

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

Měření účinnosti dutého světlovodu

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

JOSEF ZAJÍČEK

BRNO 2010

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Josef Zajíček

Ročník: 3

ID: 111164

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Měření účinnosti dutého světlovodu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem práce je provedení série měření na dutých zrcadlových světlovodech, které se používají pro osvětlování denním světlem v prostorech bez oken. Hlavním cílem je proměřit účinnost vedení světla dutým válcem se zrcadlovou plochou.

- Popis a funkce dutých světlovodů
- Návrh metodiky měření účinnosti světlovodu
- Měření účinnosti pro difuzní světlo
- Měření účinnosti pro přímé světlo

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 31.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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.

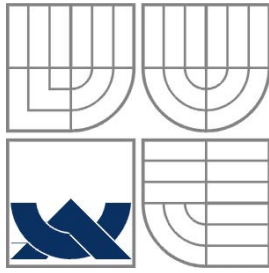
Bibliografická citace práce:

ZAJÍČEK, J. *Měření účinnosti dutého světlovodu*. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně 2010. 43 stran.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Zde bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Petrovi Baxantovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. Tomášovi Pavelkovi a Ing. Janovi Škodovi za pomoc při laboratorním měření. Nakonec děkuji slečně Adrienn Kádek a panu Ing. Josefovi Zajíčkovvi za pomoc při konečné korektuře práce.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

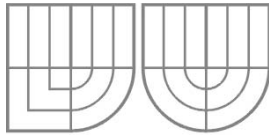
Měření účinnosti dutého světlovodu

Josef Zajíček

Vedoucí: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2010

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering



Bachelor's Thesis

Measuring the Effectiveness of the Hollow Light Guide

by

Josef Zajíček

Supervisor: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Brno University of Technology, 2010

Brno

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá popisem dutých světlovodů používané pro osvětlování vnitřních prostor. Jedním z cílů práce je popis funkce dutých světlovodů, jejich třídění a využití v jednotlivých aplikacích. Práce se dále zabývá základními optickými vlastnostmi těchto systémů. Hlavním cílem práce je sestavení laboratorní úlohy pro měření účinnosti dutých světlovodů, které jsou dostupné na fakultě. Pro laboratorní úlohu byla vymyšlena metodika měření, která napodobuje osvětlení difuzním světlem. Metodika byla upravena k možnostem laboratoři světelné techniky fakulty. Práce dále obsahuje kompletní laboratorní měření účinnosti dutého světlovodu. Měření obsahuje popis měřicí metody, naměřené hodnoty a vyhodnocení měření.

KLÍČOVÁ SLOVA: Dutý světlovod; Pasívní osvětlovací systémy; Účinnost dutých světlovodů; Měření účinnosti dutých světlovodů

ABSTRACT

This thesis describes hollow lightguides used for inner-space lighting. One of the goals of this thesis is to describe the function, classification and use of hollow lightguides in certain applications. The basic optical properties of these systems are also discussed. The main goal of the thesis is to propose a lab procedure to measure the efficiency of the hollow lightguides available at the faculty. A measurement method which simulates diffuse lighting is proposed for the lab procedure. This method was adjusted to fit the capabilities of the lighting laboratory of the faculty. The thesis includes a complete measurement of the efficiency of a hollow lightguide. This includes the description of the measurement method, the measured values and an evaluation of the measurement.

KEY WORDS:

Hollow Light Guide; Passive Lighting Systems; Hollow Light Guides Efficiency; Hollow Light Guides Efficiency Measurement

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek.....	10
Seznam symbolů a zkratk	11
1 Úvod.....	12
1.1 Cíle práce	12
1.2 Charakteristika současného stavu řešené problematiky	12
2 Základní fotometrické veličiny	14
2.1 Úvod.....	14
2.2 Veličiny	14
3 Osvětlovací soustavy se světlovody	16
3.1 Úvod.....	16
3.2 Vývoj osvětlovacích systémů se světlovody.....	16
3.3 Pasivní osvětlovací systémy.....	18
3.3.1 Světlovody	18
3.4 Aktivní osvětlovací systémy	22
3.4.1 Využití aktivních osvětlovacích systémů.....	22
4 Účinnost a optické vlastnosti světlovodů.....	24
4.1 Úvod.....	24
4.2 Světelná propustnost světlovodů.....	24
4.3 Provozní účinnost trubkových světlovodů.....	27
5 Měření účinnosti dutých světlovodů.....	29
5.1 Úvod.....	29
5.2 Měření dutých světlovodů.....	29
5.3 Vlastní měření účinnosti dutého světlovodu	31
5.3.1 Úkol měření.....	31
5.3.2 Popis laboratorní úlohy	31
5.3.3 Postup měření.....	36
5.3.4 Naměřené hodnoty	36
5.3.5 Výpočet	37
5.3.6 Grafické závislosti.....	38
5.3.7 Závěr měření	39
6 Závěr.....	40
Použitá literatura.....	41
Příloha A Obrázky laboratorní úlohy.....	42
Příloha B Seznam přístrojů	43

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 3-1. Osvětlovací soustava P. N. Čikoleva v továrně na střelný prach. [1]</i>	16
<i>Obrázek 3-2. Osvětlovací soustava kancelářských budov podle Molera a Cebrein [1]...</i>	17
<i>Obrázek 3-3. Části světlovodu</i>	19
<i>Obrázek 3-4. Provedení nástřešních kupolí [9]</i>	20
<i>Obrázek 3-5. Druhy světlovodů[7]</i>	21
<i>Obrázek 3-6 Různé provedení difuzorů (stropní kryt)[9]</i>	21
<i>Obrázek 4-1. Náskres světlovodu [8]</i>	24
<i>Obrázek 4-2. Spektrální propustnost střešní kupole z PMMA skla [7].....</i>	26
<i>Obrázek 4-3. Spektrální propustnost difuzoru z PMMA skla [7].....</i>	27
<i>Obrázek 5-1 Měření pod umělou oblohou [6]</i>	29
<i>Obrázek 5-2 Měření pomocí kulového integrátoru [6]</i>	30
<i>Obrázek 5-3 Měření pod venkovní oblohou [4]</i>	31
<i>Obrázek 5-4 Principiální boční zobrazení laboratorního měření.....</i>	32
<i>Obrázek 5-5 Zobrazení výstupní části světlovodu z hora.....</i>	33
<i>Obrázek 5-6 Prostorový úhel kulového vrchlíku a kulového pásu [3].....</i>	34
<i>Obrázek 5-7 křivka svítivosti daného světlovodu.....</i>	38
<i>Příloha A-1 Provedení laboratorní úlohy ze předu</i>	42
<i>Příloha A-2 Provedení laboratorní úlohy ze strany.....</i>	42

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 4-1. Vypočtené hodnoty propustnosti světla $\tau(\gamma_d)$ v závislosti na uhlu dopadu světla γ_d</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 4-2. Světelnětechnické vlastnosti různých materiálů [7]</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 5-1 Tabulka naměřených hodnot</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 5-2 Vypočtené hodnoty světelných toků</i>	<i>37</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

D	průměr světlovodu [m]
dA	plocha řezu svazkem, který obsahuje daný bod [m ²]
E	osvětlenost [lx]
H	světlení kruhového krytu [lm.m ⁻²]
H _e (λ)	spektrální hustota záření [W.m ⁻¹]
I	svítivost [cd=lm.sr ⁻¹]
K _m	je konstanta pro fotopické vidění [lm.W ⁻¹]
L	jas [cd.m ⁻²]
l	délka světlovodu [m]
L _{po}	průměrný jas oblohy [cd.m ⁻²]
L _{sk}	jas stropního krytu [cd.m ⁻²]
r	vzdálenost pozorovatele [m]
V(λ)	spektrální citlivost normalizovaného pozorovatele [-]
α	činitel pohlcení světla [-]
γ	úhel který udává rovinu v systému C – γ [°]
γ ₁	úhel, který udává spodní rovinu daného prostorového pásu [°]
γ ₂	úhel, který udává horní rovinu daného prostorového pásu. [°]
γ _d	úhel dopadu světla [°]
γ _m	úhel mezi měřenou rovinou a osou světlovodu [°]
η	účinnost světlovodu [%]
θ	úhel mezi normálou plochy řezu a směrem paprsku [°]
ρ	činitel odrazu světla [-]
τ	činitel prostupu světla [-]
τ ₁	propustnost nástřešní kopule [-]
τ ₂	propustnost stropního krytu [-]
Φ _{celk}	světelný tok vystupující ze světlovodu [lm]
Φ _{vstup}	světelný tok vstupující do světlovodu [lm]
Ω	prostorový úhel [sr]
Ω _{γ₁-γ₂}	prostorový úhel pásu vymezený úhly γ ₁ , γ ₂ [sr]
Φ	světelný tok [lm]

1 ÚVOD

Sluneční záření je jedním ze základních aspektů lidského života. Je dokázáno, že sluneční světlo a jeho dynamické změny mají pozitivní vliv na úroveň a kvalitu života. V dnešní době se lidstvo kvůli globálním hrůzám pokouší snižovat spotřebu neobnovitelných zdrojů energie. Snaží se najít co nejvíce cest, kde by mohl využít obnovitelných zdrojů. Jedna z perspektivních cest je sluneční záření. Sluneční energie je všem snadno dostupná a téměř nevyčerpatelná. [7]

Snaha co nejefektivněji využít sluneční energii nezahrnuje pouze přeměnu sluneční energie na elektrickou, ale i mnoho dalších možností. Jedna z nich je využít denní světlo pro osvětlení vnitřních prostorů budov, či podzemních komplexů. Nejčastěji se používají tubusové světlovody a to v různých provedeních. V poslední době bylo dokázáno, že přirozené osvětlení a jeho dynamika kladně ovlivňuje výkonnost, náladu a zdraví jednotlivce. Jelikož dnešní civilizace většinu času tráví v uzavřených prostorech s umělým osvětlením, tato problematika nabývá na významu. [7]

1.1 Cíle práce

Tato práce má za cíl popsat základní funkci a možnosti dutých světlovodů. Dále budou popsány metody, kterými se dá měřit účinnost světlovodů. Dalším cílem je provedení sérii měření na funkčním modelu dutého světlovodu a zjištění účinnosti. Pro měření bude vymyšlena metodika, která bude přizpůsobena k možnostem laboratoře.

1.2 Charakteristika současného stavu řešené problematiky

Problematika moderních osvětlovacích soustav se světlovody se začala zkoumat v 70-80. letech. První patenty se zaznamenávaly od roku 1999. Každým patentem se zdokonaloval předchozí stav dutých světlovodů. Světlovody se zabývá i mezinárodní komise pro osvětlování CIE. Byl sestaven tým expertů, kteří vypracovali dvě technické zprávy o terminologii, využití, údržbě a instalaci světlovodů. (CIE 164-2005 a CIE173-2005) [7]. V druhé technické zprávě už byla vypracována i aproximační metoda pro výpočet účinnosti vedení světla. [7]

Snaha zdokonalovat světlovodné systémy vedla k tomu, že byly vypracovány analytické řešení popisující šíření světla ve světlovodu. Po roku 1997 byly provedeny měření na světlovodech, s cílem vypracování empirických metod pro návrh světlovodných systémů. Měření prováděli např. Oakley a kol (2000), Carter (2002), Zhang a Muneer (2002), Jenkins a Muneer (2003). V návaznosti na tyto měření vzniklo mnoho modelů, které umožňují korektní

návrh a odhad světlovodů. Například [7]: Jenkins-Muneerova metoda, Zhang-Muneerova metoda, Tsangrassoulisova metoda a aproximační metoda CIE.

