

5. ZÁKLADY MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH VELIČIN

Metody měření fotometrických veličin se dělí na **vizuální** (subjektivní metody, při kterých se jako indikátoru využívá zraku a na **fyzikální** (objektivní), při kterých se měří fyzikálními čidly.

Subjektivní měření jsou závislá na individuálních vlastnostech zraku různých pozorovatelů a na změnách těchto vlastností v závislosti na podmínkách pozorování a různých subjektivních faktorech. Dnes se všeobecně dává přednost měřením fyzikálním, při nichž se využívá přesných objektivních přístrojů vybavených kvalitními fotočládky. To umožňuje provádět jak rychlá a snadná provozní měření (zvl. osvětlenosti a jasů) s rozšířenou nejistotou měření mezi 8 až 14 %, tak i přesná laboratorní měření (např. svítivosti a světelného toku) při rozšířené nejistotě měření do 8 %. Existují i přístroje pro orientační měření, která jsou určena k ověřování základních podmínek zrakové pohody a u nichž se rozšířená nejistota měření pohybuje mezi 14 až 20 %.

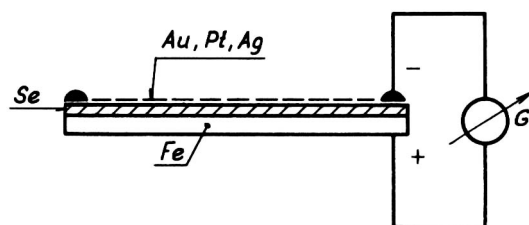
Pro laboratorní světelně technická měření je třeba mít k dispozici vhodné etalony (normály) svítivosti (popřípadě i jasu) a světelného toku, které je třeba pravidelně ověřovat a kontrolovat (např. žárovkové normály po každých 15 h hoření, nejméně však jednou za rok).

Jako etalonu svítivosti se obvykle užívají speciální žárovky s vláknem konstrukčně řešeným v jedné rovině, aby bylo možno při měření jednoznačně změřit vzdálenost. Svítivost takového etalonu je při kalibračních měřeních zjištěna pro určitou teplotu chromatičnosti při jednoznačně definované poloze zdroje ve směru kolmém k rovině vlákna a při přesně stanoveném napájecím napětí a proudu.

Má-li se při světelně technických měřeních, ať již vizuálních či fyzikálních, dosáhnout správných, srovnatelných a reprodukovatelných výsledků, je třeba při měřeních postupovat velmi pečlivě a dodržovat celou řadu podmínek. Měření nesmí být ovlivněna rozptýleným světlem. Optické části fotometrů nesmí být zaprášené. Fotometrická vzdálenost, t. j. vzdálenost fotometru od zdroje, musí být dostatečně velká (nejlépe desetkrát větší než největší rozměr zdroje), aby bylo možno považovat zdroj za bodový. Tato okolnost je zvláště důležitá při měření svítivosti zdrojů. Dalšími příčinami chyb bývají nedostatečná stabilita přístrojů a světelných normálů. Pokud jde o samotné přístroje, patří k nejčastějším zdrojům nejistot měření nedokonalá shoda spektrální citlivosti fotočládků s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normálního pozorovatele, dále jejich úhlová chyba, nelinearita mezi dopadlým světelným tokem a fotoproudem, ale také teplotní závislost a únava.

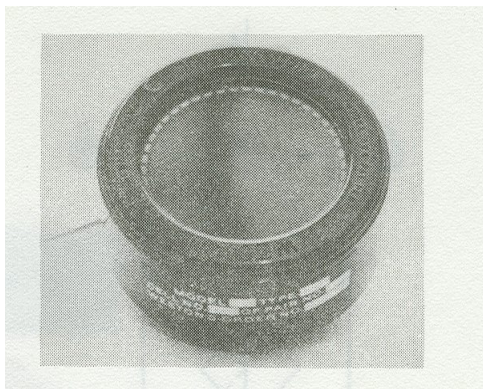
Před každým měřením je třeba ponechat jak zkoušené zdroje, tak i normály dostatečně dlouho zahořet, aby se ustálily jejich světelně technické i elektrické parametry. Např. žárovky se zahořují přibližně 5 minut, ale výbojové zdroje světla asi 20 minut podle jejich náběhových charakteristik.

Jako přijímačů záření se nejčastěji používá hradlových křemíkových (dříve i selenových), fotonek založených na principu ventilového fotoefektu.



Obr. 5-1

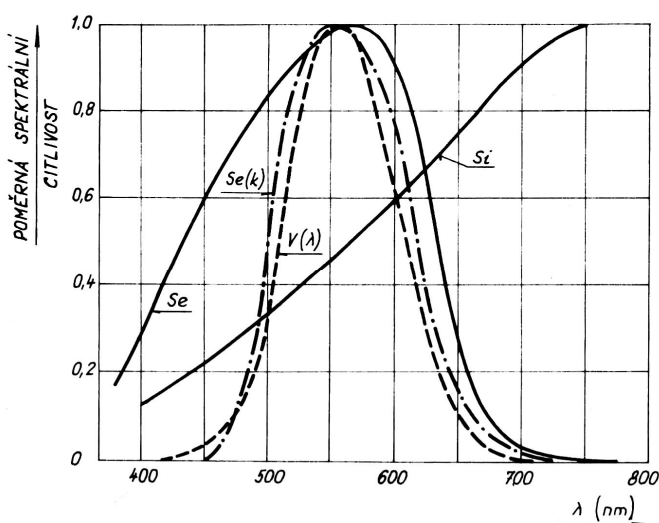
Základní deska fotočládku je železná, popřípadě hliníková. Vrstva křemíku, resp. selenu je pokryta průsvitnou vodivou vrstvičkou z platiny, stříbra nebo zlata (obr. 5-1). Po obvodě fotonky je sběrný kroužek pro odvádění elektrického proudu. Ozáří-li se tenká vrstva křemíku či selenu, nanesená na kovové podložce, vznikne rozdíl potenciálů kovové podložky a vrstvy křemíku či selenu a uzavřeným obvodem pak protéká proud, který se měří např. galvanometrem G nebo mikroampérmetrem.



Obr. 5 - 2

Příklad provedení hradlového fotočlánku firmy Weston uloženého v pouzdře vhodném pro fotometrické účely je na obr.5-2.

Křivka spektrální citlivosti fyzikálního přijímače má mít průběh shodný s křivkou $V(\lambda)$ spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele. To je zvláště důležité pro měření výbojových zdrojů světla s čárovým nebo kombinovaným spektrem.



Obr. 5-3

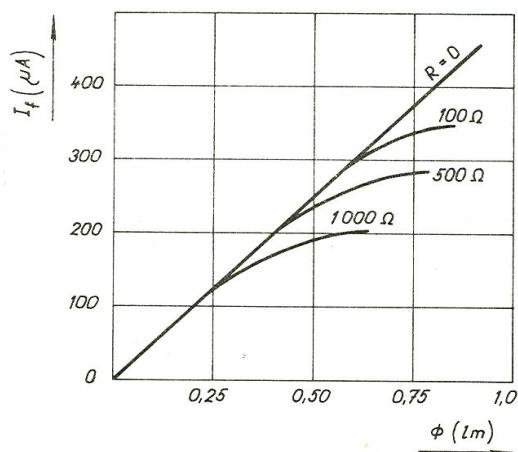
Spektrální rozložení poměrné citlivosti nekorigovaného fotočlánku (viz obr.5-3: křivka S_e - selénový fotočlánek, křivka S_i - křemíkový fotočlánek) je odlišné od průběhu poměrné spektrální citlivosti oka normálního pozorovatele [křivka $V(\lambda)$]. Měří-li se proto s nekorigovaným fotočlánkem, jsou údaje přečtené na měřícím přístroji rovny skutečným hodnotám osvětlení jen tehdy, pokud druh měřeného světla je shodný se světlem použitým při cejchování přístroje.

Je-li měřené světlo jiného druhu, musí se naměřené hodnoty násobit korekčním činitelem. Přepočítávání odpadá, vybaví-li se fotočlánek korekčními filtry, které zajistí přizpůsobení křivky citlivosti fotočlánku křivce citlivosti oka [obr.5-3: křivka $S_e(k)$].

Křemíkové hradlové fotočlánky vykazují vysokou spektrální citlivost ve viditelné oblasti spektra a ve srovnání se selenovými fotočládky jsou

stabilnější a jejich elektrický proud při stejném osvětlení je několikanásobně větší.

Závislost fotoelektrického proudu na světelném toku dopadlém na hradlový fotočlánek je při běžném zapojení nelineární a dosti závislá na odporu vnějšího obvodu.



Obr. 5-4

Závislost fotoproudu selénového fotočlánku na odporu R jeho vnějšího obvodu

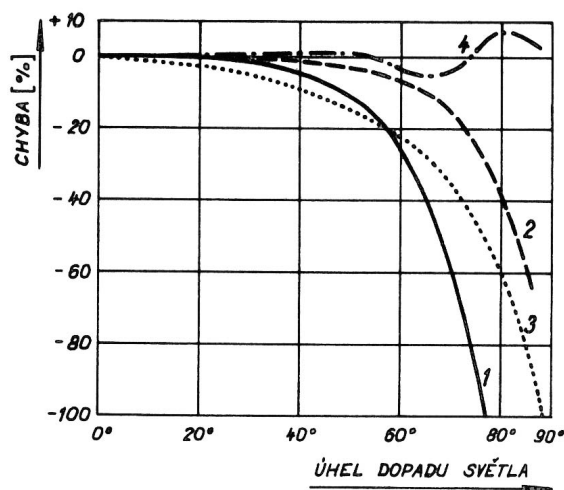
V porovnání s křemíkovými fotočládky je zmíněná závislost výraznější u fotočlánků selénových (obr.5-4). Je patrné, že k dosažení vyhovující linearitě musí proto mít vnější obvod selénového fotočlánku odpor menší než 100Ω . U křemíkových fotonek je linearita závislosti fotoproudu na osvětlenosti zachována téměř až do odporu vnějšího obvodu $R = 500 \Omega$.

