

10. PŘEDBĚŽNÝ VÝPOČET PARAMETRŮ OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV

Navrhování a projektování umělého osvětlení vnitřních či venkovních prostorů je spojeno s celou řadou světelně technických výpočtů. Jejich cílem je jednak stanovit výkon a potřebný počet světelných zdrojů, respektive svítidel, tedy celkový instalovaný příkon pro osvětlení daného prostoru, a jednak v navržené osvětlovací soustavě ověřit dodržení ukazatelů jakosti osvětlení.

Metody základních světelně technických výpočtů lze rozdělit do dvou skupin, a to na metody, které pracují s místně průměrnými hodnotami světelně technických veličin a na metody bodové. Do první skupiny metod patří, vedle předběžného stanovení příkonu osvětlovací soustavy využitím hodnot měrných příkonů, zejména toková metoda světelně technických výpočtů. U tokové metody se vychází z požadované průměrné hladiny celkové osvětlenosti obvykle vodorovné výpočtové roviny a stanovuje se k tomu účelu potřebný světelný tok zdrojů a příkon osvětlovací soustavy, z čehož vyplývá i počet světelných zdrojů a svítidel. Tokové metody je též možno využít k určení střední hodnoty jasů stěn a stropu daného prostoru. Vliv zastínění částí srovnávací roviny velkými předměty umístěnými do osvětlovaného prostoru se u tokové metody neuvažuje. Bodovou metodou výpočtu se zjišťují hodnoty ukazatelů jakosti osvětlení (nejčastěji hodnoty osvětlenosti libovolně natočených pracovních rovin, či hodnoty střední kulové, popříp. válcové osvětlenosti v různých bodech osvětlovaného prostoru), stanovují se maximální a minimální hodnoty sledovaných veličin i odpovídající hodnoty jejich rovnoměrnosti. Při běžných výpočtech integrálních charakteristik bodovou metodou se vliv odražených světelných toků obvykle neuvažuje nebo se respektuje jen přibližně.

Ani toková, ani bodová metoda výpočtu není metodou univerzální. Obě metody mají svá určitá omezení a předpoklady správného použití. Tyto okolnosti musí brát v úvahu projektant při volbě výpočtové metody. Tokové metody se většinou užívá k výpočtu průměrné hodnoty osvětlenosti v soustavě celkového osvětlení. Odstupňované osvětlení vyžaduje pak obvykle řešení bodovou metodou. V případech, kdy činitel odrazu světelně činných ploch osvětlovaného prostoru (zvl. stropu a stěn) je vysoký a zejména, když je prostor ještě osvětlen svítidly jinými než přímými, je třeba bodovou metodou výpočtu integrálních charakteristik odpovídajících pouze přímým světelným tokům doplnit výpočtem nepřímých složek charakteristik, které odpovídají světelným tokům odraženým od světelně činných ploch daného prostoru.

K zabezpečení určité průměrné hladiny osvětlenosti v bodech uvažovaných výpočtových rovin je třeba v osvětlovaných prostorech instalovat a vhodně rozmístit určité množství světelných zdrojů a svítidel a zajistit potřebný elektrický příkon navržené osvětlovací soustavy. K předběžnému odhadu nutného elektrického příkonu osvětlovací soustavy se v praxi často užívá hodnot poměrných příkonů. Ve vnitřních prostorech se poměrné příkony vztahují na jednotku osvětlované plochy, zatím co v uličních osvětlovacích soustavách pak na jednotku délky osvětlované komunikace.

S místně průměrnými hodnotami světelně technických veličin, zejména osvětleností a jasů se pracuje i při návrhu osvětlovacích soustav tokovou metodou. Průměrné hodnoty veličin odpovídají úhrnným světelným tokům dopadajícím na uvažovanou výpočtovou rovinu v osvětlovaném prostoru. Ve vnitřních prostorech se pak berou v úvahu toky dopadlé na srovnávací rovinu jak přímo ze svítidel, tak i po odrazu od světelně činných ploch v daném prostoru, zvláště od stropu a od stěn. Výpočet osvětlení vnitřního prostoru tokovou metodou vychází proto z předpokladu, že svítidla soustavy celkového osvětlení jsou po půdorysu osvětlovaného prostoru rozložena rovnoměrně.

10.1 Odhad příkonu osvětlovací soustavy

K orientačnímu stanovení elektrického příkonu P (W) osvětlovací soustavy potřebného k zajištění požadované průměrné hladiny osvětlenosti E (lx) srovnávací roviny v daném vnitřním prostoru se v projekční praxi běžně využívá měrných příkonů $p = P / A$ ($W \cdot m^{-2}$) vztažených na $1 m^2$ osvětlované plochy. Měrné příkony závisí nejen na způsobu osvětlení a na duhu a rozmístění zdrojů, resp. svítidel, ale i na geometrických a světelně technických vlastnostech osvětlovaného prostoru. K odhadu měrných příkonů lze například použít údajů v tab.10-1.

Tab. 10 – 1 **Měrné elektrické příkony p** ($W \cdot m^{-2}$)
k dosažení průměrné hladiny osvětlenosti $E = 100 \text{ lx}$
při měrném výkonu světelných zdrojů $\eta_z = 10 \text{ lm} \cdot W^{-1}$

Osvětlení	činitel μ *)	Stěny a strop osvětlovaného prostoru		
		světlé	středně světlé	tmavé
		měrný příkon p ($W \cdot m^{-2}$)		
přímé	2	25	28	30
	2 až 4	19	20	22
	4	15	16	18
smíšené	2	42	60	80
	2 až 4	28	36	48
	4	20	26	32
nepřímé	2	56	86	160
	2 až 4	36	56	106
	4	26	40	74
nepřímé stropními římsami	-	64	96	-

*) činitel μ je roven poměru šířky \check{s} místnosti k výpočtové výšce h_v [$\mu = \check{s} / h_v$].
Pro přímé a smíšené osvětlení je h_v výška zdrojů (svítidel) nad srovnávací rovinou.
Pro nepřímé osvětlení se za h_v dosazuje výška stropu nad srovnávací rovinou.