Měřením účinnosti dutých světlovodů se zabývá i směrnice CIE 173-2006, kde jsou popsány jednotlivé možnosti měření. Tímto tématem se také zabývala konference SVĚTLO – 2009.

2 ZÁKLADNÍ FOTOMETRICKÉ VELIČINY

2.1 Úvod

Cílem této kapitoly je popsat základní fotometrické veličiny a poukázat na vztahy mezi nimi. Fotometrické veličiny se budou v této práci často vyskytovat, a proto je důležitá jejich jednoznačná interpretace.

2.2 Veličiny

Světelný tok- Φ [lm] je vyjádřený vztahem [7]:

$$\Phi = K_m \cdot \int_{380}^{780} V(\lambda) \cdot H_e(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{lm}] \quad (2.1)$$

kde je:

$H_e(\lambda)$ je spektrální hustota záření [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$];

$K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ je konstanta pro fotopické vidění, stanovená pro vlnovou délku $\lambda_m = 555 \text{ nm}$;

$V(\lambda)$ spektrální citlivost normalizovaného pozorovatele; [-]

Světelný tok vyjadřuje, kolik světla vyzařuje těleso do prostoru. Je to světelný výkon, na který reaguje lidské oko.

Svítivost- I [cd] je jedinou fotometrickou veličinou v soustavě SI a vyjadřuje se vztahem [7]:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [\text{cd}] \quad (2.2)$$

kde je:

I svítivost [$\text{cd} = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$];

Φ světelný tok [lm];

Ω prostorový úhel [sr];

Svítivost udává množství vyzařovaného světelného toku světelným zdrojem do prostorového úhlu. Kandela je definována takto: „Kandela [cd] představuje svítivost zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o vlnové délce $\lambda_{\max} = 555$ nm (kmitočtu $540 \cdot 10^{12}$ Hz), přičemž intenzita vyzařování zdroje v tomto směru je $1/683$ W.sr⁻¹“. [7, str. 14]

Osvětlenost-E [$\text{lx} = \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$] udává míru osvětlenosti určité plochy a určuje se vztahem [7]:

$$E = \frac{\Phi}{dA} = \frac{I}{r^2} \cdot \cos \theta \quad [\text{lx}] \quad (2.3)$$

kde je:

E	osvětlenost [lx];
I	svítivost bodového zdroje [cd];
r	vzdálenost [m];
θ	úhel mezi normálou plochy řezu a směrem paprsku [°];

Jas-L [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$] je veličina, která udává hodnotu pro vjem světlosti určitého tělesa nebo zářící plochy, jak ji vnímá lidské oko [9]. Jas se dá vyjádřit pomocí více vztahů, v závislosti na ostatních fotometrických veličinách. Nejčastěji se jas vyjadřuje jako závislost na svítivosti, vztahem [7]:

$$L = \frac{dI}{dA \cdot \cos \theta} \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2.4)$$

kde je:

L	jas [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$];
dA	plocha řezu svazkem, který obsahuje daný bod. Plocha $dA' = \cos \theta$ představuje kolmý průmět elementu plochy ve směru k pozorovateli [m^2];
θ	úhel mezi normálou plochy řezu a směrem paprsku [°];

Jas se měří jasoměrem.

3 OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY SE SVĚTLOVODY

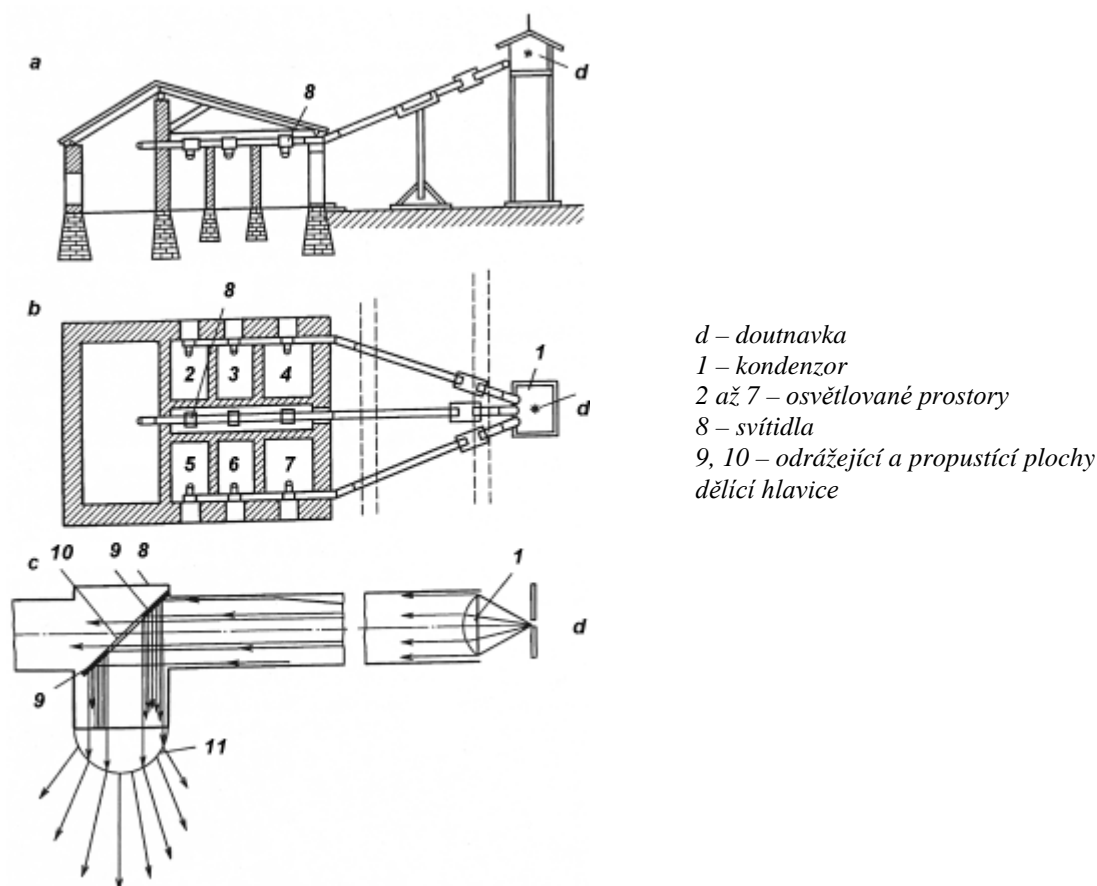
3.1 Úvod

V této kapitole bude popsán vývoj světlovodných systémů se světlovody. Cílem této kapitoly je popsat základní funkci aktivních a pasivních osvětlovacích systémů.

3.2 Vývoj osvětlovacích systémů se světlovody

Idea přenosu světla na velké vzdálenosti vznikla už v starověkém Egyptě, kde do svých podzemních budov přenášeli denní světlo pomocí vertikálních šachet, které byly obloženy zlatými pláty. [7]

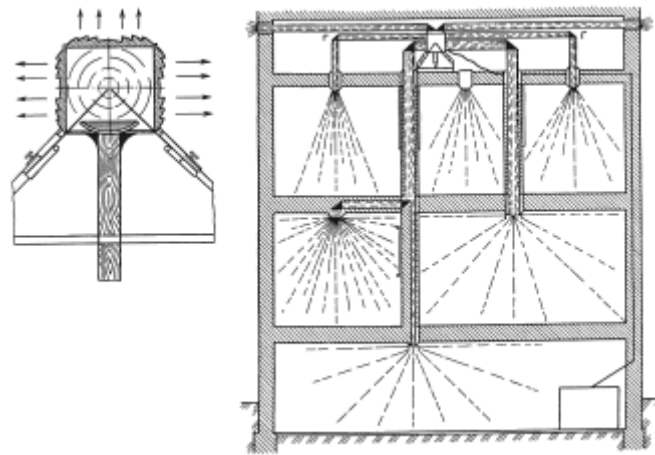
V novověku se začali touto tematikou zabývat inženýři a vynálezci z USA a z Ruska. Jako první navrhnul a zrealizoval osvětlovací soustavu se světlovody vynálezce P. N. Čikolev (1874). Jeho nápad spočíval v tom, že od výkonné elektrické obloukové lampy přenášel světlo pomocí dutých trubek s pozrcadleným vnitřkem. Tento projekt realizoval v Ochtinské továrně na střelný prach. Zdroj světla byl v budově daleko od skladu výbušnin. [1]



Obrázek 3-1. Osvětlovací soustava P. N. Čikoleva v továrně na střelný prach. [1]

Současně s ním se touto tematikou zabývali i vědci z USA: M. T. Neal, W. R. Lake, Molera a Cebrian, W. Wheeler. Neal navrhnul systém, který pomocí čoček a zrcadel usměrňoval a přerozděloval světelný tok zdroje světla. Zabýval se též s odvedením a využitím tepla, které produkovaly elektrické obloukové lampy. Lake navrhnul způsob, jak využít Nealův světlovod k osvětlování podzemních šachet tunelů a vícepodlažních budov. [1]

Molera a Cebrian ve svých patentech navrhli soustavu dutých světlovodů, pro osvětlování kancelářských budov. Jejich nápad popisoval transport světla od výkonného zdroje světla přes Fresnelovy čočky usměrněné pomocí zrcadel. [1]



Obrázek 3-2. Osvětlovací soustava kancelářských budov podle Molera a Cebrein [1]

Tyto nápady zůstaly bohužel jenom teoretické, ale vypovídaly o pokrokovém myšlení v tematicke optických systémů. Ve všech patentech se využívaly trubice s reflexním materiálem, v kterých se světlo přenášelo pomocí mnohonásobných odrazů z jednoho konce trubice na druhý. Bohužel rozvoj světlovodů se pozastavil po vzniku žárovky. Technický rozvoj se vydal jiným směrem.

