

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

Ing. Eva Kadlecová

**AUTOMATIZOVANÝ SYSTÉM VÝPOČTU ODRAZNÉ
PLOCHY SVÍTIDEL**

**AUTOMATED SYSTEM OF CALCULATION OF REFLECTING
SURFACE OF LIGHT SOURCES**

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

Oponenti: Doc. Ing. Josef Linda, CSc.

Prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.

Datum obhajoby: 10.2.2005

Klíčová slova

Reflektor, odraz, modelování osvětlení, osvětlování, světlo, odrazná plocha, metoda konečných prvků, numerické metody modelování.

Keywords

Reflector, reflect, modeling of lighting systems, lighting systems, light, reflective surface, finite element method, numerical method of modeling.

Disertační práce je k dispozici na Vědeckém oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně,
Údolní 53, Brno, 602 00

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému školiteli Ing. Pavlu Fialovi Ph.D. za vedení a cenné rady v průběhu mého doktorského studia a ostatním pedagogům a kolegům za jejich rady a pomoc.

Také bych ráda poděkovala svým rodičům a přátelům za nepřetržitou podporu.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou modelování odrazné plochy svítidel pomocí metody konečných prvků. V práci jsou porovnány vlastnosti využívaných metod modelování odrazné plochy svítidel. Práce přináší zhodnocení jejich vlastností, včetně detailního rozboru výhod a nevýhod. Je zde popsán program vytvořený ve vývojovém prostředí Matlab, který je kombinací dříve užívaných metod (Ray – tracing a Metody elementárních zobrazení) a slouží ke srovnání výsledků modelování metodou konečných prvků při modelování světelných úloh.

Abstract

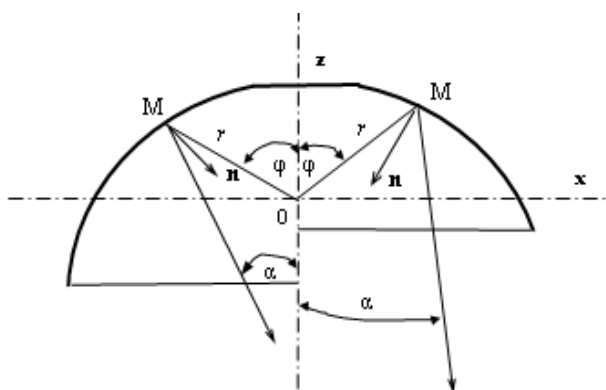
This disertation deals with problems of the modelling of the reflecting surface of the lights through the finite element method. Properties of used methods of the modelling of the reflecting surface of lights are compared in the work. The work brings assesment of their properties, including a detailed analysis of their advantages and disadvantages. There is a description of the program produced in the Matlab development environment that combines formerly used methods (Ray-tracing and The Elementary Projection Method) and is used for comprarison of results of modelling through the finite element method when the modelling light problems.

Obsah

1	ÚVOD	5
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3	PŘEHLED METOD VÝPOČTU	6
3.1	METODY POUŽÍVANÉ V OSVĚTLOVACÍ TECHNICE.....	6
3.1.1	<i>Metoda elementárních zobrazení</i>	6
3.2	POČÍTAČOVÉ ZPRACOVÁNÍ VÝPOČTŮ OSVĚTLENÍ V OSVĚTLOVACÍ TECHNICE	7
3.2.1	<i>Ray – tracing (zpětné sledování paprsku)</i>	7
3.2.2	<i>Metoda Radiozity (vyzařování)</i>	8
3.3	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	9
4	MODEL SVĚTELNÉ ÚLOHY MKP	9
4.1	VZTAHY A SOUVISLOSTI FYZIKÁLNÍMI VELIČINAMI	10
4.1.1	<i>Vztahy a souvislosti mezi obecnými fyzikálními veličinami</i>	10
4.1.2	<i>Odvození vzájemných vztahů mezi světelným a tepelným výkonem</i>	10
4.1.3	<i>Vzájemné vztahy popisů elektrostatického, magnetického, tepelného a světelného pole</i>	11
4.2	ODVOZENÍ MODELŮ SVĚTELNÝCH ÚLOH	13
4.2.1	<i>Model jednoduché světelné úlohy v programu ANSYS</i>	14
4.2.2	<i>Model světelné úlohy se světlovodem v programu ANSYS</i>	16
4.2.3	<i>Model s plnou vlnovou rovnicí</i>	16
4.2.4	<i>Model se skalárním potenciálem</i>	18
4.3	VÝSLEDKY ANALÝZY MODELŮ	20
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	23
6	MODEL SVĚTELNÉ ÚLOHY V PROGRAMU MATLAB	24
6.1	ZÁVĚREČNÉ HODNOCENÍ POUŽITÍ NUMERICKÉHO MODELU PROGRAMU MATLAB	25
7	ZÁVĚR	26
7.1	CELKOVÉ ZHODNOCENÍ.....	26
7.2	SOUHRN PŮVODNÍCH PŘÍNOSŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....	27
8	LITERATURA	27
9	ŽIVOTOPIS	28
10	PUBLIKACE	29

1 ÚVOD

Kvalitní osvětlení jak celých interiérů tak pracovních ploch je pro člověka významné, což zavazuje ke zodpovědnému přístupu k navrhování osvětlovacích soustav. K tomu se využívají dostupné metody a postupy. Rozvoj výpočetní techniky, numerických metod a počítačové grafiky umožňuje stále kvalitnější podporu při navrhování téměř ve všech technických oblastech. I když světelná technika zachytila tento trend s určitým zpožděním, dnes již existuje celá řada programových celků k podpoře projektování. Ve světelně - technické praxi začíná mít počítačové modelování stále větší význam, velkou výhodou je silná redukce objemu rutinních prací při návrhu.



Obr. 1.1 Průběh světelných paprsků u rotačně souměrné reflektorové plochy

Odrážná plocha (reflektor) je světelně činnou částí svítidel, která odráží světelný tok zdroje do prostorového úhlu určeného geometrickými vlastnostmi křivek tvořících reflektorovou plochu a vrcholovými úhly elementárních zobrazení svítícího tělesa světelného zdroje. Průběh světelných paprsků rotačně souměrné reflektorové plochy je zobrazen na obr. 1.1. Základní rovnice reflektorové plochy pak podle obr. 1.1 se vypočítá ze vztahu (1.1), kde φ je úhel natočení paprsku vycházejícího ze světelného zdroje vůči ose z , α je úhel natočení paprsku odraženého od reflektorové plochy vůči ose z a r je vzdálenost bodu dopadu paprsku na odraznou plochu od středu světelného zdroje. Více se problematikou odrazné plochy zabývá např. literatura [1].

$$\frac{dr}{r} = \operatorname{tg} \frac{\varphi \pm \alpha}{2} d\varphi \quad (1.1)$$

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce si klade za cíl nalézt vhodnou metodu řešení problematiky odrazné plochy svítidel, která by vyhovovala požadavkům výrobců svítidel a osvětlovacím technikům pro návrh, realizaci a optimalizaci svítidel a rozložení osvětlení a to při použití pro jakýkoliv vyráběný světelný zdroj a pro odraznou plochu jakéhokoliv tvaru. Cílem je matematické modelování odrazů na reflektorové ploše tvořené různými křivkami pro reálné zdroje světla. Metodu řešení je nutné nalézt i pro široké spektrum variant prostředí, neboť její použití nemá být v praktické realizaci omezeno pouze na interiérové typy osvětlovacích soustav.

Rozvržení cílů disertační práce

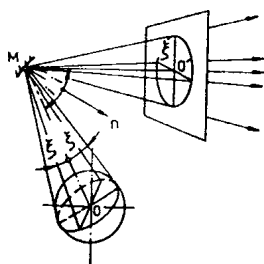
- Definice odrazné plochy svítidel. Seznámení s metodami návrhů a výpočtů osvětlení používanými v osvětlovací technice dosud.
- Vytvoření přehledu a formulace základních vlastností metod používaných v osvětlovací technice. Porovnání metod, vyhodnocení jejich předností.
- Analýza možnosti použití MKP a podpůrných programových prostředků řešících různé úlohy z oblasti fyziky, mechaniky a elektrotechniky systému ANSYS také pro řešení světelných úloh.
- Posouzení typů úloh, pro které je výhodné použít MKP a systém ANSYS, aby se odstranily nedostatky dosud užívaného, zdoluhavého, pracného nebo finančně náročného řešení problémů osvětlovací techniky.
- Zpracování metodiky umožňující MKP ve spojení se systémem ANSYS ihned použít v praxi a zjištění, zda lze metodu použít při řešení širokého spektra variant prostředí.
- Vytvoření jednoduchého modelu MKP ve spojení se systémem ANSYS.
- Ověření modelu MKP ve spojení se systémem ANSYS s řešením jinou numerickou metodou.
- Ověření modelů MKP ve spojení se systémem ANSYS a modelu z prostředí MATLAB s výsledky experimentálního měření (praktická realizace modelu úlohy).
- Sepsání matematických formulací modelu světelné úlohy při respektování vlnového charakteru světla, vyhodnocení způsobu použití tohoto modelu.
- Zhodnocení původního přínosu disertační práce a vyhodnocení výsledků.
- Nástin dalšího možného rozvoje vybrané metody numerického modelování.

3 PŘEHLED METOD VÝPOČTU

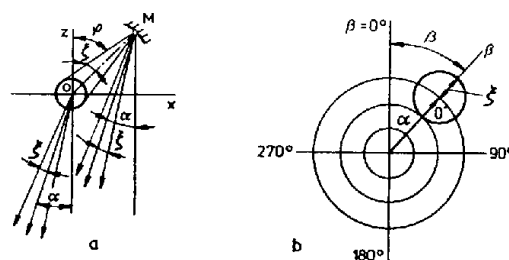
3.1 Metody používané v osvětlovací technice

3.1.1 Metoda elementárních zobrazení

Reflektory vytvářejí obraz světelného zdroje, který je určen rozměry, tvarem a vzájemnou polohou světelného zdroje a reflektoru. Přímá úloha výpočtu reflektoru spočívá v hledání svítící plochy reflektoru. Pomocí této úlohy se dá vyjádřit svítivost svítidla nebo intenzita osvětlení na předpokládané rovině. Existuje i opačná metoda, při které pro vybraný světelný zdroj, podle křivky svítivosti nebo hodnot intenzity osvětlení na předpokládané rovině, hledáme rozměry a tvar svítidla. Zmíněné úlohy lze řešit pomocí metody elementárních zobrazení. Dle této metody svazek světelných paprsků reflektorové plochy pokládáme za souhrn všech světelných svazků vycházejících ze světelného zdroje a odrazených na reflektorové ploše (viz obr.3.1). Orientace elementárních zobrazení v prostoru je určena směrem jejich středového světelného paprsku (viz obr. 3.1), který zjistíme z průběhu středových světelných paprsků v meridiánové a ekvatoriální rovině (sférická souřadnicová soustava). Na určení orientace svazku světelných paprsků odrazených bodem M reflektorové plochy, budeme používat dvojice úhlů (φ, ψ) a (α, β) . Studium elementárních zobrazení v prostoru je obtížné, proto se zavádí pojem stopy elementárního zobrazení na zobrazovací rovině (viz obr. 3.2).



