonásobnými odrazy metodami radiosity a sledování paprsku, ovlivňující dimenzování osvětlovací soustavy a její energetickou náročnost.
5. Potvrzení možnosti využití genetických algoritmů při návrhu osvětlovacích soustav v prostředí se zjednodušeným difúzním popisem odrazných vlastností materiálů.

Závěry pro další rozvoj vědy a realizaci v praxi

Na základě výsledku předložené disertační práce jsou pro další práci na této problematice doporučena následující témata, která by umožnila danou problematiku dále rozpracovat a přinést další dílčí výsledky pro oblast teorie i praxe.

1. Rozvoj metod a prostředků pro urychlení a zpřesnění popisu reálných odrazných vlastností povrchů.
2. Analýza a rozbor fotometrických ploch odrazu většího počtu vzorku a zjednodušení jejich vyjádření pro aplikaci ve výpočetních programech.
3. Podrobnější analýza vlivu typu osvětlovacích soustav na mnohonásobné odrazy při výpočtech s difúzním a reálným popisem odrazných vlastností materiálů.
4. Další rozpracování okrajových podmínek pro aplikaci genetických algoritmů při návrhu osvětlovacích soustav.

LITERATURA

- [1] HABEL, Jiří. *Světelná technika a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1995. ISBN 80-901985-0-3.
- [2] Elektromagnetické spektrum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-07-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické_spektrum
- [3] DILaura L. DAVID, Kevin W. HOUSER, Richard G. MISTRICK a Gary R. STEFFY. *The Lighting Handbook: Reference and Application*. 10th edition. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011. ISBN 9780879952419.
- [4] JIŘÍ, Žára a Jiří ŽÁRA. *Moderní počítačová grafika*. Brno: Computer Press, 2004. ISBN 8025104540.
- [5] MÁLEK, Jan. *Odrzné vlastnosti světelně činných materiálů*. Praha, 2007. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Habel, DrSc.
- [6] Polarizace odrazem a lomem. *Encyklopedie fyziky* [online]. Praha: Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, ©2006-2016 [cit. 2016-07-06]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/463-polarizace-odrazem-a-lomem>
- [7] Brewsterův úhel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-07-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Brewsterův_úhel
- [8] MIKULČÁK, Jiří, Ladislav KRKAVEC, Bohdan KLIMEŠ a Marie PAUKOVÁ. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. 3. nezměněné vydání. Brno: Státní pedagogické nakladatelství, 1968. SPN 85-16-11.
- [9] BUBNÍK, Lukáš, Jiří KLAJBL a Petr MAZUCH. *Optoelektrotechnika* [online]. 2014 [cit. 2016-07-06]. ISBN 978-80-88058-20-5. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/Impresum.html>
- [10] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.

- [11] BLINN, James F. Models of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures. In: *ACM. 4th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, San Jose, California, 20-22 July, 1977*. New York: ACM, 1977, s. 192-198.
- [12] OREN, Michael a Shree K. NAYAR. Generalization of Lambert's Reflectance Model. In: *21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM, 1994, s. 239-246. ISBN 0-89791-667-0.
- [13] Phong reflection model. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (California): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Phong_reflection_model
- [14] RUSINKIEWICZ, Szymon. A Survey of BRDF Representation for Computer Graphics. In: *Princeton University Department of Computer Science* [online]. Princeton, USA: Princeton University, 1997 [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: <http://www.cs.princeton.edu/smr/cs348c-97/surveypaper.html>
- [15] Radiosity (computer graphics). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiosity_\(computer_graphics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiosity_(computer_graphics))
- [16] TGLTSLBFSSP: Radiosity. *The good-looking textured light-sourced bouncy fun smart and stretchy page* [online]. London: Hugo Elias, 2000 [cit. 2016-06-05]. Dostupné z: <http://freespace.virgin.net/hugo.elias/radiosity/radiosity.htm>
- [17] Photon mapping. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (California): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-06-06]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Photon_mapping
- [18] BÁLSKÝ, Marek. *Analýza procesu mnohonásobných odrazů* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-06-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/60866>. Disertace. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jiří Habel.
- [19] MCNEIL, Andy. GenBSDF Tutorial. In: *Radsite: radiance-online.org* [online]. Berkeley (California), 2015 [cit. 2016-07-22]. Dostupné z: https://www.radiance-online.org/learning/tutorials/Tutorial-genBSDF_v1.0.1.pdf
- [20] HODAČ, David. *Řídicí aplikace pro reflektometr* [online]. Praha, 2014 [cit. 2016-07-18]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/25017>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Rudolf Bayer.
- [21] VLACH, Jaroslav. *Řízení a vizualizace technologických procesů*. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-860-5666-X.