Potřebný elektrický příkon P osvětlovací soustavy v daném prostoru se s využitím hodnot měrného příkonu p ($W \cdot m^{-2}$) z tab.10-1 stanoví po lineárním přepočtu ze 100 lx na potřebnou hladinu osvětlenosti E_p a z $10 \text{ lm} \cdot W^{-1}$ na skutečný měrný výkon η_z zdrojů ze vztahu

$$P = p \cdot A \cdot \frac{10}{\eta_z} \cdot \frac{E_p}{100} \quad (W; W \cdot m^{-2}, m^2, \text{lm} \cdot W^{-1}, \text{lx}) \quad (10-1)$$

kde η_z je měrný výkon použitých světelných zdrojů ($\text{lm} \cdot W^{-1}$)

E_p požadovaná průměrná hladina osvětlenosti v bodech srovnávací roviny (lx)

A osvětlovaná plocha srovnávací roviny (m^2).

Známe-li celkový příkon osvětlovací soustavy, můžeme již snadno při určitém předpokládaném příkonu jednoho svítidla určit i počet svítidel, které bude třeba pro osvětlení uvažovaného prostoru použít. Tento předběžný návrh je nutno dalšími metodami, např. metodou tokovou (odst.10.2) a zejména pak bodovou metodou výpočtu, dále zpřesňovat.

Měrný elektrický příkon komunikační osvětlovací soustavy připadající na jednotkovou délku obvykle přímého úseku komunikace a potřebný k zabezpečení určité průměrné hladiny osvětlenosti závisí jak na druhu a vlastnostech použitých světelných zdrojů a svítidel, tak na parametrech osvětlovací soustavy, zvláště na jmenovité závěsné výšce svítidel, na rozteči svítidel a na šířce vozovky. Informativní hodnoty měrných el. příkonů p ($\text{kW}\cdot\text{km}^{-1}$) uličních osvětlovacích soustav nutných k dosažení průměrné hladiny osvětlenosti vozovky $E = 1 \text{ lx}$ běžnými typy zdrojů a svítidel je možno například odečíst z tab.10-2.

Tab.10 – 2 Orientační hodnoty měrných elektrických příkonů uliční osvětlovací soustavy

šířka komunikace (m)	komunikace osvětlena svítidly s vysokotlakou výbojkou				
	rtuťovou 400 W	halogenidovou 400 W	sodíkovou 70 W	sodíkovou 150 W	sodíkovou 250 W
	měrný příkon p ($\text{kW}\cdot\text{km}^{-1}$) pro $E_{\text{pk}} = 1 \text{ lx}$ ^{x)}				
8	1,2 - 1,8	0,8 - 1,2	0,4 - 0,7	0,4 - 0,7	0,3 - 0,6
10	1,4 - 1,9	0,9 - 1,3	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8	0,4 - 0,7
12	1,6 - 2,1	1,0 - 1,4	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8	0,4 - 0,7
14	1,7 - 2,3	1,1 - 1,6	0,6 - 1,0	0,6 - 0,9	0,5 - 0,8
16	1,9 - 2,5	1,2 - 1,7	-	0,7 - 1,0	0,5 - 0,8
18	2,1 - 2,7	1,3 - 1,8	-	0,7 - 1,1	0,6 - 0,9
20	2,2 - 2,8	1,5 - 1,9	-	0,8 - 1,2	0,7 - 1,0

- x) Údaje platí pro :
1. přímý úsek komunikace osvětlený svítidly se širokou křivkou svítivosti při rozteči rovné trojnásobku závěsné výšky svítidel,
 2. závěsné výšky svítidel $h = 8$ až 14 m ,
 3. udržovací činitel $z = 0,5$.

Pro vyšší hladiny průměrné osvětlenosti než 1 lx je třeba hodnoty měrných příkonů odečtené z tab.10-2 úměrně zvýšit. Obdobně je třeba tyto hodnoty lineárně přepočítat na skutečnou délku osvětlované komunikace.

Vydělíme-li takto získaný příkon soustavy příkonem jednoho svítidla, zjistíme potřebný počet uvažovaného typu svítidel. Parametry takto orientačně navržené soustavy je nutno ověřovat bodovou metodou a postupně upravovat, aby byly splněny všechny požadavky, které jsou předepsány v příslušných normách.

Využití měrných příkonů má své opodstatnění zvláště pro rychlý odhad celkového příkonu potřebného pro osvětlení projektovaného objektu. Z ekonomického hlediska je důležité, že hodnoty měrných příkonů osvětlovacích soustav umožňují posuzovat efektivnost využití elektrické energie pro osvětlování určitých typů prostorů různými druhy osvětlovacích prostředků. Proto se zmíněným ukazatelům v projekční praxi věnuje stále pozornost.

10.2 Toková metoda výpočtu průměrné osvětlenosti ve vnitřním prostoru

Toková metoda je v praxi nejčastěji používaný postup předběžného návrhu osvětlení. Nejběžněji se tokové metody využívá ke stanovení celkového, časově maximálního (počátečního) světelného toku Φ_z zdrojů světla potřebného k zajištění určité průměrné hladiny celkového osvětlení v bodech vodorovné srovnávací roviny, tj. např. normou ČSN EN 12464-1 požadované udržované osvětlenosti \bar{E}_m .

Tok Φ_z zdrojů světla, které je třeba v uvažovaném prostoru instalovat, se stanoví ze vztahu

$$\Phi_z = \frac{\bar{E}_m \cdot A}{z \cdot \eta_E} = \frac{E_{p0} \cdot A}{\eta_E} \quad (lm, lx, m^2, -) \quad (10-2)$$

kde \bar{E}_m je udržovaná osvětlenost (dříve E_{pk} místně průměrná a časově minimální osvětlenost),

A velikost osvětlované plochy (půdorysu),

z udržovací činitel,

E_{p0} místně průměrná a časově maximální (počáteční) osvětlenost,

η_E činitel využití pro výpočet osvětlenosti.

Vydělíme-li tok Φ_z vypočtený z rovnice (10-2) tokem zdrojů v jednom svítidle, které uvažujeme pro osvětlení daného prostoru použít, zjistíme, kolik je třeba těchto svítidel instalovat. Takto stanovený počet svítidel je však nutno vhodně zaokrouhlit, přičemž je třeba přihlédnout i k předpokládanému rozmístění svítidel. Protože jsme ovšem takto změnili celkový tok zdrojů, tedy hodnotu Φ_z , je nutno ověřit, zda bude i v tomto případě dodržena požadovaná osvětlenost E_{pk} . K tomu použijeme z rovnice (10-2) vyplývajícího vztahu

$$E_{pk} = \frac{\Phi_z}{A} \cdot z \cdot \eta_E \quad (lx; lm, m^2, -) \quad (10-3)$$

Činitel využití η_E je roven podílu tzv. užitečného světelného toku $\Phi_{už}$ (popříp. Φ_3) dopadajícího (včetně odražených toků) na srovnávací rovinu a toku Φ_z vyzařovanému všemi zdroji světla. Současně však je možno činitele η_E vyjádřit součinem optické účinnosti svítidel η_{sv} a světelné účinnosti (činitele využití) η_{op} osvětlovaného prostoru. Platí tedy

$$\eta_E = \frac{\Phi_{už}}{\Phi_z} = \eta_{sv} \cdot \frac{\Phi_{už}}{\Phi_{sv}} = \eta_{sv} \cdot \eta_{op} \quad (10-4)$$

kde Φ_{sv} je světelný tok všech v daném prostoru instalovaných svítidel, jejichž světelné zdroje vyzařují úhrnný tok Φ_z .

