



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

SIMULACE VLIVU NEUNIFORMITY VNITŘNÍHO POVRCHU KULOVÉHO INTEGRÁTORU NA VÝSLEDKY MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO TOKU V PROGRAMU ANSYS SPEOS

THE SIMULATION OF INFLUENCE OF NONUNIFORMITY OF THE INNER SURFACE ON THE MEASURED
LUMINOUS FLUX IN PROGRAM ANSYS SPEOS.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Winkler

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Miroslav Winkler

ID: 203507

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Simulace vlivu neuniformity vnitřního povrchu kulového integrátoru na výsledky měření světelného toku v programu Ansys SPEOS

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše fotometrických veličin
2. Důkladná rešerše kulových integrátorů se spektrometrií
3. Tvorba základního modelu v programu Ansys SPEOS
4. Simulace vlivu neuniformity vnitřního povrchu a vnitřního uspořádání kulového integrátoru na chyby měření bodových světelných zdrojů
5. Teoretický návrh modifikace kulového integrátoru za účelem snížení nejistoty měření; výpočet korekce naměřených hodnot světelného toku

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá principem fungování a vlastnostmi kulového integrátoru, vytvoření modelů kulového integrátoru dle reálné předlohy umístěné ve světelné laboratoři fakulty a prováděním simulací na vytvořených modelech za účelem zjištění vlivu konstrukčních změn na uniformitu měření. V úvodu práce je uveden souhrn teorie fotometrických veličin, následuje kapitola věnovaná problematice kulových integrátorů, jejich teorii a provedení. Třetí kapitola se věnuje provedení modelů v programu ANSYS SPEOS a poslední kapitola vyhodnocuje dosažené výsledky a navrhuje možná vylepšení stávajícího přístroje.

Klíčová slova

Fotometrické veličiny; kulový integrátor; princip kulového integrátoru; provedení kulového integrátoru; model kulového integrátoru; ANSYS SPEOS

Abstract

Master's thesis deals with the principle of function and properties of integrating spheres and creating models of integrating spheres according to a real model located in light laboratory of faculty. The thesis starts with a summary of theory of photometric quantities, followed by a chapter focusing on integrating spheres, their theory and design, following chapter deals with the implementation of integrating sphere models in ANSYS SPEOS program and the thesis ends with a summary of outcomes generated by the simulations and presents possible improvements to the current integrating sphere.

Keywords

Photometric quantities; integrating sphere; theory of integrating sphere; design of integrating sphere; model of integrating sphere; ANSYS SPEOS

Bibliografická citace

WINKLER, Miroslav. Simulace vlivu neuniformity vnitřního povrchu kulového integrátoru na výsledky měření světelného toku v programu Ansys SPEOS [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151328>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Motyčka.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Miroslav Winkler</i>
VUT ID studenta:	<i>203507</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/23</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Simulace vlivu neuniformity vnitřního povrchu kulového integrátoru na výsledky měření světelného toku v programu Ansys SPEOS</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 17. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Motyčkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 17. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. FOTOMETRICKÉ VELIČINY.....	14
1.1 SVĚTELNÝ TOK.....	14
1.2 PROSTOROVÝ ÚHEL	15
1.3 EKVIVALENTNÍ PROSTOROVÝ ÚHEL.....	16
1.4 SVÍTIVOST	16
1.5 OSVĚTLENOST	17
1.6 JAS	18
1.7 SVĚTELNĚ-TECHNICKÉ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ	18
1.8 PARAMETRY A VLASTNOSTI SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	19
1.8.1 Náhradní teplota chromatičnosti	19
1.8.2 Měrný výkon.....	20
1.8.3 Obecný index podání barev.....	21
2. KULOVÉ INTEGRÁTORY	22
2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	23
2.2 PRINCIP	23
2.2.1 Rovnice záře.....	25
2.2.2 Konstanta kulového integrátoru (multiplikační koeficient).....	26
2.2.3 Výsledný zářivý tok uvnitř kulového integrátoru.....	27
2.2.4 Časová konstanta kulového integrátoru.....	28
2.3 PROVEDENÍ KULOVÉHO INTEGRÁTORU.....	29
2.3.1 Průměr kulového integrátoru.....	29
2.3.2 Výběr odrazivého materiálu vnitřního povrchu integrátoru	30
2.3.3 Clony a zorné pole detektoru	32
2.3.4 Uniformita povrchu kulového integrátoru	32
3. MODEL KULOVÉHO INTEGRÁTORU V PROGRAMU ANSYS SPEOS	35
3.1 PARAMETRY	35
3.1.1 Základní korpus	39
3.2 PRVNÍ VERZE MODELU	43
3.2.1 Úvod.....	43
3.2.2 Modelace.....	43
3.2.3 Světelný zdroj.....	45
3.2.4 Vlastnosti materiálů jednotlivých komponent	47
3.2.5 První kontrolní simulace a vyladění chyb.....	49
3.2.6 Určení nastavení množství paprsků	50
3.2.7 Počet simulací v jedné sérii	51
3.3 DRUHÁ VERZE MODELU.....	54
3.3.1 Provedené změny	54
3.3.2 Modelace změn.....	54
3.3.3 Materiálové vlastnosti přidávaných a upravených prvků	54

3.4	TŘETÍ VERZE MODELU	56
3.4.1	<i>Provedené změny</i>	56
3.5	ČTVRTÝ MODEL.....	56
3.5.1	<i>Provedené změny</i>	56
3.6	ZÁVĚREČNÉ POZNÁMKY.....	56
4.	VÝSLEDKY SIMULACÍ	57
4.1	PRVNÍ SÉRIE SIMULACÍ.....	57
4.1.1	<i>Výsledky první série simulací</i>	57
4.2	DRUHÁ SÉRIE SIMULACÍ.....	59
4.2.1	<i>Výsledky druhé série simulací</i>	59
4.3	TŘETÍ SÉRIE SIMULACÍ.....	62
4.3.1	<i>Výsledky třetí série simulací</i>	62
4.4	ČTVRTÁ SÉRIE SIMULACÍ.....	64
4.4.1	<i>Výsledky čtvrté série simulací</i>	64
4.5	PROBLEMATIKA REÁLNÉHO MĚŘENÍ A SOUČASNÉHO STAVU KULOVÉHO INTEGRÁTORU	70
4.6	VYHODNOCENÍ SIMULACÍ.....	70
4.7	NÁVRH MODIFIKACÍ	71
4.7.1	<i>Teoreticky proveditelné změny</i>	71
4.7.2	<i>Obnova nátěru</i>	71
4.7.3	<i>Změna velikosti hlavní clony</i>	71
4.7.4	<i>Závěrečná doporučení</i>	72
4.7.5	<i>První varianta</i>	72
4.7.6	<i>Druhá varianta</i>	72
4.7.7	<i>Třetí varianta</i>	73
4.7.8	<i>Návrhy k metodice měření tzv. bodových zdrojů</i>	73
5.	ZÁVĚR.....	74
	LITERATURA.....	75
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Průběhy poměrné spektrální světelné účinnosti záření pro různé adaptační jasy La [1]	15
Obr. 2: Vymezení prostorového úhlu na kulové ploše [3]	15
Obr. 3: Soustavy C- γ , B- β a A- α [1]	17
Obr. 4: Příklady křivek svítivosti (1,2 - LED svítidla veřejného osvětlení; 3,4 - LED parková svítidla; 5 - LED reflektor; 6 - interiérové LED svítidlo).....	17
Obr. 5: Vzájemný vztah světelného toku, svítivosti, osvětlení a jasu	18
Obr. 6: Náhradní teplota chromatičnosti – vizuální příklad [10]	19
Obr. 7: Souřadnicový systém chromatičnosti podle CIE 1931 [4].....	19
Obr. 8: Příklad rozdílu v indexu podání barev [6]	21
Obr. 9: Příklad výstupu z měření v kulovém integrátoru Lisun LMS-7000	22
Obr. 10: Doplnující grafika ke vzorci (2.1)	24
Obr. 11: Doplnující grafika ke vzorci (2.3)	24
Obr. 12: Pomocná ilustrace.....	25
Obr. 13: Graf závislosti konstanty kulového integrátoru na odraznosti povrchu pro různé poměry ploch pracovních otvorů vůči celkové ploše integrátoru [7, upraveno]	27
Obr. 14: Graf závislosti poměrné záře na počtu odrazů pro různé kombinace hodnot odraznosti (p) povrchu a poměru ploch pracovních otvorů (f) vůči celkovému povrchu integrátoru [7, upraveno]	28
Obr. 15: Závislost poměrné záře na odraznosti pro různé průměry (D_s (m)) kulového integrátoru [7, upraveno]	30
Obr. 16: Graf poměrné odraznosti materiálů Spectralon a Spectralect na vlnové délce [7, upraveno]	31
Obr. 17: Graf závislosti poměrného nárůstu záře a odraznosti na vlnové délce [7, upraveno].....	31
Obr. 18: Příklad optického systému kulového integrátoru s externí čočkou a fotodetektozem.....	32
Obr. 19: Uvažovaný systém kulového integrátoru se zdrojem paralelních paprsků, clonou a detektorem [9, upraveno].....	33
Obr. 20: Příklad průběhu funkce SRDF v 3D zobrazení [9, upraveno]	34
Obr. 21: Fotodokumentace – levá, pohyblivá, polokoule s hlavní clonou a pravá, nepohyblivá polokoule s vedlejší clonou kulového integrátoru.....	35
Obr. 22: Fotodokumentace – hlavní clona zakrývající pracovní otvor pro detektor spektrometru a vedlejší clona pomocné žárovky	36
Obr. 23: Fotodokumentace – skoba a elektrický přívod	36
Obr. 24: Fotodokumentace – skoba pro zavěšení svítidel a elektrický přívod – detail	37
Obr. 25: Fotodokumentace – detail dna – záslepka ve dně a teplotní čidlo	37
Obr. 26: Fotodokumentace – detail defektu pláště pohyblivé polokoule	38
Obr. 27: Rozměry první polokoule s hlavní clonou.....	40
Obr. 28: Rozměry druhé polokoule s vedlejší clonou.....	41
Obr. 29: Upřesnění polohy skoby pro zavěšení svítidel.....	42
Obr. 30: Interpolovaný výstup – povrchový graf kulového integrátoru [5]	43
Obr. 31: Otvor pro detektor spektrometru krytý plexisklem.....	44
Obr. 32: Provedení zploštění stěny 1. polokoule – pohled zezadu, drátový model	45
Obr. 33: Model skoby a jejího uchycení.....	45
Obr. 34: Model světelného zdroje.....	46
Obr. 35: Umístění světelného zdroje v prostoru simulovaného kulového integrátoru – nastavení pro simulaci "C250 g130"	47
Obr. 36: Výsledný odraz paprsku dopadajícího pod úhlem 35° na povrch s nastaveným 100% Lambertovským odrazem.....	48

Obr. 37: Výsledný odraz paprsku dopadajícího pod úhlem 35° od povrchu s nastaveným 100% Gaussovským odrazem s rozsahem distribuce 25°	48
Obr. 38: Umístění výpočtové plochy	50
Obr. 39: Zobrazení směřování světelných zdrojů jednotlivých simulací	52
Obr. 40: 3D zobrazení prvního modelu	53
Obr. 41: Díra a ucpávka v dolní části a díra v horní části druhé polokoule	55
Obr. 42: Defekt pláště	55
Obr. 43: Grafické znázornění výsledků první série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx.....	66
Obr. 44: Grafické znázornění výsledků druhé série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx.....	67
Obr. 45: Grafické znázornění výsledků třetí série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx.....	68
Obr. 46: Grafické znázornění výsledků čtvrté série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx.....	69

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Přehled měrných výkonů dostupných světelných zdrojů (2019) [5].....	20
Tabulka 2: Tabulka naměřených rozměrů pro modelaci kulového integrátoru pro základní korpus.....	39
Tabulka 3: Výsledky první série simulací.....	57
Tabulka 4: Porovnání normovaných hodnot první série simulací s měřením VUT.....	58
Tabulka 5: Výsledky druhé série simulací.....	59
Tabulka 6: Porovnání normovaných hodnot druhé série simulací s měřením VUT.....	60
Tabulka 7: Porovnání druhé série simulací s měřením na VUT a s první sérií simulací.....	61
Tabulka 8: Výsledky třetí série simulací.....	62
Tabulka 9: Porovnání normovaných hodnot třetí série simulací s měřením VUT.....	63
Tabulka 10: Výsledky čtvrté série simulací.....	64
Tabulka 11: Porovnání normovaných hodnot čtvrté série simulací s měřením VUT.....	65

ÚVOD

Diplomová práce si klade za cíl seznámit čtenáře s problematikou kulových integrátorů z jejich fyzikálního hlediska a s možnostmi jejich reálného provedení. Dalším cílem práce je vytvoření modelu kulového integrátoru na základě reálného přístroje v laboratoři světelné techniky v programu ANSYS SPEOS, který slouží k simulacím vlivu změn jeho konstrukčních parametrů na přesnost měření.

Práce je členěna do čtyř kapitol. První kapitola se věnuje krátkému zopakování fotometrických veličin. Následuje kapitola věnovaná fyzikálnímu principu a možnostech provedení kulového integrátoru. Třetí kapitola se věnuje modelu kulového integrátoru a nastavení simulací. Čtvrtá kapitola je věnována shrnutí výsledků simulací a jejich porovnáním mezi sebou a s reálným měřením, závěr kapitoly je věnován zhodnocení získaných poznatků a nabízí doporučení pro možné úpravy dosavadního provedení kulového integrátoru.

1. FOTOMETRICKÉ VELIČINY

Pro lepší přehlednost a pochopení této práce si přiblížíme světelně technické parametry, které vychází z následujícího poznání. Pro proces vidění není důležitá energie vyzářená světelnými zdroji za určitý čas, rozhodující je výkon světelného zdroje a jeho prostorové rozdělení. Z tohoto důvodu se neposuzují energetické veličiny, ale fotometrické pojmy a veličiny, které respektují různou citlivost oka na různé vlnové délky záření.

Obecně je zraková schopnost každého člověka různá a mění se postupně s věkem a opotřebením oka. Aby se dosáhlo jednotnosti světelně technických výpočtů, byl zaveden tzv. normální fotometrický pozorovatel.

V následujících podkapitolách jsou vypsány jednotlivé fotometrické veličiny a jejich definice. Značná část informací k fotometrickým veličinám je převzata z [1].

1.1 Světelný tok

Světelný tok odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem, respektive kolik světelné energie vyzáří zdroj do okolí. Jedná se o světelně technickou veličinu s označením ϕ a jednotkou lumen (lm).

Světelný tok monochromatického záření o vlnové délce λ a zářivém toku ϕ_e se určí podle vztahu:

$$\phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; -; \text{W}) \quad (1.1)$$

Kde $K(\lambda)(\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$ je světelný účinek monochromatického záření rovný poměru světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku. Rovněž se dá tato veličina vyjádřit součinem maximální hodnoty spektrálního průběhu veličiny a poměrné světelné účinnosti monochromatického záření:

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda)$$

Maxima $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ je dosaženo na vlnové délce $\lambda = 555,0155 \text{ nm}$. Vysvětlení a souvislosti jsou důkladněji popsány v [1].

Zářivý tok ϕ_e představuje celkovou energii vyzářenou monochromatickým zdrojem za jednotku času:

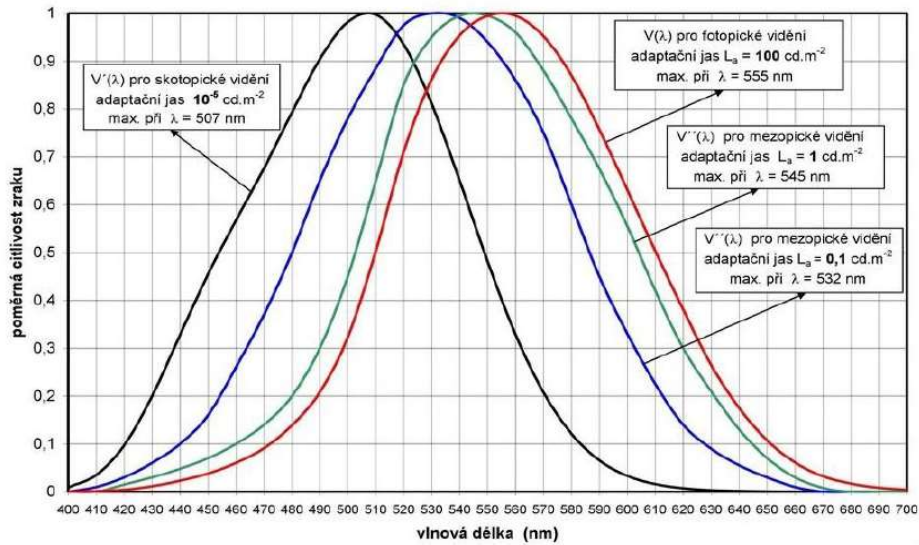
$$\phi_e = \frac{dE}{dt} \quad (\text{W}; \text{J}; \text{s}^{-1}) \quad (1.2)$$

Pro poměrnou světelnou účinnost monochromatického záření je definován vztah:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (1.3)$$

Poměrná spektrální světelná účinnost závisí na pozorovateli, obvykle se předpokládá normální fotometrický pozorovatel při fotopickém vidění, a dále na

adaptačním jasu L_a . Na grafu níže jsou vyobrazeny průběhy poměrné spektrální citlivosti oka pro různé adaptační jasy.



Obr. 1: Průběhy poměrné spektrální světelné účinnosti záření pro různé adaptační jasy L_a [1]

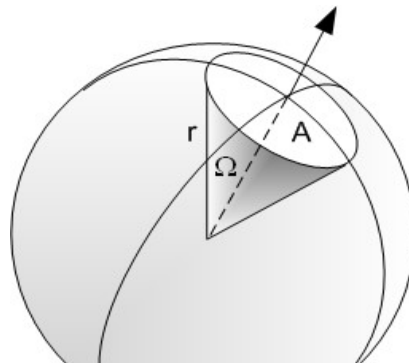
1.2 Prostorový úhel

Prostorový úhel je geometrická veličina používaná ve světelně technických výpočtech. Velikost prostorového úhlu je určena velikostí plochy vyřáté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy.

Prostorový úhel je označován Ω a jeho jednotkou je steradián (sr) a stanoví se pomocí vztahu:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \text{ (sr; m}^2\text{; m)} \quad (1.4)$$

Prostorový úhel může maximálně nabývat plochu jedné koule $\Omega_{max} = 4\pi$ (sr).



Obr. 2: Vymezení prostorového úhlu na kulové ploše [3]

Postupy stanovení prostorového úhlu pro širokou řadu situací a jejich využití jsou podrobně popsány v [1].

1.3 Ekvivalentní prostorový úhel

Ekvivalentní prostorový úhel Ω_e je roven prostorovému úhlu, do kterého by bodový světelný zdroj vyzářil veškerý svůj světelný tok ϕ , kdyby do všech směrů vyzařoval vztaznou svítivostí I_0 .

$$\Omega_e = \frac{\phi}{I_0} \text{ (sr; lm; cd)} \quad (1.5)$$

Praktické využití ekvivalentního prostorového úhlu nacházíme u rovnoměrně rozptýleně vyzařujících svítidel (např. zářivky).

1.4 Svítivost

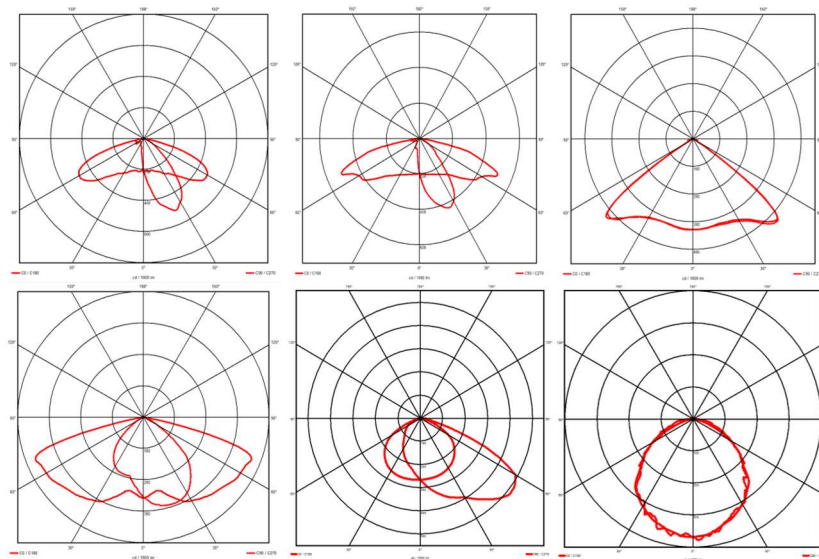
Tato světelně technická veličina popisuje prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech. Svítivost je jednou ze základních jednotek SI. Označuje se I , její jednotkou je kandela (cd) a ve směru určeném dvojicí úhlů γ, δ je dána vztahem:

$$I_{\gamma\delta} = \frac{d\phi}{d\Omega_{\gamma\delta}} \text{ (cd; lm; sr)} \quad (1.6)$$

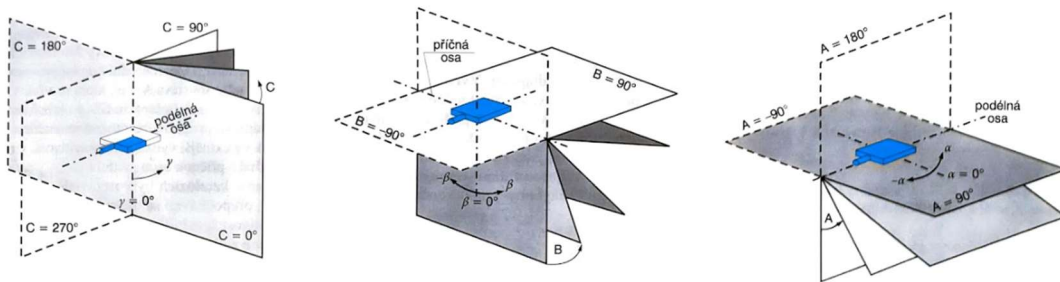
kde $\Omega_{\gamma\delta}$ je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly γ, δ a v jehož mezích uvažovaný zdroj vyzařuje tok $d\phi$. Svítivost se dle vztahu (1.6) stanovuje pro svítidlo či zdroj ležící ve vrcholu prostorového úhlu $d\Omega_{\gamma\delta}$. Z tohoto důvodu je svítivost definována pouze pro bodový zdroj, případně pro svítidlo, jehož vyzařovací plocha má zanedbatelné rozměry ve srovnání se vzdáleností mezi vrcholem prostorového úhlu $d\Omega_{\gamma\delta}$ a kontrolním bodem (vzdálenost by měla být minimálně pětinásobkem největšího rozměru vyzařovací plochy).