Až v roku 1965 G. B. Buchman přišel s revolučním nápadem pro realizaci světlovodů. Stavěl na nápadě Čikoleva a Wheelera. Jeho inovace byla v tom, že světlo od zdroje se nebude přenášet pomocí trubic s mnohonásobným odrazem světla, ale světlo bude vyzařováno rovnoměrně po celé délce světlovodu. Později se tyto světlovody nazývaly štěrbinovými a místo, kde světlo opouštělo světlovod, se nazývalo optická štěrбина. [1,7]

3.3 Pasivní osvětlovací systémy

Jak již bylo v úvodu zmíněno, je zřejmé, že dnešní technický rozvoj osvětlovacích systémů je zaměřen na zvyšování dostupnosti denního světla kdekoliv v budově. K dosažení tohoto cíle se využívají pasivní osvětlovací systémy. V pasivních systémech se pro přístup denního světla nevyužívají technické přístroje. Denní osvětlování je zajištěno vhodnou volbou stavebního řešení. K pasivním osvětlovacím systémům patří [9]:

- Okna, transparentní stěny, střešní okna, světlíky a valkýře
- Atria
- Anglické dvorky
- Světlovody

Anglické dvorky jsou stavební úpravy, které většinou složí pro osvětlení a větrání podzemních či sklepních místností. Do míst, kam tímto způsobem nelze přivést denní světlo se používají světlovodné systémy. Světlovodné systémy využívají pro rozvod světla různé typy světlovodných tubusů, které většinou využívají vysocereflexní povrchy pro mnohonásobný odraz světla. Tato podkapitola se dále bude zabývat převážně dutými tubusovými světlovody. [9]

3.3.1 Světlovody

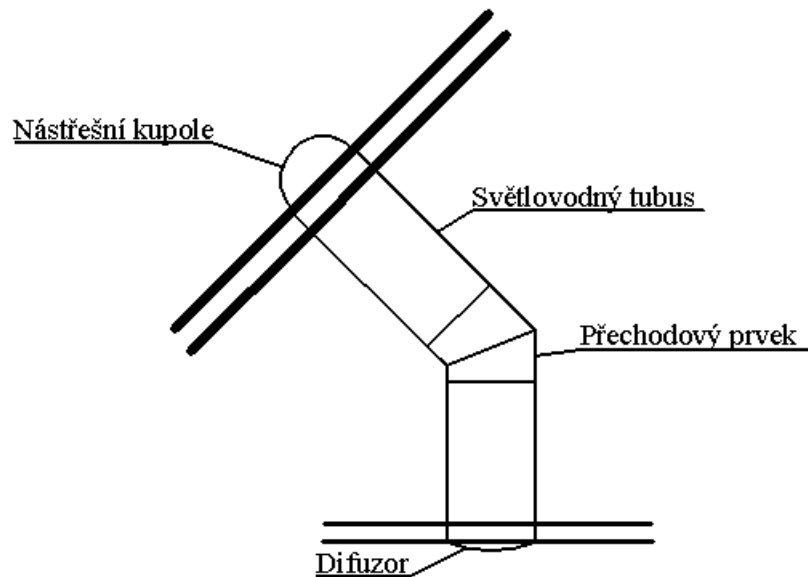
Světlovody jsou optické systémy, které se pro osvětlování vnitřních prostor dnes používají nejčastěji. Přepравují světlo na velkou vzdálenost pomocí mnohonásobných odrazů od vysocereflexních materiálů. Vývoj těchto zařízení gradoval hlavně v 70-80. letech 20. století. Použití světlovodů má více předností, které se dají uplatnit hlavně pro úsporu elektrické energie a v nových architektonických a stavebních řešeních. Mezi hlavní přednosti světlovodů patří [2]:

- studený kanál, na kterém není elektrický potenciál,
- možnost využití svítících ploch a tyčí namísto bodových zdrojů,
- nastavení rovnoměrného rozložení svítivosti,
- možnost změny barvy pomocí barevných filtrů,
- bezproblémový provoz, pomocí absolutní hermetizace světlovodného kanálu,
- možnost využití kombinovaného osvětlení (sluneční a umělé světlo),
- energetické a ekonomické úspory.

Mezi nevýhody patří poměrně vysoká instalační cena, dále proměnlivá intenzita osvětlení způsobena dynamickými změnami denní oblohy.

Části světlovodu [7]:

1. nástřešní kopule,
2. světlovodný tubus,
3. stropní kryt (nejčastěji difuzor)
4. doplňkové prvky – těsnění a popř. přidavné elektrické osvětlení

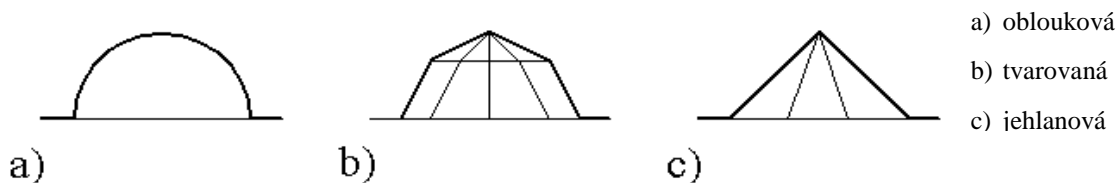


Obrázek 3-3. Části světlovodu

3.3.1.1 Nástřešní kopule

Tato část světlovodu je zcela průhledná (transparentní) a umožňuje vstup slunečního světla do světlovodu. Nástřešní kupole často bývá buď ze skla, anebo z plastu (PMMA). Tyto materiály mají vysokou světelnou propustnost, mnohdy až 95%. Můžou být tvarovány různě: obloukově, segmentovaně, kónicky. Existují dokonce provedení, kde nástřešní kupole je nahrazena jenom plochým sklem, ale zde se snižuje účinnost celého systému. Kupole je většinou čirá, ale pro větší koncentraci slunečních paprsků se dá kupole vybavit i optickou čočkou. Účinnost se dá zvyšovat i pomocí parabolických zrcadel, které se natočí na jih. Tyto zrcadla jsou buď v kupoli, anebo v její bezprostřední blízkosti. Pokud se toto zrcadlo automaticky natáčí směrem k slunci, tak se hovoří už o aktivním světlovodném systému. Existuje i varianta, kdy na jedné straně kupole je povrch prizmaticky upraven. Nástřešní kupole musí být odolná vůči povětrnostním podmínkám, stárnutí, mechanickému namáhání a musí být vzduchotěsná. Kupole se umísťují na místa, kde je největší intenzita osvětlení, na střechu a na fasádu. Fasádní provedení u nás není tak časté [7,9].

Na obrázku 3-4 [9] jsou uvedeny různé provedení nástřešních kupolí.



a) oblouková
b) tvarovaná
c) jehlanová

Obrázek 3-4. Provedení nástřešních kupolí [9]

3.3.1.2 Světlovodný tubus

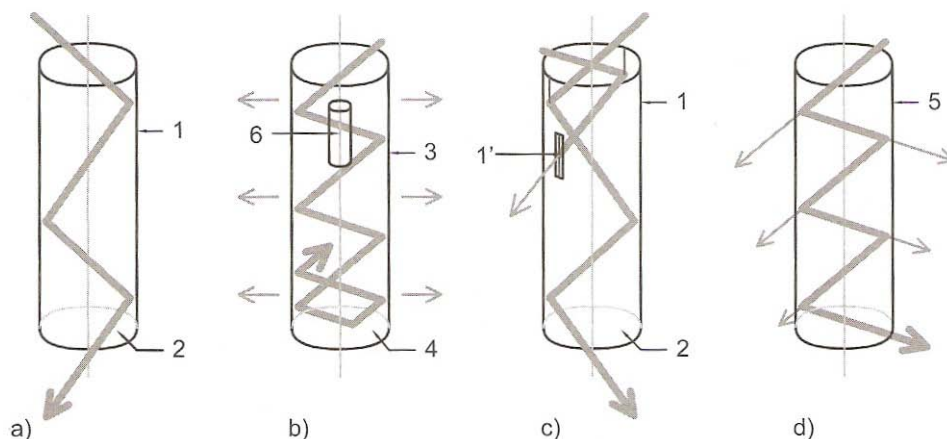
Tato část světlovodu má za úlohu dopravit denní, nebo umělé světlo na požadované místo v místnosti. Vyrábí se v různých průměrech a tvarech. Průměry se pohybují mezi 50 – 1000 mm. Pro běžné domovní instalace se ale většinou používají průměry kolem 500 mm. Tubusy s velkým a malým průměrem se řadí spíše do aktivních osvětlovacích systémů. Průřez světlovodného tubusu se nejčastěji volí kruhový, ale existují i čtvercové a obdélníkové provedení, které však mají menší účinnost, protože mají kouty. Pro vedení denního světla je důležité i umístění světlovodu. Vertikálně uložené světlovody jsou určeny hlavně pro vedení denního světla. Mohou být sestaveny i pro vedení umělého světla, ale to je spíš jenom jako doplněk při nízké intenzitě slunečního záření. Horizontální světlovody jsou určeny hlavně pro vedení umělého světla, protože denní světlo se ve vodorovných systémech šíří s menší účinností, než ve svislých. [7,9]

Materiál tubusu může být různorodý. Podle materiálu a povrchu můžeme rozdělit tubusové světlovody na [7,9]:

- **Neprůhledné tubusy se zrcadlovou úpravou** – tyto světlovody jsou používány nejčastěji. Jsou vyrobeny z anodizovaného hliníku a z vnitřku jsou opatřeny speciálními filmy, s kterými se dá dosáhnout odrazivost až 96%. Pro snadnější a univerzální instalaci se vyrábí jako pevné a ohybné. Pevné části mohou být rovné, ohýbané anebo sestaveny z teleskopických částí. Ohybné části umožňují světlovod zalomit. Uhel zalomení se dá plynule nastavit. Každé zalomení však znamená světelné ztráty a tím zmenšení světelné účinnosti. Jednotlivé články světlovodů se do sebe zasunují a spoje se přelepí páskou s aluminiovým povrchem, která zabraňuje vniknutí vlhkosti a prachu do tubusu světlovodu.
- **Štěrbínové tubusy** – tento typ světlovodů umožňuje vyzařování světla po celé své délce. Světlo vychází z povrchu světlovodu přes optickou šterbinu, přičemž povrch světlovodu je neprůhledný. Vnitřní povrchová úprava je stejná jako u předchozího.
- **Transparentní tubusy** – tyto světlovody se používají při aplikacích, kde se musí osvětlit více podlaží z jednoho světlovodu. Povrch tubusu je z termoplastických hmot (PMMA) a vnitřní plocha je pokryta tenkým mikro-prizmatickým filmem, který umožňuje vysoký odraz vedeného světla. V určitých částech světlovodu jsou

nainstalovány prvky, které rozptylují světlo ven. Na spodní části světlovodu se umísťuje zrcadlová plocha, která odráží světelné paprsky zpět do světlovodu. Pomocí vnitřní povrchové úpravy se docílí toho, že tubus po celé své délce tvoří souvislý svítící sloup. Transparentní tubus bez vnitřní povrchové úpravy se používá spíše jako dekorace a není vhodný pro vedení denního světla na větší vzdálenosti. Intenzita osvětlení je na vstupu denního světla největší a pak se postupně snižuje.

Na obrázku 3-5 [7] jsou znázorněny jednotlivé druhy světlovodů.



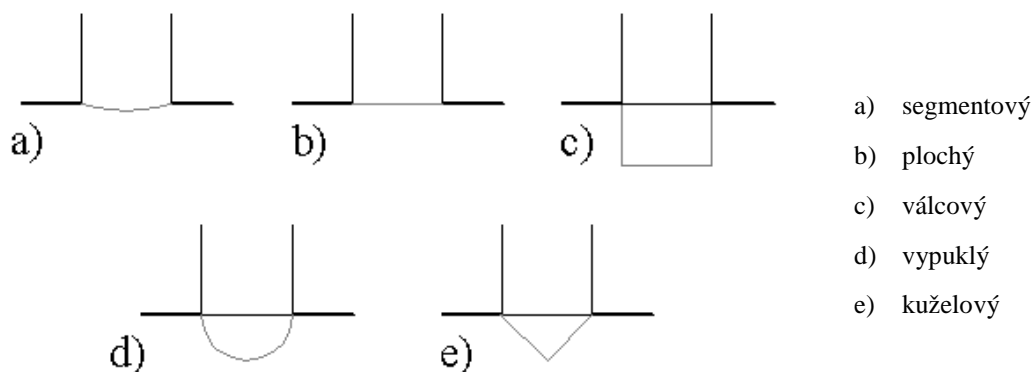
Obrázek 3-5. Druhy světlovodů[7]

a) zrcadlový, b) transparentní s mikroprizmatickou povrchovou úpravou, c) štěrbinový, d) transparentní bez jakékoli úpravy.