Obr. 3.1 Svazek světelných paprsků svítícího tělesa kulového tvaru



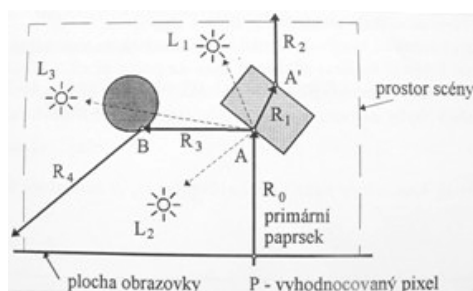
Obr. 3.2 Řez elementárního zobrazení v meridiánové rovině

3.2 Počítačové zpracování výpočtů osvětlení v osvětlovací technice

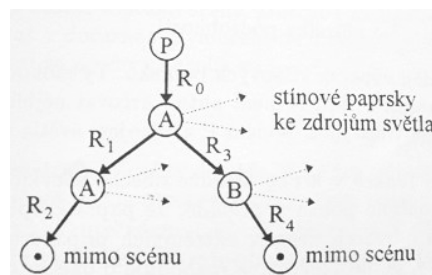
Pro automatizovaný výpočet osvětlení existuje v současné době několik metod a komerčně dostupných programů. Všechny metody byly nejdříve aplikovány v počítačové grafice. Tam se z komerčních důvodů začala problematika výpočtu osvětlení rozvíjet nejdříve. Jistou roli také zcela jistě sehrála skutečnost, že pro účely počítačové grafiky nemusel být popis všech jevů souvisejících s přenosem světla fyzikálně zcela korektní. Tam stačí, odpovídá-li získaný výsledek vizuálně objektivní skutečnosti i s určitou mírou nepřesnosti. Taková nepřesnost by se ve světelné technice mohla velmi nepříznivě promítnout do získaných výsledků. Proto se začaly základní směry světelné techniky v oblasti využití výpočetní techniky rozvíjet o něco později. Nyní jsou využívány především dva přístupy řešení Ray – tracing a metoda Radiozity.

3.2.1 Ray – tracing (zpětné sledování paprsku)

Zpětné sledování paprsku (backward raytracing) patří mezi velmi používané metody k výpočtu rozložení jasu v interiéru a knižně byly zpracovány např. v literatuře [6]. Metoda je založena na principu zpětného sledování světelného paprsku od pozorovatele ke zdroji světla. Výhodou metody zpětného sledování paprsku je možnost provádět světelně-technické výpočty pro interiéry se značně komplikovanou geometrií. Tvar ploch, ze kterých je interiéur tvořen, může být přitom velmi obecný a nemusí se omezovat jen na rovinné plochy. Jeden z nejpoužívanějších je program Radiance [8].



Obr. 3.3 Princip metody sledování paprsku



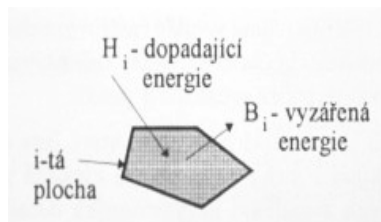
Obr. 3.4 Strom vznikající při sledování paprsku

Princip metody vidíme na obr. 3.3 a strom vznikající při sledování paprsku na obr. 3.4. Sledování bývá ukončeno, když paprsek opustí scénu, nebo paprsek dopadne do zdroje světla, nebo po N odrazech a lomech anebo po uražení mezní vzdáleností. Metody založené na metodě sledování paprsku se vyznačují celou řadou nedostatků mezi které patří např. obtížnost sledovat všechny odražené paprsky (bývá zčásti kompenzovaná sledováním většího množství náhodně

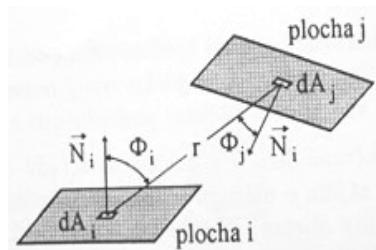
vybraných odražených paprsků, výběr se nejčastěji provádí metodou Monte-Carlo), výpočet interreflexe světla mezi jednotlivými plochami, které tvoří interiér, je touto metodou neproveditelný (přitom při výpočtu má velkou váhu) a výpočet vržených stínů je nepřesný. Stíny jsou vždy vypočteny jako ostré (při difúzním osvětlení (zatažená obloha) však hranice vržených stínů není zřetelná). Všechny nedostatky jsou dány fyzikální podstatou metody, která předpokládá, že uzavřený prostor obsahuje jen reflexní plochy. V řadě aplikací (např. strojírenství), kde se zobrazují technické povrchy (např. lesklé kovové plochy), je kontrastní obraz vítaný a dobře odpovídá objektivní skutečnosti. Pro uzavřené prostory s opticky difúzními plochami, které jsou osvětleny plošnými zdroji světla, však zpětné sledování paprsku nedává dobré výsledky.

3.2.2 Metoda Radiozity (vyzařování)

Základním geometrickým prvkem této metody je plocha, která dokáže světelnou energii přijímat, odrážet a vyzařovat. Předpokládá se energeticky uzavřená scéna, všechny zdroje světla jsou součástí scény a zdroje mimo scénu nemají na světelné poměry uvnitř scény žádný vliv. (Při optimalizaci výsledků lze samozřejmě posléze světelný šum těchto zdrojů do výpočtů zahrnout, aniž bychom museli měnit původní předpoklad o uzavřenosti scény. Více v literatuře [6].) Zkoumá se, jak se šíří světelná energie ze zdrojů na ostatní plochy a jak se po odrazu světlo šíří dalšími směry. Na všechny plochy na scéně se nahlíží jako na zářiče, které vyzařují buď světlo vlastní nebo odražené (viz obr. 3.5).



Obr. 3.5 Energetické poměry na ploše



Obr. 3.6 Určení konfiguračního faktoru F_{ij}

Celková energie dopadající na plochu i s plošným obsahem A_i je rovna součtu příspěvků energií od všech N_i ostatních ploch a vyjádří se

$$B_i = p_i \cdot \sum_{j=1}^{N_i} B_j F_{ij} + E_i \quad (3.1)$$

kde B_i je energie vyzářená plochou i , E_i je vlastní záření (pro zdroje $\neq 0$), p_i je koeficient odrazu a F_{ij} je konfigurační faktor vyjadřující vzájemné prostorové uspořádání ploch i a j (viz obr. 3.6). Pokud plocha j leží tak, že žádná z jejích částí vyzářené energie nedopadá na plochu i , je $F_{ij} = 0$, jinak má F_{ij} nezápornou hodnotu menší nebo rovnu 1. Soustava se řeší pro neznámé hodnoty B_i , které se dále využijí pro závěrečný výpočet osvětlení plochy i . Matice je diagonálně dominantní a řeší se zpravidla Gauss - Seidlovou metodou. Více o této metodě je uvedeno např. v literatuře [6]. Vyzařovací metoda umožňuje odstranit principiální nedostatky metody zpětného sledování paprsku. Nemožnost nalezení všech světelných paprsků, které projdou prostorem, řeší „sledováním“ světelného toku po jeho dráze od zdrojů světla. Pro difúzní charakter odrazných ploch používaných ve světelné technice je nasazení vyzařovací metody vhodné.

3.3 Metoda konečných prvků (MKP)

Metoda konečných prvků je účinná metoda k řešení velké části okrajových úloh popsanych diferenciálními rovnicemi. V krátké době byla zavedena v řadě oblastí ve strojírenství, stavebnictví a elektrotechnice. V osvětlovací technice se tato metoda využívá pouze pro výpočty tepelných úloh (např. modelování tepelných deformací součástí svítidel) nebo vlivů elektromagnetických polí u součástí svítidel (např. tlumivek, vodičů,...), pro výpočty světelných úloh a osvětlení se dosud nepoužívá. V oblasti, kde se počítá pole, se zavádí uzly a uzlové potenciály. Uzly mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou sledovat tvar hraničních ploch. V místech, kde se očekává prudká změna pole, se zavede větší hustota sítě. Sestaví se soustava rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.

Postup při aplikaci MKP

1. Generace prvků sítě s uzly.
2. Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot.
3. Dosazení zvolené aproximace do diferenciální rovnice nebo jejího ekvivalentu a sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
4. Vyřešení soustavy.
5. Zpracování dodatečných požadavků – výpočet dalších veličin a zobrazení výsledků.

Podrobněji je celá metoda vysvětlena např. v literatuře [3]. V práci je použita analogie tepelného záření se zářením světelným pro řešení světelné úlohy za podpory programových prostředků systému ANSYS (bude rozebráno v následujících kapitolách).

4 MODEL SVĚTELNÉ ÚLOHY MKP

Pro úlohy světelné techniky s ohledem na vlastnosti světla lze sloučit vlnovou a kvantovou optiku, vznikají tak dva hlavní směry řešení

I. Optika vlnová – pro řešení světelných úloh, pro které platí $l \approx \lambda_s$, kde λ_s je vlnová délka světla ze světelného zdroje a l je geometrický rozměr. Při modelování světelných úloh pomocí MKP s využitím systému ANSYS se touto částí úloh osvětlovací techniky zabývá v disertační práci kapitola 4.2.3.

II. Optika geometrická – pro řešení světelných úloh, pro které platí $l \gg \lambda_s$, kde λ_s je vlnová délka světla ze světelného zdroje a l je geometrický rozměr. Řešením světelných úloh pomocí MKP s využitím systému se touto částí úloh osvětlovací techniky zabývají kapitoly 4.2.1 a 4.2.2 a jsou hlavní náplní disertační práce.

Při vývoji a měření světelných zdrojů je nezbytnou součástí procesu jejich návrhu modelování a experimentální ověřování výsledků. Nabízí se používat standardních jednoúčelových programů jako jsou LUX JUNIOR nebo HIGH CURVES ST. Jiná možnost spočívá v použití sofistikovaných numerických metod, mezi které patří metoda konečných prvků (MKP). Jedním z možných řešení je využití programu ANSYS. Zde je v oblasti teplotního pole také řešena radiace, zmíněná v metodě vyzařovací (metodě radiozity). V programu ANSYS lze použít standardních nástrojů programu – modelování, diskretizace na síť elementů, řešiče, vyhodnocování a interpretace výsledků. Těžisko problému leží v transformaci veličin teplotního pole na veličiny optické, což lze provést podle všeobecných pravidel popsanych v literatuře [2]. V následujícím textu je zachycen základ modelování primitivní světelné úlohy, ve které se pomocí experimentu provede ověření modelu světelné úlohy. Po ověření těchto výsledků bylo možno

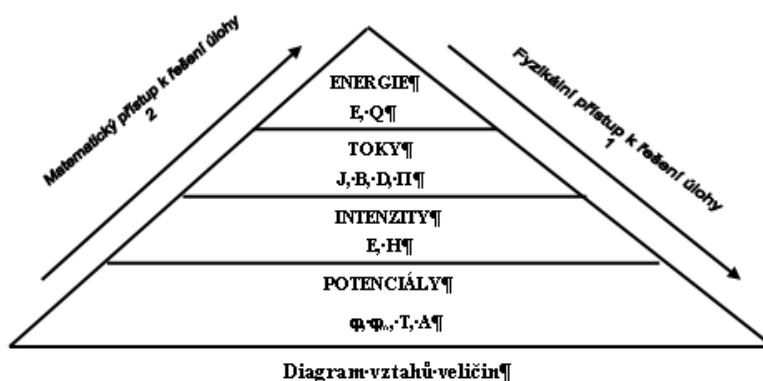
pokračovat v modelování další úlohy, jako je úloha s jednoduchým světelným zdrojem v kombinaci se světlovodem.

