

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 fotočlánky. To umožňuje provádět jak rychlá a snadná provozní měření (zvl. osvětleností 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 %.

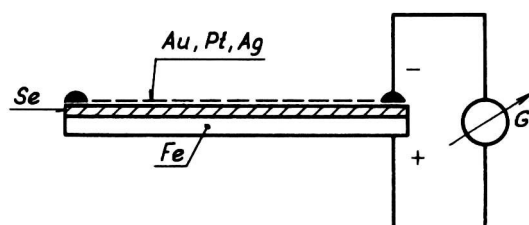
Pro laboratorní světelně technická měření je třeba mít k dispozici vhodné etalony (normály) svítivosti (popřípadě i jasu) a světelného toku, které je třeba pravidelně ověřovat a kontrolovat (např. žárovkové normály po každých 15 h hoření, nejméně však jednou za rok).

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 zaprášeny. 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 normalů. Pokud jde o samotné přístroje, patří k nejčastějším zdrojům nejistot měření nedokonalá shoda spektrální citlivosti fotočlánků 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.

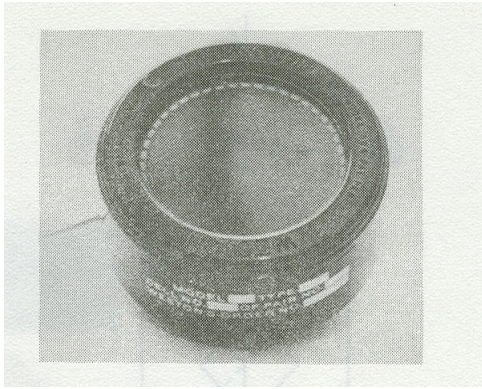
Před každým měřením je třeba ponechat jak zkoušené zdroje, tak i normály dostatečně dlouho zahořet, aby se ustálily jejich světelně technické i elektrické parametry. Např. žárovky se zahořují přibližně 5 minut, ale výbojové zdroje světla asi 20 minut podle jejich náběhových charakteristik.

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



Obr. 5-1

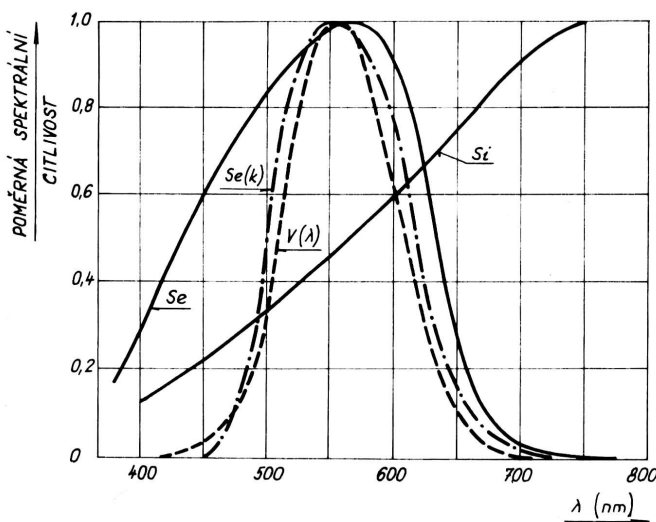
Základní deska fotočlánku je železná, popřípadě hliníková. Vrstva křemíku, resp. selenu je pokryta průsvitnou vodivou vrstvičkou z platiny, stříbra nebo zlata (obr. 5-1). Po obvodě fotonky je sběrný kroužek pro odvádění elektrického proudu. Ozáří-li se tenká vrstva křemíku či selenu, nanesená na kovové 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.



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

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

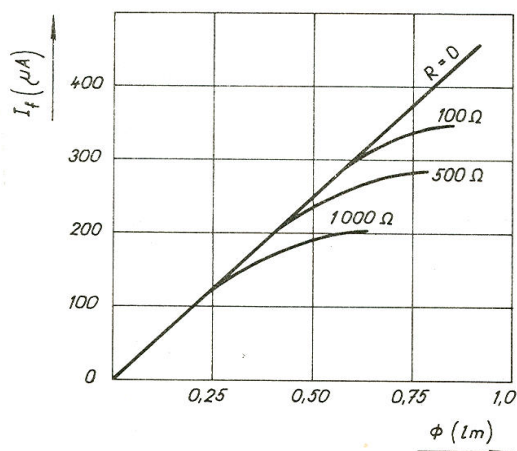
Spektrální rozložení poměrné citlivosti nekorigovaného fotočlánku (viz obr.5-3: křivka S_e - selénový fotočlánek, křivka S_i - křemíkový fotočlánek) je odlišné od průběhu poměrné spektrální citlivosti oka normálního pozorovatele [křivka $V(\lambda)$]. Měří-li se proto s nekorigovaným fotočlánkem, jsou údaje přečtené na měřicím 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 selénovými fotočlánky 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