Z rovnice (10-4) je zřejmé, že činitel využití η_{op} osvětlovaného prostoru je roven podílu užitečného toku $\Phi_{už}$ a toku Φ_{sv} vyzařovanému všemi svítidly.

Činitel využití η_E závisí tedy jednak na účinnosti použitých svítidel a jejich fotometrické ploše svítivosti a jednak na geometrických parametrech a světelně technických vlastnostech osvětlovaného prostoru.

Geometrické parametry, tj. rozměry určitého prostoru se popisují indexem místnosti m nebo činitelem prostoru k . Hodnoty indexu místnosti m , respektive v posledních letech více užívaného činitele prostoru k se stanovují pro osvětlení přímé, převážně přímé a smíšené při obdélníkovém půdorysu místnosti ze vztahů

$$m = \frac{c \cdot d}{h \cdot (c + d)} \quad k = \frac{5}{m} = \frac{5 \cdot h \cdot (c + d)}{c \cdot d} \quad (10-5)$$

a pro osvětlení převážně nepřímé a nepřímé se vychází z výrazů

$$m = \frac{3 \cdot c \cdot d}{2 \cdot H \cdot (c + d)} \quad k = \frac{5}{m} = \frac{10 \cdot H \cdot (c + d)}{3 \cdot c \cdot d} \quad (10-6)$$

kde c, d jsou šířka a délka osvětlovaného prostoru (m)

h je výška svítidel nad srovnávací rovinou (m)

H je výška stropu nad srovnávací rovinou (m).

Je-li půdorys osvětlovaného prostoru nepravidelný, vypočtou se pro přímé až smíšené osvětlení veličiny m a k z výrazů

$$m = \frac{\text{plocha půdorysu prostoru}}{h \cdot (\text{převaha obvodu prostoru})}; \quad k = \frac{5 \cdot h \cdot (\text{obvod prostoru})}{2 \cdot (\text{plocha půdorysu prostoru})} \quad (10 - 7)$$

Světelně technické vlastnosti osvětlovaného prostoru se pro účely tokové metody charakterizují odraznými vlastnostmi hlavních světelně činných ploch, to znamená zejména stropu, stěn a podlahy, respektive přesněji integrálními hodnotami činitelů odrazu: ρ_1 – fiktivní roviny svítidel, či stropu (jsou-li svítidla instalována na stropě), ρ_2 – stěn (uvažovaných jako jedna plocha) a ρ_3 – srovnávací roviny (resp. podlahy).

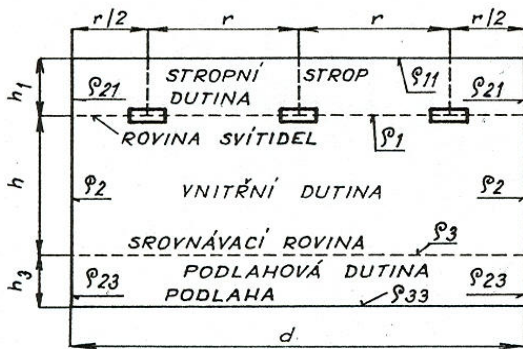
Hodnoty činitele využití η_E se pro pravidelné rozmístění určitého typu svítidel stanovují z rovnice (10-4) na základě podrobného výpočtu užitečných toků $\Phi_{už} = \Phi_3$ a dříve se sestavovaly do tabulek platných pro ten který typ svítidla a zdrojů, pro různé rozměry osvětlovaného prostoru, tj. pro vybrané hodnoty indexu místnosti m , či činitele prostoru k a činitelů odrazu ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 . Při přípravě podkladových materiálů pro navrhování osvětlovacích soustav tabulek ke stanovení činitele využití η_E se většinou pracuje s hodnotami indexu místnosti $m = 0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5$ nebo s řadou hodnot činitele prostoru $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ a dále s hodnotami činitelů odrazu:

$$\rho_1 = 0,8; 0,7; 0,5; 0,3; 0,1; \quad \rho_2 = 0,5; 0,3; 0,1 \quad \text{a} \quad \rho_3 = 0,3; 0,2; 0,1.$$

Vlastnosti světelně činných ploch se v průběhu využívání osvětlovací soustavy mění. To ovšem znamená, že se s časem mění i činitele odrazu ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 . Postupně klesá také účinnost svítidel. Proto se během provozu osvětlovací soustavy mění také hodnota činitele využití. Při návrhu osvětlovací soustavy se pochopitelně vychází z **počátečních** hodnot činitelů odrazu ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 a tedy i činitele využití η_E .

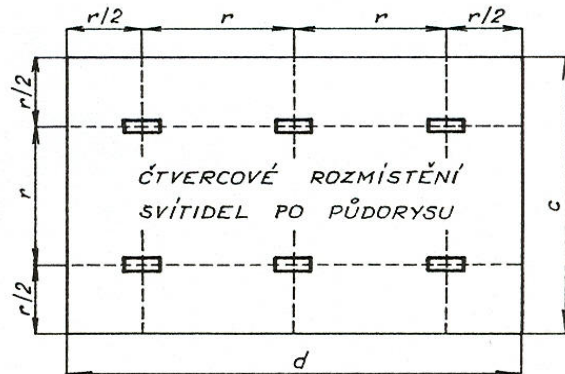
V posledních letech byly zpracovány počítačové programy, které umožňují stanovit činitele využití η_E poměrně rychle přímo výpočtem z poměru toků (Φ_3 / Φ_z) bezprostředně pro každou řešenou alternativu, pokud jsou využita svítidla, jejichž světelně technické charakteristiky jsou obsaženy v paměti počítače. Daří se tak nejen zrychlit, ale i zpřesnit určení činitele η_E . Proto také postupně klesá význam předem připravených tabulkových podkladových materiálů pro určení činitele využití, v nichž bylo běžně nutno i několikanásobně interpolovat, což pochopitelně znatelně zvyšovalo chybu výpočtu.