4.1 Vztahy a souvislosti fyzikálními veličinami

4.1.1 Vztahy a souvislosti mezi obecnými fyzikálními veličinami

Na obr. 4.1 je schéma znázorňující vztahy a postup v užívání veličin při modelování fyzikálních úloh. Využívají se dva základní směry (viz obr. 4.1)

- 1) *Fyzikální přístup řešení úlohy*
- 2) *Matematický přístup k řešení úlohy*



Obr. 4.1. Vztahy mezi veličinami v závislosti na kvalitativní úrovni

V procesu modelování se postupuje při zadání úlohy (modelu) tak, že se sestaví fyzikální model, převede se na matematickou úlohu a její výsledky řešení se zpětně interpretují na fyzikální model. Při řešení a zkoumání matematického modelu se u některých modelů (formulací pomocí MKP) postupuje směrem od potenciálů k veličinám z nich odvozených. Je-li hledán fyzikální model úlohy, lze pro jeho řešení využít známých matematických modelů (Laplaceova rovnice, Poissonova rovnice, Helmholtzova rovnice, Difúzní rovnice (obecná rovnice pro vedení tepla), Schrödingerova rovnice, Vlnová rovnice, Teplotní rovnice, Biharmonická rovnice, ...více podrobností je uvedeno v literaturách [2], [3], [4] a [5]) a pomocí analogií mezi fyzikálními a matematickými modely problém vyřešit. Pro tento typ řešení je vhodné využít druhého (matematického) přístupu k řešení úlohy (viz obr. 4.1), v němž se veličiny dvou odlišných (duálních) modelů posouvají na základě jejich významu, tj. porovnávají se rozměry veličin. Charakteristické úlohy popsané tvary parciálních diferenciálních, lze standartně řešit pomocí zmíněných metod. Úlohy mohou být převedeny na matematický model.

4.1.2 Odvození vzájemných vztahů mezi světelným a tepelným výkonem

Vzájemná provázanost a ekvivalence fyzikálních veličin podle [40] jsou vyjádřeny v tab.4-1. Duality veličin lze využít tak, že z vlastností matematického modelu se přejde k řešení odlišné fyzikální úlohy.

TEPLO	SVĚTLO
Monochromatické (spektrální) vyzářování $H_{\lambda} = \frac{dW_{\lambda}}{d\lambda}$	Monochromatický (spektrální) zářivý tok $\Phi_{\lambda} = \frac{d\Phi_{\lambda}}{d\lambda}$
Zářivý tok $\phi_{\lambda} = \int_{S} H_{\lambda} dS$	Zářivý tok $\phi_{\lambda} = \int_{\nu} \phi_{\lambda} d\lambda$
Svitivost $I = \frac{d\phi}{d\omega}$	Zářivost $I_{\lambda} = \frac{d\phi_{\lambda}}{d\omega}$
Zář $I_{\lambda} = \frac{dI_{\lambda}}{dS \cos \vartheta}$	Jas $I_{\sigma} = \frac{dI_{\sigma}}{dS \cos \vartheta}$
Intenzita vyzářování $H_{\lambda} = \frac{d\phi_{\lambda}}{dS}$ $H_{\lambda} = \int_{\nu} H_{\lambda} d\lambda = W(\infty)$	Intenzita světlení $H = \frac{d\phi}{dS}$
Intenzita ozáření $E_{\lambda} = \frac{d\phi_{\lambda}}{dS}$	Intenzita osvětlení $E = \frac{d\phi}{dS}$
Tepelný tok $\phi = -k_{gr} \alpha dT$ $\phi_{\lambda} = \int_{S} H_{\lambda} dS$	Světelný tok $\phi = K_{\omega} \int_{\nu} V_{\lambda} \phi_{\lambda} d\lambda$ $\phi = \int_{\nu} K d\omega$

Tab. 4-1 Vzájemný vztah tepelných a světelných veličin

4.1.3 Vzájemné vztahy popisů elektrostatického, magnetického, tepelného a světelného pole

Vzájemné ekvivalence lze ukázat naznačením Poissonovy rovnice pro jednotlivé typy fyzikálních úloh podle [4]. Základní vztahy a relace pro matematicko – fyzikální model jsou uvedeny v následujících úlohách. Jsou zde základní matematický model, vztah mezi toky a intenzitami a hraničními podmínkami.

Elektrostatické pole

$$\operatorname{div} \varepsilon \operatorname{grad} \varphi_e = -\rho, \quad \text{na } \Omega_e \tag{4.1}$$

$$\operatorname{grad} \varphi_e = E \tag{4.2}$$

$$\varepsilon \operatorname{grad} \varphi_e = D \tag{4.3}$$

$$n \cdot (\varepsilon_i \cdot \text{grad} \varphi_{ei} - \varepsilon_j \cdot \text{grad} \varphi_{ej}) = q_1, \text{ na } \Gamma_1 \quad (4.4)$$

$$n \times (\text{grad} \varphi_{ei}) = 0, \text{ na } \Gamma_2, \text{ kde } \Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma \quad (4.5)$$

Magnetické pole – skalární magnetický potenciál

$$\text{div } \mu \text{ grad } \varphi_m = 0, \text{ na } \Omega \quad (4.6)$$

$$\mu \text{ grad } \varphi_m = B \quad (4.7)$$

$$\text{grad } \varphi_m = H \quad (4.8)$$

$$n \cdot (\mu_i \cdot \text{grad} \varphi_{mi} - \mu_j \cdot \text{grad} \varphi_{mj}) = q_1, \text{ na } \Gamma_1 \quad (4.9)$$

$$n \times (\text{grad} \varphi_{mi}) = 0, \text{ na } \Gamma_2, \text{ kde } \Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma \quad (4.10)$$

Teplotní pole

$$\text{div } k \text{ grad } T = q, \text{ na } \Omega_T \quad (4.11)$$

$$k \text{ grad } T = \varphi_T \quad (4.12)$$

$$\text{grad } T = H_e \quad (4.13)$$

$$n \cdot (k_i \cdot \text{grad} T_i - k_j \cdot \text{grad} T_j) = q_1, \text{ na } \Gamma_1 \quad (4.14)$$

$$n \times (\text{grad} T_i) = 0, \text{ na } \Gamma_2, \text{ kde } \Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma \quad (4.15)$$

Světelné pole – skalární potenciál

$$\text{div } k_s \text{ grad } \varphi_s = q_s, \text{ na } \Omega_s \quad (4.16)$$

$$k_s \text{ grad } \varphi_s = \Phi_s \quad (4.17)$$

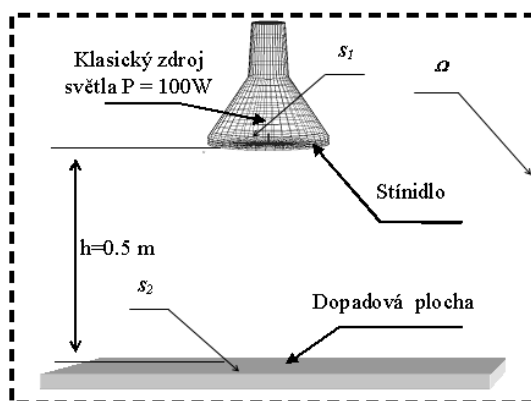
$$\text{grad } \varphi_s = E_s \quad (4.18)$$

$$n \cdot (k_{Si} \cdot \text{grad} \varphi_{Si} - k_{Sj} \cdot \text{grad} \varphi_{Sj}) = q_1, \text{ na } \Gamma_1 \quad (4.19)$$

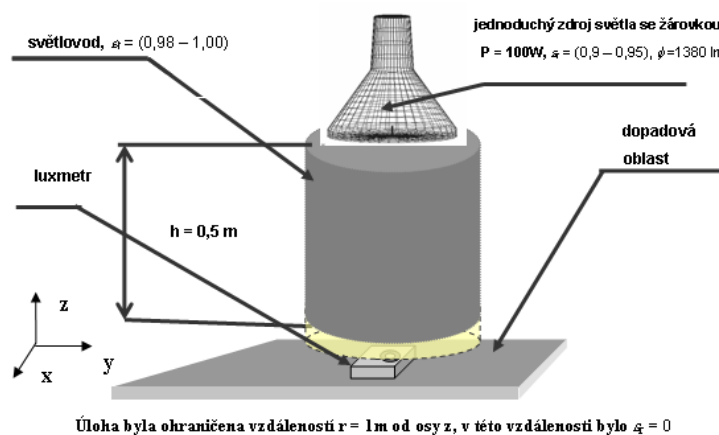
$$n \times (\text{grad} \varphi_{Si}) = 0, \text{ na } \Gamma_2, \text{ kde } \Gamma_1 \cup \Gamma_2 = \Gamma \quad (4.20)$$

4.2 Odvození modelů světelných úloh

Úlohy se světelnými zdroji lze rozdělit na dva základní typy. V prvním typu úlohy se uvažuje geometrie modelu taková, že nejmenší rozměr základní geometrie (konstrukční prvek) je větší než $l = 100 \times \lambda_S$ (λ_S je vlnová délka světla z $\lambda_S \in \langle \lambda_{\min}, \lambda_{\max} \rangle$). Uvažuje se základní odraz a útlum, bez polarizace vlny.



Obr. 4.2 Schématické znázornění jednoduché úlohy modelované MKP v systému ANSYS



Obr. 4.3 Schématické znázornění jednoduché úlohy se světlovodem modelované MKP v systému ANSYS

Lze připustit dvě další varianty - první $V_\lambda \neq f(\lambda)$ a druhá $V_\lambda = f(\lambda)$. Při $V_\lambda = f(\lambda)$ se uvažují geometrie a efekty, při nichž dochází k polarizaci světla, ohybu na částech $l \approx \lambda_S$, interferencím světla, atd. První případ $V_\lambda \neq f(\lambda)$ lze řešit pomocí duality mezi světelnou úlohou a teplotní úlohou s radiací. Formulace základního modelu, vztahy mezi veličinami a hraniční podmínky jsou v rovnicích (4.16)-(4.20). Druhý případ ($V_\lambda = f(\lambda)$) úlohy se řeší pomocí klasické vlnové rovnice (více podrobností je uvedeno v literaturách [2], [3] a [4]). Toto řešení je vhodné i pro řešení případu předchozího typu úlohy, ale je z hlediska modelování a řešení příliš složité a nejsou

zdaleka využity všechny vlastnosti takového modelu. Z tohoto důvodu je první typ formulace modelu vhodnější, rychlejší a snadněji se zadává a modeluje. Poskytuje všude pohodlné výsledky s deklarovanou přesností. Tato formulace zatím není ve světelné technice běžná a nebyla příliš publikována. Práce ukazuje na jednoduchých světelných úlohách vhodnost použití metody modelování prvního typu a přináší srovnání numerických výsledků s řešením již dnes klasicky používanou numerickou metodou a ověření experimentálním měřením. Řešené úlohy jsou zobrazeny na obr. 4.2 a 4.3.