Pokud zjistíme hodnoty svítivosti svítidla ve všech směrech prostoru a nanese je prostorově od světelného zdroje jako radiusvektory, dostaneme následným spojením všech koncových bodů fotometrickou plochu svítivosti. Pro výpočty je obvykle potřeba znát jen vybrané řezy touto plochou rovin procházejících bodovým zdrojem. V rovinách řezu vzniknou křivky svítivosti v polárních souřadnicích s počátkem diagramu ve světelném středu zdroje. Křivky svítivosti se měří pomocí goniofotometru a jsou jedním ze základních údajů poskytovaných výrobcem svítidel v technických dokumentacích.

Ve světelné praxi se křivky svítivosti stanovují v soustavě fotometrických rovin C- γ . Dále existují soustavy B- β a A- α , využití soustavy A- α se však nedoporučuje.



Obr. 4: Příklady křivek svítivosti (1,2 - LED svítidla veřejného osvětlení; 3,4 - LED parková svítidla; 5 - LED reflektor; 6 - interiérové LED svítidlo)



Obr. 3: Soustavy C- γ , B- β a A- α [1]

1.5 Osvětlenost

Osvětlenost (angl. illuminance) udává plošnou hustotu světelného toku $d\phi_d$ dopadlého na plošku dA . Označuje se E , její jednotkou je lux (lx) a určuje se dle vztahu

$$E = \frac{d\phi_d}{dA} \text{ (lx; lm; m}^2\text{)} \quad (1.7)$$

Osvětlenost klesá s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje, dále je její velikost přímo úměrná kosinu úhlu dopadu světelných paprsků dle vztahu

$$E = \frac{I_\gamma}{l^2} \cdot \cos\beta \text{ (lx; cd; m; -)} \quad (1.8)$$

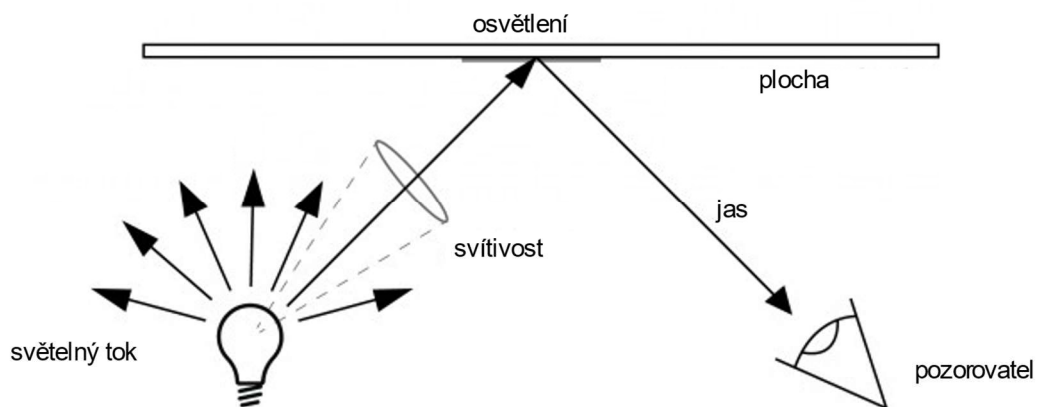
Z výše uvedeného vyplývá, že největší osvětlenost je kolmo pod zdrojem. Když spojíme body o stejných hodnotách osvětlenosti, dostaneme křivky, které se nazývají izoluxy.

1.6 Jas

Fotometrická veličina definovaná jako měrná svítivost. Označuje se L , její jednotkou je $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ a je závislá na poloze a směru pohledu pozorovatele. Jas se určuje dle vztahu

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_n} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lm}; \text{sr}; \text{m}^2) \quad (1.9)$$

V tomto vztahu L představuje jas ve směru osy svazku světelných paprsků, kdy $d\Omega$ je prostorový úhel, kterým se šíří paprsky, a dA_n je plocha, na kterou paprsky dopadají, přičemž je kolmá k ose svazku světelného toku ϕ .



Obr. 5: Vzájemný vztah světelného toku, svítivosti, osvětlení a jasu

1.7 Světelně-technické vlastnosti materiálů

Optické vlastnosti materiálů jsou důležité pro návrh a konstrukci různých zařízení s ohledem na možnosti usměrnění a s ohledem na rozptyl světelného toku, omezení jasů v určitých směrech, a to při zachování co nejvyšší účinnosti.

Světelný tok ϕ dopadající na materiál se v obecném případě rozdělí na tři části. Jednu část tvoří tok odražený ϕ_ρ , druhou část tvoří tok procházející ϕ_τ a třetí část tvoří tok pohlcený ϕ_α . Pro tyto části platí:

$$\phi = \phi_\rho + \phi_\tau + \phi_\alpha \quad (\text{lm}; \text{lm}; \text{lm}; \text{lm}) \quad (1.10)$$

Světelnětechnické vlastnosti látek charakterizují tři činitele odpovídající zmíněnému rozdělení světelného toku, a to činitel odrazu ρ , činitel prostupu τ a činitel pohlcení α , pro které platí následující vztahy:

$$\rho = \frac{\phi_\rho}{\phi}; \quad \tau = \frac{\phi_\tau}{\phi}; \quad \alpha = \frac{\phi_\alpha}{\phi}; \quad \rho + \tau + \alpha = 1 \quad (1.11)$$

Pro neprůsvitné materiály platí $\tau = 0$, pro materiály pohlcující veškeré záření na ně dopadající (černé těleso) platí $\alpha = 1$.

1.8 Parametry a vlastnosti světelných zdrojů

Umělé zdroje osvětlení, které se využívají pro náhradu přirozeného osvětlení, mají definované základní parametry, které je popisují. Mezi hlavní parametry patří zejména světelný tok, náhradní teplota chromatičnosti, měrný výkon a index podání barev.

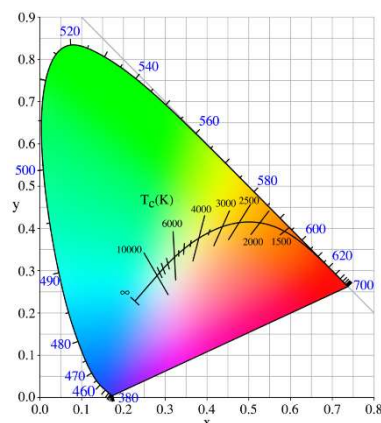
1.8.1 Náhradní teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má tutéž chromatičnost jako uvažované záření.

Náhradní teplota chromatičnosti je definovaná teplotou chromatičnosti odpovídající bodu, který leží na čáře teplotních zářičů nejbližší bodu znázorňujícímu chromatičnost uvažovaného světla. Náhradní teplota chromatičnosti se značí T_{cp} nebo také CCT (correlated color temperature) a udává se v kelvinech (K). Popisuje barevné vlastnosti světla. Teplé a studené barvy světla ovlivňují živé organismy jak z fyziologického hlediska, tak i psychologického hlediska.



Obr. 6: Náhradní teplota chromatičnosti – vizuální příklad [10]



Obr. 7: Souřadnicový systém chromatičnosti podle CIE 1931 [4]

1.8.2 Měrný výkon

Měrný výkon (rovněž také světelná účinnost) udává míru přeměny 1 W elektrické energie na světelný tok daného světelného zdroje. Jedná se o poměr vyprodukovaného světelného toku k elektrickému příkonu světelného zdroje. Světelná účinnost se vypočítá pomocí vztahu

$$\eta_z = \frac{\phi}{P} \left(\frac{lm}{W}; lm; W \right) \quad (1.12)$$

Tabulka 1: Přehled měrných výkonů dostupných světelných zdrojů (2019) [5]

Druh světelného zdroje	Příkon (W)	Měrný výkon (lm/W)
Žárovka	15–200	6–15
Halogenová žárovka	10–2000	14–26
Kompaktní zářivka	5–60	56–88
Lineární zářivka T8	10–58	65–90
Lineární zářivka T5	14–80	70–104
Indukční výbojka	50–400	70–93
Rtuťová výbojka	50–1000	50–80
VT Sodíková výbojka	50–1000	94–103
Halogenidová výbojka	35–3500	94–103
NT Sodíková výbojka	18–180	130–200
Světelné diody	1–20	Až 200 (laboratorně 300)
Xenonová výbojka	25–10 000	Až 95
Plazmový světelný zdroj	Až 250	Až 85

VT – Vysokotlaká

NT – Nízkotlaká

1.8.3 Obecný index podání barev

Vjem barvy určitého předmětu je závislý jednak na spektrálním složení záření zdroje, jednak na spektrálním činiteli odrazu či prostupu daného předmětu, a rovněž je ovlivněn samotným zrakem, jeho citlivostí na určité barvy a stavem adaptace zraku.

Obecný index podání barev vyjadřuje stupeň shodnosti vjemu barvy předmětu osvětleným vybraným zdrojem s vjemem barvy při osvětlení smluvním zdrojem (žárovka pro $T_{cp} < 5000 K$ a pro $T_{cp} > 5000 K$ se využívá zdroj se spektrálním složením odpovídajícím smluvnímu bílému světlu D a některé fázi přírodního světla).



Obr. 8: Příklad rozdílu v indexu podání barev [6]

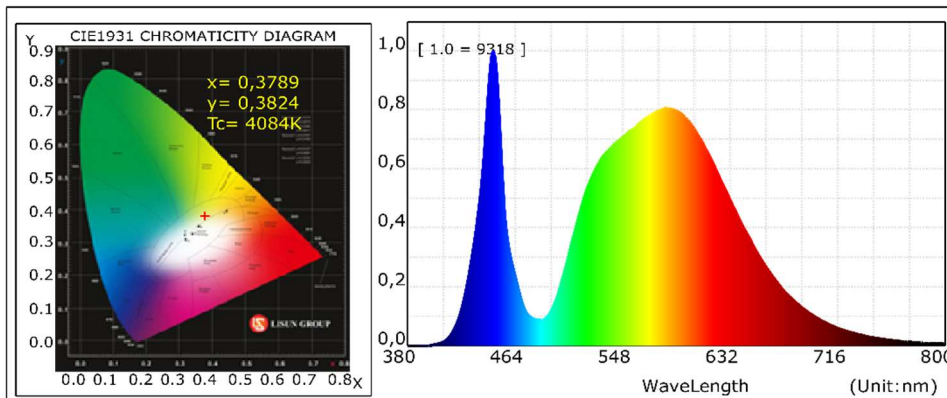
2. KULOVÉ INTEGRÁTORY

Následující kapitola se zabývá problematikou kulových integrátorů se spektrometrií a jejich využitím při měření optických parametrů světelných zdrojů. Principiálně je kulový integrátor vcelku jednoduchý fotometrický přístroj a v kombinaci se spektrometrem tvoří měřící soustavu schopnou určit značnou část parametrů světelných zdrojů, jako například měrný výkon, náhradní teplotu chromatičnosti, index podání barev či světelný tok (viz obrázek níže).

Lightsource Test Report

CIE Colorimetric Parameters

Chromatic Coordinate: $x=0,3789$ $y=0,3824$ $u(u')=0,2219$ $v=0,3359$ $v'=0,5038$
CCT: 4084K Color Ratio: R=27,708 G=53,861 B=18,494
Peak WaveLength: 447,1nm Half WaveLength: 20,0nm
Domaint Wave: 577,1nm Color Purity: 28,484%
Color Render Index: Ra=70,8 TM30: Rf= 76,1, Rg= 88,7
R1=68 R2=76 R3=82 R4=71 R5=68 R6=66 R7=80 R8=54
R9=-29 R10=43 R11=67 R12=38 R13=69 R14=90 R15=62
Color Quality Scale: Qa=73,5, Qf=71,7, Qp=77,1, Qg=94,8
Q1=77 Q2=96 Q3=73 Q4=72 Q5=74 Q6=70 Q7=70 Q8=82
Q9=91 Q10=73 Q11=69 Q12=70 Q13=73 Q14=63 Q15=68



Photometric Parameters

Luminous Flux: 7789,80lm Efficiency: 146,04lm/W Radiant Power: 15,184W
EEI: 0,09 Energy Efficiency Class: A++(EU874-2012)
PAR: 21,726W PPF: 100,854umol/s R/B: 1,4
Photons1: 10,771umol/s(400~500nm) Photons2: 22,387umol/s(600~700nm)

Electric Parameters

Voltage: 219,60V Current: 0,248A Power: 53,34W
Power Factor: 0,9780 Frequency: 49,99Hz

Test Information

Scan Range: 380~800 :1nm
Stabilization Time: 30min
Max of Signal: 9318

Photometric Method: sphere-spectroradiometer
Photometric Condition: Sphere:1.5 Geometry:4n
CCD Integration Time: 1,5

Environment: Tx:25.1°C Ti:24.5°C RH:60%
Test Lab: Lisun Lab
Operator: Miroslav Winkler

Test Device: Lisun LMS-7000
Test Time: 2022-12-15 10:11:44
Inspector:

Obr. 9: Příklad výstupu z měření v kulovém integrátoru Lisun LMS-7000

2.1 Úvod do problematiky

Hlavní myšlenkou kulového integrátoru je dosažení co nejlepší prostorové integrace světelného toku vyzařovaného světelným zdrojem, ať už se jedná o singulární LED čip, čipset, soustavu „žárovky“, o velké světelné zdroje typu reflektorů či lampy veřejného osvětlení.

Ve zjednodušeném pohledu se jedná o dutou kouli s bílým rozptylným nátěrem na vnitřním povrchu, díky kterému se má docílit co nejrovnoměrnější distribuci světelné energie uvnitř integrátoru. Koule má na jedné straně otvor, ve kterém je umístěn měřicí přístroj (fotočlánek, případně spektrometr), před který je umístěna clona opatřená stejným nátěrem, jako povrch koule. Na opačné straně je umístěna pomocná žárovka, před kterou je rovněž umístěna natřená clona. Měřené svítidlo se ideálně umísťuje do středu kulového integrátoru. Způsob uchycení svítidel je variabilní, mohou být například zavěšeny z vrchní části koule či položeny na pevný polohovací podstavec.

Pochopení funkce kulového integrátoru je esenciální pro návrh či použití kulového integrátoru pro jednotlivé aplikace. Je důležité porozumět, jak se světlo chová uvnitř koule, což následně vede k problematice difúznosti odrazových ploch vnitřního pláště, jeho případných nerovností, defektů apod. Toto vede k určení dvou zásadních parametrů kulového integrátoru, a sice sférického násobitele a průměrné odrazivosti povrchu. Rovněž je důležitá časová konstanta integrace, která je relevantní pro aplikace zahrnující rychlé pulsy či měření zářivé energie s krátkou životností.

Informace v rámci druhé kapitoly vychází převážně z autorského překladu [7] a jeho doplnění, podkapitola 2.3.4 vychází z velké části z autorského překladu [9].

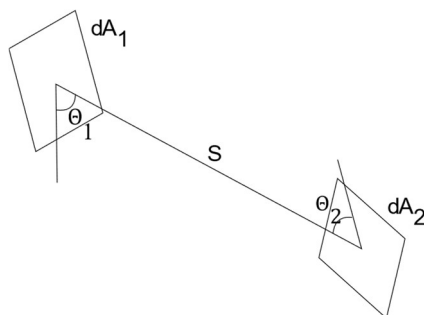
2.2 Princip

Princip kulového integrátoru vychází z teorie chování záření v uzavřeném prostoru složeném z rozptylujících povrchů. Obecně komplexní teorie se v případě využití kulového prostoru stává jednodušší k pochopení a využití.

Uvažujme výměnu záření mezi dvěma elementárními plochami difúzního povrchu. Část energie odražená od elementu plochy dA_1 dopadající na element plochy dA_2 je označována jako faktor výměny dF_{d1-d2} , jehož hodnotu získáme pomocí vztahu:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi \cdot S^2} \cdot dA_2 \quad (-) \quad (2.1)$$

Kde úhly θ_1 a θ_2 jsou měřeny od normály plochy.



Obr. 10: Doplňující grafika ke vzorci (2.1)

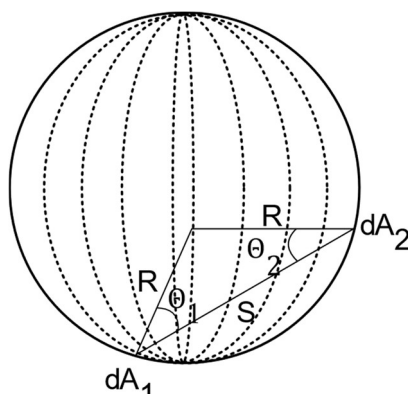
Pokud se tyto plochy nachází na vnitřním povrchu koule, kde platí:

$$S = 2 \cdot R \cdot \cos \theta_1 = 2 \cdot R \cdot \cos \theta_2 \text{ (m)} \quad (2.2)$$

Původní vztah se zjednoduší následovně:

$$dF_{d1-d2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot dA_2 \text{ (-)} \quad (2.3)$$

Z výsledné rovnice vyplývá, že výsledná odražená energie není závislá na úhlu a vzdálenosti mezi odraznými plochami, tudíž dopadající část zářivé energie je stejná po celém povrchu vnitřní koule.



Obr. 11: Doplňující grafika ke vzorci (2.3)

Když rozšíříme úvahu o výměnu záření elementární plochy dA_1 s plochou A_2 o konečném rozměru větším než elementární, rovnice (2.3) se změní:

$$dF_{d1-d2} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \int_{A_2} dA_2 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot A_2 \text{ (J)} \quad (2.4)$$

Výsledná rovnice je nezávislá na elementu dA_1 , ve jmenovateli figuruje vztah $4 \cdot \pi \cdot R^2$, což je vztah pro výpočet povrchu koule. Z toho plyne, že podíl zářivé energie dopadající na plochu A_2 je roven podílu velikostí ploch A_2 ku celkové ploše vnitřního pláště sféry A_S .

$$dF_{d1-d2} = \frac{A_2}{4 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{A_2}{A_S} \text{ (J)} \quad (2.5)$$

2.2.1 Rovnice záře

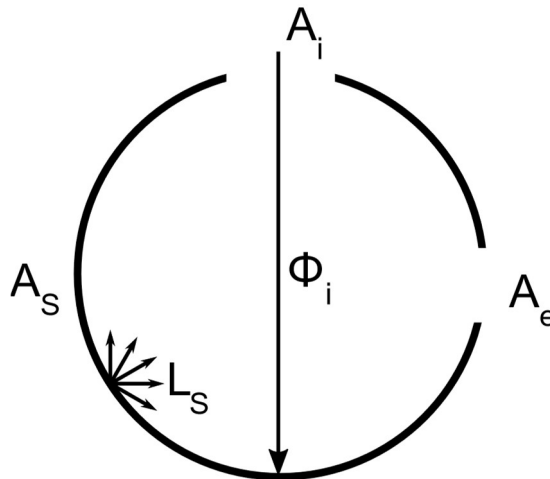
Difúzní plocha, od které se odráží a rozptyluje dopadající zářivá energie, se chová jako virtuální zdroj záření, emitované záření z povrchu tohoto virtuálního zdroje se dá nejlépe popsat jeho září L ($\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$). Zář je důležitá z pohledu možnosti předpovězení množství zářivého toku, který bude schopen zachytit optický systém orientovaný směrem k ozařovanému povrchu.

Odvození záře kulové plochy povrchu integrátoru vychází z obecné rovnice záře:

$$L = \frac{\Phi_i \cdot \rho}{\pi \cdot A} \quad (\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}) \quad (2.6)$$

Kde A je difúzní plocha s odrazností ρ , na kterou dopadá zářivý tok Φ_i , který se odráží do prostorového úhlu π .

U kulového integrátoru je potřeba brát v potaz několikanásobné odrazy v rámci kulového prostoru a ztráty v pracovních otvorech integrátoru. Uvažujme integrátor se dvěma pracovními otvory – otvor pro vstup zářivého toku o ploše A_i a výstupní otvor pro měření o ploše A_e (viz obrázek níže).



Obr. 12: Pomocná ilustrace

Vstupující zářivý tok se dokonale difúzně odrazí a dojde k jeho rovnoměrnému rozprostření v integrátoru podle vztahu (2.7).

$$\Phi_i \cdot \rho \cdot \left(\frac{A_s - A_i - A_e}{A_s} \right) \quad (2.7)$$

V závorce je vyjádřen podíl plochy, od které se může tok v rámci koule odrazit, vůči celkové ploše koule. Pro usnadnění následujících výpočtů si zavedeme jednoduchou substituci:

$$f = \frac{\sum_{n=1}^m A_{p_n}}{A_s} \quad (2.8)$$

Suma v čitateli představuje součet všech „m“ pracovních otvorů v kouli a pro náš případ získáme následující vyjádření:

$$f = \frac{A_i + A_e}{A_s} \quad (2.9)$$

Po dosazení substituce do původního vztahu (2.7) získáme jednodušší vyjádření ve tvaru

$$\Phi_i \cdot \rho \cdot (1 - f) \quad (2.10)$$

Takto odražený zářivý tok se dále odráží a rozptyluje.

Druhý odraz se dá popsat následujícím vztahem:

$$\Phi_i \cdot \rho^2 \cdot (1 - f)^2 \quad (2.11)$$

Třetí odraz potom vztahem:

$$\Phi_i \cdot \rho^3 \cdot (1 - f)^3 \quad (2.12)$$

Po „n“ odrazech dochází k celkovému rozptýlení původního zářivého toku po celém povrchu koule a vyplývá výsledný vztah:

$$\Phi_i \cdot \rho \cdot (1 - f) \cdot [1 + \rho \cdot (1 - f) + \rho^2 \cdot (1 - f)^2 + \dots + \rho^{n-1} \cdot (1 - f)^{n-1}] \quad (2.13)$$

Když dosadíme $n = \infty$ a využijeme poznatku o odraznosti $\rho < 1$, vyřešením této nekonečné řady získáme zjednodušení vztahu:

$$\frac{\Phi_i \cdot \rho \cdot (1 - f)}{1 - \rho \cdot (1 - f)} \quad (2.14)$$

Ze vztahu (2.14) vyplývá, že celkový tok uvnitř kulového integrátoru je vlivem mnohonásobného odrazu vyšší než tok vstupní. Dosazením do původní rovnice pro výpočet záře dostaneme následující vztah:

$$L = \frac{\Phi_i}{\pi \cdot A \cdot (1 - f)} \cdot \frac{\rho \cdot (1 - f)}{1 - \rho \cdot (1 - f)} = \frac{\Phi_i}{\pi \cdot A_s} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho \cdot (1 - f)} \quad (\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}) \quad (2.15)$$

Pomocí této rovnice můžeme predikovat zář povrchu kulového integrátoru v závislosti na vstupním zářivém toku a rozměrech kulového integrátoru, kdy s narůstajícím průměrem integrátoru klesá zář jeho povrchu.