Proud fotonky lze měřit mikroampérmetry či při proudech menších než $100 \mu A$ galvanoměry s vnitřním odporem do 100Ω . Moderní přístroje pro měření fotoproudu se již vybavují jak zesilovači, tak i kompenzačním zařízením s měřením proudu nakrátko fotočlánku a zabezpečují tak v širokém rozsahu linearitu mezi fotoproudem a hladinou osvětlenosti.

Při déletrvajících měřeních se může, zvláště u selénových fotonek, projevit únava fotočlánku, a to obvykle poklesem fotoproudu při konstantní osvětlenosti. Vyžaduje-li se vyšší přesnost měření, je třeba fotočlánky ověřovat po půl až jedné hodině. Citlivost fotočlánku postupně rovněž klesá při konstantní osvětlenosti vyšší než 200 lx. Po zatemnění se fotočlánek zotaví. Pouze při osvětlení nad 1000 lx bývá pokles citlivosti trvalý. Proto se u některých fotočlánků při měření vysokých hladin osvětlenosti snižuje světelný tok dopadlý na fotočlánek zakrytím části přijímací plochy fotočlánku clonami s otvory.

Proud hradlového fotočlánku závisí též na teplotě okolí a na kmitočtu kolísání světla, což se projevuje, zvláště u selénových fotonek, při měření výbojových zdrojů světla napájených střídavým proudem. Fotoproud křemíkových fotočlánků je na teplotě okolí téměř nezávislý. Při změně teploty okolí v rozmezí $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ bývají změny údajů vesměs menší než $\pm 1\%$.

Fotočlánky se cejchují pro kolmý dopad světla. Při šikmém dopadu světla při konstantní svítivosti zdroje a stejné vzdálenosti zdroje od místa měření je osvětlenost úměrná kosinu úhlu dopadu. U obvyklých fotočlánků byly zjištěny odchylky od tohoto zákona zvláště při úhlech dopadu větších než 30° (viz obr.5-5). Chyba je způsobena částečným zrcadlovým odrazem, sníženou propustností horní vrstvy, polarizací i cloněním okraje fotočlánku obrubou. Směrová (úhlová) chyba se odstraňuje tzv. **kosinusovým nástavcem** provedeným např. ve tvaru kulového vrchlíku z rozptýlného skla.



Obr. 5-5

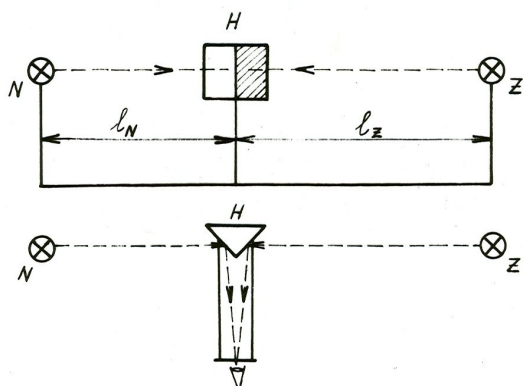
Chyby různých fotočlánků v závislosti na úhlu dopadu světla
 1 - fotočlánek s přechýlující obrubou,
 2 - fotočlánek bez obruby,
 3 - fotočlánek s korekčním filtrem,
 4 - fotočlánek s kosinusovým nástavcem

5.1 Měření svítivosti

Svítivost, jako fotometrická veličina, se neměří přímo, ale převádí se při subjektivním měření jasu nebo při objektivním měření na měření osvětlenosti. Měření se provádí na fotometrické lavici, která se skládá z vodících tyčí či kolejnic, po nichž pojíždí vozíky se zdroji světla a tzv. fotometrickou hlavicí. Vzdálenosti mezi fotometrickou hlavicí a zdroji se odečítají na měřítku upevněném na lavici. Středů zdrojů i fotometrické hlavičky musí být nastaveny přesně do optické osy.

Při vizuálním měření se buď přímo porovnává svítivost měřeného zdroje se svítivostí etalonu, nebo se měří substituční metodou s použitím srovnávacího světelného zdroje. Fyzikální měření se obvykle provádí metodou substituční.

Při vizuálním měření přímým pozorováním se na jednom konci lavice (obr. 5-6) umístí měřený (zkoušený) zdroj Z, na druhém konci etalon svítivosti N a mezi nimi fotometrická hlavička H, tvořená např. trojbokým hranolem, umožňujícím měření na stejný jas. Odrážející plochy hranolu musí být dokonale rozptýlné, aby jasy pozorovaných ploch byly úměrné jejich osvětlenosti. Z obr. 5-6 je vidět, že zorné pole fotometru je v tomto případě rozděleno na dvě části. Stejného jasu obou částí pole fotometru lze dosáhnout za předpokladu stejné chromatičnosti světla etalonu a zkoušeného zdroje v souladu se zákonem čtverce vzdálenosti změnou vzdáleností I_N respektive I_Z .



Obr. 5-6

Schématické uspořádání vizuálního měření na fotometrické lavici s fotometrem na stejný jas
 N – etalon svítivosti,
 Z – zkoušený (měřený) zdroj,
 H – fotometrická hlavice s trojbokým hrotem pro měření na stejný jas

Po vyrovnaní jasů platí pro poměr svítivosti I_Z měřeného zdroje ke svítivosti I_N srovnávacího zdroje vztah

$$\frac{I_Z}{I_N} = \frac{(l_Z)^2}{(l_N)^2} \quad (\text{cd, cd; m, m}) \quad (5-1)$$

z něhož se při známé svítivosti I_N snadno určí svítivost I_Z měřeného zdroje.

Pojížděním fotometru mezi oběma zdroji se vyrovná na stejný jas nebo kontrast obou částí fotometrického pole, odečte se vzdálenost l_N normálu I_N a l_Z měřeného zdroje I_Z a měřená svítivost se pak určí ze vztahu (5-1). K zajištění stejných optických podmínek pro oba zdroje se měření zopakuje ještě jednou při fotometru otočeném o 180° . Z obou měření se stanoví střední hodnota.

Při vizuálním měření substitučním se dává etalon svítivosti i měřený zdroj postupně na tutéž stranu fotometru a oba tyto zdroje se porovnávají s vhodným srovnávacím zdrojem, který je umístěn na druhé straně fotometru. Srovnávací zdroj nemusí mít známou hodnotu svítivosti, ale jeho svítivost musí být alespoň v průběhu jednoho měření konstantní. Po vyrovnaní jasů obou částí fotometrického pole postupně pro etalon svítivosti I_N a měřený zdroj I_Z , se na měřítku fotometrické lavice odečtou vzdálenosti l_N a l_Z a svítivost měřeného zdroje se určí podle rovnice (5-1). Při měření zůstává vzdálenost fotometru od srovnávacího zdroje konstantní a posouvá se buď vozík s etalonem či měřeným zdrojem, nebo vozík fotometru s pevně připojeným vozíkem srovnávacího zdroje. Tato metoda vylučuje vliv nesymetrie fotometrické destičky a pracuje s konstantním jasnem srovnávacího pole.

Při objektivním měření se osvětluje postupně etalonem svítivosti a měřeným zdrojem fyzikální čidlo. Nejčastěji se měří při konstantní osvětlenosti čidla, kdy se vylučuje vliv nelinearity závislosti fotoproudu fotonky na osvětlenosti. Mění se tedy poloha měřeného zdroje tak, až je výchylka měřícího přístroje stejná jako při osvětlení etalonem svítivosti. Pak se hledaná svítivost vypočte opět z rovnice (5-1). Pokud by se měřilo při různé osvětlenosti fotočlánku, bylo by nutno ověřit linearitu fotočlánku a počítat s korekčními činiteli.

Při měření je třeba vyloučit účinky rozptýleného světla na čidlo. Proto se na fotometrickou lavici umísťují mezi zdroj a fotometr stínící clony tak, aby na fotonku dopadalo světlo pouze od měřeného zdroje. Velikost otvorů v clonách musí být taková, aby žádná aktivní část zdroje nebyla zastíněna. Při objektivním měření musí být citlivá plocha čidla zcela a rovnoměrně osvětlena. Přesnost měření svítivosti teplotních zdrojů pracovním teplotním etalonem svítivosti činí asi $\pm 2\%$.

5.2 Měření čar svítivosti

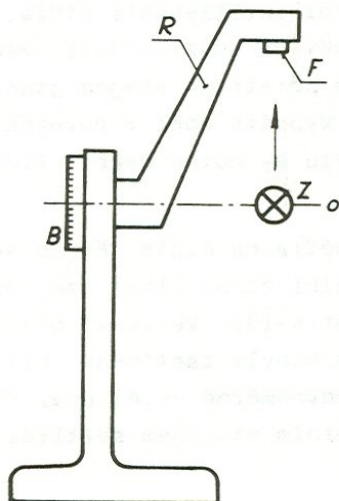
Čary svítivosti světelných zdrojů lze měřit na fotometrické lavici, a to zjišťováním svítivosti postupně v různých směrech. Podle požadované přesnosti se měří po 10° či 5° , nejčastěji však v souladu s požadavky evropských norem po 2° . Běžně se však čary svítivosti zdrojů a svítidel měří přístroji, které se nazývají **goniofotometry**. Jsou to zařízení, která umožňují měřit svítivost světelného zdroje či svítidla v různých rovinách a pod různými úhly. Takový požadavek mohou splnit v zásadě tři různá konstrukční uspořádání:

- 1) otočný zdroj a pevný fotometr
- 2) pevný zdroj a otočný fotometr
- 3) pevný zdroj i fotometr a otočný zrcadlový systém.