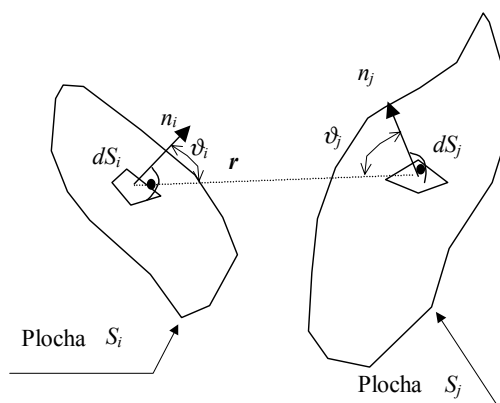
4.2.1 Model jednoduché světelné úlohy v programu ANSYS

V programu se pomocí standardních prostředků vytvoří geometrický model a pomocí automatizovaného generátoru sítě elementů a uzlů se sestaví matematický model. Použitým prvkem je SOLID70. Na obr. 4.3 je zobrazen charakteristický geometrický tvar modelu. Skládá se ze stínidla světelného zdroje, zdroje, reprezentovaného klasickou žárovkou $P_n = 100W$. žárovka je modelovaná z čirého skla a wolframového vlákna. Bylo hledáno rozložení světelného toku v modelovaném prostoru.



Obr. 4.3 Geometrický model lampičky v ANSYSu

Formulace modelu



Obr. 4.4 Určení činitele projekce $A_{i,j}$

Formulace základního teplotního modelu vychází z prvního zákona termodynamiky

$$q + \rho c v \cdot \text{div } T - \text{div}(k \text{ grad } T) = \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right), \text{ na oblasti } \Omega_T \quad (4.21)$$

kde Ω_T je definiční oblast úlohy, q je měrné teplo, ρ je měrná hmotnost, c je měrné skupenské teplo, T je teplota, t je čas, k je součinitel teplotní vodivosti, v je rychlost proudění. Tento model lze s ohledem na zamýšlený přechod k radiaci a aplikaci Snellových zákonů zjednodušit na tvar

$$q - \text{div}(k \text{ grad} T) = \rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right), \text{ pro } \Omega_T \quad (4.22)$$

Podle Stefan-Boltzmannova zákona přenos tepla mezi povrchy s indexy i, j , radiací se formuluje

$$q_{ri} = \sigma \varepsilon_i A_i S_i (T_i^4 - T_j^4), \text{ na } \Gamma_T, \quad (4.23)$$

kde Γ_T je hranice Ω_T a platí $\Omega_T \cup \Omega_T = \Omega_T$, q_{ri} je měrné teplo přenesené z povrchu s indexem i , σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, ε_i emisivita povrchu, $A_{i,j}$ je činitel projekce plochy s indexem i na plochu s indexem j , S_i je plocha povrchu s indexem i , T_i, T_j jsou teploty povrchů i, j . Na obr. 4.4 je zobrazen vztah mezi veličinami ve vztahu (4.23), činitel projekce $A_{i,j}$, která se určí

$$A_{i,j} = \frac{1}{S_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \vartheta_i \cos \vartheta_j}{\pi r^2} dS_j dS_i \quad (4.24)$$

Potom lze použitím Gallerkinovy metody s respektováním okrajových a počátečních podmínek diskretizovanou úlohu převést na model

$$[K]\{T\} = \{Q\} \quad (4.25)$$

kde K je matice koeficientů (více podrobností je uvedeno v literaturách [2], [3] a [10]), T je sloupcová matice hledaných teplot, Q je sloupcová matice zdrojů tepla. Z teploty T se následně určí tepelný tok T_f

$$T_f = -(k \text{ grad } T), \text{ na } \Omega_S \quad (4.26)$$

V principu radiace se prvky sloupcové matice zdrojů tepla Q určí

$$Q_{i,j} = S_i A_{i,j} \varepsilon_i (T_i^4 - T_j^4), \text{ na } \Gamma_{S1} \quad (4.27)$$

a po úpravě matematického modelu lze (4.27) psát jako

$$Q_{i,j} = \overbrace{S_i A_{i,j} \varepsilon_i \sigma (T_i^2 - T_j^2)}^K (T_i + T_j)(T_i - T_j) \quad (4.28)$$

Tento tepelný model se použije pro modelování světelné úlohy využívající Snellovy zákony optiky. Zdroji světla o intenzitě osvětlení E (lx) odpovídá ekvivalentní teplotní veličina hustota

tepelného toku q'' , světelnému toku ϕ (lm) odpovídá tepelná veličina tepelný tok q' . Výsledný světelný tok je dán rovnicí (4.29).

$$\Phi_e = \frac{T_{f,e}}{S_{n,e}} \quad (4.29)$$

Kde Φ_e je světelný tok na elementu, $T_{f,e}$ je ekvivalentní tepelný tok na elementu, $S_{n,e}$ je normální povrch elementu.

4.2.2 Model světelné úlohy se světlovodem v programu ANSYS

Na obr. 4.3 je zobrazena základní sestava světlovodu, který byl zakoupen z finančních prostředků grantu FRVŠ IS 43 21 69 / 2003. Jedná se o ODL světlovod, který svým systémem horního střešního osvětlení nahrazuje klasické osvětlovací soustavy. Pro potřeby numerického modelování osvětlovací soustavy byla zvolena lampička (jednoduchý zdroj světla s netriviálním tvarem odrazné plochy) jako zdroj světelných paprsků vstupujícího do těla světlovodu. Schématické znázornění modelované úlohy v programu ANSYS je na obr. 4.3. Odvození modelu je shodné s kapitolou 4.2.1, jen se změnila geometrické situace přidáním světlovodu.

4.2.3 Model s plnou vlnovou rovnicí

Model s plnou vlnovou rovnicí pro harmonický tvar budící veličiny je formulován dle [2]. Detailní odvození lze nalézt např. v [10].

$$\text{rot} \left[\vec{\mu}_r^{-1} \cdot \text{rot} \mathbf{E} \right] - k_0^2 \vec{\epsilon}_r \cdot \mathbf{E} = -j \omega \mu_0 \mathbf{J}_s, \quad v \quad \Omega \quad (4.30)$$

kde Ω je definiční oblast úlohy.

Odvození pro postupnou vlnu

V metodě konečných prvků se používá několik metod pro nalezení minima funkcionálu např. metoda nejmenších čtverců, vážených reziduí a analytické metody Galerkinova a Ritrova.

$$\int_{\Omega} F(x, \dots, z) d\Omega = I \min \quad (4.31)$$

Jednou z nejvíce rozšířených metod je Galerkinova metoda, po jejíž aplikaci na vlnovou rovnici v harmonickém tvaru (4.30) získáme

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega} \left(\text{rot} \mathbf{W}_s \cdot \left[\vec{\mu}^{-1} \cdot \text{rot} \mathbf{E} \right] - k_0^2 \mathbf{W}_s \cdot \vec{\epsilon}_r \cdot \mathbf{E} \right) d\Omega \\ & + j\omega\mu_0 \iiint_{\Omega_s} \mathbf{W}_s \cdot \mathbf{J}_s d\Omega_s - j\omega\mu_0 \iint_{\Gamma_0 + \Gamma_1} \mathbf{W}_s \cdot (\mathbf{n}_f \times \mathbf{H}) d\Gamma \\ & + j\omega\mu_0 \iint_{\Gamma_r} Y (\mathbf{n}_f \times \mathbf{W}_s) \cdot (\mathbf{n}_f \times \mathbf{E}) d\Gamma_r = 0 \end{aligned} \quad (4.32)$$

kde Y je povrchová admitance a \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole aproximovaný jako

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^{N_E} \mathbf{W}_{b,i} E_i \quad (4.33)$$

a \mathbf{W}_b je vektor bázové funkce. Při použití maticového zápisu lze rovnici (4.32) přepsat takto

$$(-k_0^2 [M] + jk_0 [C] + [K])\{E\} = \{F\} \quad (4.34)$$

kde jednotlivé části rovnice jsou vyjádřeny v literatuře [10].o

$$F_i = -jk_0 Z_0 \iiint_{\Omega_s} \mathbf{W}_{s,i} \cdot \mathbf{J}_s d\Omega_s + jk_0 Z_0 \iint_{\Gamma_0 + \Gamma_1} \mathbf{W}_{b,i} \cdot (\mathbf{n}_f \times \mathbf{H}) d\Gamma \quad (4.35)$$

Odvození pro zpětnou vlnu

Podobně jako pro postupnou vlnu se postupuje pro formulaci MKP odražené vlny. Při použití maticového zápisu lze rovnici (4.39) přepsat takto

$$-k_0^2 [M] + jk_0 [C] + [K] \{E^{SC}\} = \{F\} \quad (4.36)$$

kde jednotlivé části rovnice (4.36) vyjádříme jako

$$\begin{aligned} F_i = & -jk_0 Z_0 \iiint_{\Omega_s} \mathbf{W}_{s,i} \cdot \mathbf{J}_{s,i} d\Omega_s + jk_0 Z_0 \iint_{\Gamma_0 + \Gamma_1} \mathbf{W}_{s,i} \cdot (\mathbf{n}_f \times \mathbf{H}) d\Gamma \\ & + \iiint_{\Omega_d} \left\{ \text{rot} \mathbf{W}_{s,i} \cdot [\bar{\mu}_r^{-1} \cdot \text{rot} \mathbf{E}^{inc}] - k_0^2 \mathbf{W}_{s,i} \cdot \bar{\epsilon}_r \cdot \mathbf{E}^{inc} \right\} d\Omega_d \\ & - \iint_{\Gamma_0 + \Gamma_1} \mathbf{W}_{s,i} \cdot (\mathbf{n}_{f,d} \times \text{rot} \mathbf{E}^{inc}) d\Gamma + jk_0 Z_0 \iint_{\Gamma_r} Y (\mathbf{n}_f \times \mathbf{W}_{s,i}) \cdot (\mathbf{n}_f \times \mathbf{E}^{inc}) d\Gamma_r \end{aligned} \quad (4.37)$$

Po úpravách je celkový matematický model zapsán ve složeném maticovém tvaru

$$\begin{bmatrix} k_{\max}^2 [\bar{S}_z] & k_{\max}^2 [G_z] \\ k_{\max}^2 [G_t] & k_{\max}^2 [Q_z] + [\bar{S}_t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{E_z\} \\ \{E_t\} \end{Bmatrix} = (k_{\max}^2 - \gamma^2) \begin{bmatrix} [\bar{S}_z] & [G_z] \\ [G_t] & [Q_t] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{E_z\} \\ \{E_t\} \end{Bmatrix} \quad (4.38)$$

kde prvky matice koeficientů a podrobnosti jsou uvedeny v literatuře [10]. Podobně lze zabývat vyhodnocením vlastností elektrické a magnetické složky vlny na proudu s dokonalou elektrickou nebo magnetickou vodivostí (MML), (PEL). Tyto analýzy nejsou pro práci podstatné, jsou blíže specifikovány v [10].