2.2.2 Konstanta kulového integrátoru (multiplikační koeficient)

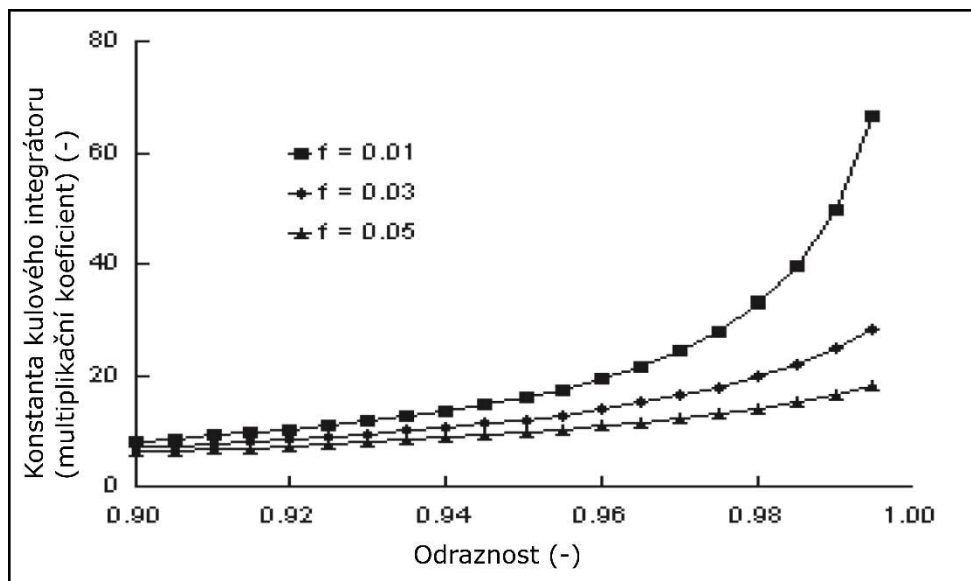
Rovnice (2.15) je záměrně rozdělena na dvě části. První přibližně vyjadřuje záři difúzního povrchu a je obdobou rovnice (2.6), druhá část vyjadřuje bezrozměrnou hodnotu, která vyjadřuje multiplikační koeficient kulového integrátoru, tzv. konstanta kulového integrátoru.

V literatuře se můžeme setkat s rozlišným označením této konstanty, pro účely tohoto textu bylo zvoleno označení „ k_i “.

$$k_i = \frac{\rho}{1 - \rho \cdot (1 - f)} \quad (-) \quad (2.16)$$

Konstanta integrátoru vyjadřuje nárůst záře v důsledku mnohonásobného odrazu uvnitř kulového prostoru integrátoru.

Na následujícím grafu je znázorněna závislost velikosti konstanty integrátoru na odraznosti povrchu ρ a poměru ploch pracovních otvorů vůči celkové ploše integrátoru (ozn. f).



Obr. 13: Graf závislosti konstanty kulového integrátoru na odraznosti povrchu pro různé poměry ploch pracovních otvorů vůči celkové ploše integrátoru [7, upraveno]

Intuitivně by se dalo předpokládat, že by se hustota toku uvnitř kulového integrátoru mohla jednoduše vypočítat jako prostý podíl vstupního zářivého toku vůči celkové ploše integrátoru. To by však bylo zavádějící, neboť vlivem odraznosti je běžně tok uvnitř integrátoru mnohonásobně větší. Obecně lze předpokládat, že u většiny kulových integrátorů s odrazností povrchu v rozmezí $0,94 < \rho < 0,99$ a poměru ploch $0,02 < f < 0,05$ dosahuje konstanta integrátoru hodnot $k_i = 10$ až 30 .

Konstanta integrátoru popsána vztahem (2.16) byla stanovena při specifických podmínkách, kdy stěna integrátoru má konstantní rovnoměrnou odrazivost a odrazivost pracovních otvorů je nulová, tohoto stavu však nelze reálně dosáhnout.

Obecný vztah pro konstantu integrátoru tedy je

$$k_i = \frac{\rho_0}{1 - \rho_s \cdot (1 - \sum_{i=0}^n f_i) - \sum_{i=0}^n \rho_i \cdot f_i} \quad (-) \quad (2.17)$$

kde ρ_0 je odraznost pro prvotní odraz, ρ_s je odraznost stěn integrátoru, ρ_i je odraznost ploch pracovních otvorů a f_i je podíl plochy pracovního otvoru vůči celkové ploše integrátoru.

Výraz $\rho_s \cdot (1 - \sum_{i=0}^n f_i) - \sum_{i=0}^n \rho_i \cdot f_i$ vyjadřuje průměrnou odraznost povrchu integrátoru $\bar{\rho}$. Vztah (2.17) můžeme vyjádřit jako

$$k_i = \frac{\rho_0}{1 - \bar{\rho}} \quad (-) \quad (2.18)$$

2.2.3 Výsledný zářivý tok uvnitř kulového integrátoru

Přesná analýza distribuce zářivého toku uvnitř reálného kulového integrátoru je závislá na mnoha faktorech. Záleží na distribuci odraženého toku, geometrických detailech, neboť je obtížné dosáhnout dokonalého kulového tvaru, dále na odrazivých vlastnostech nátěru na povrchu kulového integrátoru a rovněž značně záleží na

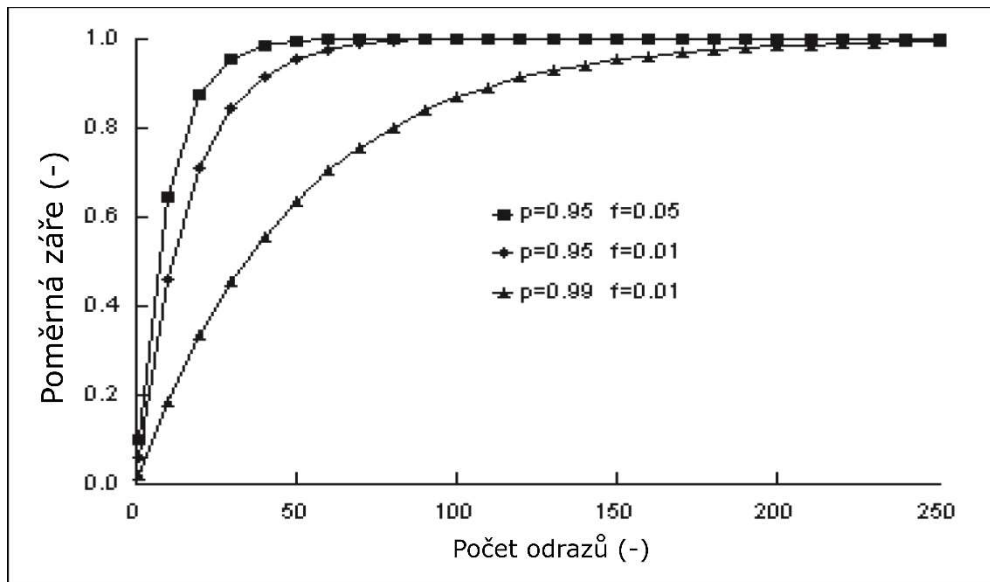
rozměrech, povrchových úpravách všech clon a pracovních i nepracovních zařízení použitých ve vnitřním prostoru kulového integrátoru.

Obecně se snažíme dosáhnout maximální možné odraznosti povrchu a dostatečně velkého celkového průměru integrátoru vzhledem k použitému příslušenství a k němu potřebným pracovním otvorům.

Vliv odraznosti a poměru ploch pracovních otvorů na potřebný počet odrazení vstupního toku pro dosažení jeho prostorové rovnoměrnosti je možné demonstrovat pomocí vztahu (2.13), kde pro případ „n“ odrazů lze použít vyjádření:

$$\Phi_i \cdot \sum_{n=1}^n \rho^n \cdot (1 - f)^n \quad (2.19)$$

Po určitém počtu odrazů lze předpokládat ustálení toku v prostoru integrátoru. Jelikož se předpokládá měření v již ustáleném toku uvnitř integrátoru, je vhodné dosáhnout ustálení za co nejmenší počet odrazů. Toto vede ke snaze dosáhnout co největší odraznosti ρ a co nejmenšího poměru f při návrhu kulového integrátoru.



Obr. 14: Graf závislosti poměrné záře na počtu odrazů pro různé kombinace hodnot odraznosti (p) povrchu a poměru ploch pracovních otvorů (f) vůči celkovému povrchu integrátoru [7, upraveno]

2.2.4 Časová konstanta kulového integrátoru

Kulový integrátor se běžně využívá v ustáleném stavu, kdy se předpokládá, že uběhl dostatečně dlouhý čas k docílení konstantní úrovně osvětlení uvnitř integrátoru a nedochází již k dalším přechodným jevům. U měření světelných zdrojů s rychle se měnícími parametry (krátkodobé pulsy, vysokofrekvenční řízení apod.) dochází k pozorovatelnému zkreslení výstupu vlivem několikanásobných odrazů. Tvar výstupního signálu je tedy tvořen konvolucí výstupního signálu s impulzní odezvou.

Impulzní odezva je dána exponenciální funkcí s časovou konstantou τ :

$$e^{-t/\tau_i} \quad (2.20)$$

Kde τ je závislé na průměrné odraznosti $\bar{\rho}$, rychlosti světla a průměru integrátoru D_i následovně:

$$\tau_i = -\frac{2}{3} \cdot \frac{D_i}{c} \cdot \frac{1}{\ln \bar{\rho}} \text{ (s)} \quad (2.21)$$

Časová konstanta se u většiny kulových integrátorů pohybuje v řádu jednotek až nižších desítek nanosekund.

2.3 Provedení kulového integrátoru

Návrh kulového integrátoru pro libovolnou aplikaci vychází z několika základních parametrů. Jedná se o zvolení optimálního průměru měřícího prostoru na základě počtu a velikosti pracovních otvorů a připojených periferních zařízení, zvolení patřičného nátěru vnitřní stěny integrátoru v závislosti na požadovaných spektrálních a provozních vlastnostech, dále zvolení parametrů clon s ohledem na zorné pole detektorů a na dopadající záření. Rovněž se vychází z radiometrických vztahů pro určení účinnosti vazby kulového integrátoru s detekčním systémem.

2.3.1 Průměr kulového integrátoru

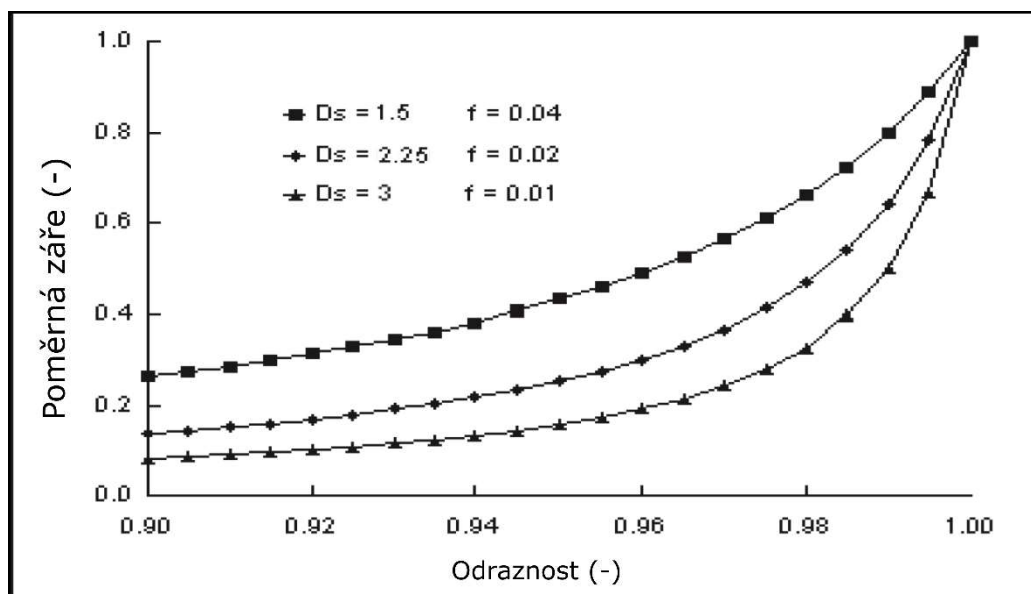
V části 2.2.225 (Konstanta kulového integrátoru) je z Obr. 13 patrné, že poměr velikosti pracovních ploch vůči celkové ploše kulového integrátoru má výrazný vliv na multiplikační koeficient kulového integrátoru. Při poměru $f > 0,05$ dochází ke ztrátě výhod, které nabízí pokrytí materiálem s velkou odrazivostí. Odtud plyne jednoduché pravidlo, že součet velikostí ploch pracovních otvorů nemá překročit 5 % celkové plochy vnitřní části integrátoru.

U reálných aplikací vychází návrh s uvážením potřebného průměru pracovních otvorů, které jsou dány jak rozměry periferních zařízení, tak geometrickým omezením systému jako celku. Dalším omezujícím faktorem jsou prostorové možnosti umístění kulového integrátoru, jeho přeprava na místo působení a v neposlední řadě se musí vzít v potaz rovněž otázka ekonomické náročnosti.

Budeme uvažovat jednoduchý příklad kulového integrátoru se dvěma pracovními otvory s jednotkovým průměrem. Poměrná zář způsobená ekvivalentním zdrojem při průměru D_i je vyjádřena následovně:

$$L_i = \frac{k_i}{D_i^2} (-) \quad (2.22)$$

Tato závislost se dá zobrazit jako funkce odraznosti pro různé poloměry a z nich vycházející rozměrové poměry, viz graf níže.



Obr. 15: Závislost poměrné záře na odraznosti pro různé průměry (D_s (m)) kulového integrátoru [7, upraveno]

Obecně nejmenší kulové integrátory dosahují největší záře vnitřního povrchu, avšak obvyklé použití kulových integrátorů vychází z jejich schopnosti integrovat prostorové záření. Ta se zlepšuje s rostoucím průměrem a snižujícími se plochami pracovních otvorů. Z Obr. 15 je patrné, že u každého provedení kulového integrátoru konverguje hustota záření s rostoucí odrazností ke stejné hodnotě. Proto materiály s vysokou odrazností vedou k optimalizaci prostorové integrace při nepatrném snížení účinnosti.

2.3.2 Výběr odrazivého materiálu vnitřního povrchu integrátoru

Z Obr. 13 je dále patrná významná závislost konstanty kulového integrátoru na odraznosti pokrytí vnitřní plochy integrátoru. Proto volba krycího materiálu může vytvořit zásadní rozdíl ve výsledné hodnotě vzniklé záře pro dané provedení kulového integrátoru.

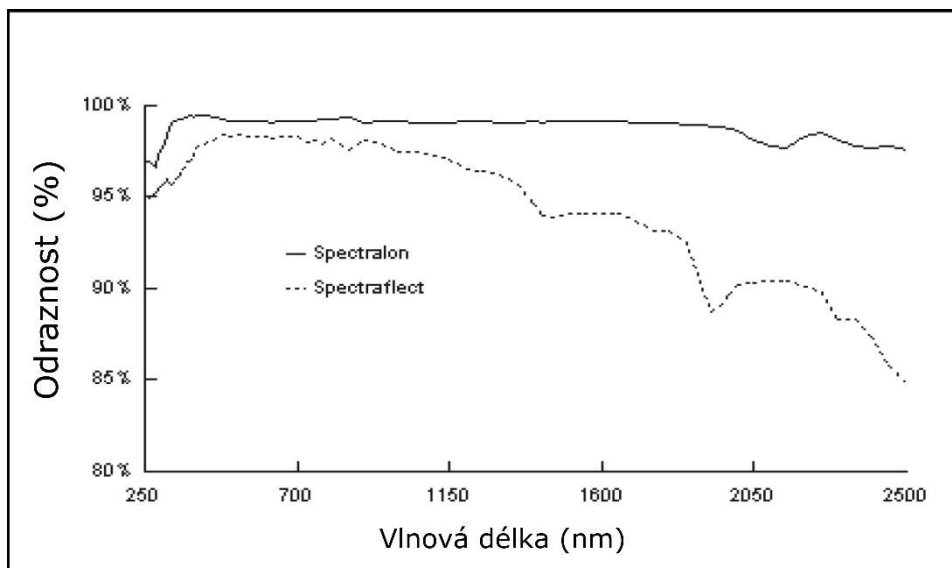
Na trhu je široké množství odrazivých materiálů, zpravidla se jedná o vybrané druhy zinkové, titanové či barytové běloby, kdy základní nátěr bývá trvalý a na něj je nanesen nátěr rozpustný ve vodě [1].

Kupříkladu společnost Labsphere nabízí materiály Spectraflect® a Spectralon®, které se využívají pro aplikace v oblasti ultrafialového záření, viditelného záření a infračerveného záření v mezích vlnových délek od 250 nm do 2500 nm. Jejich spektrální odraznost je zobrazena na grafu níže (Obr. 16). Obě pokrytí dosahují vysoké odraznosti (přes 95 % pro vlnové délky od 350 nm do 1350 nm). Na první pohled není mezi těmito dvěma materiály v oblasti viditelného spektra zásadní rozdíl, avšak poměrný nárůst záře je větší než poměrný nárůst odraznosti kvůli rozdílným multiplikačním koeficientům.

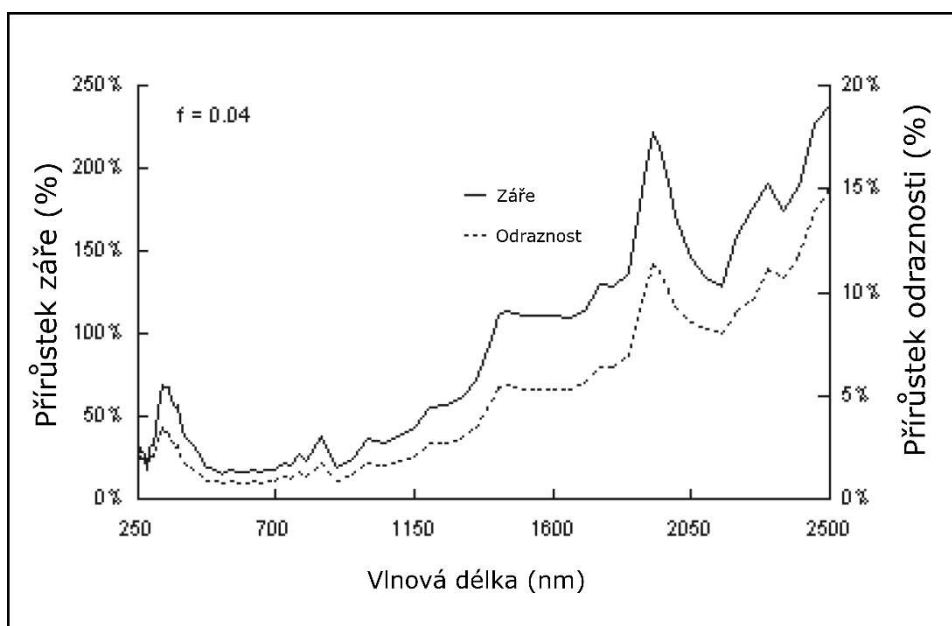
Poměry se řídí následujícím vztahem:

$$\frac{\Delta L_s}{L_s} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cdot k_{i_{nové}} (-) \quad (2.23)$$

Z tohoto vztahu vychází, že i když Spectralon nabízí 2% až 15% nárůst v odraznosti oproti Spectralectu v daném rozmezí vlnových délek, nárůst záře činí 40 % až 240 %, kdy k největšímu nárůstu dochází v okolí 1400 nm, viz oObr. 17.



Obr. 16: Graf poměrné odraznosti materiálů Spectralon a Spectralect na vlnové délce [7, upraveno]



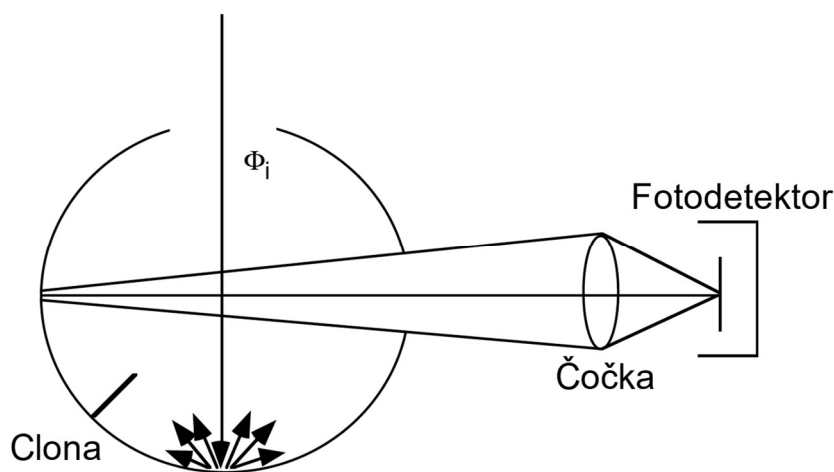
Obr. 17: Graf závislosti poměrného nárůstu záře a odraznosti na vlnové délce [7, upraveno]

Pro specifické aplikace se využívá i jiných materiálů, například difúzní zlato pro aplikace v blízkosti infračerveného záření v mezích od 0,7 do 20 μm (infračervené lasery). Dále se používá pokrytí PTFE materiály, které mají vysokou teplotní stabilitu a značnou spolehlivost, neboť neztrácí své vlastnosti s věkem a umožňují čištění bez rizika porušení mechanické integrity materiálu. Použitelné jsou hlavně v rozmezí vlnových délek od 400 nm do 1500 nm, kdy dosahují odraznosti přes 99 %. Kulové integrátory s PTFE bývají dražší a rozměrnější než integrátory využívající baryovou barvu [8].

2.3.3 Clony a zorné pole detektoru

Při měření v kulovém integrátoru je důležité, aby veškeré záření dopadající do zorného pole detektoru nepocházelo přímo od zdroje záření či místa jeho prvního odrazu, to by vedlo k chybnému měření a je tedy nutné užití clon.

Clony jsou pokryty stejným materiálem jako povrch vnitřní povrch integrátoru a zamezují změření záření, u kterého nedošlo k alespoň dvěma odrazům od povrchu integrátoru.



Obr. 18: Příklad optického systému kulového integrátoru s externí čočkou a fotodetektozem

Na příkladu optického systému (Obr. 18) můžeme pozorovat, že optický systém sice nemůže zachytit přímo světelný tok, ale nebýt clony, mohlo by dojít k odrazu světelného toku prvním odrazem do zorného pole fotodetektoru daného čočkou.

Clony lze považovat za rozšíření povrchu koule a jejich příspěvek může být zahrnut do výpočtu záře, ačkoli jejich příspěvek nebývá zpravidla signifikantní, neboť příspěvek plochy clonek k celkové ploše kulového integrátoru bývá většinou malý.