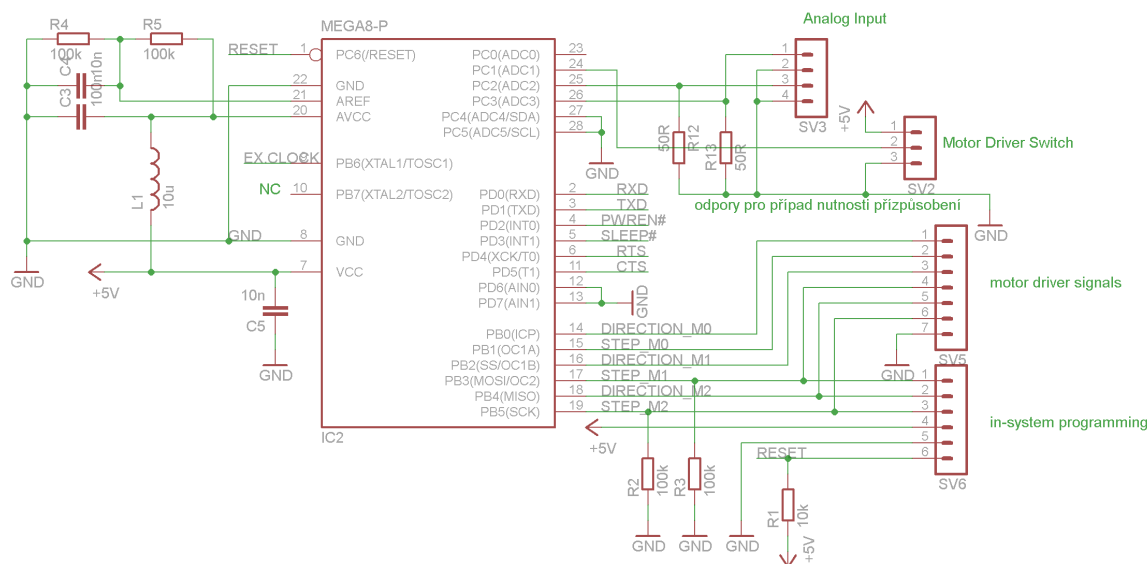
- [22] High-Level Data Link Control. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2016-06-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/High-Level_Data_Link_Control
- [23] VIRIUS, Miroslav. *Metoda Monte Carlo*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04595-4.
- [24] EIBEN, Agoston E. a J. E. SMITH. *Introduction to evolutionary computing*. New York: Springer, 2003. ISBN 3540401849.
- [25] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů: Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012

PŘÍLOHA A

ELEKTRONIKA OPTE-F3K

Jádrum řídicí elektroniky reflektometru je mikroprocesor ATmega8L. Jako převodník ze sériového rozhraní RS-232 tohoto mikroprocesoru na USB je použit integrovaný obvod FT232RL. Po připojení k počítači při užití doporučených knihoven je otevřen virtuální komunikační sériový port. Část převodníku FT232RL a mikroprocesoru ATmega8L je napájena z USB rozhraní. Napájeny jsou pouze nezbytně nutné části tak, aby nedocházelo k nadměrnému odběru proudu z rozhraní USB. Další části řídicí elektroniky jsou opticky odděleny optočleny PC400T, tzn. obvody pro ovládání krokových motorů.

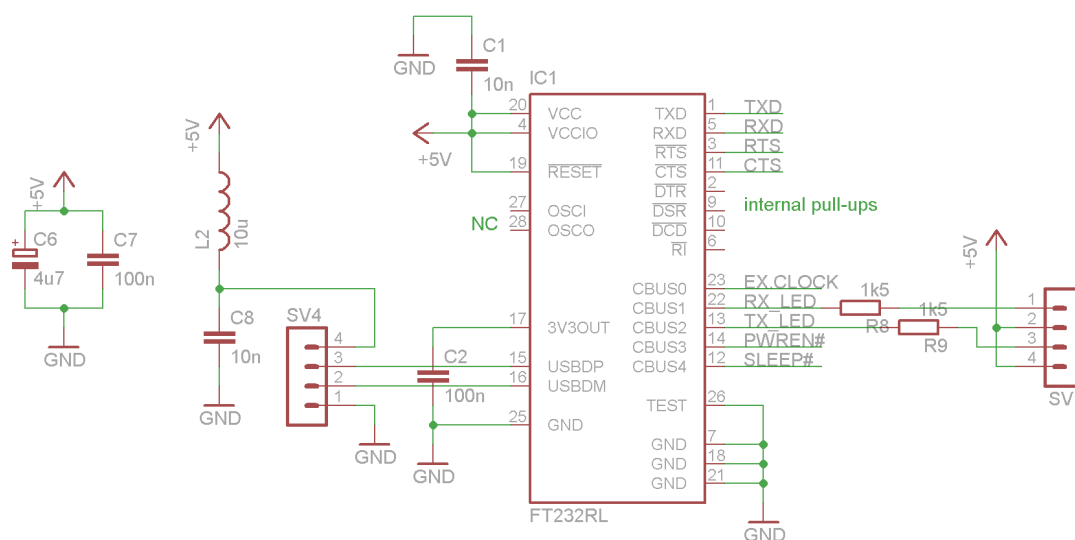
Na obr. 27 je uveden externí síťový stabilizovaný zdroj, který napájí přes 5V stabilizátor napětí dvojice integrovaných obvodů L297 a L298, řídicí napájení vinutí krokových motorů. Vinutí těchto motorů jsou napájena přímo z externího zdroje 9 V. Tento zdroj, sestaven pro původní elektroniku, je dále bez zásahu využíván v nové verzi reflektofotometru.