4.2.4 Model se skalárním potenciálem

Jak bylo v odstavci 4.2.1 uvedeno, první typ modelu úlohy, který je duální k teplotní úloze (formulace pomocí skalárního potenciálu), je uvažován na uzavřené oblasti Ω_{sk} , která je složená z rozměrů uzavřených oblastí $\Omega_{1..N\Omega}$.

$$\operatorname{div} T_F = 0 \quad (4.39)$$

Respektováním materiálových vztahů lze psát (4.65) jako

$$\operatorname{div} \vec{k} T_G = 0 \quad (4.40)$$

Vektor intenzity elektrického pole je funkcí $T_G(x, y, z, t)$, $\forall (x, y, z) \in \Omega_S, \forall t \geq 0$. V kvazistacionárním poli je vektor intenzity elektrického pole možné zapsat pomocí skalárního elektrického a skalárního potenciálu jako

$$T_G = -\operatorname{grad} \varphi_T \quad (4.41)$$

Plnou formulaci dle 1. zákona termodynamiky lze psát

$$q + \rho c \operatorname{div} \varphi_T - \operatorname{div} (\vec{k} \operatorname{grad} \varphi_T) = \rho c \left(\frac{\partial \varphi_T}{\partial t} \right) \quad (4.42)$$

Pro oblasti Ω_1 až Ω_N je vztah (4.68) nutné doplnit o Dirichletovy a Neumannovy hraniční podmínky $\forall i \neq j$

$$\mathbf{n} \times (\vec{\gamma}_i \cdot \operatorname{grad} (\varphi_{T_i}) - \vec{\gamma}_j \cdot \operatorname{grad} (\varphi_{T_j})) = \mathbf{0} \text{ na hranici } \Gamma_{1l, \dots, \Gamma_{N,l}} \quad (4.43)$$

$$\mathbf{n} \cdot (\vec{\gamma}_i \cdot \operatorname{grad} \varphi_{T_i}) = q \text{ na hranici } \Gamma \cup (\Gamma_{1l, \dots, \Gamma_{N,l}}) \quad (4.44)$$

kde indexy i, j označují čísla oblastí $j=1$ nebo 3 . Počáteční podmínky skalárních a vektorových potenciálů jsou

$$\begin{aligned} \varphi_T(t_0, x, y, z) &= \varphi_{T_0}(x, y, z), \quad \forall (x, y, z) \in \Omega_{SK} \\ \frac{\partial \varphi_T(t_0, x, y, z)}{\partial t} &= \frac{\partial \varphi_{T_0}(x, y, z)}{\partial t} \end{aligned} \quad (4.45)$$

Zvolením nenulových básových funkcí $W_{1,\dots,N}$ lze napsat aproximaci hledaných potenciálů ve tvaru

$$\varphi_T(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^{N_\varphi} \phi_{Tk}(t) W_k(x, y, z) \quad , \forall t \geq 0, \forall (x, y, z) \in \Omega_{SK} \quad (4.46)$$

Zvolením básových funkcí $W_{1,\dots,N}$ a aplikací Galerkinovy metody na výraz (4.72) se získá relace

$$\int_{\Omega_{SK}} W_i \left(q - \rho c v \cdot \text{div} \varphi_T + \text{div}(\vec{k} \text{ grad} \varphi_T) - \rho c \left(\frac{\partial \varphi_T}{\partial t} \right) \right) d\Omega = 0 \quad (4.47)$$

$i=1, \dots, N_{u\Omega}$

Pro jednoduchou světelnou úlohu člen $\rho c v \cdot \text{div} \varphi_T$ (sdílení tepla prouděním) lze zanedbat a pak lze vztah (4.73) upravit na tvar

$$\int_{\Omega_{SK}} W_i \left(q - \text{div}(\vec{k} \text{ grad} \varphi_T) - \rho c \left(\frac{\partial \varphi_T}{\partial t} \right) \right) d\Omega = 0, \quad i=1, \dots, N_{u\Omega} \quad (4.48)$$

Měrná energie q je přenášena radiací a podle vztahu (4.23) lze pokračovat v odvození modelu. Aplikací Galerkinovy metody se získá tvar

$$\begin{aligned} & \oint_{\partial\Omega_{SK}} W_i (\text{grad} \varphi_T) \cdot \vec{\gamma} \cdot \mathbf{n} d\Gamma \\ & + \int_{\Omega_{SK}} \vec{k} \cdot (\text{grad} \varphi_T) \cdot \text{grad} W_i d\Omega \\ & - \int_{\Omega_{SK}} W_i \left(-\rho c \left(\frac{\partial \varphi_T}{\partial t} \right) \right) d\Omega \\ & + \int_{\Omega_{SK}} W_i \left(\sigma \varepsilon_i A_i S_i (\varphi_{\text{R}}^4 - \varphi_{\text{T}}^4) \right) d\Omega = 0 \end{aligned} \quad (4.49)$$

Respektováním okrajových podmínek úlohy podle výrazů (4.69) až (4.72) se vztah (4.75) změni na tvar

$$\int_{\Omega_{SK}} \vec{k} \cdot \text{grad} \varphi_T \cdot \text{grad} W_i d\Omega + \int_{\Omega_{SK}} W_i \rho c \left(\frac{\partial \varphi_T}{\partial t} \right) d\Omega + \int_{\Omega_{SK}} W_i \left(\sigma \varepsilon_i A_i S_i (\varphi_{Ti}^4 - \varphi_{Tj}^4) \right) d\Omega = 0 \quad (4.50)$$

kde tenzor tepelné vodivosti \vec{k} není funkcí teploty a zjednodušený se (4.76) запиše

$$\sum_{l=1}^{N_{\varphi_T}} \phi_{Ti}^0 k_{i,l} + \sum_{k=1}^{N_{\varphi_T}} \frac{d\phi_{Tk}^0}{dt} l_{i,k} = \sum_{j=1}^{N_{\varphi_T}} S_i A_{i,j} \varepsilon_i \sigma (\varphi_{Ti}^2 - \varphi_{Tj}^2) (\varphi_{Ti} - \varphi_{Tj}) (\varphi_{Ti} + \varphi_{Tj}) (\phi_{Ti}^{0-1})^2 - (\phi_{Tj}^{0-1})^2 (\phi_{Ti}^{0-1} - \phi_{Tj}^{0-1}) (\phi_{Ti}^{0-1} + \phi_{Tj}^{0-1}) \quad (4.51)$$

kde 0 je index iterace.

$$\sum_{l=1}^{N_{\varphi_T}} \phi_{Ti}^0 k_{i,l} + \sum_{k=1}^{N_{\varphi_T}} \frac{d\phi_{Tk}^0}{dt} l_{i,k} = - \sum_{j=1}^{N_{\varphi_T}} q_j \phi_{Ti}^0 \quad (4.52)$$

Koeficienty matic k, l, q lze přepsat pro řešení na elementu čtyř, pěti a šestistěnném (viz literatura [2], [3] a [10]). Výsledný matematický model lze zapsat ve tvaru

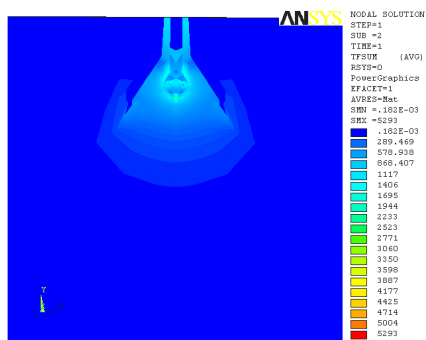
$$[k][\phi_T] + [L] \left\{ \frac{d\phi}{dt} \right\} = -\{q\}\{\phi_T\}^T \quad (4.53)$$

4.3 Výsledky analýzy modelů

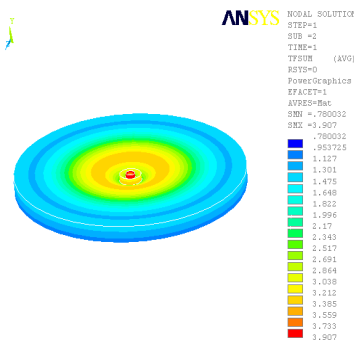
Na obr. 4.6 – 4.15 jsou výsledky analýzy modelů v systému ANSYS. Jako hraniční podmínky byly uvažovány okolní stěny ve vzdálenosti $r = 1\text{m}$ od svítidla jako dokonale temné s $\varepsilon = 0$ (viz obr. 4.3). Získané výsledky numerickým modelováním jsou ověřeny experimentálním měřením. Veličiny (světelný tok ϕ_e) z relace (4.29) byly přepočítány z prostředí ANSYS z teplotní úlohy na světelnou a pomocí makro - souboru (viz literatura [5]). V teplotním modelu sestaveném v ANSYSu byly použity pro prostředí parametry (4.80).

Na obr. 4.6, 4.7. a 4.8 jsou zobrazena rozložení modulu teplotního toku v prostoru modelované úlohy v programu ANSYS. Jde o teplotní tok vycházející z jednoduchého světelného zdroje (lampičky) (obr. 4.6), vyhodnocení rozložení teplotního toku na dopadové ploše (obr. 4.7) pro rozložení sítě elementů obr. 4.8. Přesnost řešení není závislá na volbě rozložení sítě elementů.