2.3.4 Uniformita povrchu kulového integrátoru

Následující informace vychází z autorského překladu [9].

V reálném kulovém integrátoru nelze dosáhnout dokonale rovnoměrné distribuce světelného toku. Je to způsobeno několika faktory, a sice nemožností úplně rovnoměrně aplikovat odrazivý nátěr na všechny části kulového integrátoru, nedokonalá přiléhavost polokoulí či dveří, rozlišné odraznosti clon a vnitřních konstrukčních prvků. V neposlední

řadě má na uniformitu vliv rovněž prach a nečistoty gravitující do spodní části kulového prostoru. Veškeré funkční a konstrukční prvky rovněž vytváří stíny.

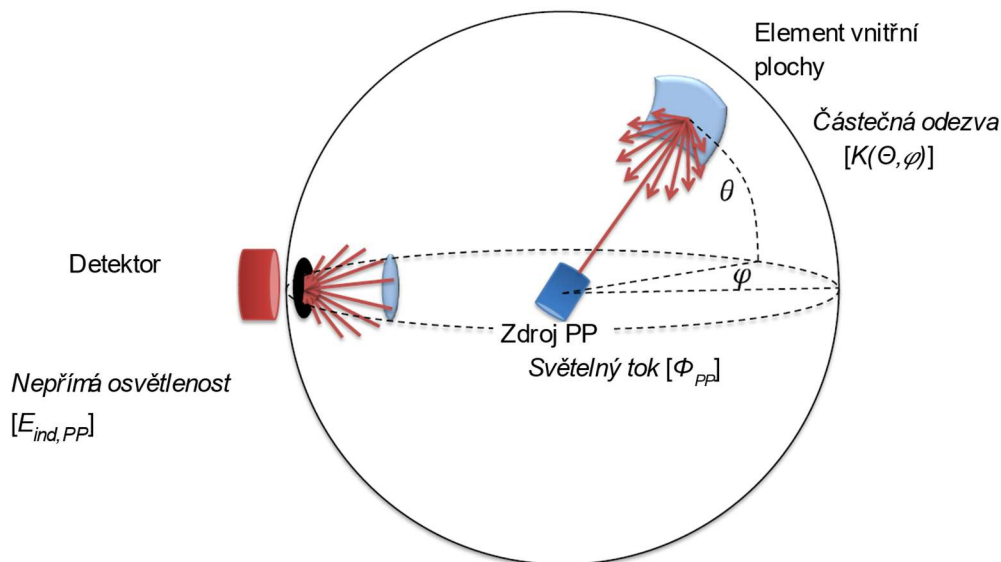
Vlivem těchto nedostatků bude mít dopadající světlo na cestě k detektoru v každém bodě různé ztráty, a tedy bude rozdílně přispívat k celkové odezvě detektoru. Proto musí být tyto jednotlivé příspěvky stanoveny a následně musí být stanovena korekce.

Uvažujme, že každý tento částečný příspěvek má formu paralelního paprsku (PP) se směrovými parametry (Θ, φ) dopadající na část vnitřní plochy integrátoru.

Faktor odezvy těchto paralelních paprsků se bude řídit následujícím vztahem:

$$f_{s,PP(\Theta,\varphi)} = \frac{\Phi_{PP}}{E_{ind,PP}} (-) \quad (2.24)$$

Kde $E_{ind,PP}$ je nepřímá osvětlenost vnitřního povrchu integrátoru paralelním paprskem a Φ_{PP} je světelný tok paralelního paprsku.



Obr. 19: Uvažovaný systém kulového integrátoru se zdrojem paralelních paprsků, clonou a detektorem [9, upraveno]

Pro získání celkové prostorové odezvy uvnitř integrátoru je nutné zdroj paprsku natáčet postupně do všech směrů a „oskenovat“ celý povrch integrátoru. Postupně otáčený paprskový zdroj představuje ekvivalent zdroje se stejnou intenzitou vyzařování I_{PP} ve všech směrech (izotropický zdroj). Výsledný světelný tok tohoto zdroje má hodnotu $4\pi I_{PP}$.

Výstupem z měření tohoto systému je funkce distribuce prostorové odezvy (Spatial Response Distribution Function) pro teoretický izotropický zdroj, označována jako $SRDF(\Theta, \varphi)$ či $K(\Theta, \varphi)$.

Pro možnost porovnávání různých uspořádání kulového integrátoru je zapotřebí, aby tato funkce byla nezávislá na intenzitě záření zdroje. Takto normalizované funkce dosáhneme poměřením $K(\Theta, \varphi)$ v každé orientaci k průměru $K_{prům}(\Theta, \varphi)$:

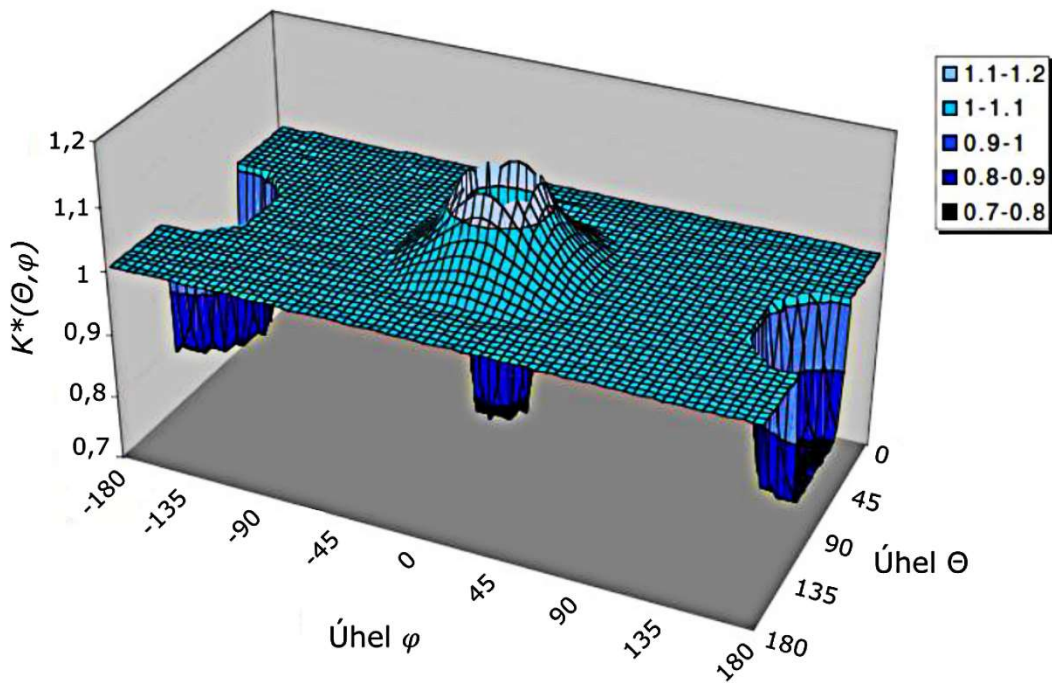
$$K^*(\Theta, \varphi) = \frac{K(\Theta, \varphi)}{K_{prům}(\Theta, \varphi)} \quad (-) \quad (2.25)$$

Kde $K_{prům}(\Theta, \varphi)$ se určí dle vztahu:

$$K_{prům}(\Theta, \varphi) = \frac{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_0^{\pi} K(\Theta, \varphi) \sin\Theta \, d\Theta \, d\varphi}{4\pi} \quad (-) \quad (2.26)$$

Po dosazení dostáváme vztah:

$$K^*(\Theta, \varphi) = \frac{4\pi \cdot K(\Theta, \varphi)}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_0^{\pi} K(\Theta, \varphi) \sin\Theta \, d\Theta \, d\varphi} \quad (-) \quad (2.27)$$



Obr. 20: Příklad průběhu funkce SRDF v 3D zobrazení [9, upraveno]

Prostorový korekční faktor $S_{f,e}$, který se používá při měření s neizotropními zdroji, se vypočte pomocí následujícího vztahu [5]:

$$S_{f,e} = \frac{1}{K^*(\Theta, \varphi)} \quad (-) \quad (2.28)$$

Standardní nejistota při použití tohoto měření je 0,05 % [5].

3. MODEL KULOVÉHO INTEGRÁTORU V PROGRAMU ANSYS SPEOS

V rámci této kapitoly se budeme věnovat modelu kulového integrátoru vytvořeného podle reálného přístroje umístěného v laboratoři světelné techniky na ústavu elektroenergetiky fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií.

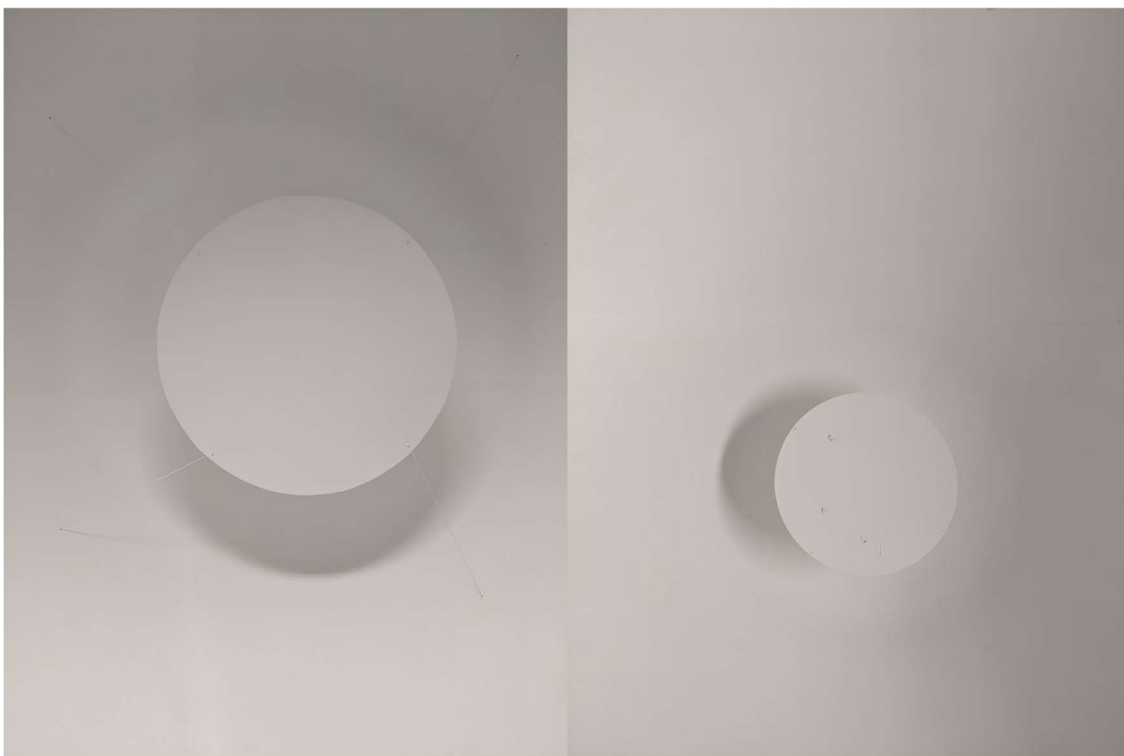
Model byl vytvořen v programu ANSYS SPEOS. Jeho účelem je simulace vlivu designových změn prvků kulového integrátoru na přesnost měření a zjištění možností úprav fyzického přístroje pro zajištění daného zvýšení přesnosti.

3.1 Parametry

Kulový integrátor, který byl předlohou vytvářeného modelu, byl proměřen s pomocí svinovacího a laserového metru a byla pořízena jeho fotodokumentace:



Obr. 21: Fotodokumentace – levá, pohyblivá, polokoule s hlavní clonou a pravá, nepohyblivá polokoule s vedlejší clonou kulového integrátoru



Obr. 23: Fotodokumentace – hlavní clona zakrývající pracovní otvor pro detektor spektroradiometru a vedlejší clona pomocné žárovky



Obr. 22: Fotodokumentace – skoba a elektrický přívod



Obr. 25: Fotodokumentace – skoba pro zavěšení svítidel a elektrický přívod – detail



Obr. 24: Fotodokumentace – detail dna – záslepka ve dně a teplotní čidlo

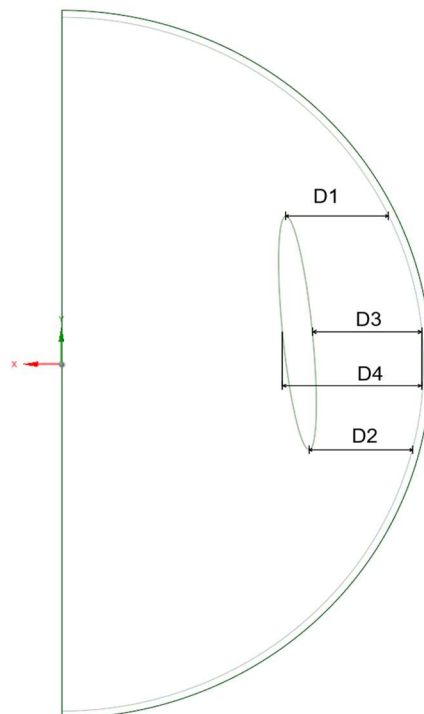
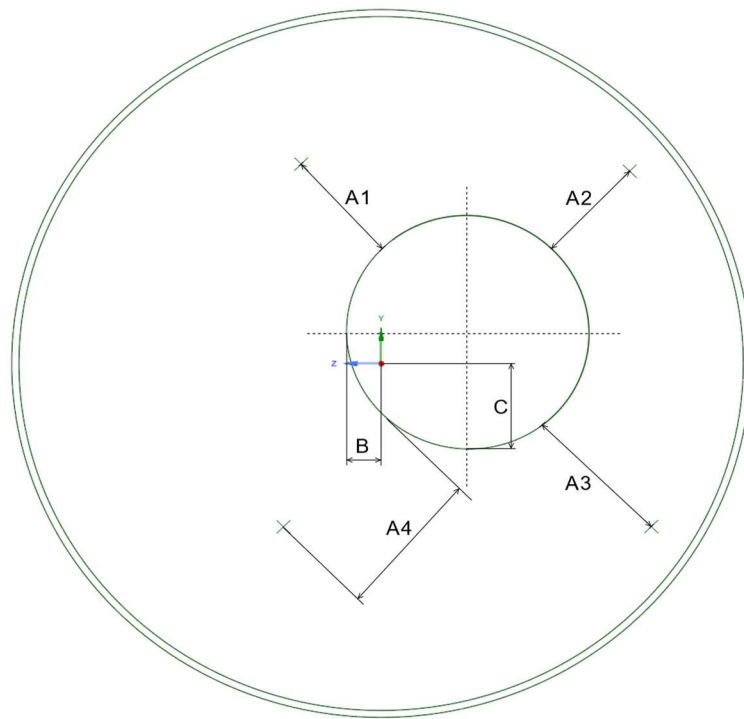


Obr. 26: Fotodokumentace – detail defektu pláště
pohyblivé polokoule

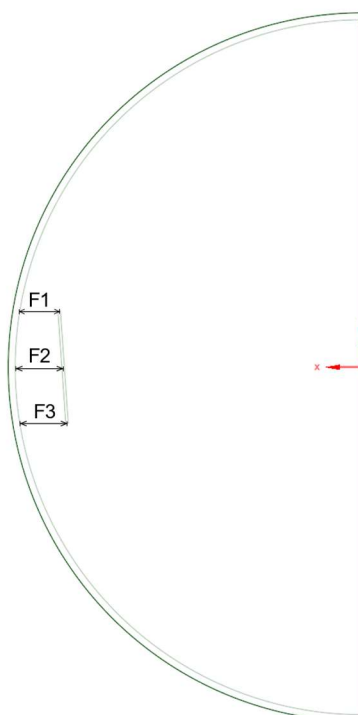
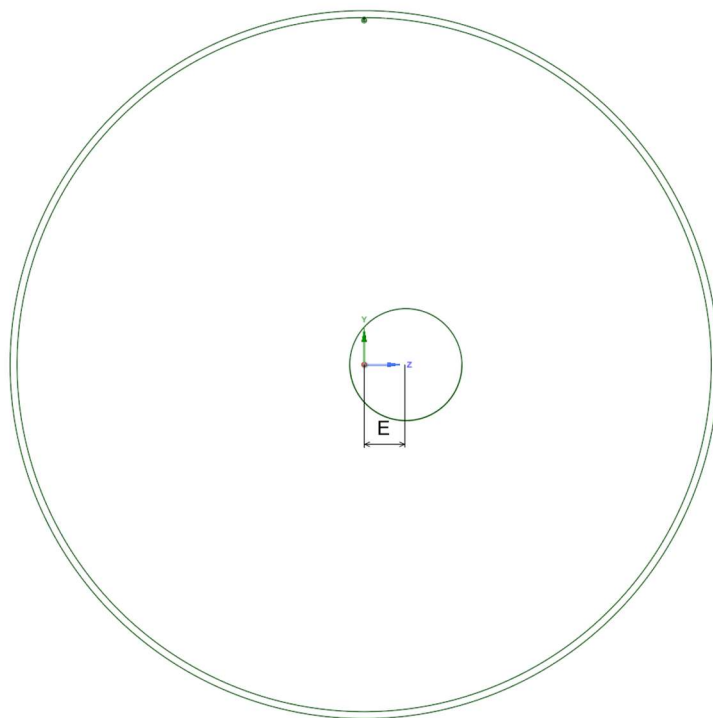
3.1.1 Základní korpus

Tabulka 2: Tabulka naměřených rozměrů pro modelaci kulového integrátoru pro základní korpus

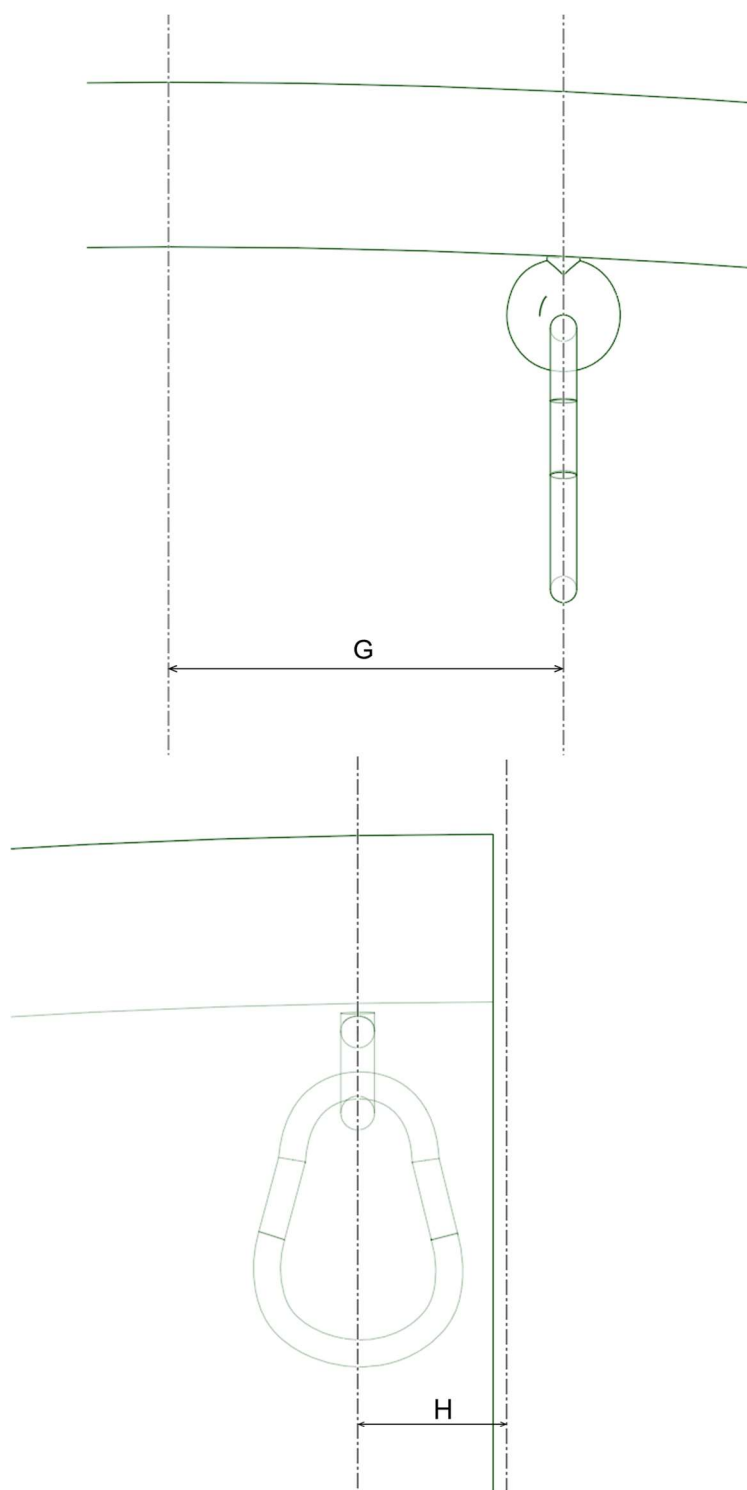
Část	Rozměr	Velikost (mm)
Kulový prostor	Průměr	2500
Těsnění	Tloušťka u polokoule	2
Hlavní clona	Výška	843
	Šířka	845
	A1	610
	A2	631
	A3	640
	A4	641
	B	120
	C	300
	D1	370
	D2	380
	D3	365
	D4	375
Vedlejší clona	Výška	400
	Šířka	400
	E	150
	F1	155
	F2	175
	F3	185
Skoba pro úchyt svítidel	G	60
	H	20



Obr. 27: Rozměry první polokoule s hlavní clonou



Obr. 28: Rozměry druhé polokoule s vedlejší clonou



Obr. 29: Upřesnění polohy skoby pro zavěšení svítidel

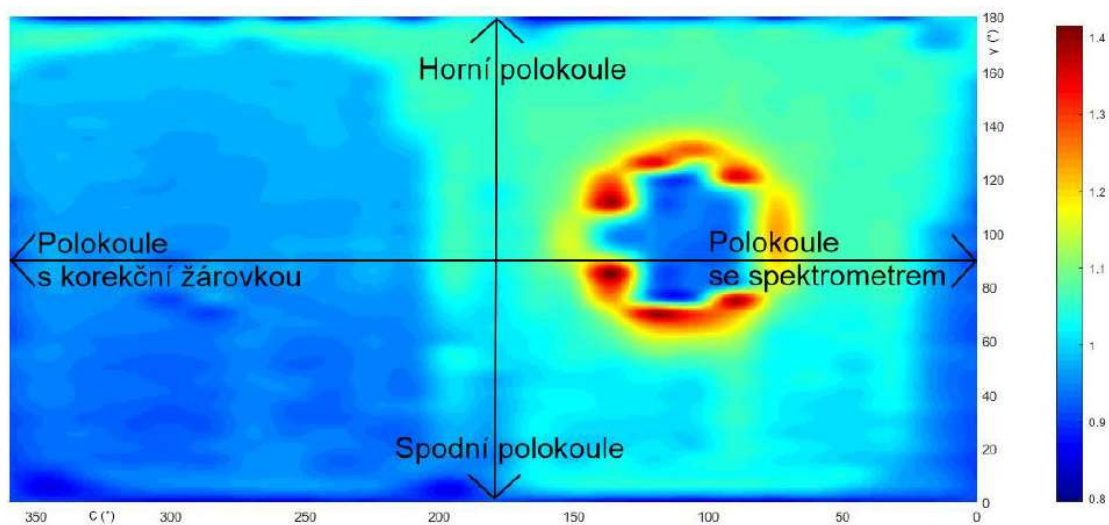
3.2 První verze modelu

3.2.1 Úvod

První verze modelu, která sloužila pro úvodní sérii simulací, vychází ze základního korpusu doplněného o plošku určenou pro senzor simulující detekční pole spektrometru. Cílem bylo zjistit, jakých výsledků dosahuje měření v simulaci a jak se liší od měření provedeného na reálné předloze bez defektů a detailů.