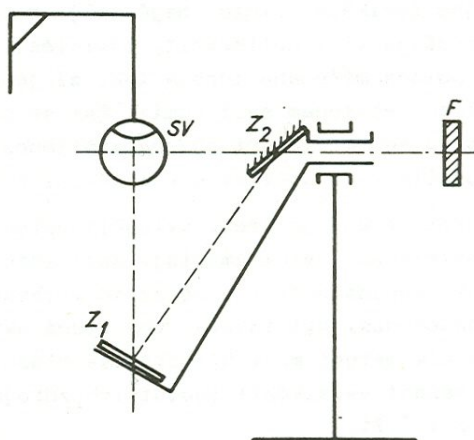
Goniofotometry s otočným zdrojem či svítidlem nejsou vhodným řešením, neboť u mnohých zdrojů je světelný tok závislý i na poloze zdroje.

Přístroje druhé skupiny lze použít pouze pro objektivní měření. Používají fotonku připevněnou na rameni, které se otáčí okolo zdroje či svítidla. Výhodou tohoto řešení je skutečnost, že svítidlo či zdroj je zavěšen v normální provozní poloze.

Příklad konstrukce goniofotometru s otočným ramenem je na obr.5-7. Přístroj se skládá z ramene R, na němž je upevněna fotonka F. Rameno R se otáčí kolem měřeného zdroje Z umístěného v ose otáčení o. Úhel natočení se odečítá na bubínku B. Změna roviny, ve které se měří křivka svítivosti, se provádí natočením zdroje či svítidla.



Obr. 5-7



Obr. 5-8

Goniofotometry třetí skupiny umožňují měření v libovolné vzdálenosti, jsou však velmi náročné na konstrukční řešení, zejména zvl. pokud jde o optickou kvalitu zrcadel. Příklad řešení takového goniofotometru je na obr.5-8. Kolem svítidla SV se na pevném rameni otáčí zrcadlo Z_1 . Světlo odražené zrcadlem Z_1 odráží druhé zrcadlo Z_2 ve směru osy otáčení na pevně umístěný fotočlánek F. Fotometrická vzdálenost je dána součtem vzdáleností od měřeného zdroje přes obě zrcadla až k fotočlátku. U tohoto přístroje by bylo možno provádět absolutní měření svítivosti, ale bylo by zapotřebí znát činitele absorpce zrcadel, který se časem zvětšuje.

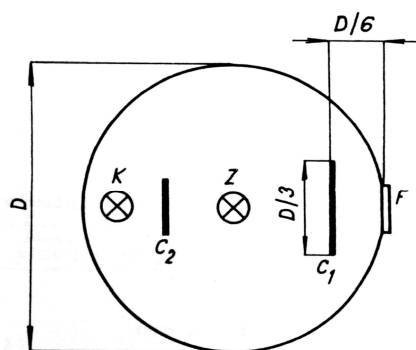
Konstrukce všech typů goniofotometrů musí být dostatečně tuhá, aby nedocházelo během rotace k deformaci či kývání nosných částí, čímž by se zaváděly přídavné chyby měření. Svítivost se obvykle v různých směrech neměří absolutně, ale stačí relativní měření, které dovoluje nakreslit tvar zjištěné křivky v polárních souřadnicích. Ocejchování diagramu svítivosti se posléze provede zjištěním jedné absolutní hodnoty svítivosti, například ve směru svislé osy svítidla, a to zvláštním měřením buď přímo na goniofotometru nebo na fotometrické lavici.

Goniofotometry pro hromadná měření je výhodné vybavit zařízením pro samočinné zakreslování čar svítivosti na polární papír.

5.3 Měření světelného toku

Světelný tok světelných zdrojů či svítidel je možno stanovit buď graficko početními metodami z naměřených křivek svítivosti nebo přímým měřením světelného toku v integrátoru s použitím normálu světelného toku. Integrátor může mít tvar krychle nebo kvádra, ale nejvhodnější (zvláště při nesymetrickém rozdělení světelného toku) jsou integrátory ve tvaru koule podle obr.5-9.

Jde o dutou kouli opatřenou na vnitřním povrchu bílým rozptýlným nátěrem s velkou odrazností. Důležitým požadavkem je, aby byl nátěr barevně neselektivní. Nejlépe vyhovují některé druhy běloby zinkové, titanové či barytové. Často bývá základní nátěr trvalý a na něj je nanesen nátěr rozpustný ve vodě, který se pravidelně obnovuje. Činitel odrazu by měl být v mezích 0,75 - 0,85. Koule má na jedné straně okénko s fotočlánkem F zastíněné clonou C_1 , aby na něj nedopadalo světlo přímo ze zdroje. Zdroj Z je zavěšen přibližně ve středu koule. Při rozsvícení zdroje uvnitř koule dochází k mnohonásobným odrazům na vnitřním povrchu koule. Tímto mnohonásobně odraženým světlem se osvětlí též okénko s fotonkou.



Obr. 5-9

Náčrt uspořádání integračního kulového fotometru

Dopadá-li na vnitřní povrch integrátoru ze zdroje tok Φ_z a má-li rovnoměrně rozptýlně odrazující povrch integrátoru integrační činitel odrazu ρ , pak je odražená složka výsledného světelného toku Φ dopadající vlivem mnohonásobných odrazů na vnitřní povrch integrátoru rovna

$$\Phi = \rho \Phi_z + \rho^2 \Phi_z + \rho^3 \Phi_z + \dots + \rho^n \Phi_z = \frac{\rho}{1 - \rho} \Phi_z \quad (5-2)$$

Vnitřní povrch kulového integrátoru je ve všech místech stejně osvětlen a osvětlenost v libovolném bodě tečné roviny k vnitřnímu povrchu integrátoru je rovna střední hodnotě osvětlenosti celého vnitřního povrchu πD^2 kulového integrátoru o průměru D .

V místě okénka s měřicím čidlem odpovídá osvětlenost E pouze odraženým světelným tokům, tj. toku Φ a stanoví se ze vztahu

$$E = \frac{\Phi}{\pi D^2} = \frac{\rho}{\pi D^2 (1 - \rho)} \Phi_z = k_i \Phi_z \quad (1x) \quad (5-3)$$

kde k_i je konstanta integračního fotometru

$$k_i = \frac{\rho}{\pi D^2 (1 - \rho)} \quad (1x \cdot \text{lm}^{-1}; \text{m}, -) \quad (5-4)$$

Fotočlánek indikuje tedy hodnotu osvětlenosti E , která je přímo úměrná toku zdroje Φ_z . Z rovnice (5-3) je patrné, že citlivost integračního kulového fotometru ovlivňuje jeho průměr D a činitel rovnoměrně rozptýlného odrazu ρ .

Obvykle se měří objektivní metodou substituční. Nejprve se umístí do integrátoru normál světelného toku a stanoví se konstanta zařízení. Pak se normál vyjme a místo něho se do koule umístí měřený zdroj. Údaj fotometru násobený konstantou zařízení udává světelný tok měřeného zdroje.

Pokud se měří v integrátoru světelný tok celého svítidla nebo zdroje s většími nosnými částmi, dochází k určitému pohlcení a odstínění části světelného toku. V takovém případě je vhodné použít pro vyloučení stínícího vlivu pomocnou žárovku, zvanou korekční zdroj K (viz obr.5-9). Ten bývá umístěn u stěny koule obvykle naproti výstupnímu okénku, přičemž je zakryt clonou C_2 , aby neosvětloval přímo výstupní okénko, ani měřený zdroj či svítidlo. Je vhodné, aby světelný tok pomocné žárovky se příliš nelišil od světelného toku měřeného zdroje a musí být konstantní po dobu jednoho měření.

Postup měření s korekčním zdrojem je následující:

- 1) Při rozsvíceném normálu a zhasnutém korekčním zdroji se zjistí údaj fotometru E_N
- 2) Při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji - údaj fotometru E_{kN}
- 3) Při zhasnutém měřeném zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji - údaj fotometru E_{kx}
- 4) Při rozsvíceném měřeném zdroji a zhasnutém korekčním zdroji - údaj fotometru E_x

Je-li světelný tok normálu Φ_N , pak světelný tok měřeného zdroje Φ_x se vypočte ze vztahu

$$\Phi_x = \Phi_N \cdot \frac{E_x}{E_N} \cdot \frac{E_{kN}}{E_{kx}} \quad (1m) \quad (5-5)$$

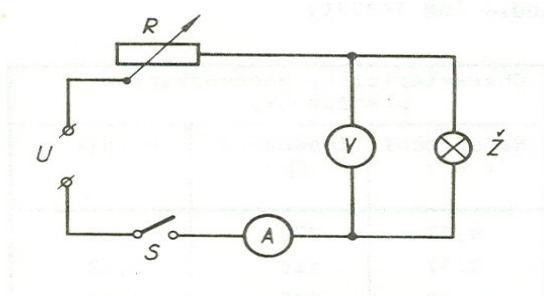
V tomto vztahu poměr $\frac{E_{kN}}{E_{kx}}$ udává korekci vlivu stínění neaktivních částí.