Obr. 78. Schéma zapojení mikroprocesoru ATmega8L

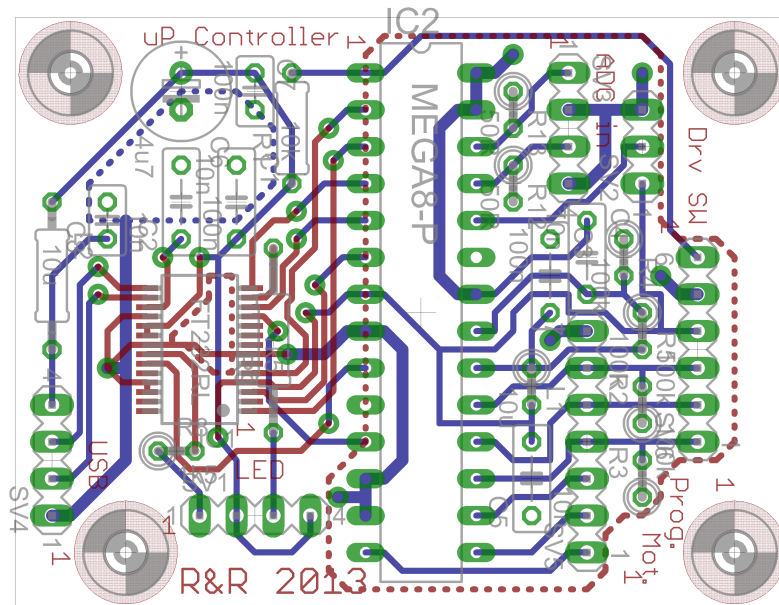
Na obr. 78 je uvedeno schéma zapojení mikroprocesoru ATmega8L. Napájení 5 V je získáno ze sběrnice USB a je filtrováno kondenzátorem C5 a cívkou L1. Hodinový signál je získáván z převodníku FT232RL o frekvenci 6 MHz vstupem PB6. Pro měření jasu je

zvolen vstup PC3 s možností A/D převodu. Vstup PC2 je vyveden také na tentýž konektor pro možnost případného rozšíření. Výstupem PC1 lze vypínat a zapínat napájení vinutí synchronních motorů. Vstup a výstup pro sériovou komunikaci jsou vyvedeny přímo do FT232RL. Řízení motorů je zajištěno výstupy PB0 až PB5. Tyto piny jsou částečně sdíleny s programovacím rozhraním. Každý ze synchronních motorů je ovládán dvojicí signálů směr a krok (v obr. 78 označeno jako DIRECTION_Mx a STEP_Mx, kde x je číselné označení motoru).



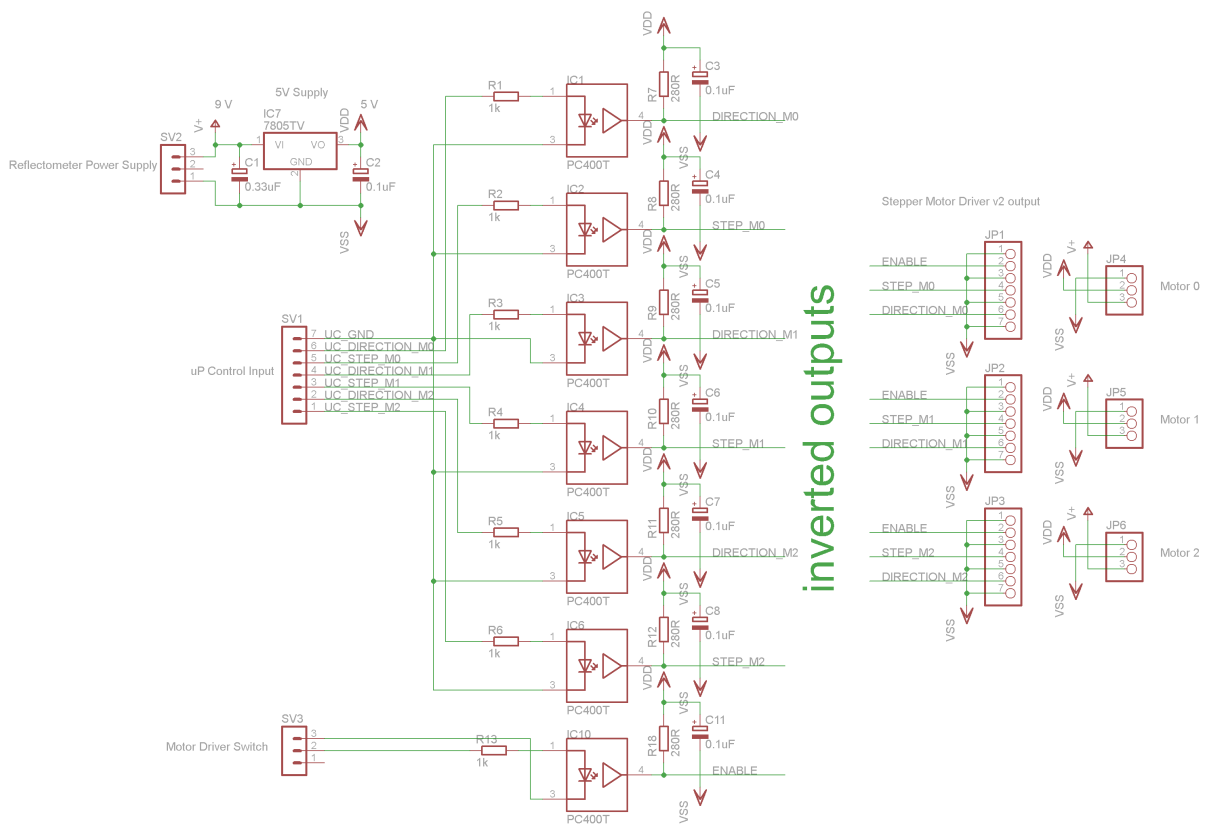
Obr. 79. Schéma zapojení integrovaného obvodu FT232RL pro převod USB na RS-232

Na obr. 79 je uvedeno schéma zapojení převodníku RS-232 na USB FT232RL. Konektor SV4 slouží pro propojení reflektometru s počítačem přes rozhraní USB, konektor SV1 slouží k připojení externích indikačních LED pro signalizaci odchozí a příchozí komunikace po USB rozhraní. Piny pro sériovou komunikaci RS-232 jsou přímo připojeny k mikroprocesoru ATmega8L stejně jako výstupní hodinový signál 6 MHz. Jak mikroprocesor ATmega8L, tak USB převodník FT232RL byly umístěny na společnou desku plošných spojů dle obr. 80. Ve středu plošného spoje se nachází procesor se svým pouzdrem DIL28 s vývody, na obrázku pod ním se nachází převodník USB na RS-232 v SMD pouzdře SOIC s 28 piny.