Výpočet světelné účinnosti η_{op} osvětlovaného prostoru a činitele využití η_E se v posledních letech provádí tzv. **metodou dutin**, při níž se daný prostor uvažuje rozdělený podle obr.10-1 na dutiny: stropní, podlahovou a vnitřní. Hledané veličiny se pak řeší jen pro vlastní vnitřní dutinu. Fiktivní rovině svítidel se přitom přiřazuje ekvivalentní činitel odrazu ρ_1 stropní dutiny a podobně srovnávací rovině ekvivalentní činitel odrazu ρ_3 podlahové dutiny (viz odst.10.4). Stěny vnitřní dutiny se uvažují jako jedna plocha se střední hodnotou činitele odrazu ρ_2 (viz odst.10.3). Předpokládá se, že počáteční toky dopadlé na jednotlivé povrchy přímo ze svítidel jsou po těchto plochách rovnoměrně rozloženy a že uvažované povrchy vykazují vlastnosti rovnoměrně rozptýlně odrážejících ploch.



Obr.10 - 1

Vymezení stropní, podlahové a vnitřní dutiny v osvětlovaném prostoru



Obr.10 - 2

Příklad tzv. čtvercového uspořádání svítidel v půdorysu osvětlovaného prostoru

V některých podkladech se též uvádějí hodnoty η_E pro nulové činitele odrazu a získané výsledky pak odpovídají pouze vlivu světelných toků dopadajících na srovnávací rovinu přímo ze svítidel. Porovnáním s výsledky vypočtenými pro nenulové činitele odrazu můžeme hodnotit vliv mnohonásobných odrazů na průměrnou hladinu osvětlenosti srovnávací roviny, a to v závislosti na hodnotách činitelů odrazu ρ_1 , ρ_2 a ρ_3 .

Tabulky hodnot činitelů využití se počítají za předpokladu pravidelného čtvercového rozmístění svítidel po půdorysu osvětlovaného prostoru (příklad viz obr.10-2) a pro určitou poměrnou rozteč svítidel r/h (kde r je vzdálenost středů dvou sousedních svítidel a h je výška zavěšení svítidel nad srovnávací rovinou). Kontrolní výpočty prokázaly, že při běžných změnách poměru r/h je chyba výpočtu činitele využití prakticky zanedbatelná. V některých pomůckách se udávají maximální hodnoty poměrné rozteče svítidel r/h , které lze použít, aby byla zachována určitá předepsaná rovnoměrnost osvětlení, V katalogích našich výrobců svítidel se uvádějí pouze hodnoty r/h , pro které byly činitele využití vypočteny, a proto je pak třeba rovnoměrnost osvětlenosti kontrolovat bodovou metodou výpočtu.

10.3 Střední činitel odrazu plochy

Při výpočtu mnohonásobných odrazů se pro každý uvažovaný povrch stanoví jediná (střední, po ploše vážená) hodnota činitele odrazu, o níž se předpokládá, že je stejná ve všech směrech, které přicházejí v úvahu. Střední hodnota ρ_s činitele odrazu povrchu A , který má n částí o plochách $A_1, A_2, A_3 \dots A_n$ s činiteli odrazu $\rho_1, \rho_2, \rho_3 \dots \rho_n$ se stanoví ze vztahu

$$\rho_s = \frac{\rho_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot A_2 + \rho_3 \cdot A_3 + \dots + \rho_n \cdot A_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} \quad (10-8)$$

Podle vzorce (10-8) vypočteme i střední (po ploše váženou) hodnotu činitele odrazu stěn ρ_2 potřebnou k určení činitele využití η_E , při čemž můžeme dle potřeby i jednotlivé stěny členit na několik dílčích ploch.

Běžně však potřebujeme stanovit také střední hodnotu činitele odrazu ρ_{1s} všech ploch, které tvoří stropní dutinu (viz obr.10-1). Postupujeme opět podle rovnice (10-8) a hodnotu činitele ρ_{1s} vypočteme podle vztahu

$$\rho_{1s} = \frac{\rho_{11} \cdot (c \cdot d) + \rho_{21} \cdot 2 \cdot h_1 \cdot (c + d)}{c \cdot d + 2 \cdot h_1 \cdot (c + d)} \quad (10-9)$$

kde ρ_{11} je střední hodnota činitele odrazu povrchu samotného stropu,
 c, d jsou šířka a délka osvětlovaného prostoru (m),
 h_1 je vzdálenost roviny svítidel od stropu (m),
 ρ_{21} je střední činitel odrazu stěn ve stropní dutině.

Zcela analogicky se určí střední hodnota činitele odrazu ρ_{3s} ploch podlahové dutiny z výrazu

$$\rho_{1s} = \frac{\rho_{33} \cdot (c \cdot d) + \rho_{23} \cdot 2 \cdot h_3 \cdot (c + d)}{c \cdot d + 2 \cdot h_3 \cdot (c + d)} \quad (10-10)$$

kde ρ_{33} je střední činitel odrazu povrchu podlahy,
 h_3 je vzdálenost srovnávací roviny od podlahy (m),
 ρ_{23} je střední činitel odrazu stěn v podlahové dutině.

Zavedou-li se činitele prostoru k_1 a k_3 stropní a podlahové dutiny výrazy

$$k_1 = \frac{h_1}{h} \quad k = \frac{5 \cdot h_1 \cdot (c + d)}{c \cdot d}; \quad k_3 = \frac{h_3}{h} \quad k = \frac{5 \cdot h_3 \cdot (c + d)}{c \cdot d} \quad (10-11)$$

kde k je činitel prostoru, pro který platí rovnice (10-5),
 pak je možno vztahy (10-9) a (10-10) pro střední hodnoty činitelů odrazu povrchů stropní, resp. podlahové dutiny upravit ještě do tvaru

$$\rho_{1s} = \frac{\rho_{11} + 0,4 \cdot k_1 \cdot \rho_{21}}{1 + 0,4 \cdot k_1}; \quad \rho_{3s} = \frac{\rho_{33} + 0,4 \cdot k_3 \cdot \rho_{23}}{1 + 0,4 \cdot k_3} \quad (10-12)$$

10.4 Ekvivalentní činitel odrazu výstupního otvoru dutiny

Z výpočtu mnohonásobných odrazů v obecné duté ploše s otvorem vychází, že ekvivalentní činitel odrazu ρ_e , který lze připsat fiktivní ploše otvoru, jíž se nahrazuje vliv uvažované duté plochy, se stanoví ze vztahu

$$\rho_e = \frac{\rho \cdot \frac{A_0}{A}}{1 - \rho \cdot \left[1 - \frac{A_0}{A} \right]} \quad (-; -, m^2, m^2, -) \quad (10-13)$$

kde A_0 je velikost rovinné plochy výstupního otvoru duté plochy,
 A je velikost plochy celého vnitřku duté plochy,
 ρ je střední činitel odrazu vnitřního povrchu A uvažované duté plochy.