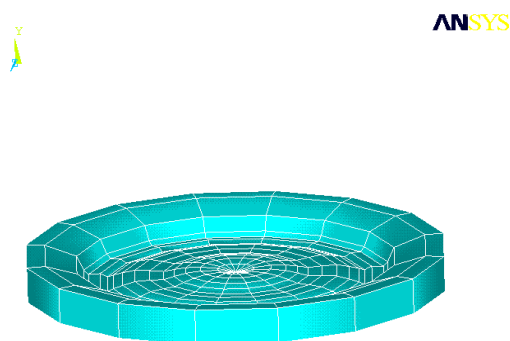
- vzduch - $k = 1$; $\varepsilon_r = 0$
 - vlákno - $k = 10$; $\varepsilon_r = 10$
 - plocha baňky žárovky - $k = 50$; $\varepsilon_r = 1,0$, $q' = 1380 \text{ lm}$
 - plocha světlovodu - $\varepsilon_r = 1,0$
 - plocha stínidla krytu (bílá barva nikoliv dokonalé zrcadlo) - $\varepsilon_r = 0,95$
 - plocha dopadu (šedá deska) - $\varepsilon_r = 0,4$
- (4.54)



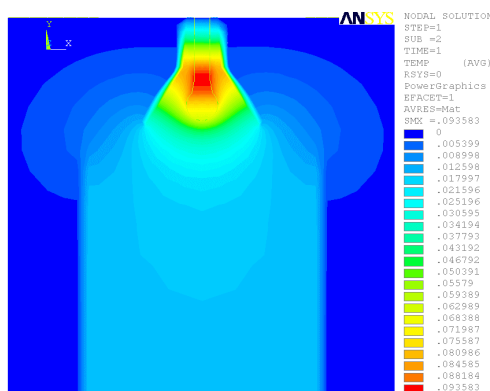
Obr. 4.6 Hodnoty tepelného toku vycházejícího z jednoduchého světelného zdroje



Obr. 4.7 Hodnoty tepelného toku na ploše pod jednoduchým světelným zdrojem



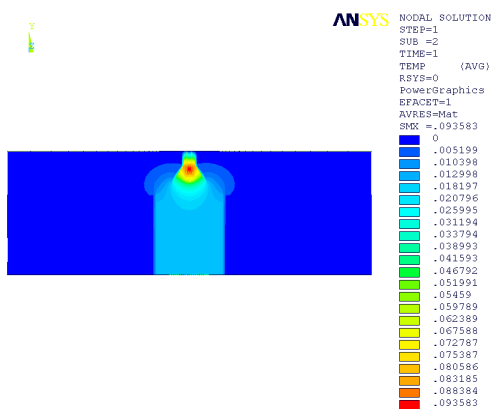
Obr. 4.8 Rozložení a tvar sítě elementů na ploše pod jednoduchým světelným zdrojem



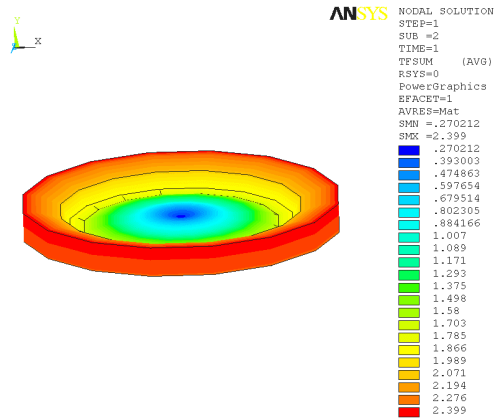
Obr. 4.9 Hodnoty tepelného toku vycházejícího z jednoduchého světelného zdroje se světlovodem

Na obr. 4.9 a 4.10 jsou zobrazena rozložení modulu teplotního toku jednoduchého světelného zdroje se světlovodem (lampičkou se světlovodem). Na obr. 4.11 je rozložení teplotního toku na dopadové ploše pod jednoduchým světelným zdrojem se světlovodem.

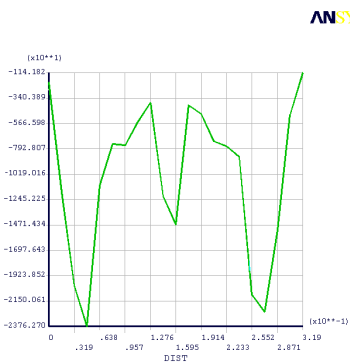
Na obr. 4.12 – 4.15 jsou zobrazeny rozložení modulů intenzit osvětlení po kalibraci dle vztahu (4.29). Na obr. 4.15 je pak rozložení teplotního toku odpovídajícímu výsledné intenzitě osvětlení na obr. 4.12. Tvar na obr. 4.12 má ve střední části neočekávaný tvar modulu toku. To lze vysvětlit efektem volby hustoty sítě elementů diskrétního modelu a tvarem odrazných ploch. Tento efekt je z programu Photopia 2.1 znám (viz obr. 4.16) a dochází k tomu, že se namodelované a experimentálně naměřené hodnoty v této části rozložení liší.



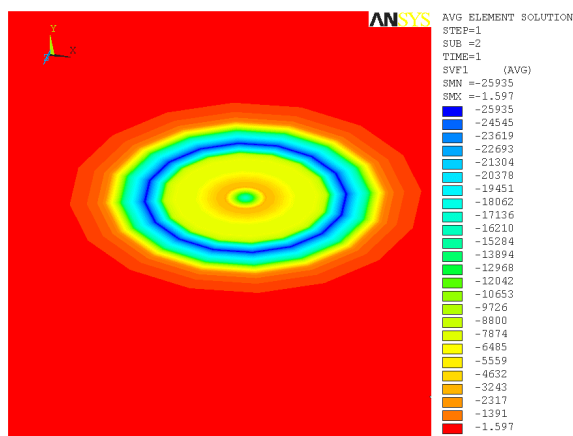
Obr. 4.10 Hodnoty tepelného toku vycházejícího z jednoduchého světelného zdroje se světlovodem



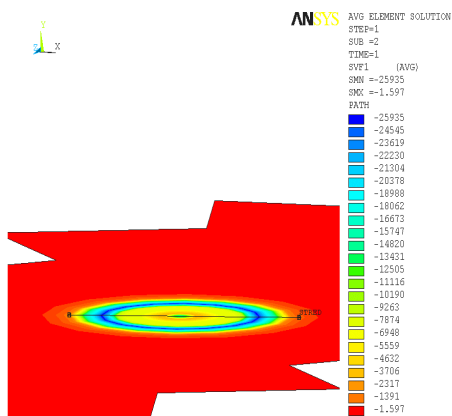
Obr. 4.11 Hodnoty tepelného toku vycházejícího z jednoduchého světelného zdroje se světlovodem na dopadové ploše



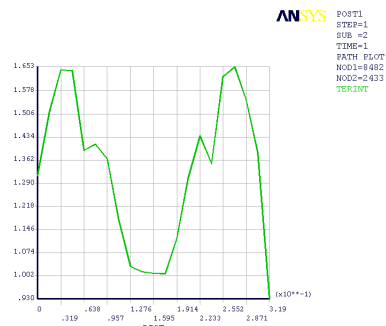
Obr. 4.12 Výsledná intenzita osvětlení



Obr. 4.13 Výsledná intenzita osvětlení na dopadové ploše



Obr. 4.14 Výsledná intenzita osvětlení na dopadové ploše

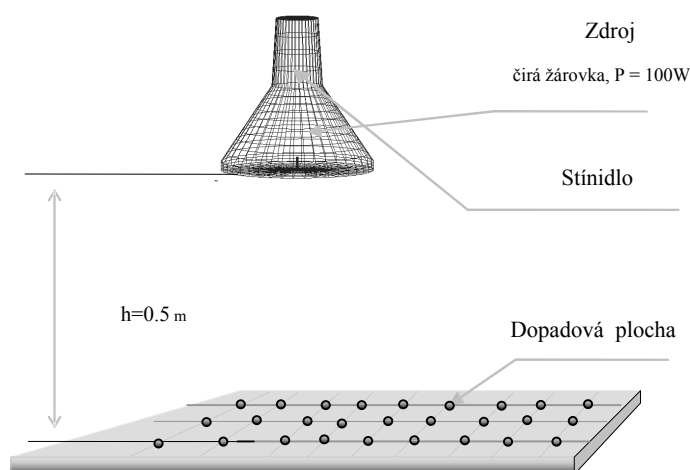


Obr. 4.15 Výsledný teplotní tok

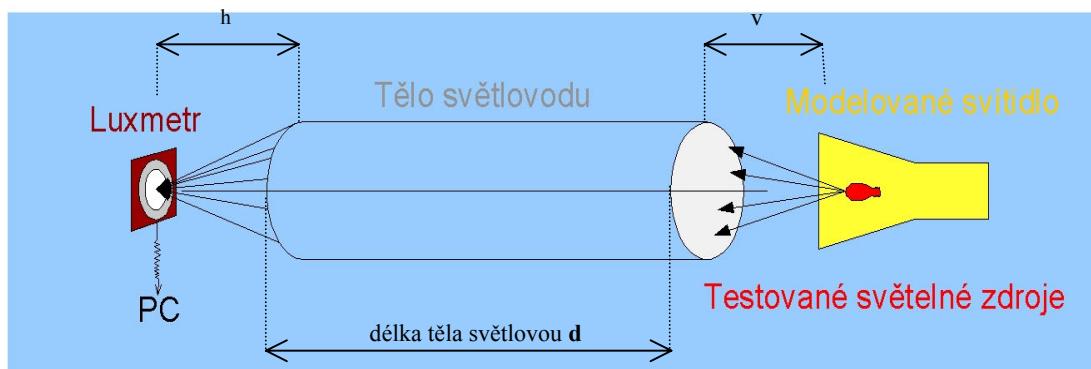
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Pro ověření výsledků numerického modelování úlohy byla tato úloha setavena v laboratorním prostředí a proměřena na dvou experimentech. Prvním z nich je zjištění rozložení intenzity osvětlení pro lampičku 0.5 m nad deskou stolu, druhou úlohou je zjištění rozložení intenzity osvětlení na konci 0.5 m dlouhém světlovodu (na difúzním skle), u kterého je zdrojem světla v prvním experimentu namodelovaná a laboratorním měřením ověřená lampička. Při měření se dodržely okrajové podmínky zadané modelováním, tj. 1m okolo absolutně černé stěny realizované čínským sametem (viz obr. 5.1 znázorňující praktickou realizaci 1. úlohy a obr. 5.2 znázorňující praktickou realizaci 2. úlohy). Další náhodné chyby (například odrazy od okolních předmětů, přídatné osvětlení jiných zdrojů světla,...) byly vyloučeny absolutně černým prostředím laboratoře osvětlovací techniky ústavu elektroenergetiky. Měření je zatíženo systematickou chybou vlivu velikosti snímací plochy luxmetru na přesné měření intenzity osvětlení v daném bodě. Snímací fotočlánek luxmetru Beha, který by zakoupen z prostředků grantu FRVŠ k realizaci dané úlohy, má rozměr 26 mm. Ke správnému měření přesné hodnoty intenzity osvětlení bychom potřebovali snímač bodový.

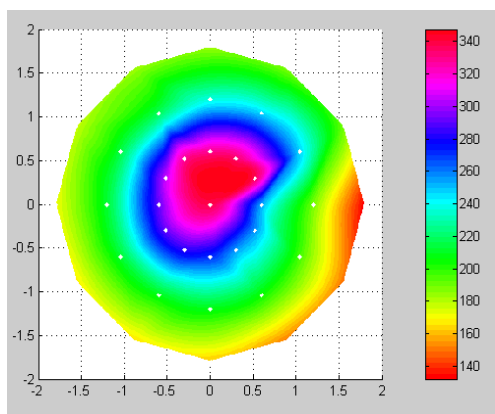
Bylo provedeno 6 kontrolních měření, aby se eliminovaly chyby měření. Výsledky měření průměrné hodnoty intenzity osvětlení jsou zobrazeny na obr. 5.3 pro jednoduchý světelný zdroj a na obr. 5.4 pro světlovod s jednoduchým zdrojem světla.