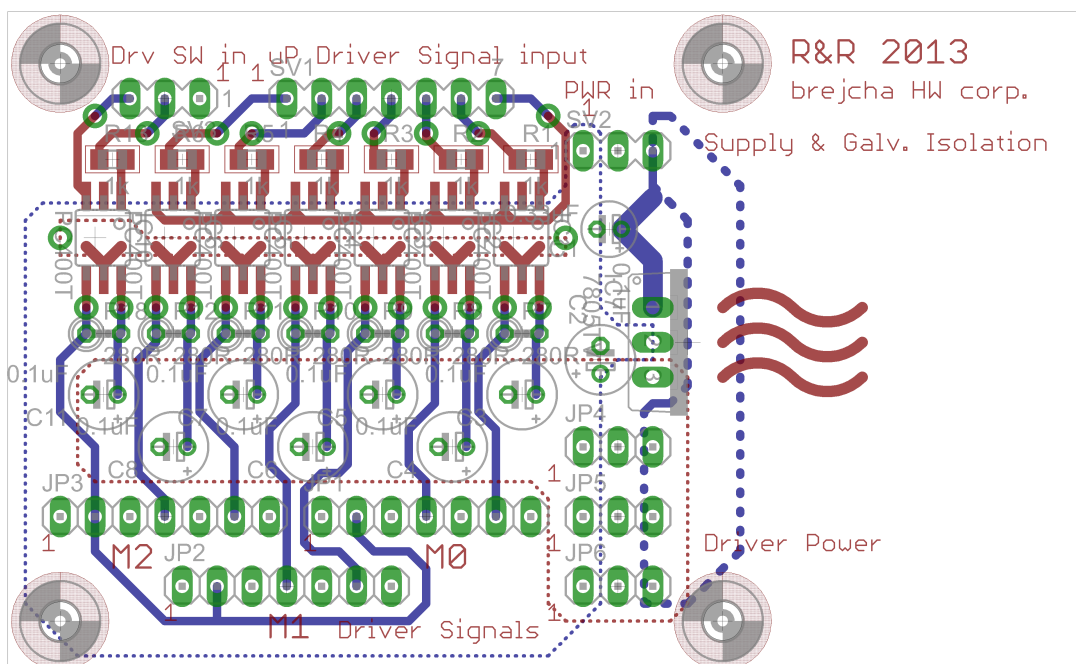
Obr. 80. Návrh plošného spoje řídicího modulu

Část řídicí elektroniky galvanicky oddělující rozhraní pro komunikaci s počítačem je uvedena na obr. 81. Součástí je i stabilizovaný zdroj napětí 5 V, který napájí výstupní část optočlenů PC400T a regulátory krokových motorů. Způsobem zapojení optočlenů jsou výstupy invertovány.



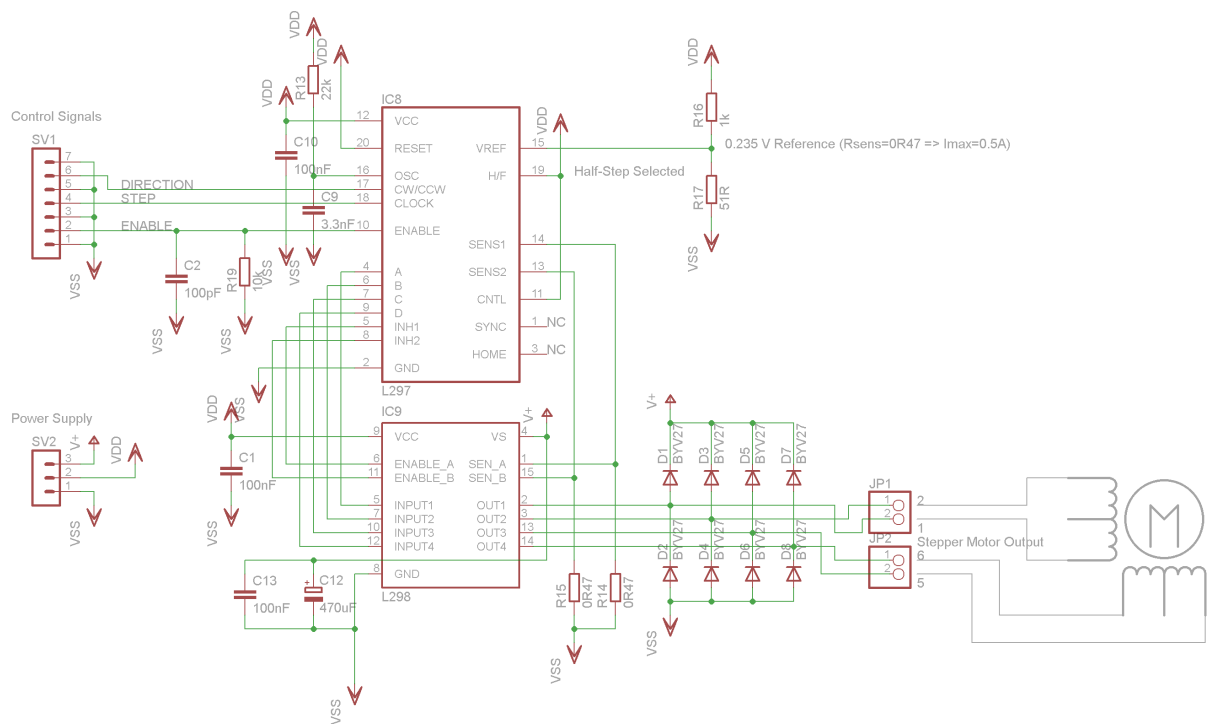
Obr. 81. Schéma zapojení modulu optočlenů PC400T a stabilizátoru napětí 5 V

