

5. Výpočtové metody v osvětlovací technice

(Kapitola č. 5)



Studijní cíle

- Popis a vysvětlení bodové a tokové metody pro výpočet osvětlení



Klíčová slova

Odhadní účinnostní metoda, toková metoda dle ČSN 36 0450, toková metoda měrného příkonu, numerická integrace, integrální charakteristiky, bodová metoda výpočtů jasu povrchu vozovky dle ČSN 36 0400.



Čas potřebný ke studiu

80 minut



Text k prostudování

5.1. Úvod

Metody k výpočtům osvětlenosti lze v zásadě rozdělit do dvou základních skupin, na metody tokové a bodové. Obě tyto skupiny se zásadně liší svým principem a také svými možnostmi. Tokové metody umožňují snadno spočítat průměrnou osvětlenost srovnávací roviny prostoru, jsou technicky i časově zpravidla méně náročné a umožňují rovněž funkci návrhu. Naproti tomu bodové metody poskytují možnost výpočtu osvětlenosti v konkrétních bodech prostoru, bývají časově i technicky náročnější, vyžadují větší množství vstupních dat a ve funkci návrhu jsou jen těžko použitelné.

Pokud budeme zpracovávat cenovou nabídku nebo pokud budeme potřebovat vědět, kolik asi svítidel bude nutno v prostoru instalovat, pak nejspíše zvolíme některou z tokových metod. Pokud ovšem potřebujeme znát hodnoty osvětlenosti v určitých bodech prostoru a to třeba i s respektováním jeho skutečného tvaru, pokud budeme chtít znát rovnoměrnost, jak to vyžaduje norma, pak nezbytně budeme muset použít metodu bodovou. Velmi často je vhodné oba druhy metod kombinovat, tokovým výpočtem získáme představu o potřebném počtu svítidel a bodovým výpočtem pak provedeme konečné detailní výpočty v důležitých místech prostoru.

V dalším je nastíněn přehled jednotlivých metod a jejich vlastností a to zejména se zaměřením na jejich použitelnost pro návrh osvětlení.

5.2. Tokové metody

Tokové neboli účinnostní metody jsou založeny na použití fyzikálního vztahu mezi osvětleností, světelným tokem a plochou ve tvaru:

$$E = \Phi/S \quad (5.1)$$

kde Φ - světelný tok dopadajícího na plochu [lm]

S - plocha [m²]

E - průměrná osvětlenost plochy [lx]

Tokové metody zpravidla předpokládají, že vlastnostmi místnosti a typem svítidla je dána určitá hodnota světelné účinnosti, se kterou se využije světelný tok nebo elektrický příkon osvětlovací soustavy pro osvětlenost srovnávací roviny. Tento princip lze popsat jednoduchým vzorcem:

$$E = \eta \cdot \Phi_S / S \quad (5.2)$$

kde Φ_S - světelný tok všech svítidel soustavy [lm]

S - plocha [m²]

E - průměrná osvětlenost srovnávací roviny [lx]

η - světelná účinnost prostoru

Veškerá složitost a přesnost těchto metod je dána přesností určení hodnoty světlené účinnosti η , která v sobě zahrnuje světelné vlastnosti svítidel, osvětlovacích soustav, prostoru i údržbu. Je zřejmé, že z uvedeného vzorce lze snadno vyjádřit potřebný výkon či tok pro návrh potřebného počtu svítidel. Podle způsobu získání a použití této účinnosti existuje poměrně velké množství různě přesných metod.

5.2.1. Odhadní účinnostní metoda

$$E = \eta \cdot \Phi_1 \cdot nS / S \quad (5.3)$$

kde Φ_1 - světelný tok jednoho svítidla soustavy [lm]

S - plocha [m²]

E - průměrná osvětlenost srovnávací roviny [lx]

η - světelná účinnost prostoru

nS - počet svítidel soustavy

Tuto metodu lze použít zejména pro rychlý odhad. Pro přímé osvětlení se používá hodnota η kolem 0.3 a je zřejmé, že se zde jedná o odhadní metodu. Je dobré si uvědomit, že je to metoda, která nemá okrajové podmínky (podmínky použití), její použitelnost je dána možnostmi správného stanovení hodnoty světlené účinnosti.