Pro stropní dutinu v souladu s obr.10-1 platí:

$$A_0 = c \cdot d$$

$$A = c \cdot d + 2 \cdot h_1 \cdot (c + d)$$

a ekvivalentní činitel ρ_1 odrazu stropní dutiny, který přepisujeme fiktivní rovině svítidel, je tedy roven

$$\rho_1 = \frac{\rho_{1s} \cdot \frac{c \cdot d}{c \cdot d + 2 \cdot h_1 \cdot (c + d)}}{1 - \rho_{1s} \cdot \left[1 - \frac{c \cdot d}{c \cdot d + 2 \cdot h_1 \cdot (c + d)} \right]} \quad (-; -, m, m, m) \quad (10 - 14)$$

kde ρ_{1s} je střední činitel odrazu povrchů stropní dutiny [viz rovnice (10-9) a (10-12)].

Jsou-li svítidla umístěna přímo na stropě osvětlovaného prostoru, pak $h_1 = 0$ a ekvivalentní činitel odrazu výstupního otvoru stropní dutiny, tj. fiktivní roviny svítidel je roven střední hodnotě činitele odrazu stropu $\rho_1 = \rho_{11}$.

Analogicky lze podle vztahu (10-12) napsat výraz pro ekvivalentní hodnotu činitele odrazu ρ_3 podlahové dutiny, který přisoudíme srovnávací rovině

$$\rho_3 = \frac{\rho_{3s} \frac{c \cdot d}{c \cdot d + 2 h_3 (c + d)}}{1 - \rho_{3s} \left[1 - \frac{c \cdot d}{c \cdot d + 2 h_3 (c + d)} \right]} \quad (-; -, m, m, m) \quad (10 - 15)$$

kde ρ_{3s} je střední činitel odrazu povrchů podlahové dutiny [viz rovnice (10-10) a (10-12)].

Zavedou-li se činitele prostoru k_1 a k_3 stropní a podlahové dutiny podle rovnic (10-11), je možno výrazy (10-14) a (10-15) pro ekvivalentní činitele odrazu ρ_1 a ρ_3 stropní a podlahové dutiny upravit do tvaru

$$\rho_1 = \frac{\rho_{1s}}{1 + 0,4 \cdot k_1 \cdot (1 - \rho_{1s})} \quad ; \quad \rho_3 = \frac{\rho_{3s}}{1 + 0,4 \cdot k_3 \cdot (1 - \rho_{3s})} \quad (10 - 16)$$

10.5 Toková metoda výpočtu průměrného jasu stropní dutiny a stěn

Jak již bylo řečeno, při světelně technických výpočtech předpokládáme, že povrchy tvořící stropní dutinu vykazují vlastnosti difúzních ploch. Proto i fiktivní rovina svítidel, nahrazující účinek stropní dutiny, je difúzní plochou s ekvivalentním činitelem odrazu ρ_1 , který se vypočte ze vztahu (10-14). Mezi jasem a osvětleností difúzní plochy platí obecně vztah $M = \pi L = \rho E$. \Rightarrow

Označíme-li L_{1e} a E_1 místně průměrné a časově minimální hodnoty jasu a osvětlenosti fiktivní roviny svítidel, platí

$$L_{1e} = \frac{\rho_1}{\pi} E_1 \quad (\text{cd.m}^{-2}, -, lx) \quad (10 - 17)$$

V procesu mnohonásobných odrazů ve vnitřní dutině uvažovaného prostoru dopadá na fiktivní roviny svítidel o ploše A (m^2) světelný tok označený Φ_1 . Místně průměrná a časově maximální osvětlenost fiktivní roviny svítidel je tedy určena poměrem toku Φ_1 k ploše A , tj. Φ_1 / A . Časově minimální hodnotu této osvětlenosti, tj. veličinu E_1 dostaneme vynásobením uvedeného poměru Φ_1 / A udržovacím činitelem z . To znamená

$$E_1 = (\Phi_1 / A) \cdot z \quad (lx; lm, m^2) \quad (10 - 18)$$

Dosadíme-li za E_1 výraz (10-18) do rovnice (10-17) dostaneme pro jas L_{1e} rovnici

$$L_{1e} = \frac{\rho_1}{\pi} \frac{\Phi_1}{A} \cdot z \quad (\text{cd. m}^{-2}; -, lm, m^2, -) \quad (10 - 19)$$

z níž po úpravě vychází hledaný vztah

$$L_{1e} = \frac{\Phi_z}{A} z \frac{\rho_1}{\pi} \frac{\Phi_1}{\Phi_z} = \frac{\Phi_z}{A} z \eta_{L1} \quad (\text{cd.m}^{-2}; lm, m^2, -, -) \quad (10 - 20)$$

kde Φ_z je časově maximální (počáteční) hodnota světelného toku všech nainstalovaných světelných zdrojů, která se vypočte z rovnice (10-2),

η_{L1} je činitel využití pro výpočet jasu stropní dutiny (fiktivní roviny svítidel), který se zjistí z výrazu

$$\eta_{L1} = \frac{\rho_1}{\pi} \frac{\Phi_1}{\Phi_z} \quad (-, -, lm, lm) \quad (10 - 21)$$

Jsou-li svítidla umístěna přímo na stropě daného prostoru, vypočte se z rovnice (10-20) místně průměrná a časově minimální hodnota L_1 jasu stropu, tj. v daném případě je $L_{1e} = L_1$.