1 - zrcadlový povrch, 1' - optická štěrbina, 2 - stropní difuzor, 3 - polopropustný tubus, 4 - zrcadlový kryt, 5 - transparentní tubus, 6 - prvek rozptylující světlo

3.3.1.3 Stropní kryt

Stropní kryt světlovodu je zakončovací část. Většinou se zakončuje difuzorem, který rozptyluje světlo po místnosti popř. podhledový kryt s reflexní mřížkou. Existuje mnoho provedení difuzorů. Na obrázku 3-6 [9] jsou znázorněny různé provedení difuzorů. [9]



Obrázek 3-6 Různé provedení difuzorů (stropní kryt)[9]

3.4 Aktivní osvětlovací systémy

Aktivní osvětlovací systémy se od pasivních liší v mnoha směrech. Tyto systémy jsou mnohem modernější a složitější. V běžných aplikacích se ještě nepoužívají. Pro koncentraci světelného záření používají optické čočky a zrcadla. Tyto systémy jsou schopny vyhodnocovat změny externí osvětlenosti a udržovat vnitřní osvětlenost na stejné úrovni pomocí ovládaní umělého osvětlení. Bohužel tyto zařízení jsou velice nákladné, a proto se používají pouze ve větších stavbách. [7]

Aktivní světlovodné systémy nevyužívají pouze duté světlovody. Mezi prvky aktivních osvětlovacích soustav patří [9]:

- **Sluneční kolektory a heliostaty** – kolektory jsou nejčastěji parabolická zrcadla, které soustřeďují světelné záření do ohniska paraboly. Heliostaty jsou zařízení, které se natáčejí na slunce a odrážejí světelné záření na požadované místo.
- **Optické čočky** – nejčastěji se používají Fresnelovy čočky, které umožňují posunout ohnisko blíž ke skleněné ploše.
- **Optická vlákna** – soubor komplexních světlovodičů, které slouží k přenosu světla i optických signálů. Existují v mnoho provedeních a z různých materiálů a často se používají pro osvětlení, i pro dekorativní účely.
- **Světlovodné transparentní tubusy** – o těchto světlovodech už byla řeč u pasivních osvětlovacích systémech.

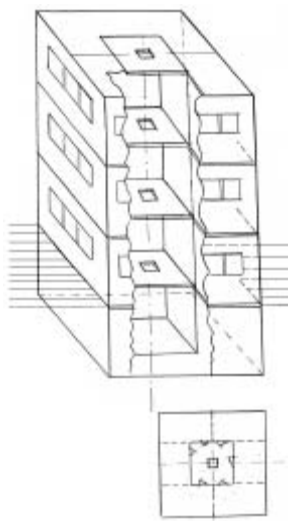
3.4.1 Využití aktivních osvětlovacích systémů

Aktivní osvětlovací systémy jsou mnohem efektivnější než pasivní. Už delší dobu se zkoumá tato technologie a optimalizuje se pro použití v praxi. Vzniklo mnoho komisí a vědeckých skupin, které mají za úkol aplikovat tyto systémy v různých podmínkách a zkoumat jejich účinnost. [9]

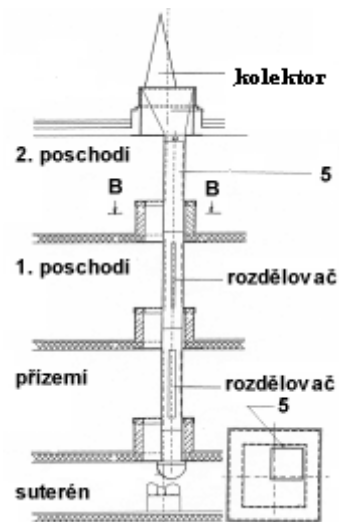
Program ARHELIO byl zaměřen na návrh inteligentního osvětlovacího systému, který využívá systémy dutých světlovodů a světlovodných šachet. Tento program využívá více prvků aktivních osvětlovacích soustav. Heliostaty a optické čočky koncentrují světlo do dutých světlovodů a světlovodných šachet, které pak dopravují světlo do prostorů budovy. Dále je součástí systému monitorovací systém, který sleduje a řídí (natáčí heliostaty, reguluje osvětlenost) optické prvky. [9]

Podle programu Arthelio bylo sestaveno osvětlování schodiště v budovách Semperlux AG company na Marienfelde v Berlíně, na Technische Universität Berlin. V obou případech se použily nastavitelné heliostaty jako zdroj světla. Do světlovodných šachet byly nainstalovány vysocevýkonné výbojky, které udržovali stálou hodnotu osvětlenosti. Energetická náročnost byla v průměru poloviční. [9]

Jedním z příkladů použití transparentních dutých světlovodů je škola v St. Gallenu ve Švýcarsku. Jedná se o svislý transparentní tubus s prizmatickým povrchem, který přechází přes všechna podlaží a osvětluje velkou nejfrekventovanější halu v budově. Světlovod je 10 m dlouhý a rozměr čtvercové základny je 625 mm x 625 mm. Na střeše je parabolický kolektor světla z aluminia. Na obrázku 3-7 [1] a 3-8 [1] je znázorněn náčrt budovy a provedení světlovodu. [9,8]



Obrázek 3.7. Stavební dispozice školy v St. Allenu [1]



Obrázek 3.8. Schéma světlovodu použitého v St. Allenu [1]

Jak je z příkladů použití zřejmé, osvětlování denním světlem je aktuální téma. Úspora elektrické energie a materiálu je podstatná, neboť cena a montážní náklady jsou mnohdy dost vysoké. Existují i aktivní světlovodné systémy, které nevyužívají duté světlovody, ale mnohonásobný odraz od zrcadel a optická vlákna.

4 ÚČINNOST A OPTICKÉ VLASTNOSTI SVĚTLOVODŮ

4.1 Úvod

Tato kapitola má za cíl popsat optické vlastnosti určitých prvků světlovodu a popis světelné propustnosti světlovodů. Dále se tato kapitola bude zabývat hodnocením světelné účinnosti světlovodů.

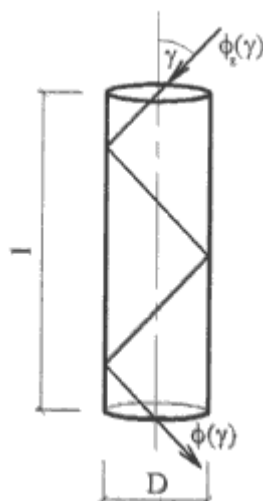
4.2 Světelná propustnost světlovodů

Když chceme posuzovat optické vlastnosti světlovodů, musíme znát určité parametry [7].

- odraznost. Vyjadřujeme jí pomocí činitele odrazu světla ρ ,
- propustnost. Vyjadřujeme jí pomocí činitele prostupu světla τ ,
- pohltivost. Vyjadřujeme jí pomocí činitele pohlcení světla α ,

Propustnost je jeden z nejdůležitějších parametrů. Udává v jaké míře propouští světlovod světlo. Propustnost vyjadřuje poměr světelného toku vycházejícího ze světlovodu k světelnému toku vcházejícího do světlovodu. Pro účinnost a celkové ohodnocení světlovodu je tento parametr rozhodující [8].

Na obrázku 4-1 je znázorněno schéma a uvedeny veličiny [8].



l – délka světlovodu. [m]

D – průměr světlovodu [m]

γ_d – úhel dopadu světla [°]

ϕ_E – vstupující světelný tok [lm]

ϕ - výstupný světelný tok [lm]

Obrázek 4-1. Náčrt světlovodu [8]

Pro výpočet propustnosti musíme znát délku světlovodu, průměr světlovodu, úhel, pod kterým dopadá světlo do světlovodu (měřeno od svislé osy světlovodu), světelný tok při vstupu do světlovodu a světelný tok, který vystupuje ze světlovodu. Světelný tok, který vychází ze světlovodu, se počítá následovně [8]:

$$\phi(\gamma_d) = \phi_E(\gamma_d) \cdot \rho^{\frac{l \cdot \tan \gamma}{D}} \quad [lm] \quad (4.1)$$

Propustnost se vyjadřuje jako poměr veličin $\phi(\gamma_d)$ k $\phi_E(\gamma_d)$, které jsou závislé na úhlu dopadu světla [8]:

$$\tau(\gamma_d) = \frac{\phi(\gamma_d)}{\phi_E(\gamma_d)} = \rho^{\frac{l \cdot \tan \gamma_d}{D}} \quad [-] \quad (4.2)$$

Pro názornost byly vypočítány světelné propustnosti světlovodů s různými parametry délky, průměru a úhlu dopadu. Průměr je volen z hodnot $D=320\text{mm}$, 520mm , 760mm . Délka světlovodu se volí tak aby poměr délka k průměru nabýval hodnot $l/D=5,10,20$. Činitel odrazu světla $j\varphi=0,98$ [8]. Následující 4-1 tabulka obsahuje vypočtené hodnoty světelné propustnosti pro zadané světlovody.

Tabulka 4-1. Vypočtené hodnoty propustnosti světla $\tau(\gamma_d)$ v závislosti na úhlu dopadu světla γ_d

l/D	l[m]	D[m]	$\tau(\gamma)$				
			$\gamma_d=0^\circ$	$\gamma_d=10^\circ$	$\gamma_d=20^\circ$	$\gamma_d=30^\circ$	$\gamma_d=40^\circ$
5	1,60	0,32	1	0,982	0,963	0,943	0,918
	2,60	0,52					
	3,80	0,76					
10	3,20	0,32	1	0,965	0,929	0,889	0,844
	5,20	0,52					
	7,60	0,76					
20	6,40	0,32	1	0,931	0,863	0,791	0,712
	10,40	0,52					
	15,20	0,76					

Hodnoty byly počítány podle vztahu 4.2 a bylo počítáno se světlovodem, který nemá difuzor ani nástřešní kupoli a není ničím zastíněn ani znečištěn.

Ve skutečnosti se však musí počítat i s difuzorem a nástřešní kupolí, které jsou nedílné součástí každého světlovodu. V těchto součástech je světelná ztráta značná, není možné ji zanedbat. [8]

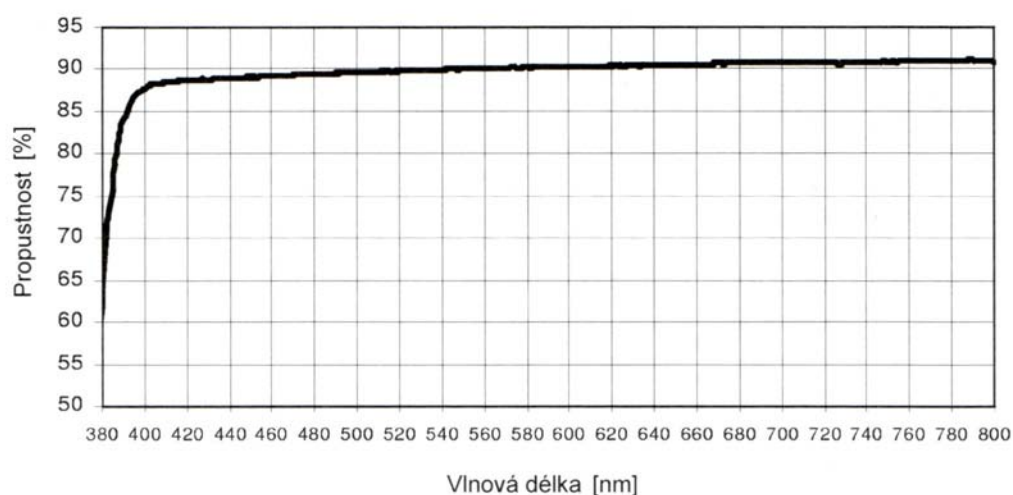
Difuzor a nástřešní kupole se může vyrábět z různých materiálů. Každý materiál má různou odraznost, propustnost a pohltivost. Tabulka 4-2 znázorňuje tyto parametry pro různé materiály. [7]