Na obr. 82 je vpravo ponechána plocha pro položení pouzdra stabilizátoru napětí a odvodu ztrátového tepla do plošného spoje. Ve finální provedení plošného spoje byl mezi desku plošných spojů a součástku vložen hliníkový chladič.



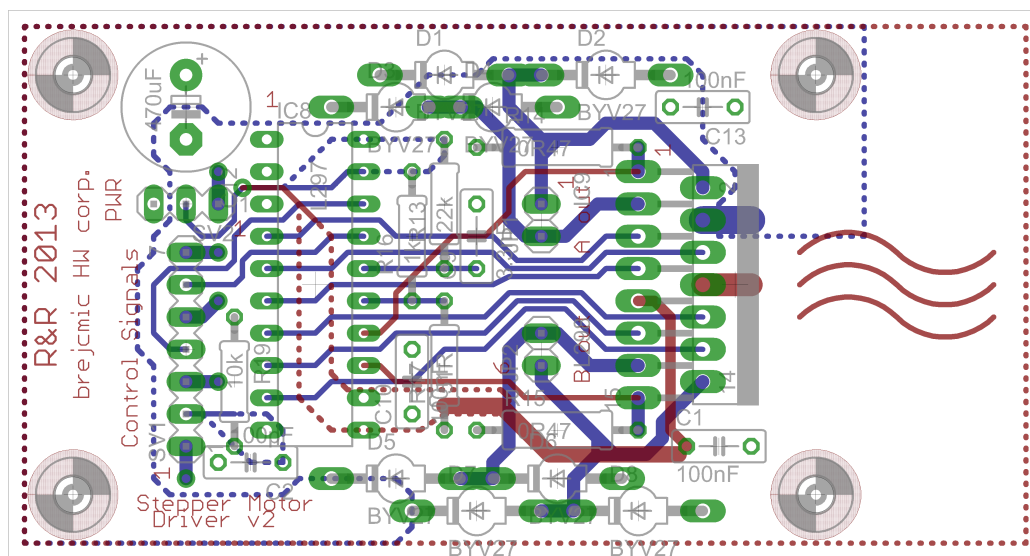
Obr. 82. Návrh plošného spoje modulu optočlenů a stabilizátoru napětí

Na obr. 83 je uvedeno schéma modulu řízení a napájení synchronních motorů. Je osazen regulátorem krokového motoru L297 a H-můstkem L298N. Tato část je v reflektometru zabudována jednou pro každý ze tří synchronních motorů. Do regulátoru L297 jsou přivedeny signály *směr*, *krok* a *napájení vinutí*. Tyto signály jsou zde převedeny přímo na signály pro napájení H-můstku L298N, který připojuje ke svorkám vinutí motoru napětí z externího zdroje 9 V. Pro plynulejší chod motorů je nastaven poloviční krok vstupem H/F regulátoru, tzn. že motory jsou řízeny bipolárně v osmitaktním režimu. Nastavení maximálních proudů vinutími motoru je nastaveno odpory R15 a R14 a nastavením referenčního napětí odpory R16 a R17. Pro potlačení špiček napětí při vypínání napájení vinutí motorů jsou zapojeny diody D1 až D8.