Uvědomme si dále, že také mezi jasem a osvětleností stěn existuje obdobný vztah jako mezi jasem a osvětleností fiktivní roviny svítidel. Zavedme proto činitel využití η_{L2} pro výpočet jasu stěn ve tvaru

$$\eta_{L2} = \frac{\rho_2}{\pi} \frac{A}{A_2} \frac{\Phi_2}{\Phi_z} \quad (10 - 22)$$

kde A_2 je velikost (m^2) plochy všech stěn; jejichž střední činitel odrazu je ρ_2 a na které v procesu mnohonásobných odrazů dopadá výsledný tok Φ_2 ,
 A je plocha půdorysu osvětlovaného prostoru (m^2).

Místně průměrnou a časově minimální hodnotu L_2 jasu stěn pak vypočteme z výrazu

$$L_2 = \frac{\Phi_z}{A} \cdot z \cdot \eta_{L2} \quad (\text{cd.m}^{-2}; \text{lm, m}^2, -, -) \quad (10 - 23)$$

Je patrné, že vztahy (10-20), (10-23) a (10-3) jsou zcela obdobné. Světelný tok Φ_z všech instalovaných zdrojů světla se stanoví z rovnice (10-2).

Indexy p, k (charakterizující místně průměrnou a časově minimální hodnotu, jsou u veličin) L_{1e} a L_2 pro zjednodušení zápisu vypuštěny.

Stejně jako činitel využití η_E pro výpočet osvětlenosti se činitele využití η_{L1} a η_{L2} pro výpočet středního jasu stropní dutiny a stěn řeší za předpokladu pravidelného čtvercového rozmístění svítidel pro určitou poměrnou rozteč r/h svítidel (viz obr.10-1 a 10-2). Při obvykle se vyskytujících změnách poměru r/h se činitele využití η_{L1} a η_{L2} mění jen málo a v praxi lze tyto odchylky obvykle zanedbat.

Ke stanovení činitelů využití pro výpočet jasu η_{L1} a η_{L2} je možno vypočítat a sestavit obdobné tabulky jako pro činitele η_E k výpočtu osvětlenosti. Činitele η_{L1} a η_{L2} se z tabulek zjišťují pro určité hodnoty činitele prostoru k a pro různé hodnoty ekvivalentních činitelů odrazu ρ_1 roviny svítidel (stropní dutiny), ρ_3 srovnávací roviny (podlahové dutiny) a střední hodnotu činitele odrazu ρ_2 stěn. V katalogích řady starších svítidel tyto tabulky běžně nalezneme.

Nicméně v posledních letech se činitele η_{L1} a η_{L2} stejně jako činitel využití η_E nejčastěji počítají pro každý konkrétní případ přímo na počítači z výrazů (10-21) a (10-22) po vyřešení mnohonásobných odrazů ve vnitřní dutině daného prostoru a zjištění toků Φ_1 , Φ_2 a toku Φ_3 . Takový postup dovoluje nejen urychlit samotné řešení činitelů využití, ale také podstatně zpřesnit jejich výpočet.

10.6 Určení průměrné hodnoty střední kulové osvětlenosti

Místně průměrnou hodnotu střední kulové osvětlenosti $E_{4\pi}$ ve vnitřním prostoru je možno stanovit z přibližného vztahu

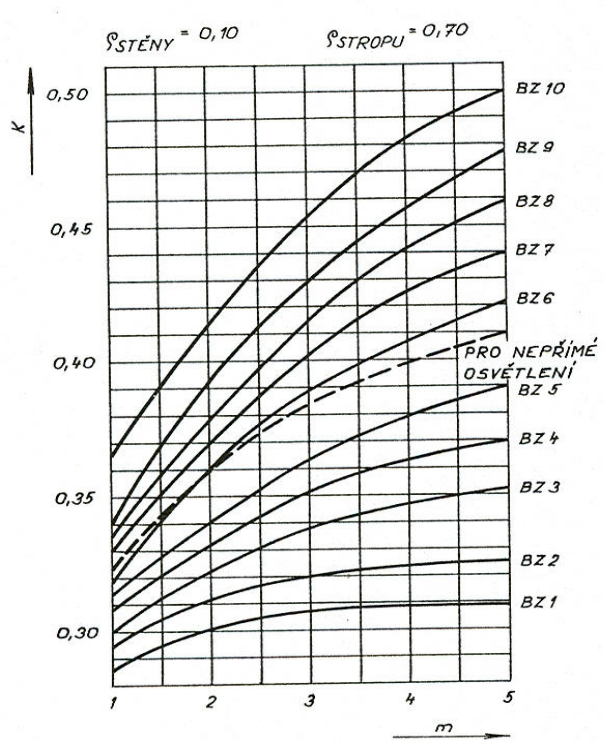
$$E_{4\pi} = E_h \cdot (K + 0,5 \cdot \rho_3) \quad (\ell x; \ell x, -) \quad (10 - 24)$$

kde E_h je místně průměrná hodnota osvětlenosti v bodech vodorovné roviny,

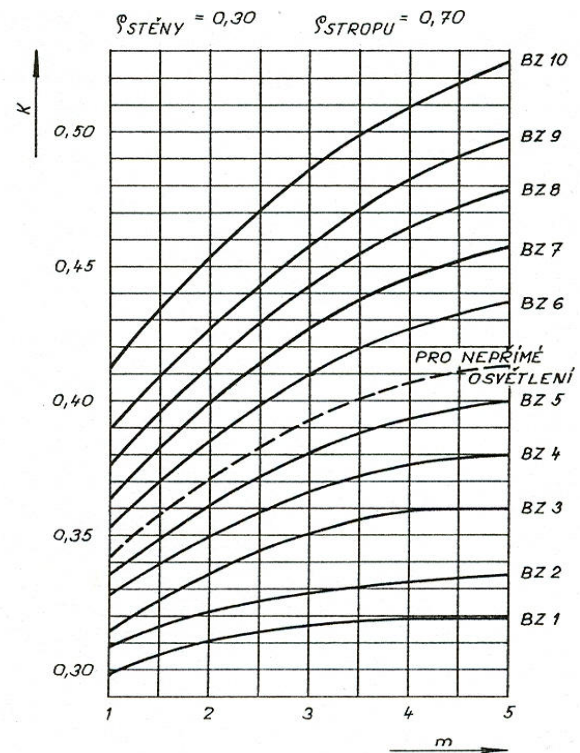
ρ_3 je činitel odrazu podlahy,

K je činitel závislý na odraznosti stropu, stěn, na fotometrické ploše svítivosti svítidla a na indexu místnosti m [viz rovnice (10-5) a (10-6)].