Obdobným postupem se může v integrátoru změřit i světelný tok svítidla. Pak je možno stanovit též účinnost svítidla jako poměr světelného toku vyzařovaného svítidlem ke světelnému toku zdrojů instalovaných ve svítidle.

Před začátkem měření světelného toku je třeba světelný zdroj nechat určitou dobu zahořet, aby se ustálily jeho světelně-technické parametry. U výbojových zdrojů je tato doba 20 i více minut.

Přesnost měření světelného toku v integrátoru je ovlivněna jednak vlastnostmi fotočlánku (závislost fotoproudu na osvětlenosti), jednak změnami teploty uvnitř integrátoru při déletrvajících měřeních. Linearita fotočlánku se má pravidelně kontrolovat a je třeba počítat s korekčními křivkami; vliv teplotních změn se dá omezit tím, že se světelný zdroj zahořuje při otevřeném integrátoru a integrátor se zavírá na dobu vlastního měření. Vlastnosti vnitřního nátěru integrátoru se rovněž časem poněkud mění, což by mohlo mít vliv u dlouhotrvajících měření (např. zkoušky životnosti zdrojů). Také výstupní okénko musí vyhovovat určitým požadavkům, např. jeho umístění se má krýt co nejpřesněji s vnitřním povrchem integrátoru. Rovněž clony pro odstínění přímopadajícího světla mají mít určité geometrické rozměry, např. clona C_1 má mít průměr asi $D/3$ a její vzdálenost od výstupního okénka má být $D/6$, kde D je průměr integrátoru.

Přesnost měření světelného toku při použití teplotních pracovních etalonů bývá $\pm 2\%$, při měření zářivek a výbojek asi $\pm 3,5\%$. Při srovnávacích měřeních se žárovkami a vysokotlakými výbojkami musí být teplota okolí kulového integrátoru v rozmezí 22 až 27°C, při provozních měřeních 18 až 29°C. Zářivky se měří při okolní teplotě integrátoru $25 \pm 1^\circ\text{C}$ v prostředí bez průvanu. Žárovky a vysokotlaké výbojky rtuťové se měří v poloze svislé, patičí nahoru, vysokotlaké výbojky sodíkové a zářivky v poloze vodorovné tak, aby jejich podélná osa ležela na spojnici středu koule se středem fotočlánku.

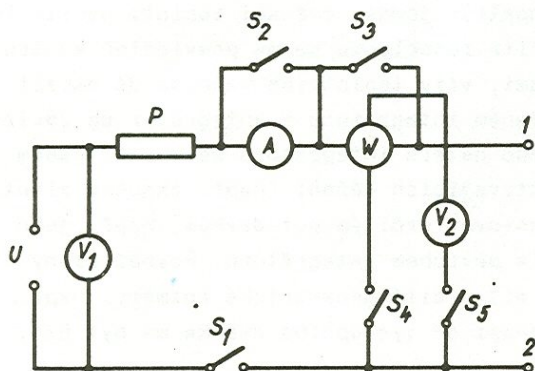


Žárovky se při měření zapojují podle schématu na obr.5-10 a doporučuje se při měření voltmetr nevypínat a od hodnoty měřeného proudu odečítat hodnotu proudu procházejícího voltmetrem.

Obr.5-10

Schéma napájení žárovek při fotometrických měřeních
 U - zdroj napětí, R - odpor, Z - zkoušená žárovka,
 A - ampérmetr, V - voltmetr, S - vypínač

Při měření zářivek se měřicí přístroje a předřadník zapojí podle obr.5-11a. Kolíky patič zářivky se na napájecí napětí zapojí křížem a během měření se zapojení nemění. Měří-li se vysokotlaké výbojky, použije se schématu zapojení podle obr.5-11b. Světelný tok zářivek a vysokotlakých výbojek se měří po ustálení světelně technických a elektrických parametrů obvykle po 20 minutách svícení, a to za stejných podmínek, při kterých se pak měří. Při měření se buď používá referenčních předřadníků a udržuje se napájecí napětí rovné jmenovitému napětí použitého předřadníku, nebo se měří při jmenovitém příkonu měřeného zdroje.

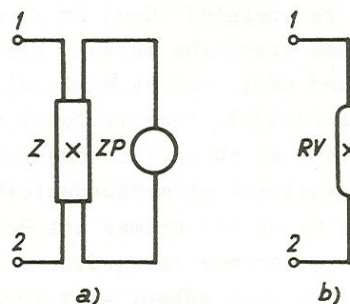


Obr. 5–11

Schéma napájení zářivek (a), resp. vysokotlakých výbojek (b) při fotometrických měřeních

U - zdroj napětí, P - předřadník, A - ampérmetr, W - wattmetr, V_1 , V_2 - voltmetry,

S_1 až S_5 - vypínače, Z - zářivka, RV - výbojka, ZP - zapalovač



Obr. 5– 11 a, b

Při měření jedné elektrické veličiny musí být přístroje na měření ostatních veličin (s výjimkou napájecího napětí) vypnuty [ČSN 360012 Měření světelného toku a elektrických parametrů zářivek a rtuťových výbojek]. Měří se každá veličina zvlášť, a to při konstantním světelném toku zkoušených zdrojů, tj. po zapnutí určitého přístroje se změnou napájecího napětí upraví měřená hodnota fotoproudu na hodnotu, která byla před zapnutím tohoto přístroje.

Měří-li se při jmenovitém příkonu zdroje, nastaví se po zahoření zdroje na wattmetru příkon rovný součtu příkonu zdroje a příkonu spotřebovaného napěťovou cívku wattmetru. Ampérmetr a voltmetr pro měření obloukového napětí jsou odpojeny. Tomuto stavu odpovídající fotoproud se pak udržuje konstantní při měření ostatních elektrických veličin. Příkon P_W spotřebovaný napěťovou cívku wattmetru o odporu R_W při napětí U_{ob} se vypočte z výrazu

$$P_W = \frac{U_{ob}^2}{R_W} \quad (W; V, \Omega) \quad (5-6)$$

5.4 Měření osvětlenosti

K měření osvětlenosti se používá objektivních přístrojů, luxmetrů, které se skládají z přijímače s korigovaným fotočlánkem opatřeným kosinusovým nástavcem a z měřicího a vyhodnocovacího systému s digitálním nebo analogovým indikátorem.

V souladu s naší normou ČSN 36 0011-1 (Měření osvětlení vnitřních prostorů, část 1: Základní ustanovení), se luxmetry člení podle celkové přípustné chyby (f_c): na **přesné** ($f_c \leq \pm 5\%$), **provozní** ($f_c \leq \pm 10\%$) a **orientační** ($f_c \leq \pm 15\%$).

Sleduje se přitom 11 druhů chyb (f_1 až f_{11}): f_1 - relativní chyba stupnice, f_2 - spektrální chyba (vzniká při měření ve světle se spektrem jiným, než které bylo použito při cejchování, což je obvykle normalizované světlo A, 2856 K), f_3 - směrová (úhlová) chyba, f_4 - chyba nestability, f_5 - chyba vlivu teploty (vztažená na 1°C), f_6 - odchylka spektrální citlivosti čidla od křivky $V(\lambda)$, f_7 , f_8 - chyby vyplývající z citlivosti fotonky na záření UV (f_7) a IČ (f_8), f_9 - chyba linearity, f_{10} - chyba při měření modulovaného záření a f_{11} - chyba při změně rozsahu přístroje.

Chyby f_6 až f_{11} se zjišťují pouze při typové zkoušce přístroje.

Indikátor luxmetru musí být opatřen korektorem umožňujícím nastavení nuly. Má-li luxmetr vlastní napájecí zdroj, musí být možnost průběžně kontroly napětí tohoto zdroje. Luxmetr musí snést na každém rozsahu přetížení 20 % měřicího rozsahu, a to po dobu 5 minut. Za normálních podmínek musí být životnost luxmetrů minimálně 5000 provozních hodin. Frekvenční rozsah pro všechny třídy přesnosti luxmetrů je v mezích od 40 do 10^5 Hz.

Před započítím měření je třeba fotočláanky po dobu 5 až 15 minut ponechat odkryté ve světelném prostředí, v němž se bude měřit, aby se čidla daným podmínkám přizpůsobila a stabilizovala se.

Vzhledem k tomu, že se v průběhu využívání luxmetrů mohou jejich parametry, zejména vlastnosti fotočláanků, měnit, je zapotřebí luxmetry pravidelně kalibrovat prostřednictvím pověřeného pracoviště (např. ČMI - Český metrologický institut), a to podle pokynů výrobce a požadavků úřadu pro normalizaci a měření : přesné přístroje maximálně po 2 letech, přístroje pro provozní měření po 3 letech a přístroje pro orientační měření nejdéle po 5 letech.

Luxmetry určené pro provozní měření bývají většinou konstruovány s dostatečně dlouhým stíněným kabelem spojujícím pouzdro s fotočláankem s vlastním měřicím přístrojem, čímž se zajišťuje, aby výsledky měření nebyly nevhodně ovlivněny při čtení údajů. Je-li fotočláanek zabudován přímo v pouzdře měřicího přístroje, je třeba, aby byl přístroj vybaven dálkově ovládanou fixací naměřené hodnoty, neboť jinak je obtížné zabránit tomu, aby pracovník, který údaje odečítá, neovlivnil měření, např. zastíněním čidla, popřípadě dalších světelně činných ploch atd. Nejsou-li malé kapesní luxmetry takto upraveny, jsou pak použitelné jen pro skutečně orientační měření. Podobné malé luxmetry jsou též základem expozimetrů užívaných ke zjištění potřebné doby osvitů při fotografování.