Reálné měření mělo za cíl zmapovat odezvu plochy kulového integrátoru v závislosti na natočení a poloze svítidla s úzkou vyzařovací charakteristikou, dané svítidlo vytvořilo na povrchu kulového integrátoru kruh o průměru 8 cm. Fyzické měření bylo prováděno v souřadnicovém systému C- γ s 5° krokem v rovině γ a s 15° krokem v rovině C. Výstupem bylo změření uniformity kulového integrátoru a data byla zpracována v excelu. Následně se data interpolovala v programu MATLAB. [5]

Měření popsané výše bylo posléze zpřesněno s 5° krokem v obou rovinách. Normované výstupní hodnoty takto vytvořené SRDF funkce sloužily jako srovnávací základna pro prováděné simulace.



Obr. 30: Interpolovaný výstup – povrchový graf kulového integrátoru [5]

3.2.2 Modelace

Modelace kruhového integrátoru byla prováděna přímo v programu ANSYS, verze 2022 R1, a v jeho modelačním prostředí SpaceClaim. Základní korpus byl vymodelován jako kulová skořepina s tloušťkou stěny 50 mm a s vnitřním průměrem 2500 mm. Následně byla tato skořepina rozdělena na dvě polokoule, které byly od sebe odsunuty 4 mm a ve vzniklé mezeře bylo vytvořeno těsnění jako samostatná entita. Výsledkem byly 3 samostatné entity: „1. polokoule“, „2. polokoule“ a „těsnění“.

Následovala tvorba clon. Hlavní clona je tvořena elipsovitým válcem s šířkou 845 mm, výškou 843 mm a tloušťkou 2 mm. Hlavní clona byla umístěna do prostoru 1. polokoule s posunem od středové osy a od zadní stěny polokoule dle obrázku (Obr. 27), kde korespondující rozměry jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2). Vedlejší clona je tvořena válcem o průměru podstavy 400 mm a tloušťkou 9 mm. Vedlejší clona byla umístěna do prostoru 2. polokoule a její poloha vůči středové ose a zadní stěně polokoule je vyobrazena na obrázku (Obr. 28) a odpovídající rozměry jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 2).

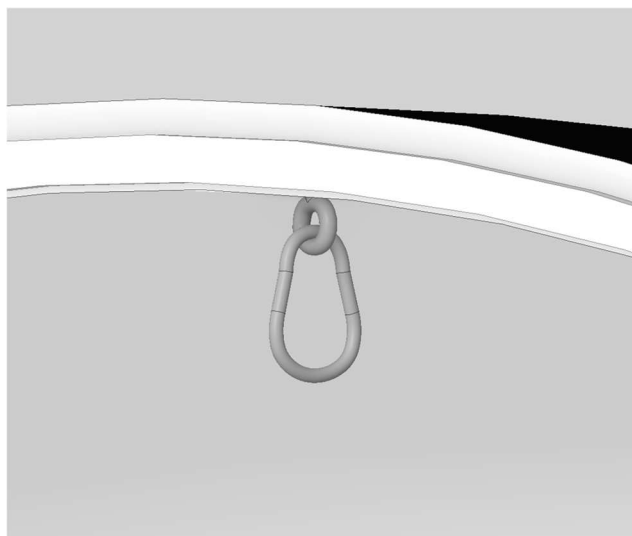
Dalším konstrukčním prvkem prvního modelu je skoba pro uchycení svítidel. Úchytný bod pro skobu byl situován do prostoru 2. polokoule dle obrázku (Obr. 29), kde rozměr „G“ činí 60 mm a rozměr „H“ činí 20 mm. Úchytný bod byl sloučen s tělem 2. polokoule. Samotná skoba byla vytvořena volnou modelací s cílem dosažení věrohodného tvaru a skládá se z tvarovaných válcovitých segmentů o průměru cca 4 mm a celková výška skoby činí 50 mm. Skoba tvoří samostatnou entitu.

Reálný podklad není tvořen dokonalými polokoulemi a v části, kde je umístěn pracovní otvor pro spektrometr, je povrch zploštěn a nahrazen plexisklem (viz Obr. 31). Toto zploštění bylo dodatečně vytvořeno pomocí vytvoření krychle prostupující stěnou 1. polokoule. Následnou sérií úprav zaoblováním a vyhlazováním hran a ploch bylo vytvořeno zmírněné zaoblování stěny polokoule za hlavní clonou vedoucí k vytvoření rovné kruhové plochy o poloměru přibližně 44,5 mm, která dostatečně věrně simuluje pracovní otvor krytý plexisklem. Vzniklé těleso bylo sloučeno s tělem 1. polokoule a tvoří jednotný celek. Drátový pohled na výsledný tvar je na obrázku (Obr. 32).

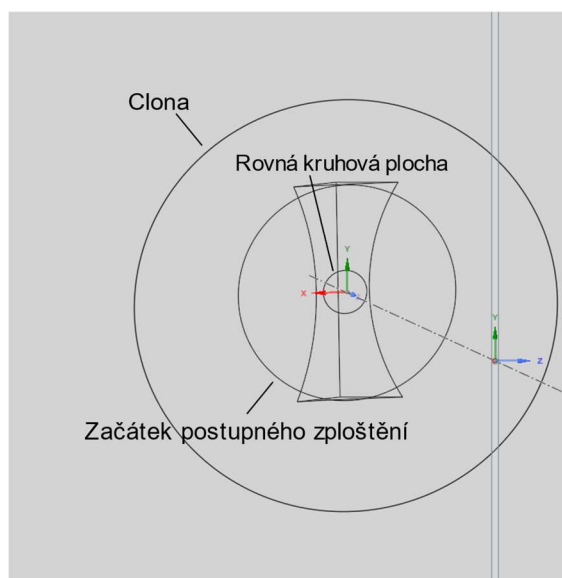
V poslední fázi byla přidána úchytná lanka držící hlavní clonu.



Obr. 31: Otvor pro detektor spektrometru krytý plexisklem



Obr. 33: Model skoby a jejího uchycení



Obr. 32: Provedení zploštění stěny 1. polokoule – pohled zezadu, drátový model

3.2.3 Světelný zdroj

Pro simulaci byl vytvořen model svítidla ve tvaru LED zdroje pro komerční využití s patičí E27 a skládá se ze dvou částí – těla a baňky. Tělo je složené ze tří segmentů reprezentujících patiči, předřadníkovou část a nosnou část LED čipsetu. Baňka je tvořená obloukovou skořepinou.

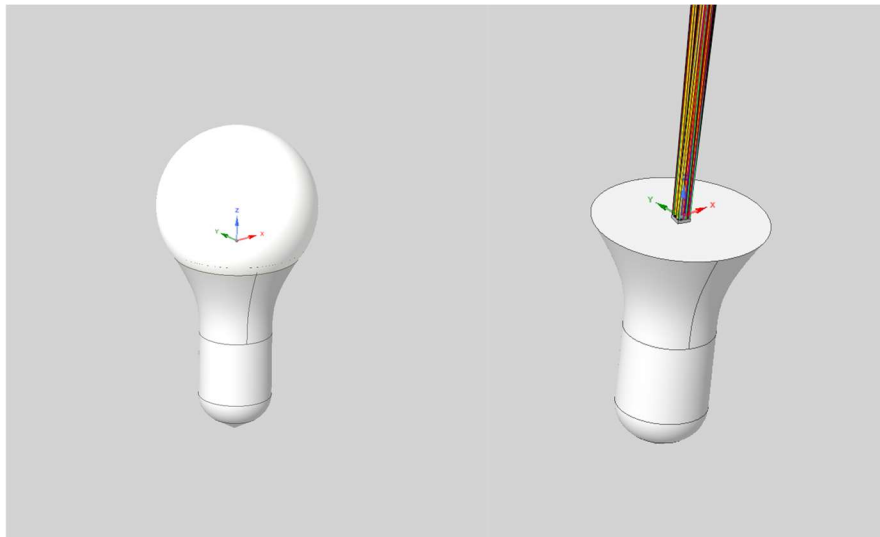
Světelný zdroj byl nastaven následovně: vyzařovaný světelný tok činí 1000 lm, náhradní teplota chromatičnosti činí 4000 K a spektrálně se zdroj chová jako černé těleso. Zde nastává odchýlení od obecných vlastností LED zdrojů, které mají své spektrum z velké části v modré oblasti vlnových délek a pokrytí zbylých vlnových délek je řešeno

přeměnou modré složky na luminoforu. V rámci simulací se však šlo cestou rovnoměrnějšího pokrytí barevného spektra. Posléze se zkušebně změnilo nastavení jednoho zdroje na monochromatický zdroj s vlnovou délkou 555 nm, aby se otestoval vliv nastavení spektrálních vlastností zdroje na výpočetní dobu a výsledek simulace. Bylo zjištěno, že nastavení monochromatického zdroje nemá vliv na výpočetní dobu simulace a v oblasti výsledků došlo ke snížení odchylky v rámci detekovaných hodnot při zachování stejné průměrné osvětlenosti (zvýšila se rovnoměrnost výsledků). Vzhledem k nezměněné době potřebné pro provedení simulace a nezměněným hodnotám průměrné osvětlenosti se z časových důvodů upustilo od přepočtení všech simulací s pouze monochromatickým zdrojem a vyhodnocení proběhlo s původním nastavením.

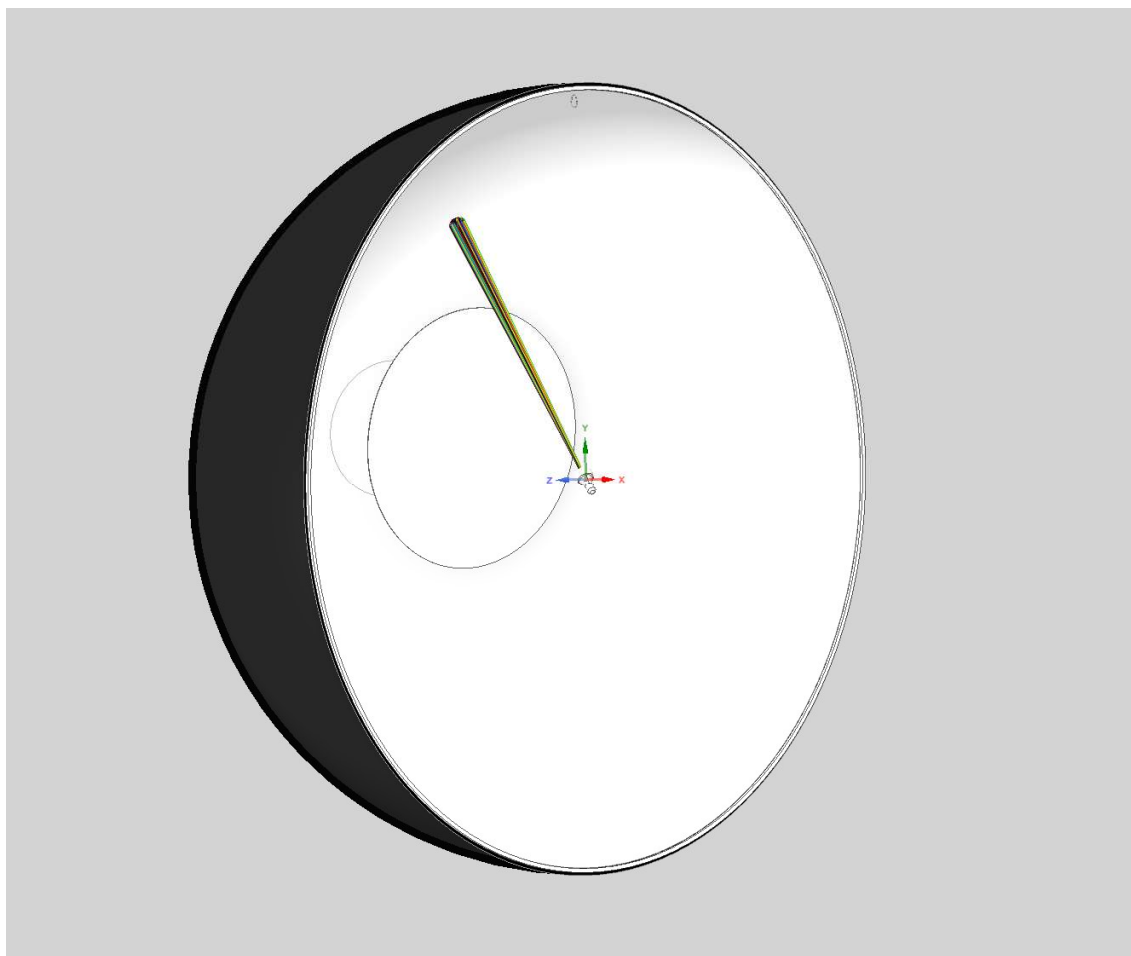
V rámci simulace jsme se rozhodli zvětšit průměr kruhu světla vytvořeného na povrchu kulového integrátoru na 10 cm oproti 8 cm vytvořeného při reálném měření. Aby bylo dosaženo kruhu o daném průměru, musel být vypočten vyzařovací úhel svítidla. Při výpočtu se vycházelo z předpokládaného umístění světelného zdroje do středu kulového integrátoru a poloměru kulového integrátoru. Pomocí převedení na pravoúhlý trojúhelník s pravým úhlem ve středu projektovaného kruhu byl stanoven vyzařovací úhel zaokrouhlený na jedno desetinné místo následovně:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{50}{1250}\right) = 2,3^\circ \quad (3.1)$$

Výsledný zdroj byl nastaven jako symetrický Gaussovský s úhlem vyzařování $2,3^\circ$ se středem vyzařovací plochy umístěném v počátku simulačního prostoru. Celkově bylo vytvořeno 20 svítidel s různým náklonem a směrem vyzařování, důvod tohoto omezeného počtu je popsán v podkapitole (3.2.7).



Obr. 34: Model světelného zdroje



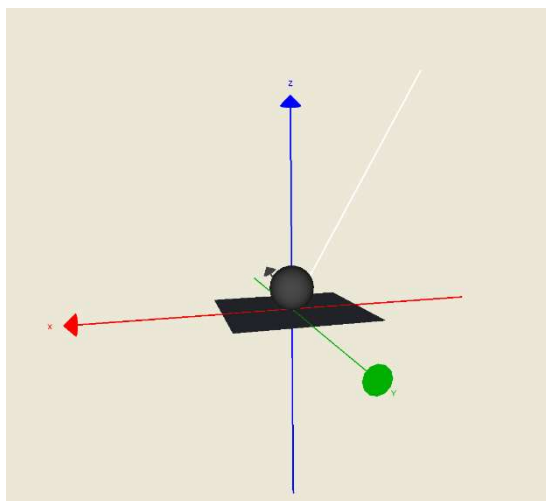
Obr. 35: Umístění světelného zdroje v prostoru simulovaného kulového integrátoru – nastavení pro simulaci "C250 g130"

3.2.4 Vlastnosti materiálů jednotlivých komponent

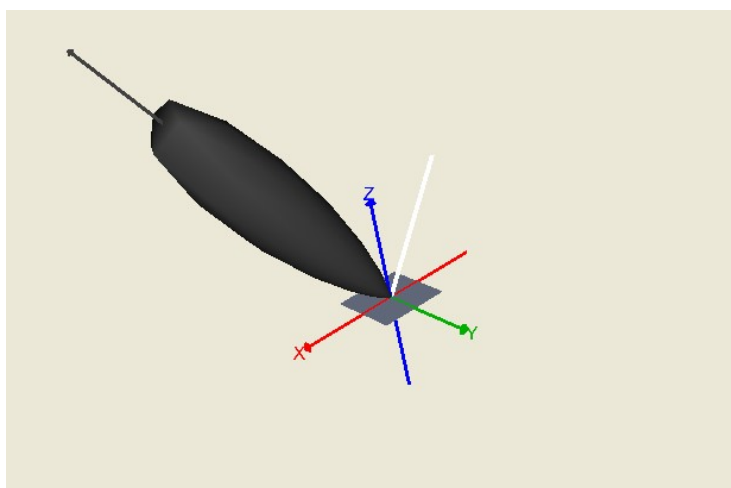
V rámci simulace je pro některé prvky využito stávající nabídky materiálových a povrchových vlastností, které jsou součástí knihoven programu ANSYS. Převážně se však vytvářely uživatelské odrazné vlastnosti povrchů za pomoci vestavného editoru „Speos – Scattering surface“.

V rámci nastavování vlastností uživatelských odrazných ploch se využívá dvou typů odrazů, Lambertovského odrazu a Gaussovského odrazu. U odrazu Lambertovského typu dochází k rovnoměrnému odrazu dopadajícího paprsku do všech směrů – dokonalému difúznímu odrazu a osvětlovaný povrch má ze všech úhlů pohledu stejný jas. Distribuce odražených paprsků má vždy tvar koule. Na obrázku (Obr. 36) je s pomocí funkce „Viewer“ programu „Speos – Scattering surface“ zobrazená výsledná distribuce paprsků při nastavení 100% Lambertovského odrazu a dopadu paprsku pod úhlem 35° .

U odrazu Gaussovského typu dochází k odrazu paprsků pod určitým úhlem s pravděpodobností danou Gaussovým rozdělením. Příklad distribuce odražených paprsků při nastavení 100 % Gaussovského odrazu s rozsahem Gaussova rozdělení nastaveným na 25° a při dopadu odrážejícího se paprsku pod úhlem 35° je zobrazen na obrázku (Obr. 37).



Obr. 36: Výsledný odraz paprsku dopadajícího pod úhlem 35° na povrch s nastaveným 100% Lambertovským odrazem



Obr. 37: Výsledný odraz paprsku dopadajícího pod úhlem 35° od povrchu s nastaveným 100% Gaussovským odrazem s rozsahem distribuce 25°

Pro pracovní plochy simulovaného kulového integrátoru byla zvolena v objemových vlastnostech obecná vlastnost „Opaque“, která vytváří základní neprůhledný objem vytvořeného tělesa a pro povrchové vlastnosti byl vytvořen uživatelský povrch s názvem „Odravný materiál 93% 80 L 20 G“. Tento materiál má nastavenou 93% odraznost povrchu složenou z 80% Lambertovským odrazem a 20%

Gaussovským odrazem. Zbylých 7 % materiál pohlcuje. Jako pracovní plochy byly označeny povrchy 1. polokoule, 2. polokoule, hlavní clona a vedlejší clona.

Těsnění bylo v počáteční fázi nastaveno jako „Opaque“ materiál se 30% zrcadlovým odrazem. Postupem času došlo k dohodě o změně odrazných vlastností a byl vytvořen uživatelský materiál s názvem „Těsnění odraznost 20 % Lambert“, kde byla materiálu přidělena 20% odraznost se 100 % Lambertovského odrazu.

Skoba byla nastavena jako „Opaque“ materiál s uživatelsky vytvořeným odrazným povrchem s názvem „Skoba odraznost 30 %“, odrazností 30 % a 100% Gaussovským charakterem odrazu.

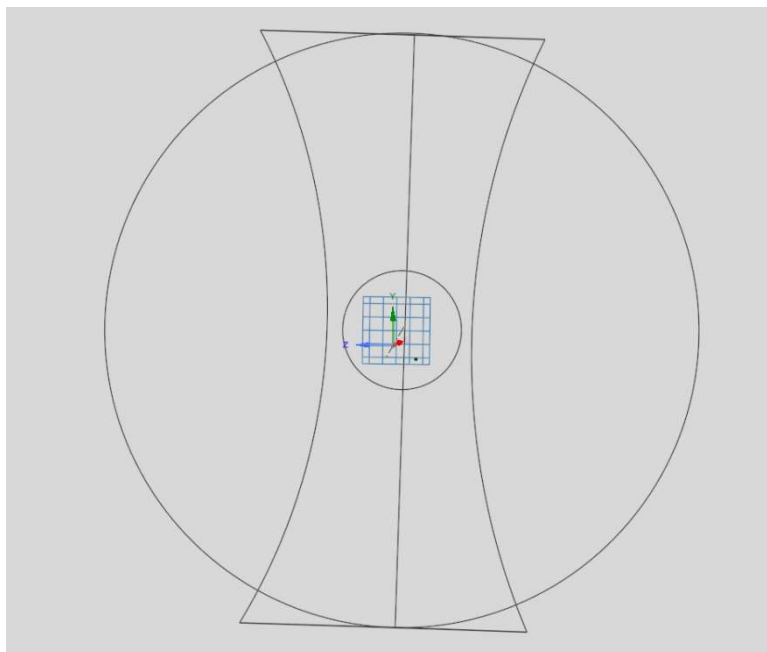
Těla svítidel byla nastavena jako „Opaque“ materiál a byla jim přiřazena odrazná vlastnost povrchu pro bílý plast z knihovny materiálů – „White Plastic“ se 70% odrazností čistě Lambertovského charakteru.

Baňky svítidel měly v prvotní fázi danou objemovou vlastnost z knihovny plexiskel – „220114_Evonik_Plexiglas_8N“, ale kvůli náročnosti výpočtu byl materiál pozměněn na obecný optický – „Optic“ se speciálně nastavenou průchodností s názvem „Průchozí materiál 98% Gauss 90 Lambert 10“, kde průchodnost materiálu byla nastavena na 98 % s 90% Gaussovskou charakteristikou a 10% Lambertovskou charakteristikou.

3.2.5 První kontrolní simulace a vyladění chyb

Vyhodnocovací plochou simulace byl v prvotní fázi čtvercový senzor o velikosti 100x100 mm umístěný za hlavní clonou tak, že mezi plochou polokoule a senzorem byla mezera. První kontrolní simulace proběhla s limitem 10 mil. paprsků a její výsledky poukázaly na možné vady prvního modelu. Jedním z nich bylo špatné nastavení odraznosti materiálu pracovních ploch.