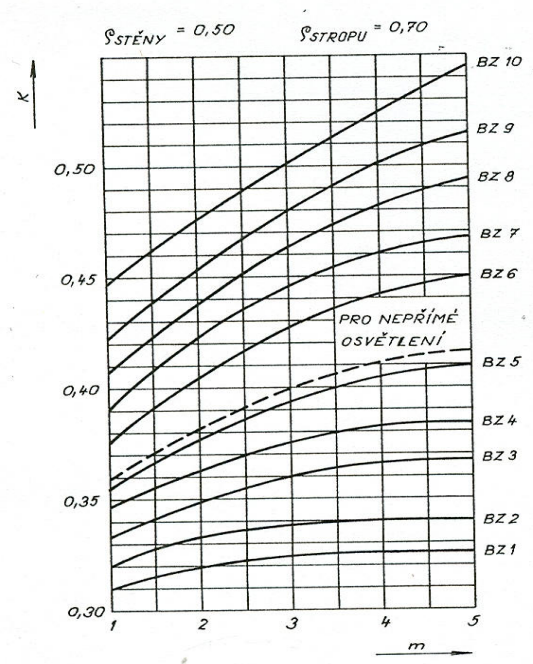
Hodnoty činitele K se pohybují v mezích 0,25 až 0,5. Obvykle bývá $K = 0,3$ až 0,4. Činitel K lze určit z grafů, jejichž příklady jsou nakresleny na obr.10-3, 10-4 a 10-5.



Obr. 10-3



Obr. 10-4



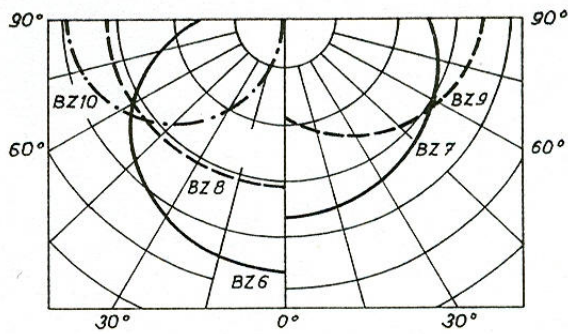
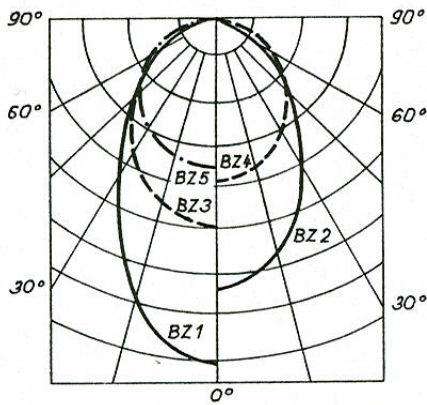
Obr. 10-5

Diagramy jsou sestaveny pro činitele odrazu stropu 0,7 a pro činitele odrazu stěn 0,1, 0,3 a 0,5, a to jednak v závislosti na indexu místnosti m a jednak v závislosti na typu vyzářovací charakteristiky použitých svítidel.

Předpokládá se, že fotometrická plocha svítidel je určena křivkou svítivosti popsanou v závislosti na zvolené vztažné svítivosti I_0 rovnicí

$$I_\gamma = I_0 \cdot f_1(\gamma).$$

Typ vyzářovací charakteristiky se označuje BZ1, BZ2, BZ3, ... BZ10. Tomuto označení odpovídající typové křivky svítivosti a charakteristické funkce svítivosti jsou uvedeny v obr. 10-6. Typ vyzářovací charakteristiky se určí porovnáním křivky svítivosti použitého svítidla s typovou křivkou, popřípadě určené charakteristické funkce $f_1(\gamma)$ s typovou funkcí uvedenou v tabulce u obr. 10-6.



TYP	$f_I(\gamma)$		TYP	$f_I(\gamma)$	
BZ 1	$\cos^4 \gamma$	1 : 1	BZ 6	$1+2\cos \gamma$	1,5 : 1
BZ 2	$\cos^3 \gamma$	1 : 1	BZ 7	$2+\cos \gamma$	1,5 : 1
BZ 3	$\cos^2 \gamma$	1,25 : 1	BZ 8	konstanta	1,5 : 1
BZ 4	$\cos^{1,5} \gamma$	1,25 : 1	BZ 9	$1 + \sin \gamma$	1,5 : 1
BZ 5	$\cos \gamma$	1,5 : 1	BZ 10	$\sin \gamma$	1,5 : 1

Obr. 10-6

10.7 Toková metoda výpočtu průměrné osvětlenosti komunikace

Rovněž pro venkovní prostory lze tokovou metodou stanovit hodnoty světelných toků zdrojů potřebných k zajištění požadované průměrné osvětlenosti na určité osvětlované ploše. V uličních osvětlovacích soustavách se k tomu využívá celkové účinnosti osvětlení η , která je rovna poměru tzv. užitečného světelného toku $\Phi_{už}$, dopadajícího z uvažovaného svítidla na vozovku a chodníky, ke světelnému toku Φ_z zdrojů světla instalovaných ve svítidle, tzn.

$$\eta = \frac{\Phi_{už}}{\Phi_z} = \eta_s \cdot \eta_v \quad (10-25)$$

kde η_s je optická účinnost svítidla

η_v je činitel využití světelného toku svítidla, tj. poměr užitečného toku $\Phi_{už}$ k toku vyzařovanému svítidlem Φ_{sv} [$\eta_v = \Phi_{už} / \Phi_{sv}$].

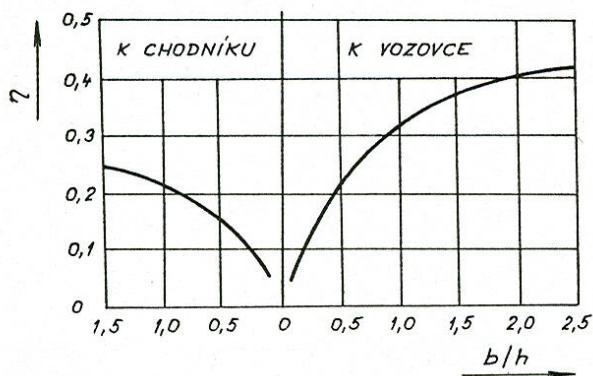
Místně průměrná a časově minimální osvětlenost E_{pk} , které se dosáhne na komunikaci o šířce b při rozteči l svítidel, se vypočte ze vztahu

$$E_{pk} = \frac{\Phi_z}{b \cdot l} \cdot z \cdot \eta \quad (lx; lm, m, m, -, -) \quad (10-26)$$

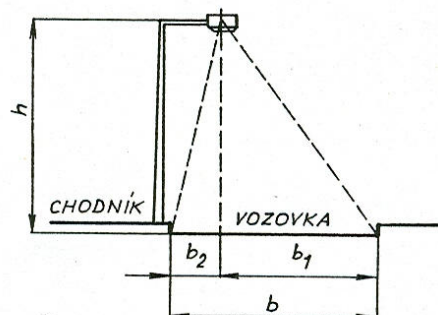
kde Φ_z je jmenovitý světelný tok zdrojů světla, a to u jednostranné, osové a vystřídané soustavy v jednom svítidle a u párové soustavy ve dvou svítidlech,

z je udržovací činitel. Běžně se požaduje $z \geq 0,6$.