V současnosti je u nás v praxi pro provozní měření osvětlenosti běžně využíván objektivní digitální luxmetr PU 550 s rozsahy 20 lx, 200 lx, 2000 lx, 20 klx a 100 klx vyráběný firmou Metra Blansko (viz obr.5-12). Přístroj je vybaven korigovanou křemíkovou fotodiodou opatřenou kosinovým nástavcem. Přístroj lze zařadit do 4. třídy přesnosti (popříp. do třídy C).



Obr.5-12

Digitální provozní luxmetr typu PU 550
Metra Blansko

Nároky na luxmetry určené k přesnějšímu měření nízkých hladin osvětlenosti jsou poměrně vysoké, a to jak pokud jde o kvalitu a citlivost samotného čidla, tak i pokud jde o parametry vyhodnocovacího zařízení, zvláště jeho zesilovač. Z obvyklých fotonek se pro tyto účely nejčastěji užívají křemíkové fotočláanky. S nízkými hodnotami osvětlenosti se častěji setkáváme ve veřejném osvětlení, zejména při měření na komunikacích. Protože se v těchto případech měří osvětlenosti ve vodorovné rovině, je výhodné pro zajištění vodorovné polohy přijímací plošky fotočláanku použít speciálního zařízení, tzv. kardanova závěsu.

K velmi kvalitním objektivním luxmetrům patří luxmetr berlínské firmy Lichtmesstechnik vybavený křemíkovým, velmi přesně korigovaným, fotočlánkem o průměru 60 mm s nasazeným kosinusovým nástavcem. Luxmetr je vybaven číslicovým mikroampérmetrem a umožňuje přímou spolupráci s počítačem. Měřicí rozsah přístroje je **0,001 lx** do **150.000 lx**. Pouzdro čidla je vybaveno libelou a má tři nastavitelné nožky, dovolující snadné umístění přijímací plochy fotočlánku do vodorovné polohy.

Dalším příkladem objektivního přesného digitálního luxmetru je radiometr typu 211 německé firmy PRC Krochmann (viz obr. 5-13) s korigovanými čidly a nástavci pro měření jak osvětlenosti rovinné plochy (v rozsahu **0,001 lx** až **200 klx**), tak střední kulové, válcové i poloválcové osvětlenosti a rovněž s využitím speciálních čidel pro měření ozáření v oblasti záření UV-A, UV-B, UV-C ($0,001 \text{ mW.cm}^{-2}$ až 200 kW.cm^{-2})



Obr. 5-13

Fotografie přesného digitálního luxmetru a radiometru typu 211 firmy PRC Krochmann s čidly (zleva tři čidla pro měření ozáření v UV oblasti, dále fotočlánek luxmetru pro měření osvětlenosti rovinné plochy a speciální nástavce s fotonkami pro měření střední poloválcové, válcové a kulové osvětlenosti

Měření osvětlenosti jsou důležitá a nezbytná k tomu, aby se mohla objektivně posoudit jakost osvětlovací soustavy ať již vnitřního nebo venkovního prostoru. Při měření je třeba dbát na to, aby se nepřekročil rozsah měřícího přístroje, a aby zejména u starších typů přístrojů nedošlo k ozáření čidla nedovoleným světelným tokem. Při použití analogových měřících přístrojů s více rozsahy se měří na vyšších rozsazích v horních dvou třetinách stupnice (při poklesu se přepíná na nižší rozsah). U digitálních přístrojů se měří na nejnižším rozsahu pokrývajícím měřené hodnoty.

Poznali jsme již, že měření osvětlenosti je ovlivněno celou řadou okolností, které souvisí se samotným měřícím zařízením, ale je třeba si uvědomit, že výsledky měření jsou závislé i na celé řadě dalších vlivů. Jmenujme jen některé. Např. jde o vliv závislosti světelného toku zdrojů na změnách napájecího napětí, popřípadě i na teplotě okolí a na době provozu zdrojů, z hlediska jejich stárnutí. Roli však hraje i míra zašpinění samotného prostoru a svítidel a mnoho dalších momentů. Proto je nutno při měření osvětlenosti dodržovat určitá pravidla, abychom v pokud možno co největší míře eliminovali nepříznivé vlivy znehodnocující výsledky měření. Přesná měření se opakují, tzn., že se měří nejméně dvakrát. Výsledné hodnoty se stanoví jako průměrné z jednotlivých měření. U provozních měření se jejich opakování doporučuje.

Měřením se kontrolují hodnoty osvětlenosti v bodech pracovní či srovnávací roviny (nejčastěji se uvažuje vodorovná rovina ve výši 0,85 m nad podlahou ve vnitřních prostorech a obvykle nejvýše 20 cm nad povrchem ve venkovních prostorech), a to jednak u nového zařízení (nová svítidla a zdroje, nově vymalováno, nové vybavení) a jednak u zařízení v běžném provozu. Při měření nového zařízení musí být svítidla i zdroje světla čisté, nepoškozené a musí odpovídat projektu. Svítidla i zdroje musí být instalovány ve správné poloze.

Pokud jde o světelné zdroje, je při měření třeba dbát těchto okolností:

- 1) Zářivky a výbojky musí před měřením svítit alespoň celkem 100 h a žárovky alespoň 10 h (při jmenovitém napětí), neboť vlivem stárnutí zdroje klesá světelný tok. V záznamu měření se uvádí, kolik hodin celkem byly již světelné zdroje v provozu.
- 2) aby se zajistilo dostatečné zahoření zdrojů, měří se osvětlenost v soustavách s výbojovými zdroji asi po 20 minutách nepřetržitého provozu. U uzavřených zářivkových svítidel může být stabilizace i delší, u žárovek lze měřit po uplynutí minimálně 1 minuty. Fotočlánky Je třeba před měřením osvětlit po dobu 5 až 15 minut přibližně stejnými hladinami osvětlenosti, které budou měřeny.
- 3) Světelný tok zdrojů se mění s teplotou okolí. Proto je třeba vždy udat při jaké teplotě bylo měření prováděno.
- 4) Světelný tok zdrojů se mění s napětím, a proto se při měření musí kontrolovat napětí na zdrojích. Napětí se má odečítat současně s údaji osvětlenosti. Liší-li se napájecí napětí od jeho jmenovité hodnoty, provede se korekce naměřených hodnot podle údajů výrobce použitého zdroje nebo, chybí-li tyto údaje, použije se korekce podle ČSN 36 0011-3 (Měření osvětlení vnitřních prostorů, část 3: Měření umělého osvětlení). Naměřené hodnoty se pak násobí činitelem k_u závislým na poměru jmenovitého napětí U_n ke skutečnému napětí U při měření

$$k_u = (U_n / U)^c$$

kde exponent c se stanoví podle druhu světelného zdroje z údajů v tab.5-4, kde jsou uvedeny orientační průměrné hodnoty exponentu c

Tab.5 - 4 Průměrné hodnoty exponentu c pro různé světelné zdroje

Světelný zdroj	exponent c
Žárovky pro všeobecné použití	3,6
Zářivky – induktivní zapojení	1,4
– kapacitní zapojení	0,6
– zapojení duo	1,0
– s elektronickým předřadníkem se stabilizací	0,0
Rtuťová vysokotlaká výbojka	2,5
Halogenidová výbojka	3,0
Vysokotlaká sodíková výbojka	1,7
Nízkotlaká sodíková výbojka	0,0

- 5) Světelný tok závisí i na zaprášení svítidla, a proto je v protokolu zapotřebí tento stav zachytit.
- 6) Umělé osvětlení je vhodné měřit po setmění nebo při zatemnění oken a světlíků, aby byl vyloučen vliv denního světla.
Při měření osvětlení venkovních prostorů se měří za suchého počasí, bez sněhové pokrývky a pokud možno za čistého ovzduší.
Světlo od výkladních skříní apod. se vyloučí vhodným zastíněním fotonky .

Je-li měřené osvětlení kombinací umělého a denního světla, musí se umělé osvětlení měřit odděleně od denního. Denní osvětlení velmi kolísá jednak během dne a jednak i vlivem atmosférických podmínek. [Při měření denního osvětlení se postupuje podle ČSN 36 0011-3 Měření osvětlení vnitřních prostorů, část 3 Měření denního osvětlení].

Při měření osvětlenosti ve vnitřních prostorech je zapotřebí z naměřených hodnot stanovit místně průměrnou hladinu osvětlenosti E_p . K tomu účelu je nutno zachovat určitý postup a provádět dílčí měření ve vhodně zvolených kontrolních bodech (ČSN 36 0011). Ve vnitřních prostorech se měření osvětlenosti provádí v pravidelné síti kontrolních míst. Kontrolní body se umísťují do středu dílčích, nejčastěji čtvercových, ploch, které co nejrovnoměrněji pokrývají celou srovnávací rovinu.

Ve vybavených pracovních prostorech se osvětlenost měří na všech místech zrakových úkolů, tj. tam, kde se nachází hlavní předměty zrakové činnosti (pracovní stoly, stroje apod.). Kontrolní body se na pracovní ploše rozmístí v pravidelné síti ve vzdálenosti nejvýše 0,2 m a nejvýše 0,05 m nad povrchem. Průměrná hodnota osvětlenosti se opět vypočte jako aritmetický průměr všech naměřených hodnot. Je pochopitelné, že výpočet průměrné hodnoty osvětlenosti se provádí pro ta místa zrakových úkolů, pro která je předepsána stejná hodnota osvětlenosti.