Tabulka 4-2. Světelnětechnické vlastnosti různých materiálů [7]

Druh materiálu	Tloušťka materiálu	Činitel prostupu světla	Činitel odrazu světla	Činitel pohlcení světla
		τ	ρ	α
	[mm]	[-]	[-]	[-]
Čiré sklo	1 - 4	0,90 - 0,92	0,06 - 0,08	0,02 - 0,04
Prizmatické sklo	3 - 6	0,70 - 0,90	0,05 - 0,20	0,05 - 0,10
Dezénované sklo ¹⁾	3 - 6	0,60 - 0,90	0,07 - 0,20	0,03 - 0,20
Matové sklo ¹⁾	2 - 3	0,63 - 0,78	0,12 - 0,20	0,10 - 0,17
Matové sklo ²⁾	2 - 3	0,82 - 0,88	0,07 - 0,08	0,05 - 0,10
Akrylát - čirý	3	0,92	0,08	0,0
Akrylát - opál	3	0,55 - 0,78	0,17 - 0,41	0,04 - 0,05

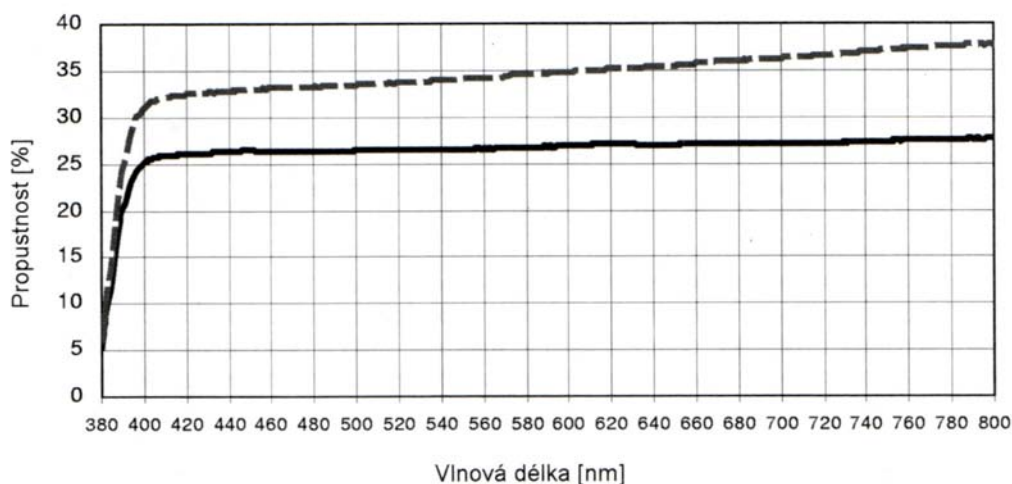
1)světlo dopadá na lesklou stranu; 2) světlo dopadá na matnou (drénovanou) stranu

Nejčastěji jsou světelnětechnické parametry látek zadány pro celé viditelné spektrum ($\lambda \in (380\text{nm}, 780\text{nm})$) jednou integrovanou hodnotou. V určitých případech toto zadání není dostačující, a proto se zavádí pojem spektrální propustnost materiálů. Pro difuzory a nástřešní kupole se nejčastěji používá PMMA skla. Na obrázku 4-2 a 4-3 [7] jsou znázorněny spektrální propustnosti skel, které se používají jako transparentní prvky u dutých světlovodů. [7]



Obrázek 4-2. Spektrální propustnost střešní kupole z PMMA skla [7]

Difuzor se vyrábí tak, aby co nejlépe rozptyloval světlo. Z tohoto důvodu se jedna strana vyrábí jako hladká, a druhá jako dezénovaná. Na tom, kterou stranou vložíme difuzor do světlovodu, závisí jeho světelná propustnost. Pokud ho dezénovanou stranou položíme směrem ven ze světlovodu, tak bude jeho propustnost maximální. Pokud ho však dezénovanou stranou položíme směrem do světlovodu, tak vlivem odrazu a rozptylu světla do světlovodu se jeho propustnost sníží a tím i celá účinnost systému. Na obrázku 4-3 [8] je spojitou křivkou značena možnost, kdy je dezénovaná strana směrem dovnitř a čárkovaná křivka pro dezénovanou stranu směrem ven ze světlovodu. [7]



Obrázek 4-3. Spektrální propustnost difuzoru z PMMA skla [7]

4.3 Provozní účinnost tubusových světlovodů

Pro praktické účely a návrh osvětlovacích systémů používajících světlovody je velmi důležité znát provozní účinnost světlovodů. Cílem této práce je tuto účinnost naměřit. Měření bude nepřímé, bude se měřit osvětlenost před a za světlovodem.

Postup hodnocení světelné účinnosti světlovodného systému je následující :

Účinnost světlovodného systému závisí na [7,9]:

- délce a průměru světlovodné části. V literatuře se často používá poměr těchto hodnot (l/D),
- způsobu realizace světlovodu: přímý a ohýbaný (počet ohybů), vodorovný a svislý,
- optických vlastnostech jednotlivých částí světlovodu: vysoká světelná propustnost nástřešní kupole a difuzoru, vysoká odrazivost vnitřních povrchů světlovodu a rozptyl difuzoru.

Další výklad ukáže jednu možnost výpočtu provozní účinnosti tubusového světlovodu.

Provozní účinnost se počítá podle následujícího vztahu [9]:

$$\eta = \frac{L_{sk}}{L_{po}} \quad [-] \quad (4.3)$$

Kde je:

L_{sk} jas stropního krytu [cd.m^{-2}]
 L_{po} průměrný jas oblohy [cd.m^{-2}]

Pro výpočet účinnosti musíme znát jas stropního krytu, který je zdrojem světla v místnosti. Průměrný jas stropního krytu se vypočítá podle [9]:

$$L_{SK} = \frac{H}{\pi} \quad [\text{cd.m}^{-2}] \quad (4.4)$$

Kde je:

$H = \Phi/A$ světlení kruhového krytu [lm.m^{-2}]
 Φ světelný tok vyzařovaný stropním krytem [lm]
 A plocha otvoru stropního krytu [m^2]

Pokud budeme uvažovat standardně zamračenou oblohu CIE s gradací jasu 1 : 3 a vnější horizontální osvětleností $E_h = 5000 \text{ lx}$ lze uvést vztah [7]:

$$L = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \alpha \cdot \frac{E}{\pi} = \frac{H}{\pi} \quad [\text{cd.m}^{-2}] \quad (4.5)$$

Kde je:

$\tau_1, (\tau_2)$ propustnost transparentních částí světlovodu (nástřešní kopule a stropní kryt)
 α činitel pohlcení na vnitřních stěnách světlovodu.

5 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI DUTÝCH SVĚTLOVODŮ

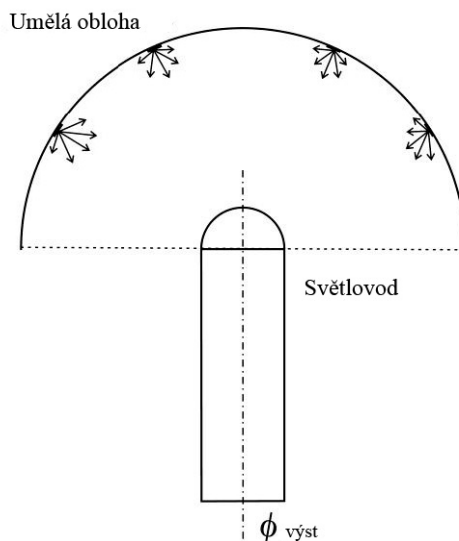
5.1 Úvod

Tato kapitola se zabývá problémy, které nastávají při měření světlovodných systémů. Obsahuje ukázky různých měřících metod a poukazuje na jejich výhody a nevýhody. V této kapitole bude také popsána a vyhodnocena vlastní laboratorní úloha, která byla naměřena v laboratoři světelné techniky na Ústavu elektroenergetiky.

5.2 Měření dutých světlovodů

Při zdokonalování světlovodných systémů s dutými světlovodny nastala potřeba zjišťování optických parametrů a účinnosti těchto zařízení. Po vzniku teoretických metod pro výpočet účinnosti a návrh světlovodů (Jenkins-Muneerova metoda, Zhang-Muneerova metoda), se začaly vyvíjet různé měřící metody pro ověření a zjištění reálných parametrů dutých světlovodů.

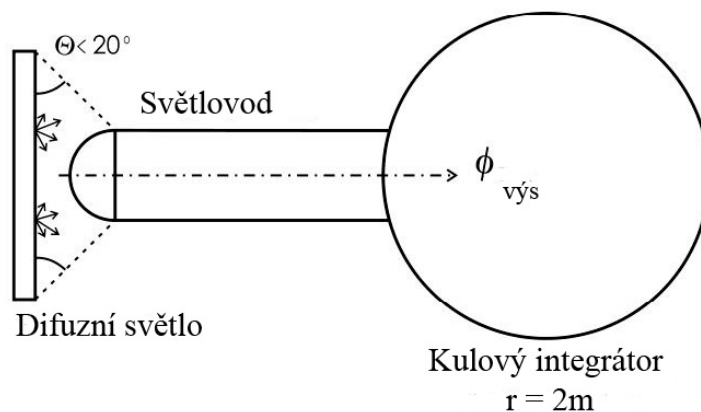
Při měření na dutých světlovodech se musí zohlednit všechny parametry denní oblohy. Denní obloha se neustále mění a dodává jak přímé osvětlení, tak i difuzní. Pokud chceme získat věrohodné výsledky, musíme sestavit metodiku, která zahrnuje oba zdroje světla. Jedním z řešení je pokusit se napodobit denní oblohu pomocí umělé oblohy. Tato možnost je zobrazena na obrázku 5-1. [6]



Obrázek 5-1 Měření pod umělou oblohou [6]

Toto řešení má výhodu v tom, že umožňuje přesně napodobit světelné parametry skutečné oblohy. Další výhodou umělé oblohy je možnost plynulé regulace osvětlení a možnost zopakování každého měření. Nevýhody jsou v tom, že sestavit laboratoř s umělou oblohou je velice nákladné a obtížné. Dále je problém s maximální měřitelnou délkou světlovodu. Pod umělou oblohu je možné postavit světlovod pouze o délce jednotek metrů, protože nás limituje výška budovy. Extrapolace pro větší délky zatěžuje výsledky chybou. [6]

Pokud nemáme k dispozici umělou oblohu, je možné použít i zdroj difuzního světla. Jelikož pracujeme v laboratořích, nemůžeme stoprocentně napodobit reálné vlastnosti oblohy. Jako zdroj difuzního světla je možno použít vysokovýkonný světelný zdroj za difuzní stěnou. Možné provedení této varianty ukazuje obrázek 5-2. [6]



Obrázek 5-2 Měření pomocí kulového integrátoru [6]