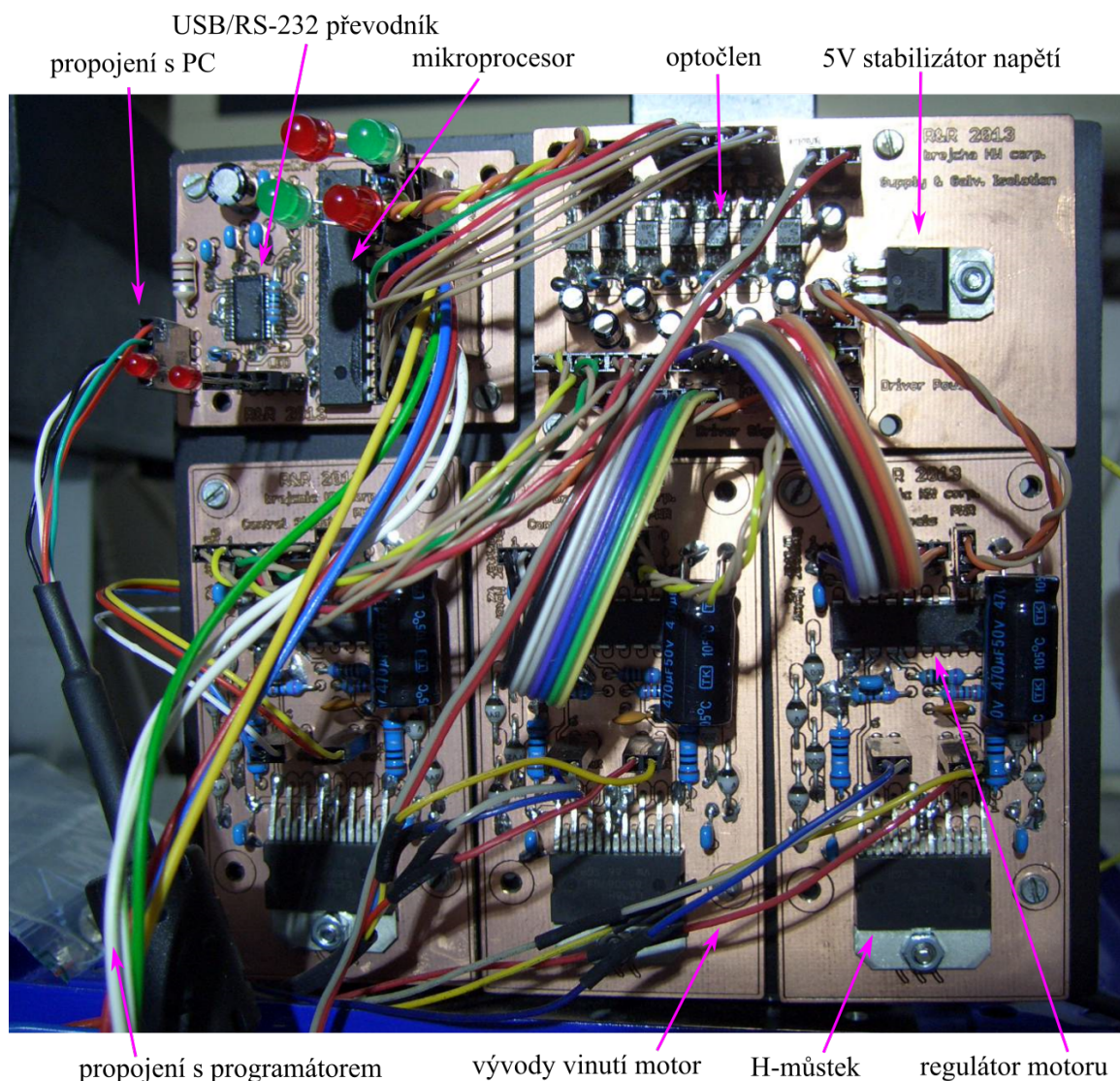
Obr. 83. Schéma zapojení modulu řízení a napájení motoru

Návrh plošného spoje modulu pro řízení a napájení motorů na obr. 84 umožňuje H-můstek L298N položit na volnou plochu na pravé části plošného spoje pro odvod tepla ze součástky do plošného spoje. Pro lepší tepelnou vodivost zde byla ponechána měděná vrstva.



Obr. 84. Návrh plošného spoje modulu řízení a napájení motorů

Na obr. 85 je uvedena fotografie zadní část reflektometru s popisky základních prvků. Důvodem pokrytí větší části povrchů desek plošných spojů měděnou fólií je dáno výrobou těchto desek CNC frézou v laboratoři Katedry elektrotechnologie FEL ČVUT v Praze.



Obr. 85. Fotografie zapojených modulů v OPTE-F3K

A.1 FW pro ATmega8L

Reflektometr je osazen mikroprocesorem ATmega8L, který má za úkol zprostředkovat rozhraní mezi počítačem a krokovými motory, otáčejícím měřeným vzorkem a referenčním světelným zdrojem, a který má dále zprostředkovat rozhraní mezi počítačem a jasoměrem Brüel & Kjær typu 1100. Pro naprogramování firmware pro tento procesor bylo využito vývojové prostředí AtmelStudio za použití programovacího jazyka C (zdrojové soubory firmwaru pro ATmega8L lze nalézt na příloženém CD).

Jako protokol pro linkovou vrstvu byl zvolen protokol HDLC (High-level Data Link Control). Jelikož pro komunikaci reflektometru s počítačem není nutné řešit adresy a kontrolní součet, byl protokol zjednodušen na formu podle tab. 16, kde jsou uvedena použitá pole posílaná chronologicky zleva. Kontrolní součet bylo možno vynechat z důvodu sériové komunikace mezi počítačem a reflektometrem zprostředkované USB rozhraním, které má své vlastní postupy pro ověřování doručených dat. Čistě sériová komunikace se provádí pouze na řídicím modulu mezi převodníkem USB/RS-232 a mikroprocesorem

ATMega8L (viz obr. 78, obr. 79) s minimálním rušením, neboť oba integrované obvody jsou od sebe vzdáleny několik centimetrů.

funkce pole rámce	oddělovač	povel	data	oddělovač
původní délka pole	1 B	1 B	2 B	1 B
délka po zapouzdření	1 B	1, 2 B	2, 3, 4 B	1 B

Tab. 16. Struktura rámce zjednodušeného protokolu HDLC

Každý rámeček (zpráva), posílaný mezi počítačem a procesorem, je ohraničen tzv. oddělovači rámečků [22] (viz tab. 16). Pokud je posíláno několik rámečků za sebou, po sobě jdoucí oddělovače lze vynechat. Obsah nezapouzdřeného rámce je jeden byte pro povel, dva byty pro data. Velikost datového pole byla zvolena na základě potřeby posílat hodnoty vyšší než 2^8 a nižší než 2^{16} . Po zabalení rámce linkovou vrstvou HDLC však mohou být některé znaky zdvojeny (viz dále), proto se může délka obsahu HDLC rámce pohybovat od 3 bytů do 6 bytů v případě, že bude jak povel tak data potřeba ošetřit únikovou sekvencí.