5.2.2. Toková metoda dle ČSN 36 0450

$$E = \Phi_3 / S \quad (5.4)$$

kde Φ_3 - světelný tok dopadající na srovnávací rovinu [lm]

S - plocha [m²]

E - průměrná osvětlenost srovnávací roviny [lx]

Veškerá složitost metody je dána výpočtem toku dopadajícího na srovnávací rovinu Φ_3 .

Lze uvést zjednodušující předpoklady a použitelnost této metody:

- tvar místnosti blíží se čtverci
- svítidla jsou v místnosti pravidelně rozmístěna a osazena v jedné výši
- předpokládá se jednoduchá orientace svítidel dolů popř. nahoru
- jasy odrazných ploch jsou uvažovány jako konstantní, odrazné plochy jako difúzní
- nelze uvažovat se zařizovacími předměty (překážkami) místnosti

V případě nedodržení těchto předpokladů je třeba počítat s určitou chybou ve výpočtu, která v některých případech nemusí být významná. Ve většině případů je tato metoda poměrně velmi přesná, ale pro poměrně složitý výpočet, zejména integrálních odrazů, je vhodná spíše pro počítačové aplikace.

5.2.3. Toková metoda měrného příkonu

$$E = \frac{10 \cdot \eta_z \cdot P^{-1}}{p \cdot S} \quad (5.5)$$

kde S - plocha [m²]

E - průměrná osvětlenost srovnávací roviny [lx]

η_z - měrný výkon zdrojů [lm]

P - celkový příkon osvětlovací soustavy [W]

p - poměrný elektrický příkon [W/m²]

Tento vzorec je vhodný pro rychlý odhad osvětlenosti srovnávací roviny, doporučené hodnoty měrných výkonů bývají uváděny v různých publikacích v přehledných tabulkách.

5.2.4. Tokové metody pro výpočet denního osvětlení

Jsou složitější v tom, že zpravidla nejsou známy charakteristiky svítivosti osvětlovacích otvorů. Tyto metody se zpravidla používají pouze pro výpočet vnitřní odražené složky činitele denní osvětlenosti. Jednodušší je situace u horního osvětlení, protože lze většinou předpokládat konstantní hodnotu odražené složky v prostoru. U bočních soustav je nutno náhradním způsobem určit její rozložení v prostoru. Pro jednoduchost se zde omezíme jen na uvedení několika příkladů metod:

- toková metoda pro horní soustavy
- toková metoda pro boční soustavy
- metoda Krochmann - Kittler pro boční soustavy
- metoda B. R. S. pro boční soustavy

Všeobecně lze říci, že se jedná o empirické metody, jejichž přesnost a použitelnost je závislá na dodržení předpokladů - okrajových podmínek.

5.3. Bodové metody

Všechny bodové metody jsou založeny na použití jednoduchého fyzikálního vztahu:

$$E = \frac{I}{l^2} \quad (5.6)$$

kde I – svítivost svítidla ve směru svítidla bod [cd]

l – vzdálenost bodu od svítidla [m]

E – místní osvětlenost bodě ve směru spojnice svítidla bod, neboli absolutní hodnota cvětelného vektoru [lx]

Bude-li nás zajímat horizontální složka, pak lze uvedený vzorec použít ve tvaru:

$$E = \frac{I}{l^2 \cdot \cos(\alpha)} \quad (5.7)$$

kde α – úhel mezi spojnici svítidla – bod a vertikálou

Uvedený vzorec je přímo použitelný pouze pro bodové zdroje světla nebo pro takové dostatečně malé zdroje, které lze za bodové považovat. Pro zdroje, které pro své rozměry nelze považovat za bodové, existují dvě metody, které lze použít. Obě metody spočívají v rozdělení zdroje světla na menší části a liší se ve způsobu, jak to učinit.