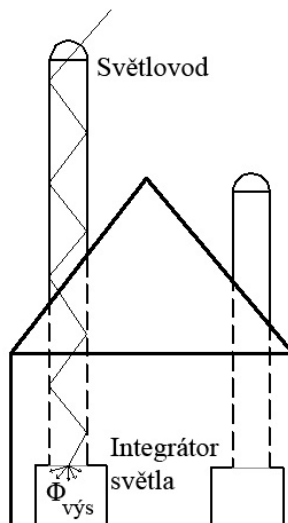
Tato varianta měření spočívá v tom, že před světlovodem vytvoříme pomocí difuzní stěny (světelné tyče před mléčným sklem) konstantní osvětlenost. Pokud je osvětlenost na vstupu konstantní a známe vstupní plochu světlovodu, můžeme vypočítat světelný tok vstupující do světlovodu. Světelný tok na výstupu světlovodu změříme pomocí kulového integrátoru. Výhodou této metody je možnost měření světelné účinnosti různých částí světlovodu (difuzor, kupole, záhyby) a poměrně jednoduchá konstrukce. Ani při této metodě se nedá použít světlovodů s neomezenou délkou. Pokud se podaří změřit osvětlenost na vstupu světlovodu, potom se tato metoda dá použít pro měření účinnosti. Je však obtížné zajistit kulový integrátor, který by měl dostatečně velký otvor, na to aby se do něj vešel konec světlovodu i s difuzorem.[6]

Pokud chceme měřením napodobit čistou oblohu s přímým slunečním světlem, musíme do světlovodu svítit paralelními paprsky. V laboratořích se pro tyto účely používají buď reflektory, nebo bodová světla. Tyto světelné zdroje však nevyzařují paralelní svazek světelných paprsků a proto je měření odlišné od reálných hodnot. Tento jev se dá eliminovat pomocí použití velké spojivky, přes kterou budeme svítit do světlovodu. Avšak, i v případě, že tuto závadu odstraníme, nemůžeme opomenout skutečnost, že umělý zdroj světla nikdy stoprocentně nenapodobí sluneční světlo a to jak intenzitou osvětlení, tak i spektrálními vlastnostmi.[6]

Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) vydala v roce 2003 technickou zprávu [7] která se zabývá touto problematikou. Tato technická zpráva považuje metodu zobrazenou na obrázku 5-2 za dostačující pro získávání světelné přenosové charakteristiky. Tato metoda má světelný zdroj, který je snadno a přesně definovatelný a proto je možné měření opakovat. Avšak taková měření jsou poměrně nákladná, a proto doporučuje naměření určitých charakteristických délek a částí světlovodů jako vzorky. Pro ostatní délky a možné variace

možnost extrapolace a intrapolace změřených přenosových charakteristik. Naměřené hodnoty pak budou dostačující pro návrh světlovodných systémů. [5]

Dosud byly popisovány měření, které probíhají v laboratorních podmínkách. Měření můžeme provádět i v exteriéru. Vstupní část světlovodu umístíme do volného prostoru, a pak pomocí světlovodu přeneseme světlo do vnitřních prostorů, kde se bude měřit výstupní tok světla ze světlovodu. Tuto možnost znázorňuje následující obrázek 5-3. [4]



Obrázek 5-3 Měření pod venkovní oblohou [4]

Měření tohoto typu nám poskytne reálné hodnoty osvětlenosti pod světlovodem, ale nejsme schopni měřit vstupní parametry. Protože nikdy nemohou nastat stejné exteriérové podmínky, pouze za čisté oblohy, toto měření se dá stěží opakovat.

Z předešlých úvah plyne, že korektní a věrohodné měření se dá uskutečnit pouze tehdy, pokud se bude počítat se všemi vlastnostmi přírodní oblohy. V laboratořích je proto nutno napodobit venkovní prostředí co možná nejpřesněji. Při nesplnění uvedené podmínky, bude měření zatíženo chybou. Protože dosažení dokonalých podmínek je v současné době stále ještě obtížné, vyžaduje si tato oblast ještě další výzkum.

5.3 Vlastní měření účinnosti dutého světlovodu

5.3.1 Úkol měření

Cílem této úlohy je naměřit účinnost dutého světlovodu, který je dostupný na fakultě. Pro účely tohoto měření je třeba sestavit laboratorní úlohu, která umožní měření vstupního a výstupního světelného toku světlovodu.

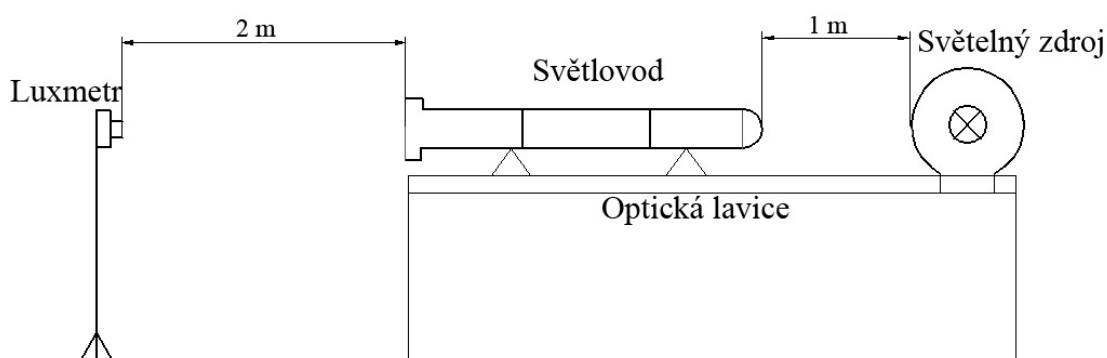
5.3.2 Popis laboratorní úlohy

Pro stanovení účinnosti světlovodu naměříme světelné veličiny na vstupu a na výstupu daného dutého světlovodu. Většinou se tyto parametry měří pomocí kulového integrátoru

nebo jiného přístroje, který je schopný stanovit výstupní množství světelné energie. Bohužel, při měření dutých světlovodů se musí brát v úvahu i jejich velikost. Fakulta nemá k dispozici integrátor s dostatečně velkým otvorem, který by vyhovoval požadavkům této úlohy. Proto byla zvolena metoda zonálních toků, která pomocí křivek svítivosti vypočítá světelný tok svítidla. Potřebné křivky svítivosti byly naměřeny následovně:

- Světlovod byl umístěn na optickou lavici ve výšce zhruba 1,5m.
- Za světlovod na podlahu byly na polokružnici s poloměrem 2m vyznačeny body s rozestupem 5° v rozsahu $0-90^\circ$ a $0- -90^\circ$.
- Ve výšce difuzoru světlovodu se postupně měřila osvětlenost v jednotlivých bodech pomocí luxmetru.

Principiální schéma laboratorní úlohy je zobrazeno na obrázku 5-4.



Obrázek 5-4 Principiální boční zobrazení laboratorního měření

Touto metodou byly postupně změřeny důležité křivky svítivosti daného světlovodu.

Parametry světlovodu:

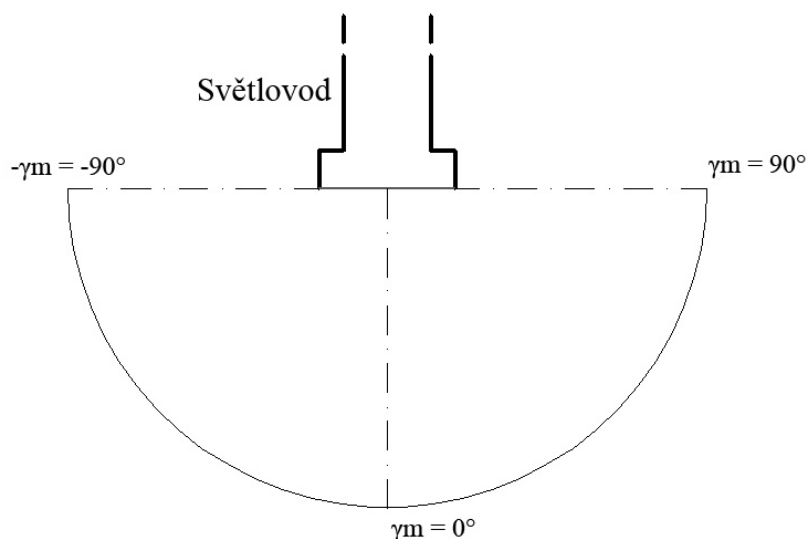
- Délka $l=133,5$ cm
- Počet částí: 3. Dvě části rovné bez zlomu se základní délkou 50,8 cm. Poslední část na kterou je možné namontovat difuzor je ohýbatelná. Základní délka ohýbatelné části je 38,5cm. Všechny části mají kruhový průřez.
- Průměr vstupního otvoru je $D=0,24$ m
- Odrazivost: 0,96

Jednotlivé části světlovodu byly zasunuty do sebe a spoje slepeny hliníkovou páskou. Difuzor byl připevněn podle návodu výrobce k poslední části světlovodu. Nástřešní kupoli se nepodařilo připevnit k světlovodu obvyklým způsobem, neboť nebylo možné namontovat umělohmotný límec, který slouží k připevnění nástřešní kupole ke střeše. Z těchto důvodů se kupole pouze přilepila k vstupu světlovodu. Světlovod byl uložen na optickou lavici. Jednotlivé body, ve kterých se provádělo měření osvětlení, byly vyznačeny pomocí velkého úhlooměru.

Tato úloha má napodobovat venkovní osvětlení difuzním světlem, proto se jako zdroj světla použila klasická žárovka o výkonu 300W. Pro zaručení stejné osvětlenosti na vstupu do světlovodu, se světelný zdroj umístil do koule z mléčného skla. Tato koule současně zaručila, že světlo vstupující do světlovodu bude difuzního charakteru. Bohužel tato koule způsobovala velké světelné ztráty. Vstup světlovodu byl od světelného zdroje vzdálen 1m.

Vstupní tok se vypočítal z osvětlenosti na rovině vstupu světlovodu a průřezu světlovodu. Osvětlenost na vstupní rovině předpokládáme rovnoměrnou.

Měření bylo provedeno podle pravidel, používaných ve světelné technice. To znamená, že úhlem 0° se značí rovina, s největším osvětlením. Viz. obrázek 5-5. Byl použit systém rovin C- γ .

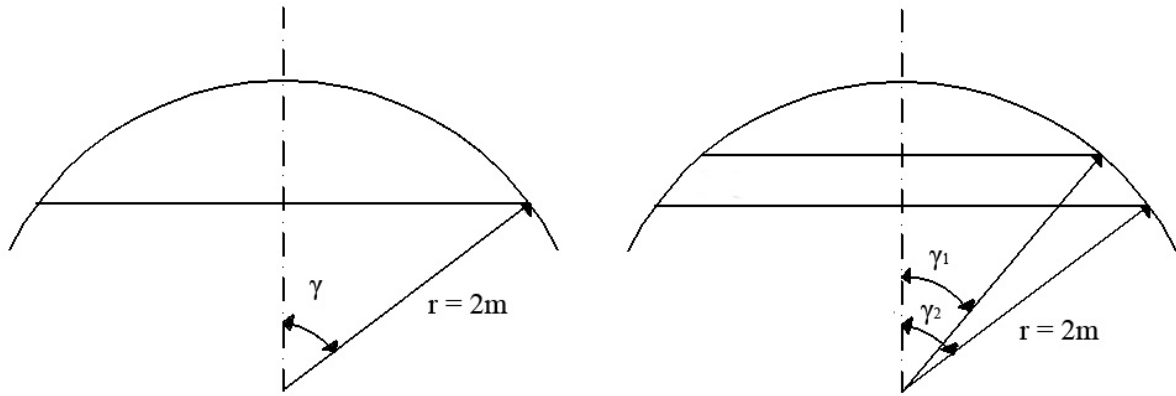


Obrázek 5-5 Zobrazení výstupní části světlovodu z hora

Pokud chceme použít metodu zonálních toků, je nutné změřit více světelných rovin daného tělesa. Jelikož tento světlovod je kruhového průřezu, předpokládáme, že je symetrický. Proto se měření provádělo v rovinách C0, C45, C90 což znamená, že světlovod byl pootočen kolem své hlavní osy o 45° a 90° .