Jelikož protokol HDLC používá oddělovací znaky, je třeba zajistit, aby se v rámci tyto znaky již nemohly opakovat a nedocházelo tak k chybnému oddělování rámečků od sebe. Z tohoto důvodu jsou zavedeny další řídicí vlajky, tzv. únikové znaky (viz tab. 17).

znak	význam	výsledná sekvence v datech
0x7E	oddělovač rámce	0x7D 0x5E
0x7D	únikový znak	0x7D 0x5D

Tab. 17. Únikové sekvence zjednodušeného protokolu HDLC

Pokud je třeba v rámci poslat oddělovač 0x7E, zavede se na jeho místo úniková sekvence 0x7D 0x5E dle tab. 17. Pokud je třeba poslat v rámci znak pro únikovou sekvenci 0x7D, nahradí se tento sekvencí 0x7D 0x5D. Jak si lze všimnout, dochází u nahrazovaného znaku vždy k inverzi 5. bitu (pokud je 7. bit nejvýznamnější bit daného bytu), tedy $0x7E \rightarrow 0x5E$ a $0x7D \rightarrow 0x5D$.

Komunikace počítače s reflektometrem, kdy iniciátorem komunikace je počítač, probíhá s potvrzením každého doručeného rámce rámečkem obsahujícím povel *OK* či rámečkem s vyžadovanými daty (viz tab. 18). Pověly poslané na popud reflektometru, tj. *naživu* a *cíl dosažen*, na potvrzení nečekají. Pokud obsah rámce přijatého reflektometrem je v pořádku, data však nedávají smysl či z jiného důvodu nelze příkaz provést, je poslána odpověď počítači obsahující povel *vnitřní chyba*. Tento rámeček slouží pouze pro řešení chyb firmwaru mikroprocesoru a při provozu by se neměl objevovat při komunikaci. Pokud byla nalezena chyba v rámci (např. nedovolená souslednost po sobě následujících bytů dáno zapouzdřením HDLC), je reflektometrem vyslána odpověď *chyba* kterou je vyžadováno opětovné poslání rámce.

V tab. 18 jsou uvedeny příkazy s použitým datovým polem. Pokud jde o dotaz, datové pole bude prázdné. Vezměme například rámeček dotazu na číslo verze firmwaru odeslaného

povel	hodnota	data	zdroj	poznámky
obecné příkazy				
chyba	0x00	-	<i>R</i>	chybný přijatý rámec
vnitřní chyba	0x01	-	<i>R</i>	po přijetí rámce
OK	0x02	-	<i>R</i>	potvrzení přijetí rámce
naživu	0x03	-	<i>PC,R</i>	echo
verze	0x04	číslo verze	<i>PC</i>	verze firmwaru reflekt.
napětí	0x05	hodnota napětí	<i>PC</i>	AD převod z jasoměru
příkazy motorů				
napájení vyp.	0x80	-	<i>PC</i>	napájení motorů
napájení zap.	0x84	-	<i>PC</i>	napájení motorů
goto	0x88 M	cílová poloha	<i>PC</i>	pohyb motoru <i>M</i> $M \in \{0, 1, 2\}$
stop	0x8C M	-	<i>PC</i>	zastavit motor <i>M</i> $M \in \{0, 1, 2, 3\}$
vyčíst polohu	0x90 M	aktuální poloha	<i>PC</i>	poloha motoru <i>M</i> $M \in \{0, 1, 2\}$
nastavit polohu	0x94 M	aktuální poloha	<i>PC</i>	poloha motoru <i>M</i> $M \in \{0, 1, 2\}$
cíl dosažen	0x98 M	-	<i>R</i>	cílová poloha dosažena $M \in \{0, 1, 2\}$
<i>M</i> určuje motor (0 pro motor <i>M</i> 0, 1 pro <i>M</i> 1, 2 pro <i>M</i> 2, 3 pro všechny motory) zdroj <i>PC/R</i> - zdrojem příkazu může být počítač / reflektometr				

Tab. 18. Přehled příkazů podporovaných FW reflektofotometru

počítačem, kdy pole *data* bude prázdné. V odpovědi reflektofotometru již pole *data* vyplněno bude příslušným číslem verze, pokud nebyla nalezena chyba v rámci. V opačném případě bude odeslána reflektometrem povel *chyba*. Odpověď tak slouží jako potvrzení doručení rámce a již nebude reflektometrem odeslán rámec *OK*. Totéž platí pro rámce s povely *napětí* a *vyčíst polohu*, kdy pole *data* obsahuje příslušné odpovědi. Na rámec *naživu* z počítače bude odpověď reflektometru *naživu*. Na ostatní povely, jejichž iniciátorem je počítač podle tab. 18 odpoví reflektometr vždy pouze potvrzujícím rámcem *OK* či chybovým rámcem *chyba*.

Při nastavování polohy a používání příkazu *goto* je třeba respektovat rozsahy možných nastavitelných úhlů jednotlivých motorů v krocích dle tab. 5.