Numerická integrace neboli metoda dělení - metoda spočívá v rozdělení zdroje světla na dostatečně malé (elementární) části tak, aby je bylo možno považovat za bodové zdroje, podle normy ČSN 360450 lze za bodový zdroj považovat takový, jehož největší rozměr je minimálně 3x menší než vzdálenost od bodu výpočtu. V praxi je vhodnější použít hodnotu

vyšší (např. 5 až 10), tato hodnota je významná pro přesnost i délku výpočtu a nazývá se v praxi dělicím poměrem.

Analytická integrace neboli integrální charakteristiky - metoda spočívá v analytické lineární nebo plošné integraci (analytickém součtu) dílčích příspěvků elementárních nekonečně malých částí svítidla. Aby bylo možno metodu použít, musí být známo analytické (funkční) vyjádření křivky svítidla a to takové, které lze integrovat, protože křivky svítivosti mají zcela obecné a rozličné tvary. Je třeba je nahradit (proložit) náhradními funkcemi. V praxi se s výhodou používá polynomu goniometrických funkcí. Těmto funkcím se po integraci říká integrální charakteristiky.

Obě metody používají jeden základní zjednodušující předpoklad - pokládají svítivost všech částí zdrojů světla za konstantní.

Metoda integrálních charakteristik:

- je poměrně rychlá, každé svítidlo se počítá pouze jedním, i když složitějším výpočetním cyklem

Metoda dělení:

- může používat přímo změřené snadno ověřitelné hodnoty svítivosti uvedené v katalogovém listu výrobce, nedefinované náhradními funkcemi
- je přesnější v případě překážek v místnosti, protože jednotlivé části svítidel mohou být vyhodnocovány samostatně
- je univerzální, nezávislá na rozměrech svítidla, jednodušší na zadání do databáze

Bodová metoda výpočtu osvětlenosti se v praxi používá zejména v těchto případech:

- výpočet přímé složky umělého osvětlení. Zdrojem světla je svítidlo v libovolné orientaci a vzdálenosti od bodu výpočtu. Charakteristiku svítivosti lze získat ze změřeného katalogového listu výrobce svítidla
- výpočet oblohové složky denního osvětlení - zdrojem světla je stavební osvětlovací otvor, okno nebo světlík. světelná charakteristika je uvažována pro rovnoměrně zataženou oblohu dle vzorce uvedeného v normě ČSN 730580.
- výpočet odražené složky bodovou metodou - zdrojem světla jsou odrazné plochy (stěny, strop, podlaha, předměty) osvětlovaného prostoru. Pro jednoduchost se nejčastěji uvažuje s tzv. difúzními plochami, tj. takovými, které mají kosinovou charakteristiku svítivosti definovanou vztahem $I = L \cdot \cos \varphi \cdot S$, v praxi se tomuto předpokladu dobře blíží matné plochy jako např. omítky, v případě lesklých ploch musíme počítat s chybou výpočtu. Existují dvě základní metody, jak lze vypočítat jas svítící plochy. První jej získá jako výsledek výše uvedené tokové metody. Logicky považuje jas celé plochy za konstantní a nelze počítat s jasy stínících předmětů. Druhou je dále popsána numerická metoda mnohonásobných odrazů.

Numerická metoda mnohonásobných odrazů - tato metoda se snaží přiblížit skutečnému fyzikálnímu ději je variantou výpočtu odražené složky. Metoda spočívá v tom, že po prvotním výpočtu přímé složky na elementárních částech odrazných ploch prostoru se ve zvoleném počtu výpočetních cyklů počítají kumulující se příspěvky jednotlivých částí odrazných ploch. Přesnost výpočtu závisí jednak na tom, na jak malé elementární části se jednotlivé odrazné plochy dělí a pak také na zvoleném počtu cyklů. Podle zkušeností se ukazuje, že při třech cyklech je již dosahovaná chyba jen kolem jednoho procenta odražené složky.