Metoda zonálních toků se dá použít tehdy, pokud známe svítivost jednotlivých zonálních pásů. Pomocí zonálních pásů se rozdělí prostor na menší části. Zonální pásy jsou vymezené pomocí prostorových úhlů. Pokud je známa svítivost v určitém zonálním pásu je možno určit světelný tok pásem. Celkový světelný tok svítidla je suma světelných toků všech pásů. [3]

Zonální tok se dá popsat také následovně: „Zonální tok je část světelného toku, který ze svítidla prochází vybranou zónou, tj. prostorovým pásem vymezeným dvěma sousedními rovnoběžkami“ [3, str. 12]. Viz obrázek 5-6



Obrázek 5-6 Prostorový úhel kulového vrchlíku a kulového pásu [3]

Prostorový úhel pásu zobrazený na obrázku 5.6 se vypočítá následovně [3]:

$$\Omega_{\gamma_1-\gamma_2} = 2 \cdot \pi \cdot (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2) \text{ [sr]} \quad (5.1)$$

Kde je:

$\Omega_{\gamma_1-\gamma_2}$ prostorový úhel pásu vymezený úhly γ_1, γ_2 . [sr]

γ_1 úhel, který udává spodní rovinu daného prostorového pásu. [°]

γ_2 úhel, který udává horní rovinu daného prostorového pásu. [°]

Světelný tok v tomto pásu je dán rovnicí:

$$\Phi_{\gamma_1-\gamma_2} = I_{\gamma_1-\gamma_2} \cdot \Omega_{\gamma_1-\gamma_2} \text{ [lm]} \quad (5.2)$$

Kde je:

$\Phi_{\gamma_1-\gamma_2}$ světelný tok pásem. [lm]

$I_{\gamma_1-\gamma_2}$ průměrná svítivost pásu [cd]

Průměrná hodnota svítivosti se určuje z hodnot svítivosti ve všech rovinách, jako aritmetický průměr svítivosti ve směrech ohraničující zónu [3]:

$$I_{\gamma_1-\gamma_2} = \frac{I_{\gamma_1} + I_{\gamma_2}}{2} \text{ [cd]} \quad (5.3)$$

Kde je:

I_{γ_1} svítivost v rovině s úhlem γ_1 . [cd]

I_{γ_2} svítivost v rovině s úhlem γ_2 . [cd]

Účinnost světlovodu se pak určí jako podíl světelného toku vystupujícího ze světlovodu k vstupujícímu:

$$\eta = \frac{\Phi_{celk}}{\Phi_{vstup}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (5.4)$$

Kde je:

Φ_{celk} světelný tok vystupující ze světlovodu. Součet světelných toků jednotlivých pásů. [lm]

Φ_{vstup} světelný tok vstupující do světlovodu. [lm]

Svítivost je definována pouze pro bodové zdroje. Prakticky se však používá i pro popis nebodových zdrojů. Chyba, která tímto vznikne, závisí na charakteru svítidla a vzdálenosti z které jej pozorujeme. Chyba se dá tolerovat, pokud platí, že vzdálenost pozorovatele od svítidla je minimálně pětikrát větší než největší rozměr svítící plochy [3]. Tomuto požadavku naše měření vyhovuje, jelikož pětinasobek průměru světlovodu je menší než vzdálenost pozorování:

$$5 \cdot D = 5 \cdot 0,24 \text{ m} = 1,2 \text{ m} < 2,0 \text{ m}$$

Je důležité, aby se měření v každém bodu provádělo tak, že luxmetr je nastaven kolmo na světelné paprsky přicházející ze světlovodu. Tento požadavek zajistíme vhodnou volbou stojanu pro luxmetr a kontrolním provázkem, který spojuje stojan s bodem na podlaze pod středem difuzoru. Pokud bude tento požadavek splněn, zjednoduší se výpočet svítivosti v jednotlivých rovinách. Normála dané roviny, kde se osvětlenost měří, je rovnoběžná s osou prostorového úhlu, tj. je rovnoběžná s rovinou která udává hranici zonálního pásu ($\theta = 0^\circ$). Potom se dá svítivost jednotlivých rovin počítat ze vztahu (2.3) následovně:

$$I_\gamma = E_\gamma \cdot r^2 \cdot \cos \theta = E_\gamma \cdot r^2 \cdot \cos 0^\circ = E_\gamma \cdot r^2 \quad [\text{cd}] \quad (5.5)$$

Kde je:

I_γ svítivost v rovině γ . [cd]

E_γ osvětlenost v bodě kde se měří rovina γ . [lx]

r vzdálenost měřícího luxmetru od světlovodu [m]

θ úhel který svírá normála roviny luxmetru s danou rovinou γ . [$^\circ$]

Popsaná laboratorní úloha byla vymyšlena pro tuto bakalářskou práci a byla přizpůsobena možnostem světelné laboratoře. Celá sestava laboratorního měření je znázorněna na obrázcích v příloze k měření.

5.3.3 Postup měření

- Sestavení laboratorní úlohy podle obázku 5.4.
- Změření osvětlenosti na vstupní rovině pomocí luxmetru.
- Postupné naměření křivek svítivosti pro fotometrické roviny C0, C45, C90.
- Vyhodnocení měření.

5.3.4 Naměřené hodnoty

Následující tabulka 5-1 obsahuje naměřené hodnoty, které jsou uvedeny pouze pro úhel 0 až 90°. Protože je světlovod symetrický podle roviny 0°, hodnoty osvětlenosti naměřené v intervalu 0 až -90° byly prakticky zrcadlové. Každý údaj v tabulce je průměrem dvou naměřených hodnot osvětlenosti v bodě s úhlem γ a v bodě s úhlem $-\gamma$.

Tabulka 5-1 Tabulka naměřených hodnot

	rovina C0	rovina C45	rovina C90	průměr
úhel	osvětlenost	osvětlenost	osvětlenost	osvětlenost
$\gamma_m [^\circ]$	E[lx]	E[lx]	E[lx]	E[lx]
0	6,14	6,04	5,90	6,03
5	5,50	5,54	5,32	5,45
10	4,06	4,11	3,97	4,05
15	2,54	2,56	2,48	2,53
20	1,21	1,24	1,26	1,23
25	0,61	0,60	0,67	0,62
30	0,35	0,37	0,35	0,35
35	0,25	0,26	0,26	0,26
40	0,19	0,20	0,20	0,20
45	0,13	0,12	0,13	0,13
50	0,10	0,09	0,09	0,09
55	0,07	0,07	0,07	0,07
60	0,08	0,06	0,05	0,06
65	0,05	0,03	0,04	0,04
70	0,02	0,03	0,00	0,01
75	0,00	0,02	0,00	0,01
80	0,00	0,00	0,00	0,00
85	0,00	0,00	0,00	0,00
90	0,00	0,00	0,00	0,00

Hodnota osvětlenosti na vstupní rovině světlovodu :

$$E_{vst} = 250lx$$

5.3.5 Výpočet

Vstupní světelný tok se vypočte z osvětlenosti vstupu a jeho plochy, podle rovnice (2.3.)

$$\Phi_{vst} = E_{vst} \cdot A = E_{vst} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 250 \text{ lx} \cdot \frac{\pi \cdot (0,24 \text{ m})^2}{4} = 11,31 \text{ lm}$$

Následující tabulka 5-2 obsahuje výpočty světelných toků jednotlivých zonálních pásů.

Tabulka 5-2 Vypočtené hodnoty světelných toků

úhel $\gamma_m [^\circ]$	osvětlenost E[lx]	svítivost $I_{stř} [cd]$	Pás		Ω (sr)	$I_{stř}$ pásu (cd)	Tok (lm)
			od °	do °			
0	6,03	24,11	0	5	0,0239	22,950	0,549
5	5,45	21,79	5	10	0,0715	18,990	1,359
10	4,05	16,19	10	15	0,1186	13,145	1,560
15	2,53	10,10	15	20	0,1648	7,515	1,239
20	1,23	4,93	20	25	0,2098	3,710	0,778
25	0,62	2,49	25	30	0,2531	1,950	0,494
30	0,35	1,41	30	35	0,2945	1,220	0,359
35	0,26	1,03	35	40	0,3337	0,910	0,304
40	0,20	0,79	40	45	0,3703	0,645	0,239
45	0,13	0,50	45	50	0,4041	0,435	0,176
50	0,09	0,37	50	55	0,4349	0,320	0,139
55	0,07	0,27	55	60	0,4623	0,260	0,120
60	0,06	0,25	60	65	0,4862	0,200	0,097
65	0,04	0,15	65	70	0,5064	0,100	0,051
70	0,01	0,05	70	75	0,5228	0,040	0,021
75	0,01	0,03	75	80	0,5351	0,015	0,008
80	0,00	0,00	80	85	0,5434	0,000	0,000
85	0,00	0,00	85	90	0,5476	0,000	0,000
90	0,00	0,00					
						součet	7,491

Příklad výpočtu je uveden pro úhel 5° . V prvním kroku se vypočítá střední svítivost z průměrné osvětlenosti, podle vztahu (5.5):

$$I_{stř5} = E_5 \cdot r^2 = 5,45 \text{ lx} \cdot 2^2 \text{ m} = 21,79 \text{ cd}$$

Určíme pás, kde se bude počítat světelný tok. Pás je ohraničen rovinami s odklonem od osy světlovodu 5° a 10° . Střední svítivost pro rovinu 10° je $I_{stř\ 10} = 16,19\text{ cd}$. Střední svítivost pásu $5 - 10^\circ$ se vypočítá jako aritmetický průměr podle (5.3)

$$I_{stř\ 5-10} = \frac{I_{stř\ 5} + I_{stř\ 10}}{2} = \frac{21,79\text{ cd} + 16,19\text{ cd}}{2} = 18,990\text{ cd}$$

Prostorový úhel pásu $5-10^\circ$ se vypočítá podle vztahu (5.1):

$$\Omega_{5-10} = 2 \cdot \pi \cdot (\cos \gamma_{m5} - \cos \gamma_{m10}) = 2 \cdot \pi \cdot (\cos 5^\circ - \cos 10^\circ) = 0,0715\text{ sr}$$

Světelný tok pásem $5 - 10^\circ$ se vypočte podle vztahu (5.2)

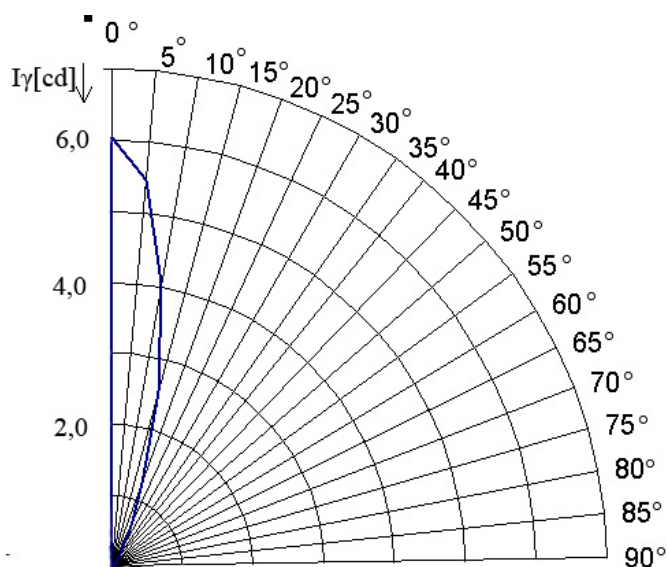
$$\Phi_{5-10} = I_{stř\ 5-10} \cdot \Omega_{5-10} = 18,990\text{ cd} \cdot 0,0715\text{ sr} = 1,359\text{ lm}$$

Suma toků všemi pásy je celkový světelný tok vycházející ze světlovodu. Celková účinnost světlovodu se pak určí ze vztahu (5.4):

$$\eta = \frac{\Phi_{celk}}{\Phi_{vstup}} \cdot 100\% = \frac{7,491\text{ lm}}{11,310\text{ lm}} \cdot 100\% = 66,2\%$$

5.3.6 Grafické závislosti

Na obrázku 5-7 je znázorněna křivka svítivosti změřeného světlovodu



Obrázek 5-7 křivka svítivosti daného světlovodu

5.3.7 Závěr měření

Cílem tohoto měření bylo stanovení účinnosti dutého světlovodu. Světlovod byl sestaven, jako funkční model reálného dutého světlovodu, používaného k přenosu denního světla do vnitřních prostor. Měření bylo sestaveno v laboratoři světelné techniky na Ústavu elektroenergetiky.