Celková účinnost osvětlení η je závislá nejen na účinnosti svítidla a na geometrických parametrech (výška zavěšení svítidla, šířka komunikace atd.), ale také na fotometrické ploše svítivosti svítidla. Většinou se celková účinnost osvětlení stanovuje pro dané svítidlo v závislosti na poměrné šířce b/h komunikace. Často se výsledky výpočtů uvádějí ve formě grafických závislostí $\eta(b/h)$ nazývaných b/h křivky. Příklad takových diagramů je na obr.10-7.



Obr. 10 – 7



Obr. 10 – 8

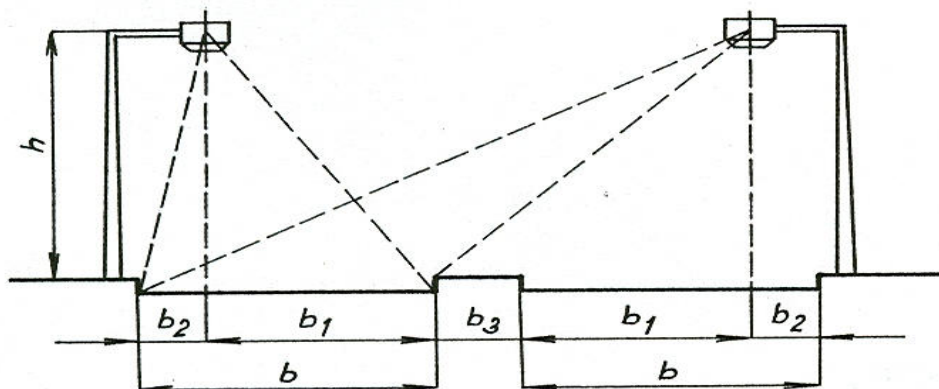
Při geometrickém uspořádání podle obr.10- 8 se pak postupuje tak, že se z křivky pro směr k vozovce odečte hodnota η_1 odpovídající poměrné šířce b_1/h a z křivky pro směr k chodníku hodnota η_2 pro poměrnou šířku b_2/h . Výsledná účinnost η je v tomto případě dána součtem dílčích hodnot η_1 a η_2 , tj. $\eta = \eta_1 + \eta_2$.

Dílčí šířky b_1 a b_2 se odečítají od svislice spuštěné ze svítidla na vozovku.

Obdobně se postupuje i u směrově rozdělené komunikace se středním pásem o šířce b_3 osvětlené párovou soustavou podle obr.10-9.

Z $Z(b/h)$ křivek použitého svítidla se stanoví hodnoty dílčích účinností η_1 pro b_1/h , η_2 pro b_2/h , η_3 pro $(b + b_3 + b_1)/h$ a η_4 pro $(b_3 + b_1)/h$. Výsledná účinnost se poté určí z výrazu

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4$$



Obr. 10 - 9

Při předběžném návrhu osvětlení komunikace stanovíme z rovnice (10-26) pro požadovanou osvětlenost E_{pk} potřebný tok Φ_z zdrojů světla. Po korekci hodnoty toku Φ_z s ohledem na skutečně použité zdroje pak podle vztahu (10-26) ověřujeme dodržení předepsané osvětlenosti. Bodovou metodou je dále nutno provést podrobnější kontrolu, zvláště s ohledem na dodržení požadované celkové a podélné rovnoměrnosti.

10.8 Toková metoda výpočtu průměrného jasu vozovky

Jas povrchu vozovky je závislý nejen na světelně technických parametrech svítidel, na jejich rozmístění a na volbě kontrolního místa, ale také na umístění pozorovatele a na světelně technických vlastnostech povrchu vozovky. Jsou-li k dispozici údaje charakterizující odrazné vlastnosti povrchu vozovky, je možno použít tokovou metodu i pro výpočet průměrného jasu vozovky. Obvykle se k tomu využívá součinitele jasu vozovky, který se označuje písmenem q a je roven poměru jasu L (v daném bodě a v určitém směru) k hodnotě osvětlenosti E vodorovné roviny v uvažovaném kontrolním místě, tj.

$$q = \frac{L}{E} \quad (\text{cd. m}^{-2}, \ell x^{-1}; \text{cd. m}^{-2}, \ell x) \quad (10 - 27)$$

V mezinárodních doporučeních se uvádějí orientační průměrné hodnoty součinitele jasu q pro světlé povrchy vozovek osvětlené cloněnými svítilny s širokou křivkou svítivosti $q_p = 0,1 \text{ cd.m}^{-2} \cdot \ell x^{-1}$ a pro tmavé stejně osvětlené vozovky $q_p = 0,07 \text{ cd.m}^{-2} \cdot \ell x^{-1}$.

S průměrnými hodnotami q_p součinitele q lze počítat, pokud ve smíšeném odrazu od vozovky nepřevládá zrcadlová složka nad difúzní. Tomu vyhovují např. asfaltobetonové vozovky s hrubší strukturou apod.

Využijeme-li průměrnou hodnotu součinitele q , můžeme v souladu s rovnicí (10-27) určit místně průměrnou a časově minimální hodnotu osvětlenosti E_{pk} pro požadovanou místně průměrnou a časově minimální hodnotu jasu L_{pk} povrchu vozovky ze vztahu

$$E_{pk} = L_{pk} \cdot \frac{1}{q_p} \quad (\ell x; \text{cd.m}^{-2}, \text{cd.m}^{-2} \cdot \ell x^{-1}) \quad (10 - 28)$$

Dále se již postupuje stejně jako u tokové metody výpočtu průměrné osvětlenosti komunikace, jak bylo uvedeno v odst.10.7.