V praxi se vyskytuje řada prostorů, v nichž při hodnocení osvětlení nemá význam pracovat s průměrnou hladinou osvětlenosti, např. tam, kde jsou instalovány vysoké stroje, či kde se rozměrná zařízení vyrábějí apod. V takových případech se měří osvětlenosti pouze v místech, kde pracovníci provádějí určitou činnost.

Často je celkové osvětlení doplňováno místním přisvětlením. K vystižení podmínek osvětlení je pak zapotřebí měřit osvětlenost na konkrétním pracovním místě za přítomnosti pracovníka zaujímajícího obvyklou pracovní pozici. Důležité je, aby se fotočlánek luxmetru umístil do skutečné pracovní roviny, která nemusí být horizontální ani vertikální, ale může být obecně nakloněna.

Kvalitu umělého osvětlení je nutno měřením ověřovat i v soustavách veřejného osvětlení, zvláště na komunikacích. Na komunikacích se osvětlenosti měří v pravidelné síti kontrolních míst ve vodorovné rovině ve výšce do 20 cm nad povrchem vozovky. Rozložení kontrolních bodů se volí tak, aby pokrývalo celou plochu jednoho prvku osvětlovací soustavy. U směrově rozdělených komunikací postačuje proměřit osvětlenosti jen na jedné straně komunikace.

V příčném směru běžně stačí provádět měření ve třech bodech v každém jízdním pruhu. Rozteč kontrolních bodů v příčném směru je pak rovna jedné šestině šířky celé komunikace. Vzdálenost prvního kontrolního bodu od okraje vozovky je při tom rovna poloviční rozteči kontrolních míst, tj. jedné dvanáctině šířky komunikace.

V podélném směru se volí maximální rozteč kontrolních míst 5 m. Při rozteči světelných míst do 50 m tedy obvykle postačuje volit v podélném směru mezi dvěma světelnými místy 10 kontrolních míst. Průměrná hodnota osvětlenosti se stanoví jako aritmetický průměr hodnot osvětlenosti naměřených v jednotlivých kontrolních bodech. K zajištění vodorovné polohy přijímací plochy fotočlátku je výhodné použít Kardanova závěsu.

Zpráva o měření musí (ČSN 36 0011) obsahovat označení a charakteristiku kontrolovaného prostoru, účel, druh a stupeň přesnosti měření, popis a náčrt osvětlovací soustavy s vyznačením rozmístění svítidel a kontrolních míst, údaje o použitých zdrojích světla a svítidlech (druh a vlastnosti, napájení, regulace, stáří) s uvedením jejich provozního stavu, dále průměrné napájecí napětí v průběhu měření, teplotu vzduchu, podmínky a postup měření, naměřené hodnoty osvětlenosti (tabelární přehled, použité korekce a jejich zdůvodnění, popříp. zápis výsledných hodnot do výkresů, grafické znázornění výsledků měření např. formou izolux), porovnání výsledků s požadavky norem, zhodnocení výsledků měření, popřípadě návrh na opatření, či úpravu osvětlovací soustavy a konečně soupis použitých přístrojů, datum a čas měření, jména pracovníků, kteří měření prováděli a jméno a podpis pracovníka odpovědného za měření.

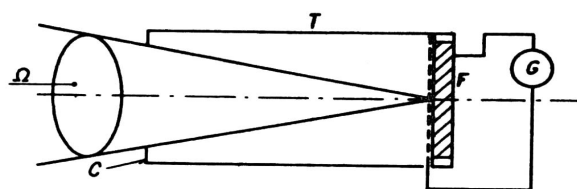
Při zpracovávání výsledků měření se z naměřených hodnot určí místně průměrná hodnota osvětlenosti a ověří se, zda odpovídá předepisovaným hladinám s přihlédnutím k době provozu soustavy, ke stavu svítidel, zdrojů atd. Většinou se určuje i minimální, popřípadě maximální hodnota osvětlenosti a posuzuje se dodržení požadavků na rovnoměrnost osvětlení.

Stanovuje se také měrný příkon osvětlovací soustavy, a to pro vnitřní prostory ve W.m^{-2} a na komunikacích v kW.km^{-1} . Výsledky měření umožňují stanovit též hodnotu činitele využití osvětlovací soustavy jako poměr světelného toku dopadlého na srovnávací rovinu k souhrnnému světelnému toku všech instalovaných zdrojů světla.

Po zhodnocení výsledků dobře provedených měření je možno doporučit nejen případné změny zdrojů světla, svítidel, doplnění počtu svítidel, či změnu jejich rozmístění, ale též úpravu způsobu a intervalu údržby osvětlovací soustavy.

5.5 Měření jasu

Dříve se měření jasu redukovalo na měření kolmé svítivosti přesně ohraničené a změřené plošky. Například na rozptylné kouli se vymezila černým papírem plocha 10 cm a změřila se její svítivost ze vzdálenosti asi 300 až 500 mm. Vhodnější je k měření jasů využít jasoměrů. Přípustná celková chyba jasoměrů pro přesná měření je $\pm 7,5\%$ (kalibrace max. po 2 letech), pro provozní měření $\pm 10\%$ (kalibrace max. po 3 letech) a pro orientační měření $\pm 15\%$ (kalibrace max. po 5 letech).



Nejjednodušší princip objektivního jasoměru je zřejmý z obr.5-14.

Obr. 5-14

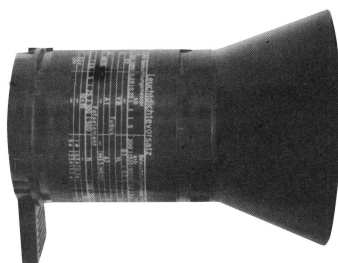
Princip objektivního jasoměru

T - černý tubus, F - fotonka,

G - galvanoměr, C - clona,

Ω - prostorový úhel odpovídající zornému poli přístroje

Na přijímač je nasazena trubka T, uvnitř černá, opatřená vpředu clonkou C s kruhovým otvorem, čímž je vymezen prostorový úhel Ω , v němž dopadají paprsky z měřené plochy na přijímač (fotočlánek) F. V popsaném uspořádání se fotočlánek F změří normálová osvětlenost E_N přijímací plochy čidla. Střední jas L plochy vymezené prostorovým úhlem Ω na sledovaném povrchu se pak určí ze vztahu



$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (\text{cd.m}^{-2}; \text{lx, sr}) \quad (5-6)$$

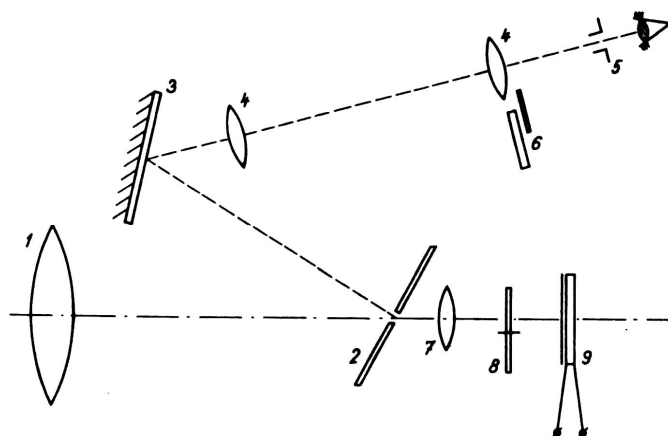
Příklad praktického provedení nastavce s fotočlánekem pro objektivní měření jasu je na obr. 5-15.

Obr. 5-15

Při měření jasu musíme mít vždy na zřeteli, že jasoměrem zjišťujeme střední hodnotu jasu měřené plochy, kterou vymezuje optika přístroje v závislosti na vzdálenosti jasoměru od měřeného povrchu. Proto je nutné vždy dbát na to, aby měřená plocha zahrnovala pouze povrch, jehož jas hodnotíme. U běžných objektivních jasoměrů toto není problém, neboť okolí měřené plochy je v okuláru vidět a měřená oblast je v zorném poli vyznačena např. kroužkem.

Podle velikosti plochy, jejíž jas se vyhodnocuje, resp. podle velikosti clon, určujících zorný úhel přístroje, se rozlišují jasoměry **bodové**, kterými lze měřit jas velmi malých plošek (pozorovaných například pod úhlem $6'$), a **integrační**, jimiž se zjišťuje jas mnohem větších ploch (pozorovaných např. pod úhlem 2°).

Většina fyzikálních jasoměrů je založena na tom, že měří světelný tok procházející clonou určitého tvaru a velikosti. V rovině této clony se zobrazuje zorným polem vymezená ploška, jejíž jas se určuje. Zásadní konstrukční schéma takového přístroje je na obr.5-16.



Obr. 5-16

Schematický náčrt konstrukčního uspořádání objektivního jasoměru, umožňujícího pozorovat okolí plošky, jejíž jas se měří.

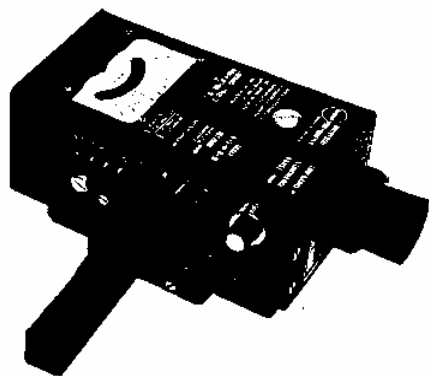
Objektiv 1 přístroje zobrazuje měřený záběr na plošku 2, na které je možno pozorovat obraz přes zrcátko 3 a optiku 4 okulárem 5. Do jeho zorného pole se zobrazuje i údaj stupnice měřícího přístroje 6.