Měřeny byly osvětlenosti na vstupu a výstupu světlovodu v předem definovaných bodech. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v tabulkách 5-1, 5-2 a na obrázku 5.7. K vyhodnocování se použila metoda zonálních toků. Celková účinnost světlovodu dosáhla hodnoty 66,2%. Největší světelné ztráty pravděpodobně vznikají na transparentních částech světlovodu (nástřešní kopule a difuzor).

Naměřené hodnoty osvětlenosti se pohybovaly mezi 0 - 6 lx. Jelikož zadání ukládalo měřit při difuzním osvětlení, bylo nutno světelný zdroj umístit do kopule z mléčného skla. Světelný zdroj o výkonu 300 W poskytl světelný tok 5030 lm. Kvůli ztrátám na difuzní kopuli a vzdálenosti od světlovodu, klesl světelný tok vstupující do světlovodu na hodnotu 11,31 lm. Na výstupu byl potom naměřen světelný tok 7,49 lm.

Výhodou této metody je možnost měření účinnosti všech částí světlovodu (difuzor, nástřešní kopule, ohýbací část). Světlovod je uložen na optické lavici, což umožní libovolně měnit délku světlovodu. Nevýhodou této metody jsou velice zdlouhavá měření, která se dají jen obtížně automatizovat. Světlovod je rozměrný a těžký, nedá se umístit na goniofotometr, který by umožnil řízení měření přes počítač.

Z naměřených hodnot jednoznačně vyplývá, že použitý světlovod se chová jako svítidlo přímé s koncentrovanou křivkou svítivosti. Úloha byla naměřena pouze pro difuzní světlo. Pro měření s přímým světlem potřebujeme velký svazek paralelních paprsků (s odpovídajícími vlastnostmi), který je větší než vstup světlovodu. Tento požadavek se nám nepodařilo splnit, a proto jsme měření nemohly provést.

I přes uvedené nedostatky považuji tuto měřící metodu za vyhovující. Pokud se podaří obstarat větší světelný zdroj, je možno tuto metodu použít i pro měření provozní účinnosti dutých světlovodů a jiných optických systémů velkých rozměrů.

6 ZÁVĚR

Jednou z perspektivních možností osvětlování vnitřních prostor je použití dutých tubusových světlovodů. Touto problematikou se zabývá mnoho autorů i mezinárodní komise pro osvětlování CIE. První část této bakalářské práce měla za cíl shrnout základní poznatky o dutých světlovodech a popsat jejich funkci.

Využití tubusových světlovodů v pasivních osvětlovacích soustavách umožnilo dopravu denního světla do prostorů, kam se jinak nedostane. Tyto systémy samozřejmě nedokáží nahradit funkci oken, či střešních světlíků, ale dokážou přenést dynamiku vnějšího osvětlení do vnitřních prostor. Tubusové světlovody nenahrazují umělé osvětlení, ale jsou vhodné pro osvětlování chodeb, menších místností a podzemních garáží. Nedostatečné osvětlení dodávané pasivními světlovodnými systémy se dá doplnit umělým osvětlením. Nevýhodou těchto systémů jsou vysoké instalační náklady a velké rozměry.

Vývoj osvětlovacích systémů se světlovody gradoval hlavně v druhé polovině 20. století a jeho výsledkem jsou různorodé provedení těchto systémů, které umožňují jejich instalování do jakékoli budovy. Snaha efektivněji využít denní osvětlení vedla k vývoji aktivních osvětlovacích soustav, které využívají moderní výpočetní techniku pro nasměrování a vedení slunečního světla, a tím i možnost regulace vnitřní osvětlenosti. Tyto systémy jsou však nákladné a jejich využití se vyplatí jenom ve velkých budovách.

Pro návrh osvětlovacích systémů se světlovody, se využívají poznatky z měření optických vlastností jednotlivých částí světlovodů a teoretické modely pro simulování šíření slunečního paprsku ve světlovodu.

Dalším cílem této práce bylo sestavení laboratorní úlohy vhodné pro měření účinnosti dutého světlovodu. Úlohu se podařilo sestavit a úspěšně naměřit účinnost. K vyhodnocení byla použita metoda zonálních toků.

Výsledkem této práce je určení účinnosti dutých světlovodů při difuzním světle na hodnotě kolem 70%. Popsaná metodika, se dá použít i pro jiná měření, která se zabývají účinností osvětlovacích systémů větších rozměrů.

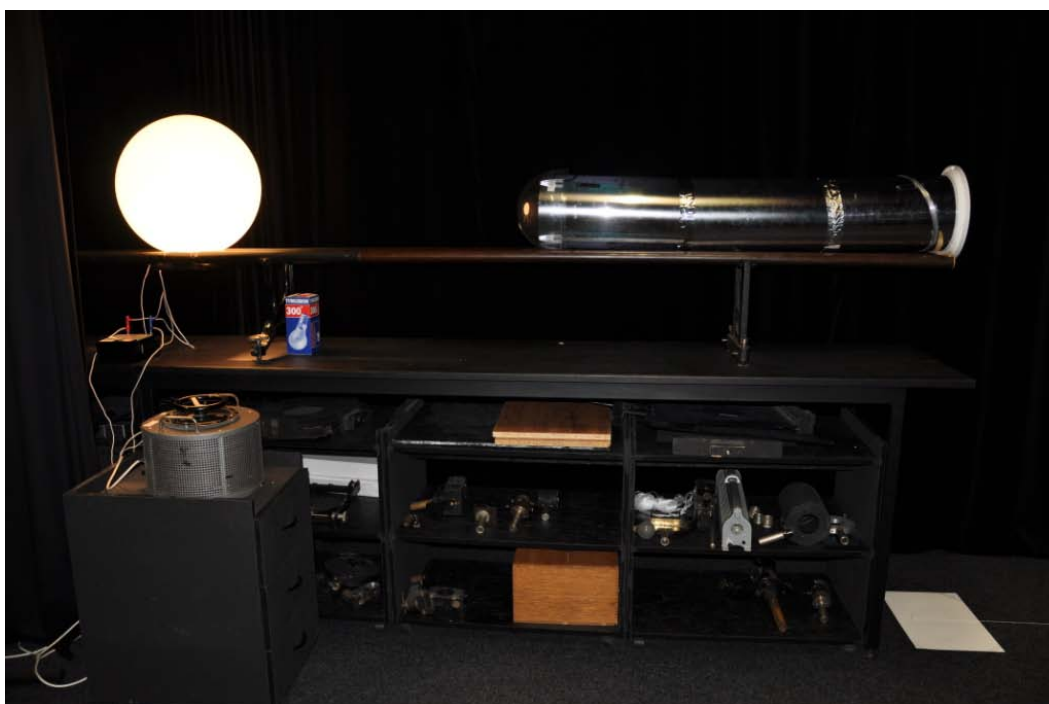
POUŽITÁ LITERATURA

- [1] AJZENBERG, J.B. Historie vývoje a užití dutých světlovodů - 1. část. *Světlo : Časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. 2001, č. 1 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22866>.
- [2] AJZENBERG, J.B. Historie vývoje a užití dutých světlovodů - 2. část. *Světlo : Časopis pro světelnou techniku a osvětlování* [online]. 2001, č. 2 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22873>.
- [3] BAXANT, P.: Světelná technika, Elektronický učební text pro prezenční studium, FEKT Vysokého učení technického v Brně
- [4] CALLOW, Joel. *Daylighting Using Tubular Light Guide Systems*. Nottingham, 2003. 255 s. Dizertační práce. University of Nottingham. Dostupné z WWW: <<http://etheses.nottingham.ac.uk/26/>>.
- [5] CIE 173:2006. *Tabular Daylight guidance systems*. Vienna : CIE Central Bureau, 2006. 65 s. Dostupné z WWW: <www.cie.co.at>. ISBN 3 901 906 49 5.
- [6] DARULA, S., KITTLER, R. Measurements of optical properties of hollow light guide components using sky simulations. In *18th International Conference LIGHT 2009*. Hotel GRAND – Jasná, 21-23. 09.2009, str 74-77. ISBN 978-80-969403-7-0
- [7] DARULA, Stanislav, et al. *Osvětlování světlovody*. 1. vyd. Praha : Grada Publishing, a.s., 2009. 160 s. ISBN 978-80-247-2459-1.
- [8] PLCH, Jiří, MOHELNÍKOVÁ, Jitka. Osvětlování budov světlovody. *Elektroinstalatér* [online]. 2006, roč. 4, č. 1 [cit. 2009-12-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=3104>>.
- [9] PLCH, Jiří, MOHELNÍKOVÁ, Jitka, SUCHÁNEK, Petr. *Osvětlení neosvětlitelných prostor*. 1. vyd. Brno : ERA group spol. s r.o., 2004. 130 s. ISBN 80-86517-82-9.

Příloha A Obrázky laboratorní úlohy



Příloha A-1 Provedení laboratorní úlohy ze předu



Příloha A-2 Provedení laboratorní úlohy ze strany

Příloha B Seznam přístrojů

Světelný zdroj

Žárovka firmy TUNGSRAM:

- Výkon: 300W
- Světelný tok: 5030 lm

Luxmetr č. 1

Luxmetr Lutron LX – 105

- Rozsah: 50 klx
- Výrobní číslo: 787344
- Inventarizační číslo: 1000021852 (8000024899) ÚEEN

Luxmetr č. 2 (luxmetr na stojanu)

Luxmetr UNITEST 93514

- Digital luxmetr RS232/DATALOGGER
- Rozsah: 20 lx – 200 lx – 2000 lx – 20000 lx
- Inventarizační číslo: 1000019732 (4320000102)
- Baterie: 9V No.:030411521

Světlovod

Světlovod firmy SOLAR flair.

- Délka $l=133,5$ cm
- Počet částí: 3. Dvě části rovné bez zlomu se základní délkou 50,8 cm. Poslední část na kterou je možné namontovat difuzor je ohýbatelná. Základní délka ohýbatelné části je 38,5cm. Všechny části mají kruhový průřez.
- Průměr vstupního otvoru je $D=0,24$ m
- Odrazivost: 0,96