Ing. Rudolf Bayer – publikační činnost

Seznam publikací vztahujících se k disertační práci

Publikace v impaktovaných časopisech (excerpované WOS):

[L1] Bálský, M.; Bayer, R.: Comparison of real street lighting with sodium lamps and LEDs. In: Przegląd Elektrotechniczny, vol. 2011, no. 04, pp. 17 - 19, 2011. ISSN 0033-2097. 50 %

Publikace ostatní

[L2] Zálešák, J.; Habel, J.; Bayer, R.: Hodnocení energetické náročnosti navržených osvětlovacích soustav. In: Světlo, vol. 18, no. 2, pp. 48-49, 2015. ISSN 1212-0812. 33,33 %

[L3] Bayer, R.; Brejcha, M.; Panskám Z. et. al.: Road lighting design by means of genetic algorithm. In: 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2015. ISBN 978-1-4673-6788-2. 25 %

[L4] Bayer, R.; Brejcha, M.: Luminous Intensity Distribution Curve Effect on Luminaire Placement. In: Proceedings of the 21st International Conference LIGHT SVĚTLO 2015. 2015. ISBN 978-80-214-5244-2. 50 %

[L5] Bayer, R.: Modernizace reflektometru OPTE-F3K. In: Proceedings of ELEN 2014. 2014. ISBN 978-80-01-05654-7. 100 %

[L6] Bayer, R.: Automatizovaný systém měření činitele odrazu. In: Kurz osvětlovací techniky XXX. 2013. ISBN 978-80-248-3173-2. 100 %

[L7] Bayer, R.; Zálešák, J.: Improving Measurements with OPTE - F3K. In: Electric Power Engineering 2013. 2013. ISBN 978-80-248-2988-3. 50 %

[L8] Bálský, M.; Bayer, R.: Analýza odrazných vlastností materiálů pro interiéry. In: Kurz osvětlovací techniky XXIX. 2012. ISBN 978-80-248-2832-9. 50 %

Seznam ostatních publikací

[L9] Bayer, R.: Luminous Flux Decrease Measurements of LED Street Lighting over Time. In: LUMEN V4 2014. 2014. ISBN 978-963-9299-21-4. 100 %

[L10] Zálešák, J.; Habel, J.; Bayer, R.: Hodnocení energetické náročnosti navržených osvětlovacích soustav. In: Technika osvětlování XXVI. 2014. 33,33 %

[L11] Pelánová, Z.; Zálešák, J.; Pavloušek, J. et al.: Osvětlenost vertikální nezacloněné roviny. In: Kurz osvětlovací techniky XXXI. 2014. ISBN 978-80-248-3553-2. 25 %

[L12] Bálský, M.; Drábek, T.; Bayer, R.: Robotická jednotka pro měření osvětlenosti v interiérech. In: Kurz osvětlovací techniky XXXI. 2014. ISBN 978-80-248-3553-2. 33,33 %

[L13] Bayer, R.: Analýza spekter světelných diod. In: Technika osvětlování XXV. 2012. 100 %

- [L14] Bálský, M.; Bayer, R.; Zálešák, J.: Methods for evaluation of lighting systems energy performance. In: ELEN 2012. 2012. ISBN 978-80-01-05096-5. 33,33 %
- [L15] Bayer, R.; Bálský, M.; Musálek, L.: Metody určení přímé a nepřímé složky slunečního záření. In: IV Lighting Conference of the Visegrad Countries. 2012. ISBN 978-80-89275-32-8. 33,33 %
- [L16] Bayer, R.; Bálský, M.: Use of direct and indirect components of solar radiation in photovoltaics. In: Light Světlo 2011. 2011. ISBN 978-80-248-2480-2. 50 %
- [L17] Brejcha, M.; Černek, P.; Bayer, R. et al.: Technologie konstrukce odrušovacích filtrů I: Analýza příčin chyb ve frekvenční charakteristice. In: Elektrověda, vol. 2011, no. 65, pp. 1 - 15, 2011. ISSN 1213-1539. 10 %
- [L18] Bayer, R.; Brejcha, M.: Simple Adaptive Control for a Single Phase Shunt Active Filter. In: Applied Electronic 2011. 2011. ISBN 978-80-7043-987-6. 50 %
- [L19] Brejcha, M.; Bayer, R.: Detekce průchodů nulou pomocí adaptivního filtru pro základní harmonickou frekvenci. In: Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. 2011. ISBN 978-80-248-2393-5. 50 %
- [L20] Bayer, R.: Gofosoft4. In: POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. 2010. ISBN 978-80-01-04544-2. 100 %
- [L21] Bálský, M.; Bayer, R.: Comparison of real street lighting with sodium lamps and LEDs. In: 3rd Conference of the Visegrad Countries on Lighting. 2010. ISBN 978-80-248-2247-1. 50 %
- [L22] Bayer, R.: Software support for measuring luminous intensity distribution curves - GOFOSOFT4. In: Electronic Devices and Systems, IMAPS CS International Conference 2010 Proceedings. 2010. ISBN 978-80-214-4138-5. 100 %
- [L23] Habel, J.; Bayer, R.; Bálský, M.: Softwarová podpora měření čar svítivosti na goniofotometru. In: Technika osvětlování XXIV. 2010. ISBN 978-80-7043-879-4. 33,33 %
- [L24] Bayer, R.; Brejcha, M.: DETEKCE PRŮCHODŮ NULOU V SÍTI S VYSOKOU MÍROU RUŠENÍ. In: Sborník konference ELEN 2010. 2010. ISBN 978-80-254-8089-2. 50 %

Ohlasy

Citace [L1] v impaktovaném článku: Uddin Sohel, Shareef Hussain, Mohamed Azah et al.: Harmonics and thermal characteristics of low wattage LED lamps. In: Przegląd Elektrotechniczny. 2012, roč. 2012, č. 11a, s. 266-271. ISSN 0033-2097.

K publikacím [L2] až [L17] nejsou zaznamenány ohlasy.