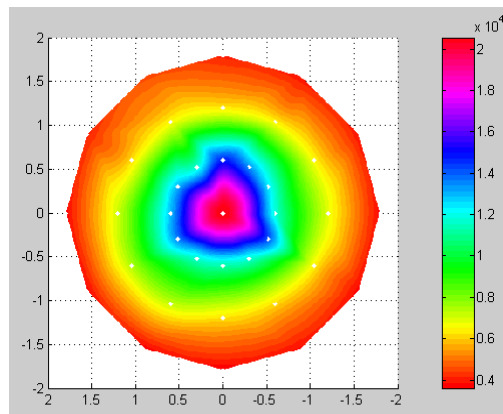
Obr. 5.1 Sestava měřené úlohy pro lampičku



Obr. 5.2 Reálná sestava měřené úlohy pro lampičku se světlovodem



Obr. 5.3 Grafické znázornění průměrné hodnoty intenzity osvětlení $E /lx/$



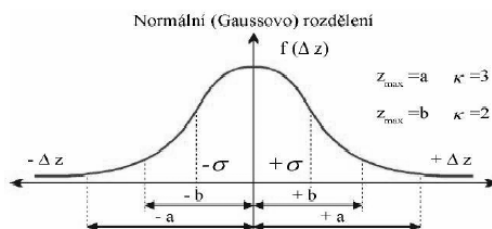
Obr. 5.4 Grafické znázornění průměrných hodnot intenzity osvětlení $E /lx/$

Výsledky vyhodnocení měření a numerického modelování

Pro jednoduchý světelný zdroj se průměrná směrodatná odchylka měření pohybovala do 2 % a pro jednoduchý světelný zdroj se světlovodem je průměrná směrodatná odchylka měření do 5 %. V druhém případě je vyšší chyba způsobena odstupem obou měření, kdy bylo nutné v laboratoři z kapacitních důvodů světlovod odinstalovat a při následné reinstalaci došlo bohužel k drobným mechanickým deformacím v jeho těle (plech, ze kterého je světlovod vyroben je velmi náchylný k mechanickým prohnutím). Je vidět, že obě měření jsou (i přes tyto nedostatky) velmi přesná. Výsledná chyba měření a numerického modelování se pohybuje v závislosti na rozložení sítě elementů v rozmezí (5 – 20)%. Podrobnosti viz literatura [5].

6 MODEL SVĚTELNÉ ÚLOHY V PROGRAMU MATLAB

Pro ověření výsledků numerického modelování v programu ANSYS bylo provedeno porovnání nejen s měřenými hodnotami, ale i s výsledky metod používanými v osvětlovací technice k řešení světelných úloh. Byla vytvořena geometrická úloha pro jednoduchý světelný zdroj se světlovodem spolu s výpočty v programu MATLAB a poté provedena i její aproximace různými pravděpodobnostními rozloženími, aby byla zajištěna kontinuita rozložení intenzity osvětlení na dopadové ploše a zohledněny optické vlastnosti povrchu (např. rozptyl, hrubost povrchu, lesk,...).



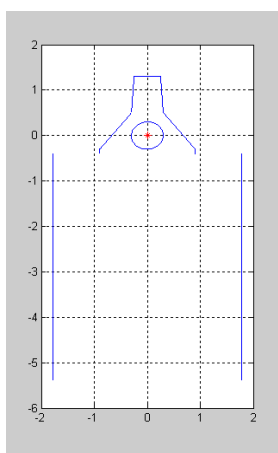
Obr. 6.1 Normální rozložení

Jako nejvhodnější rozložení rozptylové funkce se ukázalo normální rozložení (viz obr. 6.1) z důvodu nejpřesnější tvarové shody průběhu s průběhem rozložení intenzity osvětlení světelného zdroje na dopadové ploše. Základní tvary rozložení funkcí vhodné pro aproximaci jsou uvedeny

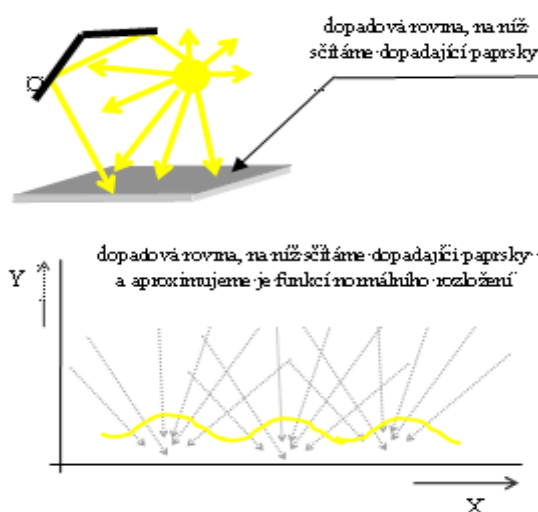
např. v literatuře [5]. Tyto funkce lze volit při použití různých odrazných vlastností odrazných povrchů modelované úlohy.

Model světelné úlohy v Matlabu s aproximací normálním rozložením

Na obr.6.5 je znázorněna geometrie modelu použitá k řešení a na obr.6.6 je grafické řešení úlohy. Při geometrickém řešení pomocí paprskové optiky se sledoval paprsek vycházející ze světelného zdroje a odrážející se na stínítku a poté v těle světlovodu až do dopadu na srovnávací rovinu. Ke zpřesnění vykreslení rozložení intenzity osvětlení na srovnávací rovině se pro každý bod dopadu provedla aproximace funkcí normálního rozložení z obr. 6.1. Simulují se tak rozptylové vlastnosti povrchu ($\lambda_s \ll l$) jak ukazuje obr 6.6.. Tento postup zajistil zpřesnění výpočtů bez nutnosti zvětšit počet prováděných operací a zjemnil přechod hladin intenzity osvětlení na srovnávací rovině světlovodu. Výsledná intenzita osvětlení byla zanesena do grafů (viz obr. 6.7 a 6.8). Výpis programu a podrobnosti jsou uvedeny v literatuře [5].



Obr. 6.5. Geometrické znázornění úlohy



Obr. 6.6. Grafické znázornění řešení rovnoměrnosti rozložení intenzity osvětlení na dopadové rovině

6.1 Závěrečné hodnocení použití numerického modelu programu Matlab

Jak bylo uvedeno dříve, způsob řešení v programu Matlab je nevhodný pro složitější geometrické úlohy, zejména pro veliký počet výpočetních operací a tím velmi zdoluhavé řešení. Dále je vždy počet kroků konečný a výsledné rozložení intenzity osvětlení je tedy nutné proložit korekční aproximací, aby výsledky odpovídaly reálným podmínkám. Vzhledem k MKP a řešení v programu ANSYS nelze v tomto případě zkoumat teplotní a další vlivy, lze řešit pouze geometrickou konfiguraci a nelze plně využít možnosti definovat homogenitu prostředí a jeho vlastnosti (déšť, mlhu,..) v okolí zkoumaného svítidla. Při složitější geometrii svítidla je také velmi obtížné postihnout všechny možnosti odrazů od odrazných ploch, nehledě na znásobení počtu řešených soustav rovnic při kombinaci více materiálů na tělese svítidla. Program má ale velké výhody v tom, že lze snadno jednoduchou geometrii svítidla ověřit a dostat prvotní výsledky velmi

rychle. Je zde velmi výborně včleněna funkce rozložení osvětlení v okolí dopadu paprsku. Lze tak velmi dobře stanovit v modelu rozptylové vlastnosti povrchu materiálů.

7 ZÁVĚR

7.1 Celkové zhodnocení

Cílem disertační práce bylo získat přehled vlastností metod použitelných k řešení odrazné plochy svítidla a nalézt vhodnou metodu, která by vyhovovala požadavkům výrobců svítidel a osvětlovacím technikům pro jejich realizaci svítidel a návrh osvětlení a to při použití pro libovolnou geometrii vzráběných světelných zdrojů a pro odraznou plochu jakéhokoliv tvaru, tj. matematické modelování odrazů na reflektorové ploše tvořené různými křivkami pro reálné zdroje světla. Metodu řešení bylo nutné nalézt i pro široké spektrum materiálových podmínek, neboť její použití nemá být v praktické realizaci omezeno pouze na interiérové typy osvětlovacích soustav. Uvedená metoda konečných prvků v návaznosti na realizační prostředí ANSYS splňuje uvedené cíle. K největším jejím výhodám z hlediska osvětlovací techniky patří nejen možnost matematicky modelovat geometrickou scénu přímo s reálnými podmínkami, ale především možnost kombinace řešení vlivů světelného pole s vlivy pole elektromagnetického či tepelného, čímž se otevírá možnost (v osvětlovací technice dosud nepostižená) řešit např. stárnutí materiálů, jejich deformace při teplotním namáhání součástí svítidel či vzájemné ovlivňování více zdrojů ve světelné soustavě z hlediska vzájemných elektromagnetických a silových účinků součástí svítidel, optimalizace tvaru svítidel a odrazných ploch.

Při porovnání výsledků numerického modelování a naměřených hodnot byla prokázána vhodnost použití numerického modelování pro světelné úlohy. Metody popsané v této disertační práci jsou přínosem pro rozvoj osvětlovací techniky, neboť přinášejí zrychlení při návrhu svítidel. Aplikace MKP otevírá nové možnosti v tomto oboru. Lze ji využít nejen pro běžně řešené světelné úlohy (např. výpočet rozložení intenzity osvětlení v prostoru), ale také pro úlohy specifické prostředím (např. výpočet osvětlení při mlze, v zakouřeném nebo prašném prostředí, atd.) či použitím osvětlovací soustavy (např. návrhy reflektorů v automobilovém průmyslu, návrhy dutých světlovodů pro zakomponování do stavby rodinného domu, výpočet rozložení intenzity osvětlení na fasádách osvětlovaných kulturních památek, atd.) Za pomoci této metody je možné modelovat nejen umělé zdroje světla, ale i oblohový standart a vyhodnotit z něj např. vhodnost a úspory při použití světelné soustavy s dutými světlovody. Díky standardně připojeným optimalizačním metodám v systému ANSYS lze provést optimalizace tvaru odrazné plochy tak, že výsledná křivka modulu intenzity osvětlení na sledované dopadové ploše (kdekoliv) bude mít požadovaný tvar.

Pro porovnání této metody s jiným numerickým řešením byl vytvořen model úlohy v prostředí MATLAB, řešený klasickou dosud používanou geometricky řešenou (paprskovou) metodou, doplněný o nové prvky, které modelují široké spektrum vlastností odrazných ploch. Je patrné, že získané výsledky jsou pro jednoduchou úlohu srovnatelné. Při složitější geometrii bez zjednodušujících předpokladů, jde o metodu velmi složitou, zdlouhavou, vedoucí na řešení většího počtu soustav rovnic, zde se ukazuje jako vhodnější MKP se širokou programovou podporou.

Byla nalezena, formulována a sepsána nová metoda využívající MKP spolu s implementací do velkého konečně prvkového systému ANSYS. V MATLABU byla vhodně a původně aplikována funkce rozptylu a odrazu paprsku na dopadové ploše.