Dalším odhaleným problémem bylo umístění vyhodnocovací plochy, kde byly detekovány paprsky jen v levé dolní části. Na první pohled vypadalo umístění bezproblémově, avšak při důkladném zkoumání se ukázalo, že vyhodnocovací plocha zasahovala do stěny 1. polokoule. To vedlo k úpravě modelu zploštěním zadní stěny popsané v závěru podkapitoly 3.2.2, zmenšením výpočtové plochy na 50x50 mm a umístění na povrch rovné kruhové plochy (viz obrázek níže). Aplikaci tohoto řešení předcházely pokusy se změnou počtu paprsků, změnou úhlu vyzařování zdroje, jeho orientací v rámci kulového prostoru a opětovná kontrola nastavení odrazných vlastností všech materiálů.



Obr. 38: Umístění výpočtové plochy

Po vyladění vzniklých problémů následovalo stanovení dostatečného množství paprsků, se kterými byly prováděny další simulace. Byla snaha dosáhnout co největšího počtu výpočetních paprsků, ale narazilo se na časové limity a hardwarové limity výpočetního počítače. Metodou postupného navyšování paprsků byla testována časová náročnost simulace.

3.2.6 Určení nastavení množství paprsků

Časová náročnost:

Při 10 mil. paprscích trvala simulace v průměru 8 minut, při 20 mil. dosahoval potřebný čas 15 minut, při 50 mil. paprscích simulace trvaly okolo 40 minut, při 100 mil. paprscích dosahovala doba trvání 1 hodiny a 30 minut. Pokusy s nastavením 500 mil. paprsků narazily na hardwarové limity použitého počítače, kdy po zpracování cca 300 mil. paprsků docházelo k selhání simulace. Při pokusu s 200 mil. paprsky se doba simulace pohybovala v rozmezí 2 až 2,5 hodin a úspěšně dokončena byla v polovině případů vlivem vysoké výpočetní náročnosti na hardware.

Hardwarová náročnost:

Pro tvorbu modelu a následné provádění simulací byl využit osobní stolní počítač autora, který v době vytváření této práce disponoval následujícím relevantním hardwarovým a softwarovým vybavením:

- Procesor: Intel(R) Core(TM) i5-8400
- RAM: 16 GB
- Grafická karta: Radeon RX 580 Series
- OS: Windows 10, 64bit

Program ANSYS měl v poskytnuté licenční verzi omezené množství využitelných jader procesoru, odtud se odvíjela největší limitace výpočetní schopnosti použitého počítače.

Při nastavení 10-50 mil. paprsků nedocházelo k závažnému zatížení výpočetní schopnosti použitého počítače. U 50 mil. paprsků docházelo k občasnému automatickému uvolnění kapacity procesoru ve formě ukončení procesů síťové karty a následné ztráty připojení k licenčnímu serveru. Odpojení od licenčního serveru nemělo vliv na dokončení probíhající simulace, neboť program ANSYS v těchto případech dává uživateli časový limit jedné hodiny na obnovení připojení nebo uložení aktuálního postupu. Doba jedné hodiny byla v případě trvání simulace 40 minut dostatečná pro doběh simulace a následné uložení výsledků, aniž by došlo k jejich ztrátě. Po obnovení připojení a následném pokusu provedení další simulace však docházelo k pádu programu. Tento problém byl eliminován restartováním počítače po každé ztrátě připojení a vypnutím všech podružných a nepotřebných procesů, aby se uvolnilo co nejvíce výpočtové kapacity procesoru.

Při nastavení 100 mil. paprsků docházelo k občasnému selhání simulace, kdy nastalo náhlé zamrznutí programu následované „blackscremem“ a po obnovení obrazu proces simulace doběhl, poté se zobrazila chybová zpráva.

Po výskytu této chyby se po uložení a následném restartování programu tento problém opakoval, řešením bylo restartování počítače po každém výskytu této chyby.

Výše popsany problém byl ve svém výskytu četnější u simulací s vyšším počtem paprsků a ve 100 % případů se vyskytoval u simulací s nastavením 500 mil. paprsků.

S přihlédnutím k výše popsané časové náročnosti, hardwarové náročnosti a nárokům na co nej přesnější výsledky bylo zvoleno pro veškeré simulace nastavení 50 mil. paprsků.

3.2.7 Počet simulací v jedné sérii

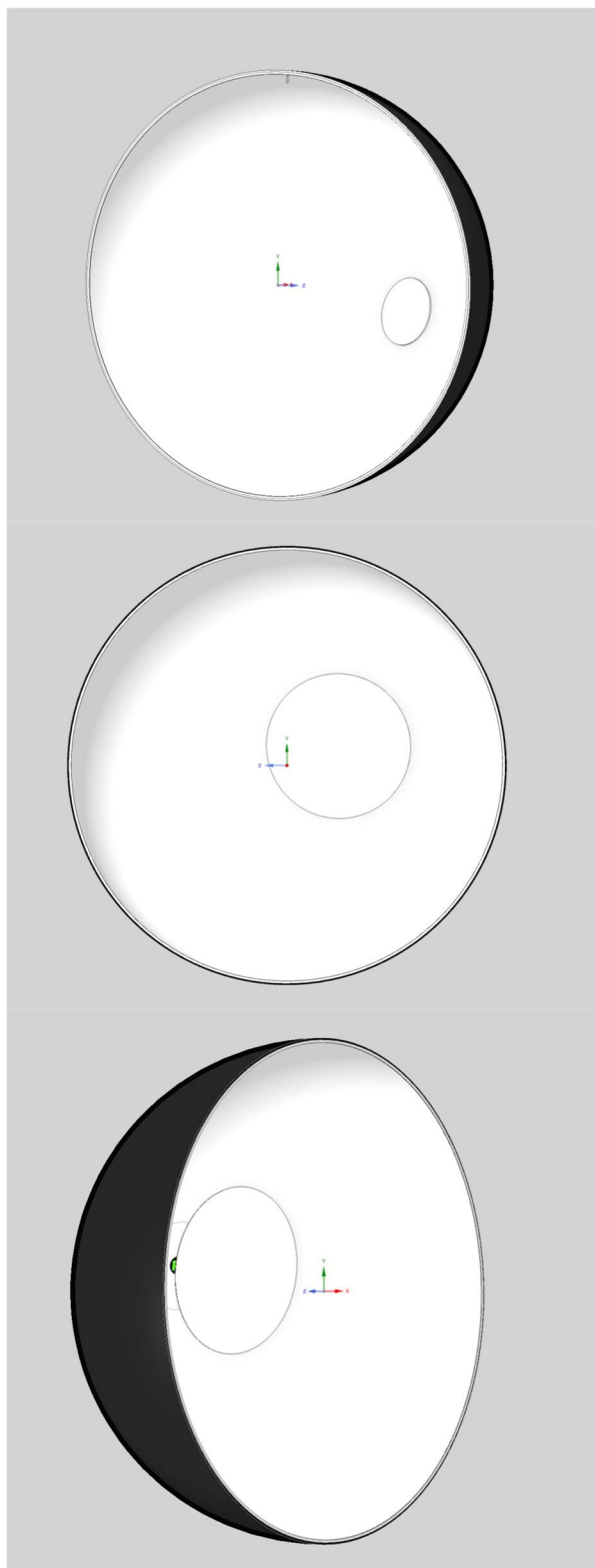
Reálné měření uniformity a rezpozivity povrchu kulového integrátoru probíhalo s 5° krokem v rovině γ a s 5° krokem v rovině C po celé ploše integrátoru. Vzhledem k časové náročnosti simulací bylo upuštěno od plánu provést simulace s totožným krokem a bylo vytipováno 20 měřících bodů se souřadnicemi: C0- γ 135, C0- γ 90, C0- γ 45, C45- γ 90, C70- γ 135, C70- γ 80, C70- γ 45, C90- γ 90, C135- γ 90, C155- γ 90, C180- γ 135, C180- γ 90, C180- γ 45, C250- γ 180, C250- γ 150, C250- γ 130, C250- γ 90, C250- γ 45,

C250- γ 0. Simulace se souřadnicemi C155- γ 90 byla brána jako referenční, neboť při reálném měření byla v těchto souřadnicích nejmenší odchylka od normované hodnoty.

Výsledky simulací s nastavením vyzařování simulovaného bodového zdroje do těchto souřadnic byly porovnávány s hodnotami reálného měření s totožnými souřadnicemi.



Obr. 39: Zobrazení směřování světelných zdrojů jednotlivých simulací



Obr. 40: 3D zobrazení prvního modelu

3.3 Druhá verze modelu

Po provedení první série simulací byl vytvořen druhý model, který v základu vycházel z modelu prvního, ale byl doplněn o další prvky se snahou více model přiblížit reálnému podkladu. Po provedení změn následovala druhá série simulací a porovnání s výsledky první série, zda došlo k žádanému přiblížení se chování reálné předlohy.

3.3.1 Provedené změny

Do modelu byly vneseny dodatečné prvky, které měly za úkol reprezentovat detaily a vady povrchu kulového integrátoru a přiblížit se více reálné předloze. Jednalo se o defekt pláště v podobě odloupenuté barvy u hrany první polokoule, souřadnicově v oblasti C0- γ 90, dále o otvor pro napájecí přívod měřených svítidel v horní části druhé polokoule poblíž skoby, souřadnicově v oblasti C0- γ 180, poté o malou díru na spodní části, reprezentující mezeru v těsnění a teplotní čidlo v této mezeře, a na závěr ucpávku poblíž této díry, která mírně vystupuje do prostoru dna druhé polokoule. Rovněž byla oproti prvnímu modelu navýšena tloušťka těsnění ze 4 mm na 10 mm.

3.3.2 Modelace změn

Defekt pláště byl vymodelován pomocí křivek, aby věrohodně kopíroval tvar díry vzniklé po odloupenutí barvy, vzniklá plocha byla zarovnána s povrchem první polokoule a vytažena pár milimetrů dovnitř stěny bez následného sloučení. Vzniklý objekt tvoří samostatnou entitu.

Díry v horní i dolní části druhé polokoule byly vytvořeny jako miniaturní válce s průměrem podstavy 10 mm zapuštěné do povrchu polokoule a povrchově zarovnané s povrchem polokoule. Díry jsou provedeny jako samostatné entity.

Ucpávka ve dně byla vymodelována jako válec s průměrem podstavy 30 mm zapuštěný do druhé polokoule. V tomto případě nebyl povrch válce zarovnan s povrchem polokoule, ale válec mírně vystupuje 1 mm do pracovního prostoru polokoule a hrana válce byla zaoblena, aby zaoblení končilo u povrchu polokoule. Ucpávka rovněž tvoří samostatnou entitu.

3.3.3 Materiálové vlastnosti přidávaných a upravených prvků

Veškeré vlastnosti povrchů nových prvků byly po konzultaci s vedoucím práce vytvořeny pomocí nástroje „Speos – Scattering surface“ následovně.

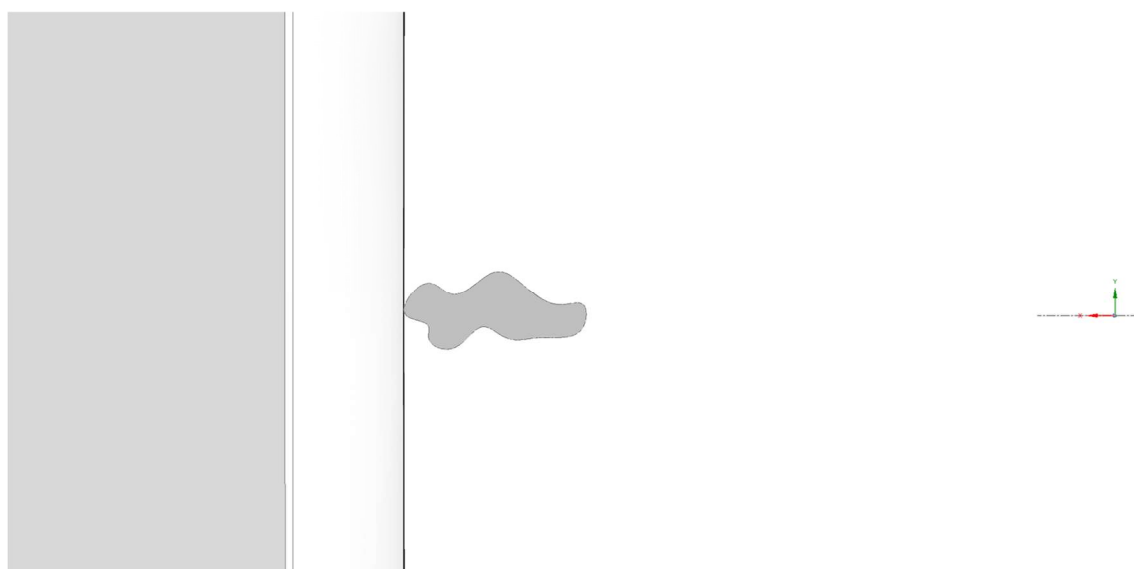
Pro defekt pláště byla zvolena v objemových vlastnostech volba „Opaque“ a navržený soubor povrchových vlastností s názvem „Defekt pláště“ byl nastaven na 70 % pohltivosti a 30 % plně Gaussovského odrazu.

Pro díru v horní i dolní části byla zvolena vlastnost „Opaque“ a soubor povrchových vlastností pojmenovaný „Díra odraznost 10 %“ byl nastaven na 10 % odraznost plně Lambertovského typu.

Pro ucpávku na dně byla rovněž zvolena objemová vlastnost „Opaque“ a povrchové vlastnosti byly nastaveny v souboru pod názvem „Ucpávka odraznost 60 %“ na 60 % plně Gaussovského odrazu.



Obr. 41: Díra a ucpávka v dolní části a díra v horní části druhé polokoule



Obr. 42: Defekt pláště

3.4 Třetí verze modelu

Třetí série simulací měla za úkol zjistit změnu chování simulovaného integrátoru při změně odraznosti pracovních ploch jejím navýšením o 2 % (z 93 % na 95 % při zachování poměru typů odrazu). Tato změna reprezentuje obnovení nátěru na pracovních plochách kulového integrátoru s vylepšenými odraznými vlastnostmi.

Třetí model vychází z druhého modelu.

3.4.1 Provedené změny

Jedinou provedenou změnou bylo vytvoření nového uživatelského souboru s názvem „Odrazný materiál 95% 80 L 20 G“ s 95% odrazností tvořenou z 80 % Lambertovským odrazem a z 20 % Gaussovským odrazem. Tato materiálová vlastnost byla následně přidělena patřičným pracovním plochám kulového integrátoru (clony, plochy 1. a 2. polokoule).

3.5 Čtvrtý model

Čtvrtý model vychází z druhého modelu a úkolem provedených simulací bylo zjistit chování modelu při změně velikosti hlavní clony. V této variantě by byl zachován stávající nátěr, ale hlavní clona by byla zmenšena.

3.5.1 Provedené změny

Jedinou provedenou změnou oproti druhému modelu bylo zmenšení hlavní clony kulového integrátoru z 84,5 cm na výšku a 84,3 cm na šířku o 10 cm v obou dimenzích, výsledné rozměry hlavní clony činí 74,5 cm na výšku a 74,3 cm na šířku.

3.6 Závěrečné poznámky

Pro každou verzi modelu byl vytvořen samostatný soubor s novou kopií modelu, ze kterého se vycházelo. Tímto se zamezilo přepisování výsledků z předchozích verzí a došlo k usnadnění možnosti porovnávat výsledky.

4. VÝSLEDKY SIMULACÍ

V rámci této kapitoly dochází k prezentaci výsledků simulací v jednotlivých modelech, jejich srovnání s reálným měřením, srovnání mezi sebou a vyhodnocením získaných poznatků.

4.1 První série simulací

První série simulací proběhla na první verzi modelu po odladění chyb. Výsledky byly poté normovány a porovnány s výsledky reálného měření. Sledovanými hodnotami u simulací byly průměrná osvětlenost (v nástroji „Measures“ označeno „Average“) a směrodatná odchylka (v nástroji „Measures“ ozn. „Sigma“).

4.1.1 Výsledky první série simulací

V tabulce níže jsou uvedeny výsledky jednotlivých simulací a korespondující normované hodnoty průměrné osvětlenosti, kdy jako referenční hodnota byla brána průměrná osvětlenost simulace „C155 g90“.

Tabulka 3: Výsledky první série simulací

Simulace	Průměrná osvětlenost (lx)	Směrodatná odchylka – σ (lx)	Normovaná hodnota	Odchylka
C0 g135	506.4	94.2	1.04	4.0 %
C0 g90	504.7	99.2	1.04	3.6 %
C0 g45	493.6	93.7	1.01	1.4 %
C250 g180	495.0	93.1	1.02	1.7 %
C250 g150	523.1	93.5	1.07	7.4 %
C250 g130	542.0	102.6	1.11	11.3 %
C250 g90	507.7	93.0	1.04	4.3 %
C250 g45	526.6	96.7	1.08	8.1 %
C250 g0	495.5	89.9	1.02	1.8 %
C180 g135	488.5	94.6	1.00	0.3 %
C180 g90	485.0	88.5	1.00	-0.4 %
C180 g45	488.4	95.7	1.00	0.3 %
C70 g135	494.0	93.2	1.01	1.4 %
C70 g80	508.0	95.6	1.04	4.3 %
C70 g45	499.8	93.2	1.03	2.6 %
C135 g90	484.9	89.4	1.00	-0.4 %
C90 g90	496.4	90.4	1.02	1.9 %
C45 g90	503.2	95.6	1.03	3.3 %
C310 g90	542.2	96.3	1.11	11.3 %
C155 g90	486.9	90.1	1.00	0.0 %

Příklad výpočtu normované hodnoty pro simulaci „C250 g130”, kdy za průměr (referenci) je dosazena hodnota simulace „C155 g90”:

$$N = \frac{E_p}{E_{ref}} = \frac{542,0}{486,9} = 1,11 \quad (4.1)$$

Kde N je normovaná hodnota, E_p je hodnota průměrné osvětlenosti příslušné simulace a E_{ref} je referenční hodnota průměrné osvětlenosti.

Takto byly počítány veškeré normované hodnoty průměrné osvětlenosti u všech sérií simulací.

Tabulka 4: Porovnání normovaných hodnot první série simulací s měřením VUT

Simulace	Normovaná hodnota	Z měření VUT	Odchylka
C0 g135	1.04	0.98	6.5 %
C0 g90	1.04	0.86	17.3 %
C0 g45	1.01	0.89	12.3 %
C250 g180	1.02	1.04	-2.0 %
C250 g150	1.07	1.07	0.7 %
C250 g130	1.11	1.24	-13.0 %
C250 g90	1.04	0.95	9.7 %
C250 g45	1.08	1.03	5.6 %
C250 g0	1.02	0.86	15.6 %
C180 g135	1.00	1.05	-4.8 %
C180 g90	1.00	1.06	-6.3 %
C180 g45	1.00	0.99	1.1 %
C70 g135	1.01	0.98	3.8 %
C70 g80	1.04	0.98	6.7 %
C70 g45	1.03	0.94	8.6 %
C135 g90	1.00	0.99	0.9 %
C90 g90	1.02	0.97	5.0 %
C45 g90	1.03	0.96	7.1 %
C310 g90	1.11	1.08	3.1 %
C155 g90	1.00	1.00	0.3 %
Max-Min	0.118	0.382	0.303
Průměr	1.034	0.995	
Směrodatná odchylka	0.036	0.085	
Rel. směrodatná odchylka	3.45 %	8.58 %	
Uniformita	96.55 %	91.42 %	

Ze získaných výsledků je při porovnání patrná výrazná odlišnost mezi hodnotami získanými simulací a hodnotami změřenými na reálném přístroji. Dostatečná podobnost byla získána pouze u simulací „C250 g180“, „C250 g150“, „C180 g45“, „C135 g90“ a „C310 g90“. Ve zbylých případech byla odchylka příliš značná. Na základě těchto poznatků bylo rozhodnuto o rozšíření modelu o více detailů a o úpravách prvního modelu se snahou více se přiblížit reálnému podkladu.

Grafické zpracování výsledků je znázorněno na obrázku (Obr. 43).

4.2 Druhá série simulací

Druhá série simulací proběhla na druhé verzi modelu, jehož konstrukce byla popsána v kapitole (3.3). Výsledky byly normovány za stejných podmínek jako první série a porovnány s jejími výsledky a s reálným měřením.

4.2.1 Výsledky druhé série simulací

V tabulce níže jsou uvedeny výsledky jednotlivých simulací a korespondující normované hodnoty průměrné osvětlenosti.

Tabulka 5: Výsledky druhé série simulací

Simulace	Průměrná osvětlenost (lx)	Směrodatná odchylka – σ (lx)	Normovaná hodnota	Odchylka
C0 g135	482.9	92.7	1.01	0.7 %
C0 g90	484.4	93.5	1.01	1.0 %
C0 g45	478.4	91.7	1.00	-0.3 %
C250 g180	485.6	89.6	1.01	1.2 %
C250 g150	520.6	96.1	1.09	8.5 %
C250 g130	534.9	95.2	1.11	11.5 %
C250 g90	513.4	97.7	1.07	7.0 %
C250 g45	534.9	96.2	1.11	11.5 %
C250 g0	473.2	89.3	0.99	-1.4 %
C180 g135	474.1	88.2	0.99	-1.2 %
C180 g90	470.9	94.0	0.98	-1.9 %
C180 g45	468.8	88.5	0.98	-2.3 %
C70 g135	493.2	95.1	1.03	2.8 %
C70 g80	504.2	93.4	1.05	5.1 %
C70 g45	491.2	88.9	1.02	2.4 %
C135 g90	479.1	88.0	1.00	-0.1 %
C90 g90	501.7	94.8	1.05	4.6 %
C45 g90	499.2	90.7	1.04	4.0 %
C310 g90	536.2	99.6	1.12	11.8 %
C155 g90	479.8	89.8	1.00	0.0 %

Tabulka 6: Porovnání normovaných hodnot druhé série simulací s měřením VUT

Simulace	Normovaná hodnota	Z měření VUT	Odchylka
C0 g135	1.01	0.98	3.1 %
C0 g90	1.01	0.86	14.6 %
C0 g45	1.00	0.89	10.6 %
C250 g180	1.01	1.04	-2.4 %
C250 g150	1.09	1.07	1.8 %
C250 g130	1.11	1.24	-12.8 %
C250 g90	1.07	0.95	12.4 %
C250 g45	1.11	1.03	9.0 %
C250 g0	0.99	0.86	12.5 %
C180 g135	0.99	1.05	-6.3 %
C180 g90	0.98	1.06	-7.7 %
C180 g45	0.98	0.99	-1.5 %
C70 g135	1.03	0.98	5.1 %
C70 g80	1.05	0.98	7.4 %
C70 g45	1.02	0.94	8.3 %
C135 g90	1.00	0.99	1.2 %
C90 g90	1.05	0.97	7.6 %
C45 g90	1.04	0.96	7.8 %
C310 g90	1.12	1.08	3.5 %
C155 g90	1.00	1.00	0.3 %
Max-Min	0.141	0.382	0.274
Průměr	1.032	0.995	
Směrodatná odchylka	0.046	0.085	
Rel. směrodatná odchylka	4.47 %	8.58 %	
Uniformita	95.53 %	91.42 %	

Ze získaných výsledků je při porovnání odlišnosti mezi hodnotami získanými simulací a hodnotami změřenými na reálném přístroji možné konstatovat, že došlo k mírnému přiblížení se k reálné předloze. Dostatečné podobnosti je dosaženo u simulací „C0 g135“, „C250 g180“, „C250 g150“, „C180 g45“, „C135 g90“ a „C310 g90“. Ve zbylých případech je odchylka stále příliš značná.