5.3.1. Bodová metoda výpočtu horizontální intenzity osvětlení dle ČSN 36 0400

Při bodovém způsobu výpočtu se počítá intenzita osvětlení, popř. jas povrchu vozovky na srovnávací rovině v poli kontrolních míst. Pro volbu pole kontrolních míst platí tyto zásady:

- a) pole kontrolních míst pokrývá celou plochu jednoho prvku osvětlovací soustavy. U komunikací směrově rozdělených pouze jednu stranu komunikace
- b) v příčném směru je dostačující provádět výpočet ve třech kontrolních místech v každém jízdním pruhu
- c) v podélném směru, při rozteči světelných míst do 50 m je dostačující provádět výpočet v 10 kontrolních místech. Při rozteči větší než 50 m smí být rozteč kontrolních míst maximálně 5 m.

Při předepsaném rozmístění kontrolních míst se průměrná hodnota intenzity osvětlení, popř. jas určí jako aritmetický průměr hodnot v jednotlivých kontrolních místech.

Horizontální intenzita osvětlení v kontrolním místě na srovnávací rovině se počítá podle vzorce:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (5.8)$$

E_i ...horizontální intenzita osvětlení od i-tého svítidla

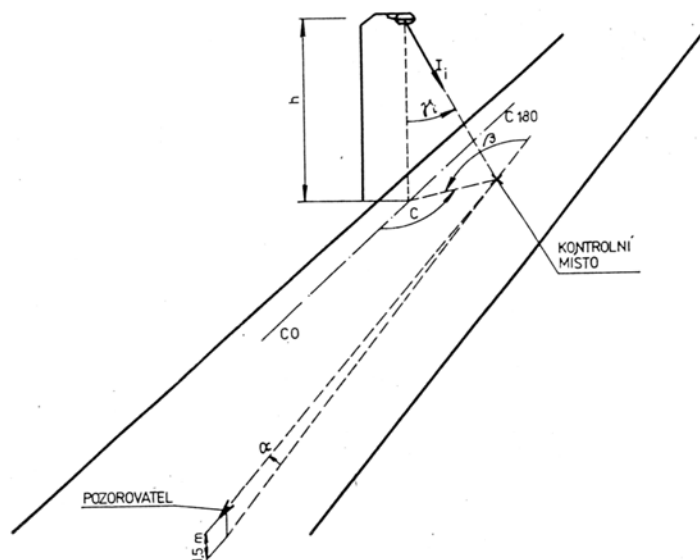
$$E = \frac{I_i}{h^2} \cdot \cos^3 \gamma_i \quad (5.9)$$

n ...počet svítidel

I_i ...svítivost svítidla ve směru určeném úhly C a γ

h ...závěsná výška svítidla

γ_i ...úhel mezi normálou srovnávací roviny a daným směrem svítivosti



Obr.5.1 Jednotlivé úhly v rovinách použité při výpočtu intenzity osvětlení a jasu

5.3.2. Bodová metoda výpočtu jasů povrchu vozovky dle ČSN 36 0400

Má-li řidič rozlišit určitou překážku na vozovce, pak musí mít komunikace jas odpovídající velikosti této překážky. Povrch vozovky se za normálních okolností (suchá vozovka, po minimálně ročním provozu) vyznačuje smíšeným odrazem světla. Ten je matematicky definován součinitelem jasu (resp. redukováným součinitelem jasu). Součinitel jasu je popsán výrazem:

$$q = q(\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon) \quad (5.10)$$

γ je úhel který svírá dopadající paprsek s normálou vozovky a β úhel, který svírá rovina kolmá na vozovku a procházející zdrojem světla a místem dopadu paprsku s rovinou kolmou na vozovku, která prochází kontrolním bodem a okem pozorovatele. Úhel α je úhel, který svírá směr pozorování s rovinou osvětlované plochy. Protože výška očí řidiče je průměrně 1,5 m nad vozovkou (osobní, nákladní automobil) a zrak řidiče se upírá do vzdálenosti 60 - 160 m, pak se úhel mění v rozmezí 0,5 - 1,5°. Pokud jsou ostatní parametry konstantní, lze v uvedeném rozsahu považovat změnu velikosti součinitele jasu za prakticky zanedbatelnou. Ve výpočtech se proto uvažuje s konstantní velikostí úhlu $\alpha = 1^\circ$.