Ve stínítku 2 je otvor, kterým projde světlo z měřené plošky pomocnou optikou 7 a filtry 8 (barevné i šedé pro změnu rozsahu) na fotočlánek 9, jehož proud se po zesílení přivede do měřícího přístroje. Velikosti otvorů v zrcadlech se obvykle volí tak, aby odpovídaly zorným polím o úhlech 6', 15', 30', 1° a 2°.

Podle mezinárodního doporučení CIE se jasoměry člení do čtyř tříd přesnosti označených písmeny L, A, B a C. Uvedeným třídám přesnosti odpovídají největší celkové přípustné chyby jasoměru 5; 7,5; 10 a 20%.

Příklad objektivního jasoměru je na obr.5-17. Jde o universální fotometr s ručkovým měřícím přístrojem vyrobený Švédskou firmou Hægner, který je kombinací jasoměru s luxmetrem. Jasoměr je opatřen křemíkovým korigovaným fotočlánkem a jeho optický systém má clonu 1°. Měření osvětlenosti umožňuje vnější, rovněž dobře korigovaná, křemíková fotonka o průměru 10 mm s kosinusovým nástavcem spojená s přístrojem dostatečně dlouhým vodičem.

Rozsahy pro měření jasu (resp. osvětlenosti) jsou od 3 do 100.000 cd.m^{-2} (resp. lx). Nejmenší čitelná hodnota je 0,025 až 0,05 cd.m^{-2} (resp. lx). Výrobce udává přesnost přístroje $\pm 5\%$.



Obr.5 – 17

Universální fotometr Hægner model S1. Přístroj je určen především pro objektivní měření jasu, ale je vybaven i vnějším fotočlánkem k měření osvětlenosti

Kvalitní objektivní jasoměry produkují i další známí výrobci fotometrických přístrojů, mezi nimi např. americká firma Spektra Pritchard. Patří k nim také německá firma Lichtmesstechnik Berlin, jejíž jasoměr série L 1009 (viz obr.5-18) je vybaven clonami 3°, 1°, 20', 6', popřípadě dokonce 2', resp. 2' x 20', digitálním měřícím přístrojem umožňujícím měření jasů v rozmezí od 0,0001 cd.m^{-2} do 19.990 kcd.m^{-2} , dále výstupem BCD, popřípadě interfacem IEEE-488, takže je umožněna přímá spolupráce přístroje s počítačem, resp. výstup na tiskárnu.



Obr. 5-18

Fotografie digitálního jasoměru typu L 1009 německé firmy Lichtmesstechnik Berlin

O měření jasů v určitém prostoru se vypracovává zpráva, jejíž obsah je obdobný jako obsah zprávy o měření osvětlenosti (viz odst. 5.4).

Pro vidění a rozlišování určitých detailů jsou důležité nejen absolutní hodnoty hladin jasů, ale rozhodující jsou rozdíly a poměry jasů, např. rozdíl jasu L_a rozlišované podrobnosti a jasu L_b jejího bezprostředního okolí, resp. **kontrast** k jasu, který se určuje z výrazu $k = |L_a - L_b| / L_b$.

Pro přímé měření kontrastu jasu na pracovních plochách jsou již rovněž vyvinuty speciální přístroje. Například dánská firma Brüel a Kjær dodává **měřič kontrastu jasu** typu 1100, včetně normálu kontrastu jasu typu 1104 s tmavým a světlým kruhovým povrchem se stabilními a přesně definovanými odraznými vlastnostmi, čímž se mohou napodobovat a ověřovat typické v praxi se vyskytující situace kontrastu jasu (jako např. papíru a vytištěných podrobností apod.). Přístroj je vybaven korigovaným fotočlánkem o průměru 8 mm instalovaným do tubusu a umožňuje měření jasů až do 200 kcd.m^{-2} při měřicím úhlu $i \pm 1,5^\circ$. Osu tubusu, resp. normálu přijímací plošky čidla je možno s použitím speciálního držáku natočit do směru osy pohledu pracovníka a poté se již v daných podmínkách měří jasy obou plošek zmíněného normálu kontrastu jasu, popřípadě jiných dvou hodnocených povrchů, resp. se může přímo určit hledaná hodnota kontrastu jasu.

Důležité je též měření jasů ve veřejném osvětlení. Průměrný jas povrchu vozovky se měří objektivními jasoměry vybavenými vhodnými clonami (odpovídajícími šířce kontrolované komunikace), a to z místa pozorovatele, které se předpokládá 1,5 m nad vozovkou v 1/4 šířky komunikace ve vzdálenosti 60 m před měřeným úsekem dlouhým 100 m. V této situaci odpovídá nejmenší měřená plocha na vozovce i při kruhové cloně jasoměru 6' ploše elipsy s malou osou asi 0,17 m a s velkou osou asi 12 m. Proto je volba tvaru a velikosti clony tak závažná. Vesměs se pro tyto účely dává přednost clonám obdélníkovým před kruhovými. Minimální a maximální hodnoty jasu povrchu komunikace se zjišťují z měření jasu ve stejném poli kontrolních míst jako při měření osvětlenosti. Clona jasoměru se volí tak, aby měřená plocha byla co nejmenší a nezasahovala do sousedních měřených míst. Provede-li se takto podrobné měření, stanoví se průměrný jas povrchu vozovky jako aritmetický průměr z hodnot jasů naměřených ve zmíněné síti kontrolních míst. Jas se měří vždy na suchém povrchu vozovky, u které jsou již ustáleny odrazné vlastnosti. To obvykle bývá až asi po roce běžného provozu.

Pro podrobné proměření jasů v mnoha bodech na komunikaci jsou vhodné jasoměry, které umožňují měřit jas z jedoucího automobilu při automatické registraci naměřených hodnot. Toto umožňují například jasoměry s kmitajícím zrcátkem, které při kmitočtu kývání zrcátka 5 Hz, rychlosti automobilu asi 55 km.h^{-1} , šířce vozovky 10 m, registrují každou setinu sekundy jednu hodnotu, čímž zajistí návaznost měření jak v podélném, tak i v příčném směru vozovky. Jiný způsob zjištění rozložení jasu na povrchu vozovky využívá obrazu snímaného televizní kamerou a hodnoceného na monitoru.

Nejsou-li k dispozici jasoměry, lze u difúzně odrážejících povrchů ve vnitřních prostorech stanovit jejich jasy L při známém činiteli odrazu ρ povrchu nepřímou z naměřených hodnot osvětlenosti E v kontrolovaném místě z výrazu $L = (\rho / \pi) \cdot E$ (cd.m^{-2} ; -, lx). Hodnota činitele odrazu se buď změří speciálními přístroji, nebo se zjistí s využitím průhledových barevných vzorníků, popřípadě je ji možno u difúzních povrchů informativně zjistit jen luxmetrem.

Nejprve se obvyklým způsobem změří osvětlenost E_d odpovídající toku dopadajícímu na uvažovanou plochu. Poté se fotočlánek umístí proti odrážející ploše do takové vzdálenosti, aby údaj měřícího přístroje byl ustálený a vyloučila se tak chyba vznikající zastíněním odrážejícího povrchu čidlem. V této poloze se změří osvětlenost E_p odpovídající odraženému světelnému toku. Hledaný činitel odrazu ρ je roven podílu takto zjištěných osvětleností $\rho = E_p / E_d$.

Nepřímá metoda určení jasu povrchu vozovky je založena na zjištění jasového součinitele osvětlení $e_{lp} = E_p / L_p$ z vypočtených (bodovou metodou) průměrných hodnot osvětleností a jasů v celém rozsahu sledovaného pole kontrolních míst a poté výpočtu hledané průměrné hodnoty jasu L_{pt} z průměrné, z naměřených hodnot určené, osvětlenosti E_{pt} z výrazu

$$L_{pt} = E_{pt} / e_{lp}.$$

Jasový součinitel osvětlenosti e_{lp} platí ovšem pouze pro podmínky, v jakých byl stanovený, to znamená pro určité geometrické uspořádání osvětlovací soustavy, daná svítidla a zdroje a jen pro konkrétní povrch vozovky.

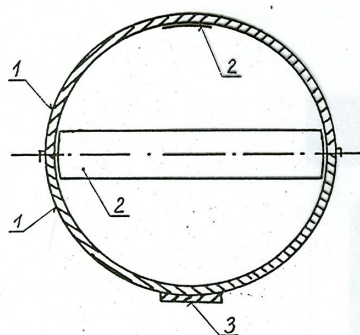
5.6 Měření integrálních charakteristik světelného pole

Metodika měření světelného vektoru vychází ze skutečnosti, že průmět světelného vektoru do směru normály k určité rovině je roven rozdílu osvětleností obou stran této roviny. Při měření se využívá dvou stejných k sobě připevněných fotočlánků zapojených tak, aby měřily rozdíl jejich osvětleností. Nejčastěji se však světelný vektor stanovuje určením jeho průmětů do zvolených tří os pravouhlé souřadnicové soustavy.

Měření střední kulové a válcové osvětlenosti se provádí přístroji [19] vybavenými obdobně jako luxmetry, ovšem kosinusové nástavce jsou nahrazeny zvláštními nastavci z difúzně propouštějícího materiálu. Tvar nástavců odpovídá typu modelového přijímače, resp. měřené integrální charakteristice.