7.2 Souhrn původních přínosů disertační práce

- Byly stanoveny podmínky, za nichž lze s výhodou využít MKP a prostředí systému ANSYS pro řešení úloh osvětlovací techniky s využitím existujících podpůrných nástrojů pro řešení teplotních polí.
- Byla zpracována metodika zadávání světelné úlohy, aby bylo možno použít duálního modelu teplo – světlo v systému ANSYS.
- Byly odvozeny vztahy pro přepočet výsledků řešené teplotní úlohy na požadované výsledky světelné úlohy v systému ANSYS.
- Bylo provedeno ověření navržené metody na modelu jednoduchého světelného zdroje v systému ANSYS.
- Bylo provedeno ověření navržené metody na modelu jednoduchého světelného zdroje se světlovodem v systému ANSYS.
- Bylo provedeno kontrolní ověření výsledků modelování MKP v systému ANSYS modelem sestaveným v prostředí MATLAB počítajícím jinou numerickou metodou.
- Numerický model v programu MATLAB obsahuje původní přizpůsobení rozložení intenzity osvětlení z paprskového řešení na rovnoměrné rozložení na ploše, respektující materiálové vlastnosti roviny dopadu a difúzní charakter světelných paprsků při dopadu.
- Byla navržena a realizována experimentální metoda ověření výsledků numerického modelování a byl zpracován postup pro její praktické využití v praxi.

8 LITERATURA

- [1] Horňák, P., Trembač, V. V., Ajzenberg, J. B. Svietidlá a svetelné zdroje. Bratislava : ALFA 1983, 404 stran, 63 - 566 – 83
- [2] Stratton, J.A. Teorie elektromagnetického pole. Praha : SNTL 1961
- [3] Dědek, L., Dědková, J. Elektromagnetismus. VUTIUM, VUT Brno 1998. ISBN 80-214-1106-6. 229 stran
- [4] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V. : Technická fyzika. Praha SNTL 1961
- [5] Kadlecová, E. Disertační práce „Automatizovaný systém výpočtu odrazné plochy svítidel“. VUT v Brně FEKT, k dispozici na vědeckém oddělení Údolní 53, Brno 602 00, Brno 2004
- [6] Žára, J., Beneš, B., Felkel, P. Moderní počítačová grafika. Praha : Computer Press 1998
- [7] http://www.lighting-technologies.com/Products/Photopia/Photopia2_pod.htm
- [8] Ward, G .J, The Radiance Lighting Simulation and Rendering System. Computer Graphics Proc. Annual Conference series 94, pp. 459-472. 1994
- [9] Tregenz, P.R. The Monte Carlo method in lighting calculations. International Journal of Lighting Research &Technology, 15(4), pp. 163-170. 1983
- [10] Ansys User's Manual. SVANSON ANALYSYS SYSTÉM, Inc. 2003,Huston, USA registered ISO 9001:2000

9 ŽIVOTOPIS

Ing. Eva Kadlecová
narozena 8.7.1978 v Brně

Kontaktní adresa

Masarykova 123
Modřice
664 42

Studium dříve

1992 – 1996

SPŠE, Kounicova 16, Brno, 602 00
obor : Elektronické počítačové systémy

1996 – 2001

VUT v Brně, FEI, Údolní 53, Brno, 602 00
obor : Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Studium nyní

od 2001

VUT v Brně, FEKT, Údolní 53, Brno, 602 00
studijní program doktorský, 3-letý
Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika,
obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika (D-SEE)
forma studia prezenční, kombinovaná

Zaměstnání

od 2003

Technický pracovník
VUT v Brně, FEKT, Purkyňova 118 ,Brno, 612 00
Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky

Granty ukončené

V rámci FRVŠ získaný grant G1 2169/2003 „Využití světlovodů v laboratorní výuce kurzů osvětlovací techniky“, byl úspěšně ukončen 10.2. 2004.

Granty ve výběrové řízení na rok 2005

- Vybudování multifunkční experimentální laboratoře pro podporu samostatné tvůrčí práce studentů v rámci semestrálních projektů, bakalářských, diplomových a disertačních prací, F1 a
- Měření a simulace vlivu vlastností vzorků v MR tomografii
- Optoelektronické metody pro měření elektromagnetických neperiodických dějů

Jiné aktivity

Konzultace v oboru osvětlovací techniky, numerického modelování světelných úloh a optických systémů, použití sdružených numerických modelů a programování. Vedení ročníkových projektů SP1 „Literární řešerše využití metod numerického modelování optických systémů“ a „Studie využití metody konečných prvků v optice“.

Jazyky

Angličtina

10 PUBLIKACE

- [1] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., PLCH, J. Problémy s přesným měřením interiérových a exteriérových svítidel In Mezinárodní vědecká konference ELEKTROENERGETIKA 2002. Mezinárodní vědecká konference ELEKTROENERGETIKA 2002. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2002, s. 41 - 45, ISBN 80-248-0060-2
- [2] KADLECOVÁ, E. Optimizing distribution flow of light from aspect of hold on the man In Proceedings of 8th Conference STUDENT EEICT 2002 Volume 2. Student EEICT 2002. Brno: VUT FEKT Brno, 2002, s. 151 - 155, ISBN 80-214-2115-0
- [3] KADLECOVÁ, E., PLCH, J. Příspěvek k teorii modelování In Sborník přednášek 5. mezinárodní konference "SVĚTLO 2002". 5. mezinárodní konference SVĚTLO 2002. Brno: Česká společnost pro osvětlování, 2002, s. 188 - 194, ISBN 80-238-8928-1
- [4] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. PROSPECTS OF LIGHT GUIDES IN INTERIOR LIGHTING AND APPLICATIONS OF ANALYSIS WITH METHOD OF LIMITED ELEMENTS FOR SIMPLE SOURCE OF LIGHT In V Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie, 18-21 października 2003r.. V Polish Workshop for Candidates for a Doctor's Degree, 18-21 of October 2003r.. V Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie, 18-21 października 2003r., Istebna-Zaolzie, Schronisko PTSM "Zaolzianka": 2003, s. 1 - 6,
- [5] BERNARD, M., FIALA, P., KADLECOVÁ, E. Illumination of Interiors by the Hollow Light Guides. ElectronicsLetters.com - <http://www.electronicletters.com>, ISSN 1213-161X, 2003, s. 1 - 5
- [6] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. Illumination of interiors by the hollow light guides In Světlo - Light 2003, s. 1 - 5, ISBN 80-233-0488-7
- [7] KADLECOVÁ, E., PLCH, J. Metody modelování odrazné plochy svítidla In Electric Power Engineering 2003. 5th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2003. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2003, s. 55 - 110, ISBN 80-248-0225-2
- [8] KADLECOVÁ, E. METHODS MODELLING USED FOR DESIGN OF LIGHTING SYSTEMS IN LIGHTING TECHNOLOGY AND DESIGN OF REFLECTORS In STUDENT

- EEICT 2003 3.díl. Student EEICT 2003. Brno: VUT Brno FEKT a FIT, 2003, s. 340 - 683, ISBN 80-214-2379-X
- [9] KADLECOVÁ, E., BAXANT, P. Možnosti návrhu odrazné plochy svítidel In 1. doktorandská konference Současnost elektroenergetiky 2003. 1. doktorandská konference Současnost elektroenergetiky 2003. : , 2003, s. 1-225 - 226, ISBN 80-214-2417-6
- [10] FIALA, P., KADLECOVÁ, E., BERNARD, M. Simple lighting source analysis with finite element method In 11. Ansys and Star-CD Users' Meeting. 11. ANSYS and STAR-CD Users' Meeting. Brno: 2003, s. 1 - 220, ISBN 80-239-1598-3
- [11] KADLECOVÁ, E. Automatizovaný systém výpočtu jednoduchého světelného zdroje metodou konečných prvků In Sborník příspěvků konference Radešín 2003. Radešín 2003., s. 129 - 258, ISBN 80-214-2479-6
- [12] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. Illumination of interiors by the Hollow Light Guides In 14.mezinárodní konferencia SVETLO 2003, 14th International Conference LIGHT 2003. 14.mezinárodní konferencia Svetlo 2003 14th International Conference Light 2003. Bratislava, 2003, s. 84 - 88, ISBN 80-233-0488-7
- [13] KADLECOVÁ, E., BAXANT, P. Odrazná plocha svítidel In 14.mezinárodní konferencia SVETLO 2003, 14th International Conference LIGHT 2003. 14.mezinárodní konferencia Svetlo 2003 14th International Conference Light 2003. Bratislava:, 2003, s. 221 - 226, ISBN 80-233-0488-7
- [14] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. Simple sources of light analysis with finite element method In Elektrotechnika a informatika 2003, část třetí Elektroenergetika. Elektrotechnika a informatika 2003., 15. - 16. října 2003, Zámek Nečtiny: s. 19 - 22, ISBN 807082-983-4
- [15] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. Osvětlování interiérů prostřednictvím světlovodů In Sborník příspěvků a prezentací akce Odborné semináře 2003. Odborné semináře 2003. Brno: UREL FEKT VUT v Brně, 2003, s. 1 - 36, ISBN REL02V
- [16] KADLECOVÁ, E., FIALA, P. MODELING OF SPECIAL ELECTROMAGNETIC PROBLEM In Proceedings of the 10th conference Student EEICT 2004, Volume 3. Brno: Brno University of Technology, tisk : MSD, spol s.r.o.Skorkovského 70a, Brno, 2004, s. 418 - 422, ISBN 80-214-2636-5
- [17] KADLECOVÁ, E., FIALA, P. Modeling of simple light problems In Modeling of simple light problems. International Scientific Conference Electric Power Engineering 2004. Brno: VUT v Brně, FEKT, ÚEEN, 2004, s. 1 - 3,
- [18] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. Modelování a možnosti využití dutých světlovodů In Elektroenergetika 2004. Elektroenergetika 2004. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004, s. 1 - 7, ISBN 80-248-0612-6
- [19] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. Modelování a možnosti využití dutých světlovodů. ISBN 80-248-0612-6. (abstrakt)
- [20] KADLECOVÁ, E., FIALA, P. LIGHT GUIDE MODELING In Energy Forum 2004. Energy Forum 2004. Sofia: Technical University - Sofia, 2004, s. 338 - 341, ISBN 80-986-1619-1
- [21] KADLECOVÁ, E., BERNARD, M., FIALA, P. Využití, měření a numerické modelování osvětlovacích soustav se světlovody In Sborník příspěvků a prezentací akce Odborné semináře 2004. Brno: UREL FEKT VUT v Brně, 2004, s. 1 - 36, ISBN REL02V
- [22] KADLECOVÁ, E., KALÁB, P., STEINBAUER, M. Metering Current Transformer In Energy Forum 2004. Energy Forum 2004. Sofia: Technical University - Sofia, 2004, s. 203 - 206, ISBN 80-986-1619-1

- [23] KADLECOVÁ, E., FIALA, P. Numerical modeling of light problem. Proceedings of the 5th International Conference ELEKTRO 2004, NEW TRENDS IN DIAGNOSTICS AND REPAIRS OF ELECTRICAL MACHINES AND EQUIPMENTS, Volume 2. ELEKTRO 2004 - 5th International Conference. Žilina, Slovakia: Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina, Slovakia, EDIS -Žilina publishers, 2004, s. 1 - 4, ISBN 80-8070-252-7
- [24] KADLECOVÁ, E., FIALA, P. Numerical modeling of light problem. Advances in Electrical and Electronic Engineering, ISSN 1336-1376, 2004, roč. 5., č. 3., s. 1 - 4.