Dalším pozorovatelným efektem je snížení rozdílu maxima a minima odchylky oproti první sérii simulací.

Grafické zpracování výsledků je znázorněno na obrázku (Obr. 43). V tabulce níže je zpracováno porovnání hodnot a odchylek první a druhé série simulací.

Tabulka 7: Porovnání druhé série simulací s měřením na VUT a s první sérií simulací

Simulace	Normovaná hodnota 2. série	Normovaná hodnota 1. série	Z měření VUT	Odchylka od měření VUT	Odchylka od první série simulací
C0 g135	1.01	1.04	0.98	3.1 %	-3.3 %
C0 g90	1.01	1.04	0.86	14.6 %	-2.7 %
C0 g45	1.00	1.01	0.89	10.6 %	-1.7 %
C250 g180	1.01	1.02	1.04	-2.4 %	-0.5 %
C250 g150	1.09	1.07	1.07	1.8 %	1.1 %
C250 g130	1.11	1.11	1.24	-12.8 %	0.2 %
C250 g90	1.07	1.04	0.95	12.4 %	2.7 %
C250 g45	1.11	1.08	1.03	9.0 %	3.3 %
C250 g0	0.99	1.02	0.86	12.5 %	-3.1 %
C180 g135	0.99	1.00	1.05	-6.3 %	-1.5 %
C180 g90	0.98	1.00	1.06	-7.7 %	-1.5 %
C180 g45	0.98	1.00	0.99	-1.5 %	-2.6 %
C70 g135	1.03	1.01	0.98	5.1 %	1.3 %
C70 g80	1.05	1.04	0.98	7.4 %	0.8 %
C70 g45	1.02	1.03	0.94	8.3 %	-0.3 %
C135 g90	1.00	1.00	0.99	1.2 %	0.3 %
C90 g90	1.05	1.02	0.97	7.6 %	2.6 %
C45 g90	1.04	1.03	0.96	7.8 %	0.7 %
C310 g90	1.12	1.11	1.08	3.5 %	0.4 %
C155 g90	1.00	1.00	1.00	0.3 %	0.0 %

Při srovnání výsledků druhé série simulací s první sérií z hlediska normovaných hodnot průměrné osvětlenosti pozorujeme v deseti případech nárůst hodnot, většinou v řádu desetin procent, s maximální hodnotou 3,3 % u simulace „C250 g45“ a v devíti případech pokles v řádech nízkých jednotek procent s maximem poklesu o 3,3 % u simulace „C0 g135“. Ve čtyřech případech došlo ke značnému zlepšení a přiblížení se reálnému podkladu, jedná se o simulace „C0 g135“, „C0 g90“, „C0 g45“ a „C250 g0“. V případě simulace „C180 g45“ došlo k poklesu hodnoty pod hodnotu získanou při reálném měření. Ve čtyřech případech došlo k výraznému oddálení se od hodnot naměřených, a to v případech „C90 g90“, „C250 g90“, „C250 g45“ a „C180 g135“. Ve zbylých případech došlo pouze k malým změnám.

Vzhledem k časové náročnosti dalších úprav a snah dosažení přesnějšího modelu, jehož pracovní prostor by měl co nejvíce podobnou odezvu jako reálná předloha, bylo rozhodnuto, že dosavadní model bude dostatečným odrazovým bodem pro realizaci dalších simulací za účelem zjišťování vlivu změn vlastností povrchů či změn rozměrů relevantních pracovních částí na uniformitu měření.

4.3 Třetí série simulací

Třetí série simulací byla provedena na třetí verzi modelu, který vycházel z druhého modelu a provedené úpravy byly popsány v kapitole (3.4). Úkolem třetí série simulací bylo zjistit vliv změny odraznosti pracovních povrchů kulového integrátoru. Tímto bylo simulováno případné obnovení nátěru pracovních ploch se snahou namíchat co nejideálnější nátěrové směsi.

4.3.1 Výsledky třetí série simulací

Výsledky jednotlivých simulací jsou vypsány v tabulce níže, v tabulce jsou rovněž zapsány příslušné normované hodnoty, které byly počítány dle vzorce (4.1).

Tabulka 8: Výsledky třetí série simulací

Simulace	Průměrná osvětlenost (lx)	Směrodatná odchylka – σ (lx)	Normovaná hodnota	Odchylka
C0 g135	679.1	112.7	1.01	1.3 %
C0 g90	677.2	111.5	1.01	1.0 %
C0 g45	681.6	110.0	1.02	1.7 %
C250 g180	670.5	110.2	1.00	0.0 %
C250 g150	715.6	118.2	1.07	6.8 %
C250 g130	741.5	125.5	1.11	10.6 %
C250 g90	700.7	116.7	1.05	4.5 %
C250 g45	714.8	120.0	1.07	6.6 %
C250 g0	674.4	114.4	1.01	0.6 %
C180 g135	673.4	109.7	1.00	0.5 %
C180 g90	668.2	110.6	1.00	-0.3 %
C180 g45	676.6	113.2	1.01	0.9 %
C70 g135	683.4	112.3	1.02	2.0 %
C70 g80	716.3	119.7	1.07	6.9 %
C70 g45	684.5	108.1	1.02	2.1 %
C135 g90	675.0	109.9	1.01	0.7 %
C90 g90	693.3	115.7	1.03	3.4 %
C45 g90	698.1	117.3	1.04	4.2 %
C310 g90	729.8	116.8	1.09	8.9 %
C155 g90	670.3	109.5	1.00	0.0 %

Tabulka 9: Porovnání normovaných hodnot třetí série simulací s měřením VUT

Simulace	Normovaná hodnota	Z měření VUT	Odchylka
C0 g135	1.01	0.98	3.8 %
C0 g90	1.01	0.86	14.7 %
C0 g45	1.02	0.89	12.6 %
C250 g180	1.00	1.04	-3.6 %
C250 g150	1.07	1.07	0.0 %
C250 g130	1.11	1.24	-13.7 %
C250 g90	1.05	0.95	9.9 %
C250 g45	1.07	1.03	4.1 %
C250 g0	1.01	0.86	14.4 %
C180 g135	1.00	1.05	-4.7 %
C180 g90	1.00	1.06	-6.2 %
C180 g45	1.01	0.99	1.8 %
C70 g135	1.02	0.98	4.3 %
C70 g80	1.07	0.98	9.2 %
C70 g45	1.02	0.94	8.1 %
C135 g90	1.01	0.99	2.0 %
C90 g90	1.03	0.97	6.5 %
C45 g90	1.04	0.96	7.9 %
C310 g90	1.09	1.08	0.6 %
C155 g90	1.00	1.00	0.0 %
Max-Min	0.109	0.382	0.284
Průměr	1.031	0.995	
Směrodatná odchylka	0.032	0.085	
Rel. směrodatná odchylka	3,14 %	8.58 %	
Uniformita	96,86 %	91.42 %	

Z dosažených výsledků je na první pohled patrné, že došlo ke zvýšení detekovaných hodnot osvětlenosti. Rovněž došlo k nárůstu směrodatné odchylky, která však z pohledu jejího rozmezí nedoznala významné změny. Významnou pozorovatelnou změnou je značný pokles rozptylu u normovaných hodnot a s tím související výrazný nárůst uniformity. Celkově lze konstatovat, že navýšením odraznosti pracovních ploch z 93 % na 95 % došlo ke značnému zlepšení uniformity odezvy povrchu simulovaného kulového integrátoru. Grafické zpracování výsledků je znázorněno na obrázku (Obr. 45).

4.4 Čtvrtá série simulací

Čtvrtá série simulací byla provedena na čtvrté verzi modelu, která byla popsána v kapitole (3.5). Úkolem čtvrté série simulací bylo zjistit vliv zmenšení hlavní clony zakrývající pracovní otvor s detektorem spektorradiometru. Tímto bylo simulováno možné zmenšení hlavní clony reálného přístroje o 10 cm.

4.4.1 Výsledky čtvrté série simulací

Výsledky jednotlivých simulací jsou vypsány v tabulce níže, v tabulce jsou rovněž zapsány příslušné normované hodnoty, které byly počítány dle vzorce (4.1).

Tabulka 10: Výsledky čtvrté série simulací

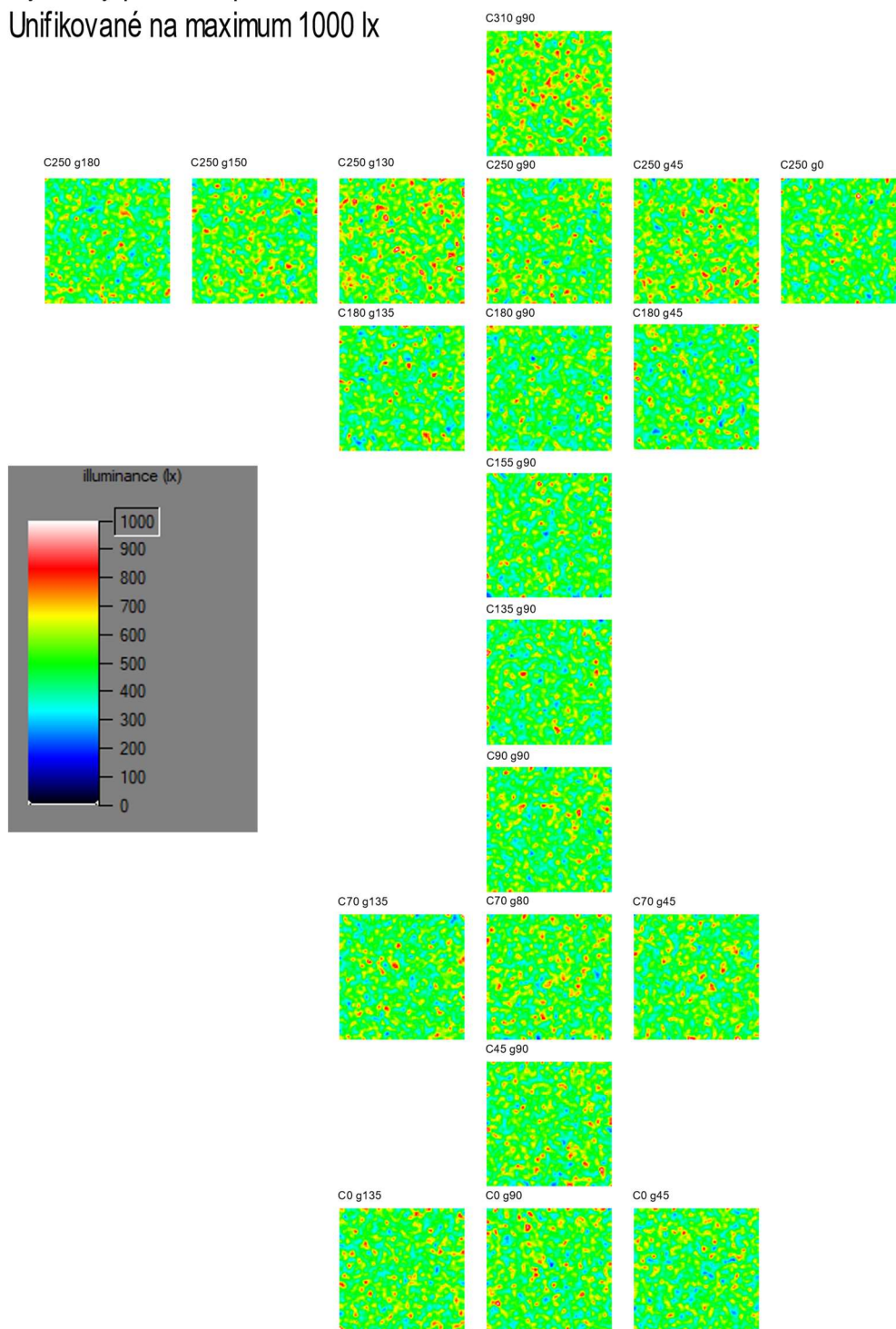
Simulace	Průměrná osvětlenost (lx)	Směrodatná odchylka – σ (lx)	Normovaná hodnota	Odchylka
C0 g135	500.75	93.9	1.05	4.9 %
C0 g90	502.85	96.4	1.05	5.4 %
C0 g45	498.87	95.6	1.05	4.6 %
C250 g180	494.21	93.3	1.04	3.6 %
C250 g150	524.22	97.2	1.10	9.9 %
C250 g130	546.63	103.0	1.15	14.6 %
C250 g90	522.46	96.9	1.09	9.5 %
C250 g45	523.02	96.7	1.10	9.6 %
C250 g0	485.90	92.0	1.02	1.8 %
C180 g135	495.26	94.3	1.04	3.8 %
C180 g90	487.81	95.2	1.02	2.2 %
C180 g45	490.97	90.5	1.03	2.9 %
C70 g135	492.42	92.2	1.03	3.2 %
C70 g80	508.85	97.4	1.07	6.6 %
C70 g45	487.16	92.3	1.02	2.1 %
C135 g90	498.30	87.8	1.04	4.4 %
C90 g90	509.42	95.6	1.07	6.8 %
C45 g90	501.10	93.9	1.05	5.0 %
C310 g90	535.58	96.8	1.12	12.2 %
C155 g90	477.14	91.9	1.00	0.0 %

Tabulka 11: Porovnání normovaných hodnot čtvrté série simulací s měřením VUT

Simulace	Normovaná hodnota	Z měření VUT	Odchylka
C0 g135	1.05	0.98	7.4 %
C0 g90	1.05	0.86	19.0 %
C0 g45	1.05	0.89	15.5 %
C250 g180	1.04	1.04	-0.1 %
C250 g150	1.10	1.07	3.1 %
C250 g130	1.15	1.24	-9.8 %
C250 g90	1.09	0.95	14.9 %
C250 g45	1.10	1.03	7.1 %
C250 g0	1.02	0.86	15.7 %
C180 g135	1.04	1.05	-1.4 %
C180 g90	1.02	1.06	-3.6 %
C180 g45	1.03	0.99	3.7 %
C70 g135	1.03	0.98	5.5 %
C70 g80	1.07	0.98	9.0 %
C70 g45	1.02	0.94	8.0 %
C135 g90	1.04	0.99	5.7 %
C90 g90	1.07	0.97	9.8 %
C45 g90	1.05	0.96	8.7 %
C310 g90	1.12	1.08	4.0 %
C155 g90	1.00	1.00	0.0 %
Max-Min	0.127	0.382	0.288
Průměr	1.057	0.995	
Směrodatná odchylka	0.038	0.085	
Rel. směrodatná odchylka	3,56 %	8.58 %	
Uniformita	96,44 %	91.42 %	

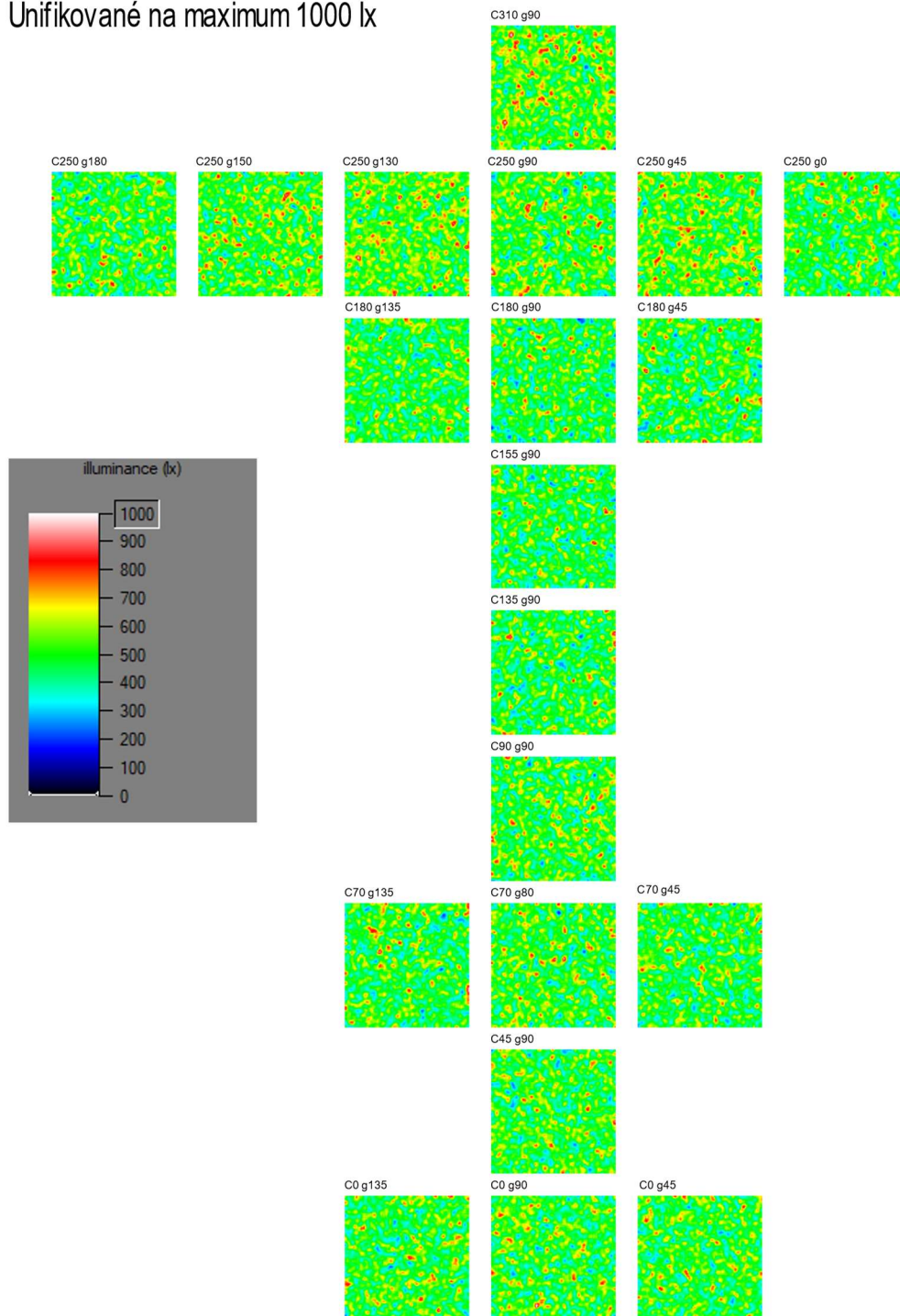
Z dosažených výsledků je pozorovatelné, že došlo ke zvýšení detekovaných hodnot osvětlenosti. Další pozorovatelnou změnou je přesah veškerých sledovaných hodnot nad referenční hodnotu a celkové zvýšení uniformity. Díky těmto poznatkům můžeme konstatovat, že i v tomto případě došlo ke zlepšení odezvy kulového integrátoru, avšak nedošlo k tak výrazné změně, jako při změně provedené u třetí série simulací. Grafické zpracování výsledků je znázorněno na obrázku (Obr. 46).