Velikost součinitele jasu je minimálně závislá na orientaci vozovky vůči zdroji světla (úhel δ) a prakticky neměnná v závislosti na orientaci vozovky vůči pozorovateli (úhel ε). Proto se tyto vlivy v praktických výpočtech zanedbávají.

Po uvedených zjednodušeních a s přihlédnutím k omezujícím podmínkám lze psát:

$$q = q(\gamma, \beta) \quad (5.11)$$

V literatuře (i v ČSN 36 0400) se používá tzv. redukováný součinitel jasu.

Redukovaný součinitel jasu je různý pro různé povrchy komunikace. Bylo hledáno zjednodušení, které by snížilo množství tabulek popisujících r. Ukázalo se, že povrch je charakterizován světlostí a zrcadlením.

Činitel zrcadlení S_1 je definován jako poměr redukováných součinitelů jasu pro úhel = 0 a $\text{tg} = 2$, resp. 0:

$$S_1 = \frac{r(0;2)}{r(0;0)} \quad (5.12)$$

Stupeň světlosti je definován průměrným součinitelem jasu Q_0 .

$$Q_0 = \frac{1}{\Omega} \int q \cdot d\Omega \quad (5.13)$$

Ω je prostorový úhel, zahrnující všechny směry dopadu světla obsažené v normalizovaných tabulkách redukováného součinitele jasu.

Hodnoty redukovaného součinitele jasu jsou uvedeny v tabulkách. Povrchy vozovek se zařazují do dvou tříd povrchů označených CI a CII. Do třídy CI patří převážně světlé povrchy (pro které $S_1 \leq 0,4$), a pracuje se v ní s normalizovanými hodnotami činitele zrcadlení $S_1 = 0,24$ a průměrného součinitele jasu vozovky $q = 0,10 \text{ cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$. Do třídy CII patří většina běžných tmavých asfaltových povrchů, pro něž $S_1 > 0,4$ a pracuje se v ní s normalizovanými hodnotami činitele zrcadlení $S_1 = 0,97$ a průměrného součinitele jasu povrchu vozovky $q = 0,07 \text{ cd.m}^{-2}.\text{lx}^{-1}$. Hodnoty r uvedené v ČSN 36 0400 jsou násobeny 10^{-3} a platí pro průměrný součinitel jasu $Q_0 = 1$.

Výpočet jasů se provádí v předepsané síti kontrolních bodů. Z vypočtených hodnot se stanoví jednotlivé rovnoměrnosti a průměrné hodnoty jasu.

Vztah mezi osvětleností a jasem v kontrolním bodu je určen součinitelem jasu q .

$$L = q \cdot E \quad (5.14)$$

a určí se pomocí výrazu:

$$L = \frac{I_i}{h^2} \cdot q \cdot \cos^3 \gamma_i = \frac{I_i}{h^2} \cdot r_i \quad (5.15)$$

I_i ...je svítivost svítidla ve směru ke kontrolnímu bodu

h ...výška optického středu svítidla nad vozovkou

γ_i ...úhel mezi normálou srovnávací roviny a daným směrem svítivosti



Kontrolní otázky k teoretické části

- 1) Definujte pojmy numerická integrace neboli metoda měření. (2 body)
- 2) Definujte vztah pro odhadní účinnostní metodu.
(2 body)
- 3) Vyjádřete vztah pro tokovou metodu měrného příkonu
(2 body)
- 4) Jaké je vztah pro součinitel jasu? (1 bod)