Světelný vektor a kulová osvětlenost se obdobně jako jasy pro hodnocení oslnění měří v kontrolních bodech umístěných v polovině stěn vnitřního prostoru ve vzdálenosti 1 m od povrchu stěny a ve výšce 1,5 m nad podlahou. Pro měření světelného vektoru, kulové a válcové osvětlenosti lze volit i další kontrolní body důležité pro zrakovou činnost. Zpravidla se vybírají body z půdorysu, v nichž se měřila hladina osvětlenosti. Výška těchto kontrolních bodů nad podlahou se volí podle situace buď v průměrné výšce očí sedící osoby (1,2 m) nebo stojící osoby (1,5 m).

Podle mezinárodního doporučení CIE se zmíněné speciální nástavce pro měření skalárních integrálních charakteristik z hlediska přesnosti měření člení obdobně jako luxmetry, do čtyř tříd přesnosti označených L, A, B a C. Přípustné chyby speciálních nástavců pro měření střední kulové osvětlenosti jsou pro třídu L a A do 10%, pro třídu B do 15% a pro třídu C do 20%. Maximální dovolené chyby nástavců pro měření střední válcové osvětlenosti jsou pak pro třídu L a A 5%, pro třídu B 10% a pro třídu C 15%.



Pro měření střední kulové osvětlenosti ($E_{4\pi}$) se užívá nástavce ve tvaru koule (viz obr. 5-19). Nástavec je složen ze dvou polokoulí 1 vyrobených z materiálu, který má jednak vysokou propustnost a který současně také propuštěné světlo velmi dobře rozptyluje; např. ze speciálního plexiskla.

Obr.5-19

Schéma přijímače pro měření střední kulové osvětlenosti navržené Krochmannem

Otvor 3 pro fotočlánek je vytvořen ve spodní části dolní půlkoule. Aby osvětlení přijímací plochy fotočlánku bylo prakticky nezávislé na směru dopadu světla, jsou dovnitř koule vlepeny korekční proužky 2 z materiálu s malou propustností a s velkou odrazností světla. Takto se dosáhne toho, že při dopadu světla z různých směrů jsou odchylky od střední hodnoty menší než 10%. Výrobce uvádí, že nástavec dovoluje měřit $E_{4\pi}$ s maximální chybou menší než $\pm 8\%$.

Vzhledem k tomu, že střední kulová osvětlenost je rovna střední hodnotě osvětlenosti povrchu koule, lze $E_{4\pi}$ též určit přibližně jako střední hodnotu jen ze šesti hodnot osvětleností E_{+x} , E_{-x} , E_{+y} , E_{-y} , E_{+z} , E_{-z} naměřených v kontrolním bodě v rovinách kolmých k osám $+x$, $-x$, $+y$, $-y$, $+z$, $-z$ zvoleného pravouhlého souřadnicového systému, to znamená na stěnách fiktivní modelové krychle zanedbatelných rozměrů. $E_{4\pi}$ pak vlastně nahrazujeme střední kubickou osvětleností.

Ze zmíněných šesti osvětleností je možno určit i velikost a orientovaný směr světelného vektoru e .

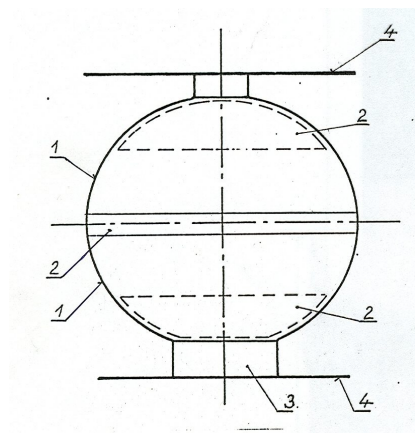
Pro průměty ε_x , ε_y , ε_z vektoru e do souřadnicových os x , y , z platí vztahy

$$\varepsilon_x = E_{+x} - E_{-x} = \varepsilon \cdot \cos\gamma_x ; \quad \varepsilon_y = E_{+y} - E_{-y} = \varepsilon \cdot \cos\gamma_y ; \quad \varepsilon_z = E_{+z} - E_{-z} = \varepsilon \cdot \cos\gamma_z$$

kde úhly γ_x , γ_y , γ_z jsou úhly vektoru e se souřadnicovými osami $+x$, $+y$, $+z$.

Velikost ε vektoru e se stanoví ze známého výrazu $e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2 + e_z^2}$.

Pro měření střední válcové osvětlenosti by měl, v souladu s definicí této veličiny, mít nástavec tvar pláště válečku svisle umístěného do daného bodu pole, a to při neprůsvitných základnách válečku. Ovšem při popsaném uspořádání nástavce byly zjištěny značné chyby měření při dopadu paprsků pod různými úhly měřenými od osy válcového přijímače. K eliminaci úhlových chyb bylo nutno zvolit náhradní tvar nástavce podle obr.5-20.



Nástavec je složen ze dvou polokoulí 1 bez vrchlíků provedených z plexiskla o tloušťce 3 mm a vybavených korekčními proužky 2. Základny nástavce tvoří neprůsvitné kruhové clony 3. Otvor 4 pro fotočlánek je ve spodní části nástavce. Výrobce uvádí, že při použití popsaného nástavce nepřesáhne maximální chyba měření $E_c \pm 8\%$.

Obr. 5-20
Náčrt přijímače používaného pro měření střední válcové osvětlenosti

Velmi dynamický rozvoj techniky v oblasti fotočidel a vyhodnocovacích elektronických systémů umožnil, aby se při měření integrálních charakteristik mohlo využívat fotočlánek s relativně malým průměrem přijímací plochy, např. 10 mm. To umožnilo vyvinout nové, rozměrově menší a praktičtější nástavce pro měření jednotlivých veličin. Např. průměr nového přijímače pro měření válcové osvětlenosti nedosahuje 5 cm a výška přijímací plochy válečku je asi 4 cm. Jednotlivá maxima úhlové chyby přitom nepřesahují 4 %.

Střední válcovou osvětlenost je možno též stanovit jako střední hodnotu osvětlenosti všech svislých rovin v daném bodě. Tyto osvětlenosti lze snadno změřit otáčením fotočlátku svisle umístěného v kontrolním bodě pole. Běžně postačí měřit vertikální osvětlenosti po 30° a ze změřených 12 hodnot stanovit aritmetický průměr. Připustí-li se větší odchylka od střední válcové osvětlenosti (E_c), lze pracovat s modelovým přijímačem ve tvaru krychle a hodnotu E_c nahradit střední hodnotou osvětlenosti čtyř stěn fiktivní modelové krychle zanedbatelných rozměrů.

5.7 Nejistoty měření

Při rozboru nejistot světelně technických měření je třeba přihlédnout k dílčím nejistotám vyplývajícím zejména z těchto možných zdrojů odchylek :

- I. Nejistota kalibrace přístroje (uvedena v kalibračním listu)
- II. Nejistoty plynoucí z možných odchylek měřidel, zvláště vlivem chyby spektrální, směrové, linearit, displeje, únavy fotonky, teploty, modulace světla, vyrovnaní, citlivosti na UV a IR záření
- III. Nejistoty plynoucí z chyb metody (postupu) měření, zvláště vlivem chyby plošné a výškové umístění fotonky, směrování jasoměru, časového souběhu odečítání, nestability napájecího napětí, počtu a umístění měřících bodů
- IV. Nejistoty plynoucí z postupu vyhodnocování, zvláště vlivem chyby zaokrouhlování, korekcí na kalibrační křivku, korekcí na druh světla.

Dílčí standardní nejistoty vyplývající z jednotlivých možných zdrojů nejistot lze vyhodnocovat buď jako nejistoty u_A typu A nebo u_B typu B.

Je-li pro určitý zdroj nejistoty k dispozici dostatečně velký (> 20) soubor dat získaných z opakovaných měření provedených za stejných podmínek, lze tuto dílčí nejistotu vyhodnotit jako nejistotu u_A typu A z rovnice pro směrodatnou odchylku střední hodnoty z daného souboru dat

$$u_A = \frac{100}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad [\%]$$

kde x_i je naměřená hodnota,

$\bar{x}$ střední hodnota z daného souboru,

n počet opakovaných měření (počet dat v daném souboru).

V ostatních případech se dílčí nejistoty pro jednotlivé zdroje chyb stanovují jako standardní nejistoty u_B typu B podle vztahu

$$u_B = z_{\max} / \chi \quad [\%]$$

kde $z_{\max}$ je předpokládaná maximální odchylka pro uvažovaný dílčí zdroj nejistoty [%]

χ je bezrozměrný koeficient daný pravděpodobností statistického rozdělení sledované dílčí chyby. Pro normální Gaussovo statistické rozdělení chyb se pro užší interval uvažuje $\chi = 2$; pro rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení $\chi = \sqrt{3} \doteq 1,73$.

Výsledná **kombinovaná standardní nejistota** u se ze všech zjištěných dílčích nejistot stanoví ze vztahu

$$u = \sqrt{(u_{A1})^2 + (u_{A2})^2 + (u_{A3})^2 + \dots + (u_{B1})^2 + (u_{B2})^2 + (u_{B3})^2 + \dots} \quad [\%]$$

Aby se zvýšila pravděpodobnost, že se správná hodnota zjišťované veličiny vyskytuje ve vymezeném intervalu $< -u; +u >$ daném stanovenou nejistotou, na 95 %, pracuje se s **rozšířenou nejistotou** U rovnou dvojnásobku výsledné kombinované standardní nejistoty u

$$U = 2 \cdot u \quad [\%]$$

Podle normy ČSN 36 0011-1 (Měření osvětlení vnitřních prostorů , část : 1 Základní ustanovení)

by pak rozšířená nejistota měla být u měření přesných $U \leq 8$ [%],

provozních $8 < U \leq 14$ [%] a

orientačních $14 < U \leq 20$ [%].