Výsledky první kompletní série simulací.
Unifikované na maximum 1000 lx



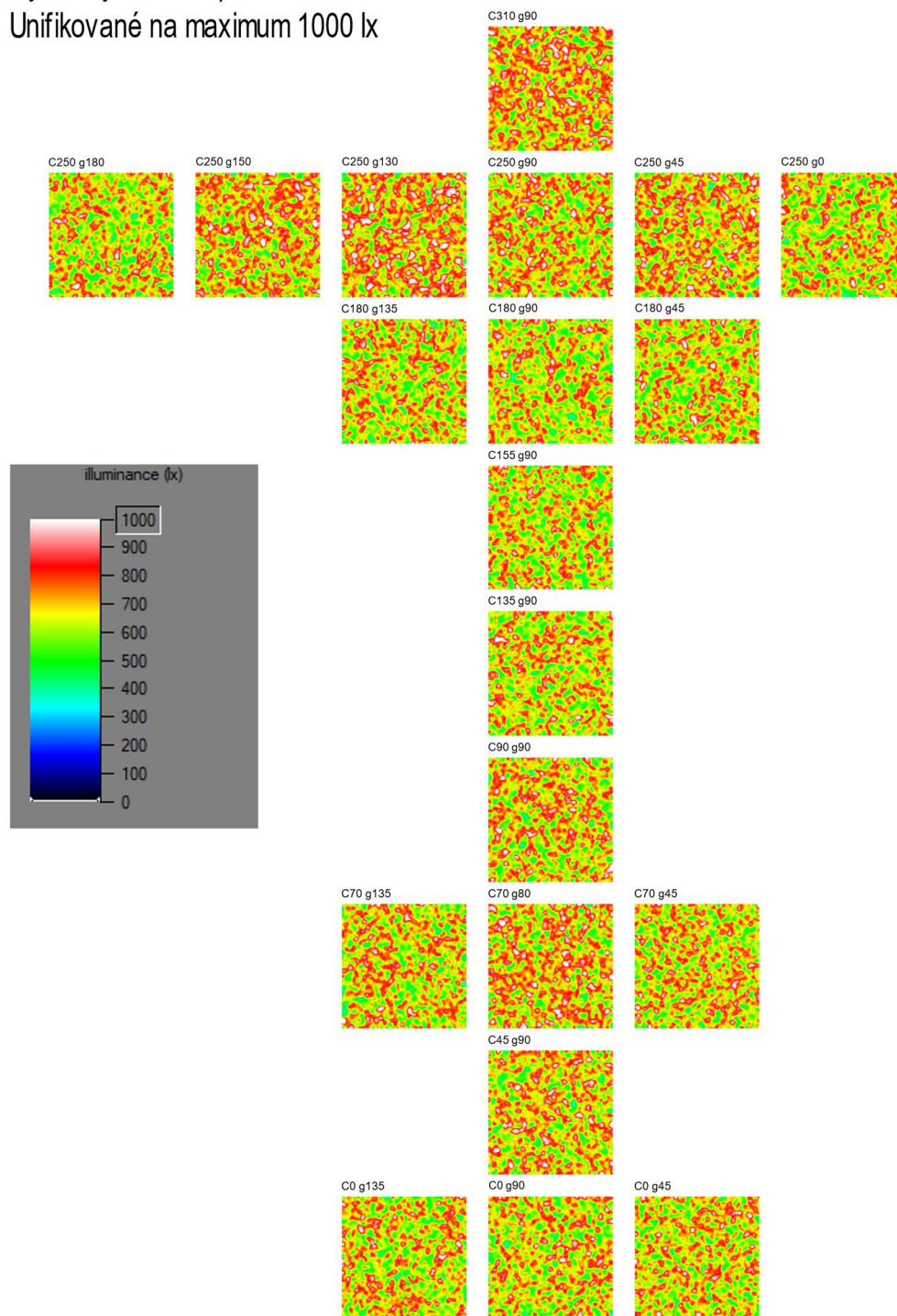
Obr. 43: Grafické znázornění výsledků první série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx

Výsledky druhé kompletní série simulací.
Unifikované na maximum 1000 lx



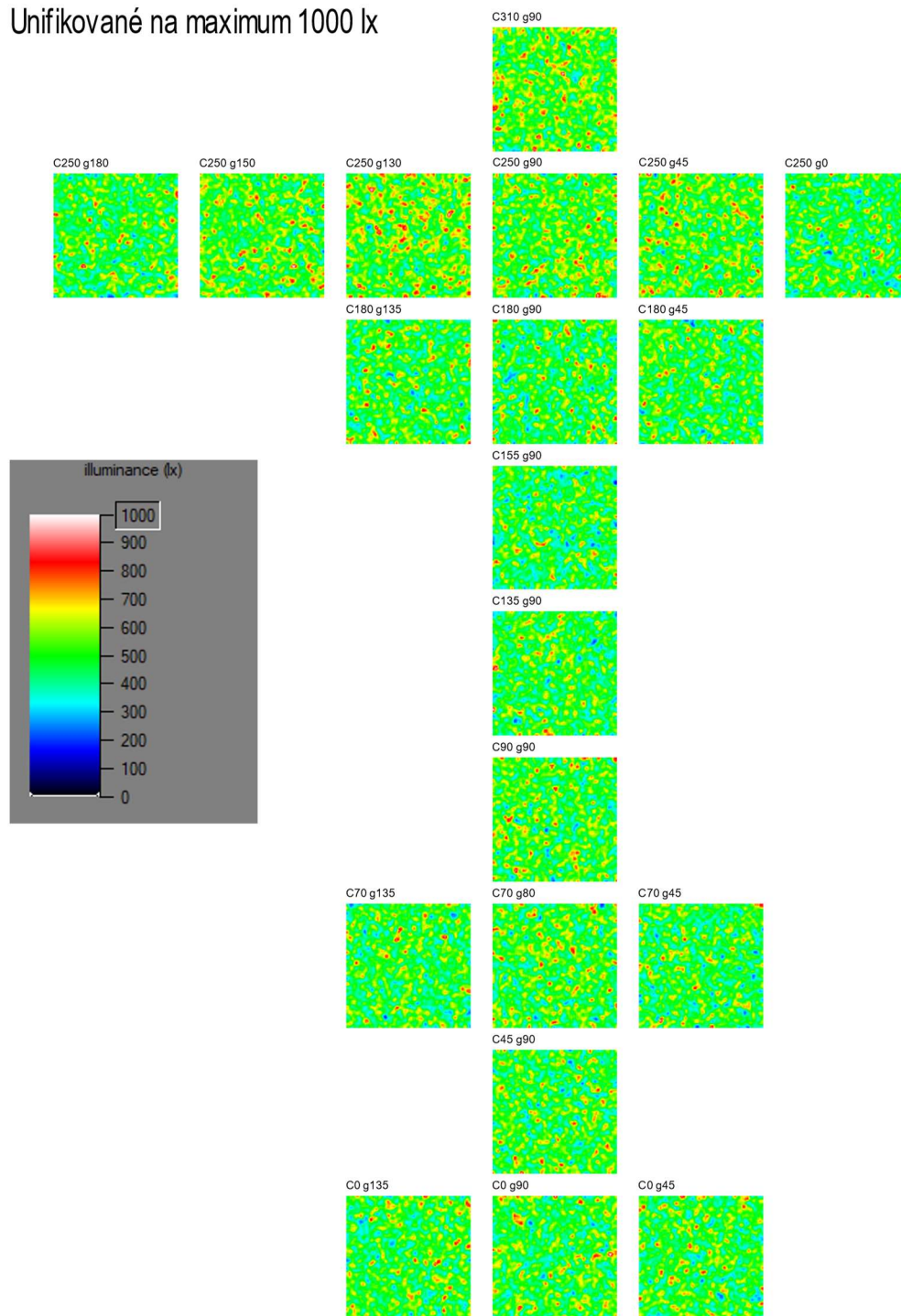
Obr. 44: Grafické znázornění výsledků druhé série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx

Výsledky třetí kompletní série simulací.
Unifikované na maximum 1000 lx



Obr. 45: Grafické znázornění výsledků třetí série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx

Výsledky čtvrté kompletní série simulací.
Unifikované na maximum 1000 lx



Obr. 46: Grafické znázornění výsledků čtvrté série simulací – seřazeno podle příslušných souřadnic systému C-gamma, výsledky unifikovány na maximum 1000 lx

4.5 Problematika reálného měření a současného stavu kulového integrátoru

Při reálném měření byla uniformita integrátoru měřena pomocí kolimátoru představujícím LED s úzkým otvorem, kterým procházelo světlo optikou, která vytvořila na povrchu kulového integrátoru kruh o průměru 8 cm. S tímto kolimátorem byl postupně osvětlován povrch kulového integrátoru ve specifických bodech [5].

Otáčení kolimátoru bylo zprostředkováno pomocí dvou servomotorů, které nastavovaly automaticky otáčení v jednotlivých rovinách C a γ . Během měření se však pokazil servomotor pro rovinu C , což vedlo k nutnosti manuálního nastavování souřadnic v této rovině. Kolimátor byl upevněn pomocí dvou provázků, aby se omezilo kývání po dobu měření. Postup měření je detailně popsán v rámci [5].

Vzhledem ke způsobu upevnění a nutnosti manuálního nastavování v „ C “ rovině není zaručeno, že bylo reálné měření bez zanedbatelné chyby způsobené nestabilitou svítidla použitého pro zaměření uniformity. Rovněž není jisté, zda má stávající nátěr kulového integrátoru stále stejné vlastnosti v rámci celého povrchu kulového integrátoru.

Z výsledků měření zpracovaných na obrázku (Obr. 30) i v poskytnutém excelu je pozorovatelné, že reálný kulový integrátor nemá souměrnou odezvu v rámci polokouli, ale horní část nepohyblivé polokoule má kladnou odchylku od normované hodnoty a dolní část má odchylku zápornou. Oproti tomu pohyblivá polokoule má v rámci svého povrchu, až na pár výjimek, kladnou odchylku od normované hodnoty. Nejvýraznější oblast záporné odchylky je v oblasti těsnění (oblast $C0-\gamma0$ až $C0-\gamma120$), avšak i u oblasti těsnění dochází ke kladné odchylce (oblast $C0-\gamma160$ až $C0-\gamma180$).

4.6 Vyhodnocení simulací

V rámci simulací nebylo v oblasti těsnění docíleno tak výrazných odchylek a převažovala spíše odchylka kladná. Zároveň při simulacích nedošlo k dosažení tak výrazných záporných odchylek ve spodní části obou polokouli. Z těchto poznatků můžeme nastolit hypotézu, zda není dolní prostor reálného kulového integrátoru znečištěn prachem a jinými drobnými nečistotami a tím výrazně snížena odraznost oproti vrchní oblasti kulového integrátoru. Dalším faktorem je stáří stávajícího nátěru a s ním spojená ztráta odrazných vlastností, která společně s defekty (odloupnutý nátěr, škrábance apod.) může taktéž vést ke zhoršení uniformity.

Problémem prováděných simulací je jejich značná časová náročnost při snaze zjistit vliv jakýchkoliv změn. Snahou bylo se ve zkoumaných bodech přiblížit co nejvíce podobné odezvy získané při reálném měření. Vzhledem k výše popsané problematice a zmíněné časové náročnosti nebylo možné takto dokonalého přiblížení dosáhnout. Model by bylo zapotřebí ze značné části modifikovat a rozdělit na více dílčích částí. Dále by se muselo postupně experimentovat s odraznostmi těchto dílčích částí a následně doladit jejich proporce. Na takto modifikovaném modelu by se následně daly provést simulace,

kteře by lépe ukázaly možný směr modifikací reálného přístroje, avšak pro náhled vlivu simulovaných změn byly dosažené výsledky dostačující.

4.7 Návrh modifikací

V rámci této kapitoly se budeme zabývat návrhem možností modifikací stávajícího kulového integrátoru za účelem vylepšení jeho uniformity a tím i snížením nepřesností při měření svítidel s úzkou vyzařovací charakteristikou.

4.7.1 Teoreticky proveditelné změny

Teoreticky proveditelných změn v rámci pracovního prostoru kulového integrátoru se nabízí několik možností, případně jejich kombinace. Může se provést obnova nátěru, změna velikostí clon a posun clon.

Z více komplexních možností, zahrnujících způsob měření a samotnou celkovou konstrukci, by bylo možné změnit způsob uchycení měřených svítidel a jejich stabilizace po přiřazení pohyblivé polokoule, úprava těsnících spojů a vyladění způsobu přitlačení polokoulí k sobě. Nejzazší možností by byl návrh kompletního vylepšení konstrukce.

V rámci této práce, a s ní spojenými simulacemi, se pracovalo pouze se změnami proveditelnými v rámci pracovního prostoru kulového integrátoru. Z předchozích kapitol je patrné, že se jednalo o možnost obnovení nátěru pracovních ploch a zmenšení velikosti hlavní clony.

4.7.2 Obnova nátěru

Ze simulací provedených s navýšenou odrazností vyplývá dosažení navýšení uniformity a tím i zpřesnění měření. Simulace zahrnovala stávající defekty a místo s výrazným odloupením nátěru. Simulace, která byla podkladem pro zjišťování vlivu změny odraznosti, počítala s odrazností 93 % v rámci všech pracovních ploch s doplněním potenciálně nejvlivnějších defektů a detailů. Vzhledem ke stáří současného nátěru a jeho opotřebení je možné, že reálná odraznost materiálu místy nedosahuje očekávaných hodnot. Ztráta odrazných vlastností, v kombinaci s vrstvou prachu a drobných nečistot v dolní části integrátoru, by byla dostatečným vysvětlením výrazně nižší odezvy získané při měření.

Na základě těchto skutečností by obnova nátěru, se snahou dosažení co nejvyšší odraznosti použité kombinace barvy a lepidla, vedla ke zmenšení odchylek.

4.7.3 Změna velikosti hlavní clony

Ze simulací provedených se zmenšenou hlavní clonou vyplývá rovněž navýšení uniformity a tím zvýšení přesnosti měření. Simulace předpokládala zachování stávajícího nátěru a počítala se stejnými defekty, jako simulace obnovy nátěru. Při zmenšení clony by muselo zároveň dojít k úpravě jejího uchycení v prostoru kulového integrátoru tak,

aby byl pracovní otvor pro senzor spektrometru i nadále vystředěn se zmenšenou clonou.

Na základě dosažených zjištění by zmenšení clony mohlo přinést zmenšení odchylek, avšak dosažené zmenšení by bylo menší než v případě obnovení nátěru.

4.7.4 Závěrečná doporučení

Vzhledem k časové náročnosti simulací nebylo možné v rámci této práce otestovat více možností úprav na vytvořeném modelu kulového integrátoru. Existuje blíže nespécifikovaná míra nejistoty nad odhalením nejdůležitějších proveditelných změn, které by byly pokryty v rámci simulací, avšak vytvořené modely jsou dostatečně pevným základem pro případné doplnění těchto slepých míst v rámci dalšího výzkumu.

Z realizovaných simulací se však dá nastínit možný směr potřebných úprav, které by vedly ke zlepšení uniformity povrchu kulového integrátoru a docílilo by se zmenšení odchylek při měření svítidel s úzkou charakteristikou vyzařování v závislosti na nasměrování jejich směru vyzařování. Na základě dosažených výsledků jsou níže nastíněny tři proveditelné varianty úprav s cílem vylepšení uniformity.

4.7.5 První varianta

První variantou doporučených úprav je zmenšení velikosti hlavní clony zakrývající pracovní otvor pro senzor spektrometru v prostoru pohyblivé polokoule.

Dle simulací by zmenšení této clony vedlo ke zlepšení rovnoměrnosti a zmenšení odchylek v rámci odezvy povrchu při osvětlení tzv. bodovým svítidlem. V simulacích se počítalo se zmenšením clony o 10 cm a výsledky ukázaly zlepšení uniformity. Tato varianta počítá se zachováním stávajícího stavu nátěru pracovních ploch kulového integrátoru, pouze by se vyjmula hlavní clona, zmenšila se o 10 cm a následně se opětovně upevnila tak, aby její střed byl na stejné ose, jako střed pracovního otvoru pro čidlo spektrometru. Při obměně je rovněž doporučena snaha o vyčištění dolního poloprostoru obou polokoulí od prachu a jiných nečistot. Tato varianta teoreticky vychází nejsnáze proveditelná a časově nejméně náročná.

4.7.6 Druhá varianta

Druhou doporučenou variantou úprav je kompletní obnova odrazného nátěru pracovních ploch se snahou dosáhnout směsi odrazné barvy a lepidla s co nejvyšší možnou odrazností, ideálně okolo 95 %.

Tato varianta by byla časově náročnější než varianta první, ale její výsledek by měl být znatelnější. Proces by zahrnoval odmontování clon, odstranění stávajícího nátěru, obnovení nátěru jednotlivých polokoulí v sestaveném stavu, obnovení nátěru clon a jejich opětovná instalace.

Méně pracnou alternativou výše zmíněného postupu by bylo pouhé přetření stávajícího nátěru, avšak tato varianta by mohla vést k nedostatečné rovnoměrnosti

nového nátěru a případné nedostatečné stabilitě spodní vrstvy tvořené stávajícím nátěrem, který se již místy odlupuje.

4.7.7 Třetí varianta

Třetí variantou je kombinace předešlých možností. Stávajícímu kulovému integrátoru by byl obnoven nátěr pracovních ploch a provedlo by se zmenšení hlavní clony.

Pro tuto variantu nebyly provedeny simulace, avšak z výsledků dílčích kroků vedoucích k této kombinaci se dá předpokládat, že by se jednalo o variantu s největším dopadem na vylepšení uniformity povrchu kulového integrátoru. Tato varianta je však časově nejnáročnější.

4.7.8 Návrhy k metodice měření tzv. bodových zdrojů

Na základě poznatků o problematice reálného měření popsané v [5] a poznatků získaných v rámci této práce je možné navrhnout metodiku pro měření svítidel s úzkou vyzařovací charakteristikou. Vzhledem ke zjištěným odchylkám pro různé nasměrování vyzařování „bodového“ svítidla v rámci kulového integrátoru se nabízí možnost stanovení co nejpřesnější metodiky, která by zajišťovala co nejmenší odchylku způsobenou špatnou uniformitou povrchu a co největší stabilitu polohy měřeného zdroje.

Z pohledu uniformity by bylo nejvhodnější nastavení směru vyzařování měřeného světelného zdroje vždy do místa, kde byla naměřena nejmenší odchylka od průměrné hodnoty (v případě zkoumaného kulového integrátoru v souřadnicích „C155 g90“).

V případě dosažení co největší stability by bylo možné provedení úpravy způsobu uchycení světelného zdroje. Dosavadní způsob je řešen uchycením na svěšeném přírodním kabelu s možným vylepšením uchycení s pomocí zavěšení na skobu a případnou stabilizaci pomocí provázků. Toto volné zavěšení je náchylné na jakékoliv otřesy (největší otřes nastává při dolehnutí pohyblivé polokoule k nehybné polokouli) a vzniká možnost nežádoucího otáčení visícího svítidla v průběhu měření.

Možnou alternativou, která by řešila tyto problémy, je vytvoření pevného úchytu tvořeného kovovou trubkou se závitem na jednom konci pro přišroubování k nepohyblivé polokouli (případně jinou úpravou umožňující upevnění k nepohyblivé polokouli), natřenou odraznou barvou o stejných vlastnostech, jako pracovní plochy integrátoru. Na konci bez závitu by byl vytvořen systém pro úchyt svítidel a dutou částí trubky by byl veden napájecí přívod pro měřená svítidla. Výhodou tohoto uchycení by byla značná stabilita polohy měřeného „bodového“ zdroje. Nevýhodou je vytvoření dalšího odrazného povrchu a z toho plynoucí navýšení rizika nepřesností, rovněž by došlo ke ztrátě snadné nastavitelnosti polohy měřeného zdroje a jeho přesného vystředění v prostoru kulového integrátoru, pokud by nebyl vytvořen náročněji realizovatelný teleskopický systém.

5. ZÁVĚR

V rámci diplomové práce je věnována pozornost přiblížení a vysvětlení principu kulového integrátoru, jeho provedení a následně vytvoření modelu kulového integrátoru v programu ANSYS SPEOS na základě reálného přístroje umístěného v laboratoři světelné techniky na ústavu elektroenergetiky VUT.

Úvod práce se zabýval zopakováním teorie fotometrických veličin následovaný podrobnějším popisem kulového integrátoru, jak z hlediska jeho fyzikálního principu, tak z hlediska možností jeho provedení.

Třetí kapitola práce se zabývá tvorbou modelu kulového integrátoru pro světelné simulace, popisem tvorby základního korpusu, jeho vyladění, první provedenou sérií simulací, úpravou prvního modelu se snahou dosažení přiblížení se k reálnému podkladu, provedení druhé série simulací a úpravami provedenými na druhém modelu pro třetí a čtvrtou sérii simulací. Základnou pro simulace je model s uniformitou o 4,1 % vyšší, než vychází z reálného měření.

Ve čtvrté kapitole se práce zabývá zhodnocením dosažených výsledků, vyhodnocení přesnosti podkladového měření a simulací. Na závěr čtvrté kapitoly dochází k návrhu možného vylepšení stávajícího kulového integrátoru k dosažení větší uniformity povrchu, přesnějších výsledků při měření bodových svítidel a případné přesnější metodiky při měření těchto svítidel.

Z navrhovaných řešení by se dalo doporučit obnovit odrazný nátěr pracovních ploch se snahou docílit co největší odraznosti, neboť toto řešení má, dle simulací, nejvýraznější vliv na zlepšení uniformity povrchu (navýšení uniformity o 1,33 % oproti základu simulace a o 5,4 % oproti reálnému měření), a tím i nejvýraznější pozitivní vliv na redukci odchylek měření. Možnou alternativou by bylo zmenšení hlavní clony o 10 cm, kdy toto opatření docílí o něco menšího pozitivního efektu než obnova nátěru (navýšení uniformity o 0,91 % oproti základu simulace a o 5 % oproti reálnému měření).

Modely vytvořené v rámci této práce jsou využitelné pro simulování dalších alternativ, které nebyly z důvodu časové náročnosti realizovány. Tyto modely a jejich modifikace umožňují případné rozšíření získaných poznatků a otestování vlivu různých variant úprav na uniformitu za účelem dosažení varianty s nejideálnějším výsledkem z pohledu časové náročnosti a dosaženého zlepšení odchylky.

LITERATURA

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-8086534-21-3.
- [2] Radiometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky*. online: Jaroslav Reichl, Martin Všeticka, 2018 [cit. 2023-17-02]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/536-radiometricke-veliciny>
- [3] Prostorový úhel. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Prostorov%C3%BD_%C3%BAhel
- [4] Color temperature. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature
- [5] VLČEK, P. *Vliv pozice svítidla uvnitř kulového integrátoru na výsledky měření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Motyčka.
- [6] Slovník pojmů: Index podání barev. DEKOLAMP [online]. Brno: DEKOLAMP, 2019, 27.12.819 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://www.dekolamp.cz/clanky/detail/index-podani-barev.htm>
- [7] Labsphere, INC. Technical Guide: Integrating Sphere Theory and Applications. North Sutton, 2017.
- [8] Integrating Sphere Fundamentals and Applications. In: Newport [online]. California: -, 2023 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://www.newport.com/t/integrating-sphere-fundamentals-and-applications>
- [9] COYNE, Steve. Measurement of Directional Lamps in an Integrating Sphere. -, 2001.
- [10] Co je teplota světla?. In: GOLED [online]. Hrochův Týnec: -, 2020 [cit. 2023-01-17]. Dostupné z: <https://www.goled.cz/blog/barva-svetla/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
CCT	Correlated Color Temperature
NT	Nízkotlaká
VT	Vysokotlaká
PTFE	Polytetrafluorethylen
SRDF	Spatial Response Distribution Function

Symboly:

Φ	Světelný tok	(lm)
$\Phi_e; \Phi_i$	Zářivý tok	(W)
$V(\lambda)$	Poměrná světelná účinnost	(-)
L	Jas/Záře	$(\frac{\text{cd}}{\text{m}^2} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{sr}})$
Ω	Prostorový úhel	(sr)
Ω_e	Ekvivalentní prostorový úhel	(sr)
$I_{\gamma\delta}$	Svítivost	(cd)
E	Osvětlenost	(lx)
ρ	Činitel odrazu (odraznost)	(-)
τ	Činitel prostupu (propustnost)	(-)
α	Činitel pohlcení (pohltivost)	(-)
T_{cp}	Náhradní teplota chromatičnosti	(K)
η_z	Měrný výkon	(lm.W ⁻¹)
R_a	Obecný index podání barev	(-)
dF_{d1-d2}	Faktor výměny energie	(J)
S	Vzdálenost	(m)
A	Plocha	(m ²)
R	Poloměr	(m)
k_i	Konstanta integrátoru (multiplikační koeficient)	(-)
τ_i	Časová konstanta integrátoru	(s)
L_i	Poměrná záře	(-)
D_i	Průměr kulového integrátoru	(m)
$f_{s,PP(\theta,\varphi)}$	Faktor odezvy paralelních paprsků	(-)
$E_{ind,PP}$	Nepřímá osvětlenost paralelním paprskem	(lx)
Φ_{PP}	Světelný tok paralelního paprsku	(W)
I_{PP}	Svítivost paralelního paprsku	(cd)

$K(\Theta, \varphi)$	Funkce distribuce prostorové odezvy integrátoru	(-)
$K^*(\Theta, \varphi)$	Normalizovaná funkce distribuce prostorové odezvy	(-)
$S_{f,e}$	Prostorový korekční faktor	(-)
N	Normovaná hodnota průměrné osvětlenosti	(-)
E_p	Průměrná hodnota osvětlenosti	(lx)
E_{ref}	Referenční průměrná hodnota osvětlenosti	(lx)