Kontrolní otázky k praktické části

- 1) V místnosti o rozměrech: šířka 12 m, délka 18 m, výška 4 m, je třeba na srovnávací rovině ve výšce 0,85 m dosáhnout osvětlenosti 800 lx. Bude použito vaničkové svítidlo 231 21.01 (viz skriptu) pro 4 zářivky 40 W s tokem 2600 lm. Činitele odrazu jsou: strop 0,7; stěny 0,3; podlaha 0,1 a udržovací činitel 0,65. Tokovou metodou navrhnete potřebný počet svítidel!
(5 bodů)



Shrnutí

Nové poznatky a pojmy

- Objasnění principu u výpočtových metod využívaných pro počítání základních světelně technických parametrů



Klíč k otázkám k teoretické části

Ad 1)

- metoda spočívá v rozdělení zdroje světla na dostatečně malé (elementární) části tak, aby je bylo možno považovat za bodové zdroje, podle normy ČSN 360450 lze za bodový zdroj považovat takový, jehož největší rozměr je minimálně 3x menší než vzdálenost od bodu výpočtu. V praxi je vhodnější použít hodnotu vyšší (např. 5 až 10), tato hodnota je významná pro přesnost i délku výpočtu a nazývá se v praxi dělicím poměrem.

(2 body)

Ad 2)

$$E = \eta \cdot \Phi_1 \cdot nS / S$$

kde Φ_1 - světelný tok jednoho svítidla soustavy [lm]

S – plocha [m²]

E – průměrná osvětlenost srovnávací roviny [lx]

η – světelná účinnost prostoru

nS – počet svítidel soustavy

(2 body)

Ad 3)

$$E = \frac{10 \cdot \eta_z \cdot P^{-1}}{p \cdot S}$$

kde S – plocha [m²]

E – průměrná osvětlenost srovnávací roviny [lx]

η_z – měrný výkon zdrojů [lm]

P – celkový příkon osvětlovací soustavy [W]

p – poměrný elektrický příkon [W/m²]

(2 body)

Ad 4)

Po uvedených zjednodušení a s přihlédnutím k omezujícím podmínkám lze psát:

$$q = q(\gamma, \beta)$$

(1 bod)



Klíč k otázkám k praktické části

Ad 1)

činitel místnosti $k = \frac{5 \cdot h \cdot (a + b)}{a \cdot b} = \frac{5 \cdot 3,15 \cdot (12 + 18)}{12 \cdot 18} = 2,19$

činitel stropní dutiny $k_1 = 0$

činitel podlahové dutiny $k_3 = k \cdot h_3 / h = 2,19 \cdot 0,85 / 3,15 = 0,59$

činitel odrazu fiktivní srovnávací roviny $\rho_3 = 0,12$

činitel využití (z katalogu pro 70, 30, 20) $\eta' = 0,46$

činitel jasů stropu $l_1 = 0,027$

činitel jasů stěn $l_2 = 0,026$

opravný koeficient pro $\rho_3 = 0,12$ $r = 0,965$

$$\eta = r \cdot \eta' = 0,44$$

$$l_1 = r \cdot l_1 = 0,026$$

$$l_2 = r \cdot l_2 = 0,025$$

potřebný počet svítidel $n \geq \frac{E_{pk} \cdot a \cdot b}{\eta \cdot z \cdot n_{zs} \cdot \Phi_z} = \frac{0,8 \cdot 12 \cdot 18}{0,44 \cdot 0,65 \cdot 4 \cdot 2,6} = 57,6$

volím $n = 60$

skutečná osvětlenost $E_{pk} = 800 \cdot 60 / 57,6 = 833 \text{ lx}$

celkový světelný tok zdrojů $\Phi = \Phi_z \cdot n_{zs} \cdot n = 2,6 \cdot 4 \cdot 60 = 624 \text{ klm}$

průměrný jas stropu $L_1 = \Phi \cdot l_1 \cdot z / a \cdot b = 49 \text{ cd/m}^2$

průměrný jas stěn $L_2 = 624 \cdot 0,025 \cdot 0,65 / 12 / 18 = 47$

(5 bodů)