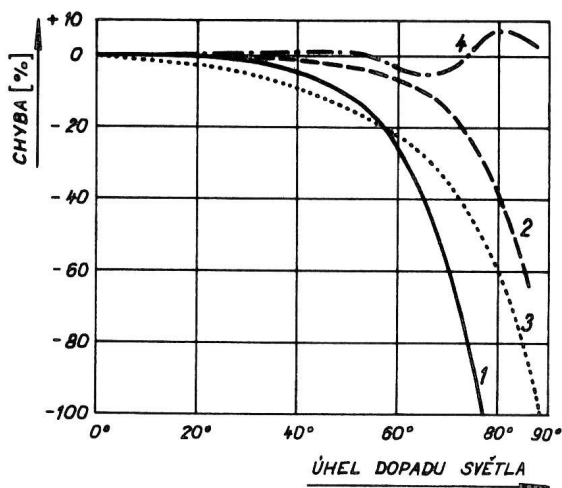
V porovnání s křemíkovými fotočlánky je zmíněná závislost výraznější u fotočlánků selénových (obr.5-4). Je patrné, že k dosažení vyhovující linearity musí proto mít vnější obvod selénového fotočlánku odpor menší než 100Ω . U křemíkových fotonek je linearita závislosti fotoproudu na osvětlenosti zachována 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 fotočlánek 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 fotočlánců 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 fotočlánců 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 fotočlánců 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 rozptylného skla.



Obr. 5-5

Chyby různých fotočlánců v závislosti na úhlu dopadu světla

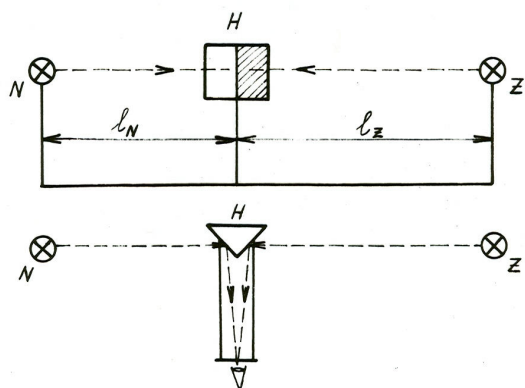
- 1 - fotočlánek s přečnávající obrubou,
- 2 - fotočlánek bez obruby,
- 3 - fotočlánek s korekčním filtrem,
- 4 - fotočlánek s kosinusovým nástavcem

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 kolejniček, 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 hlavice 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 rozptylné, 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. Stejně jas obou částí pole fotometru lze dosáhnout za předpokladu stejné chromatičnosti světla etalonu a zkoušeného zdroje v souladu se zákonem čtverce vzdálenosti změnou vzdáleností l_N respektive l_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 hranolem pro měření na stejný jas

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

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

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 vyrovnání 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

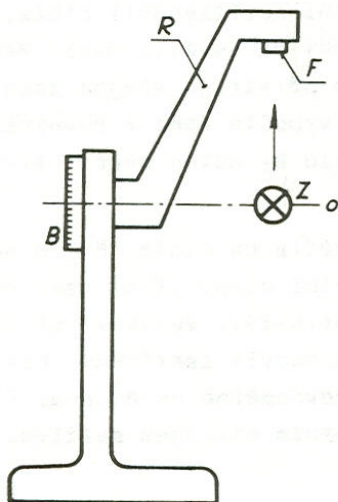
Čáry svítivosti světelných zdrojů lze měřit na fotometrické lavici, a to zjišťováním svítivosti postupně v různých směrech. Podle požadované přesnosti se měří po 10° či 5° , nejčastěji však v souladu s požadavky evropských norem po 2° . Běžně se však čáry svítivosti zdrojů a svítidel měří přístroji, 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.

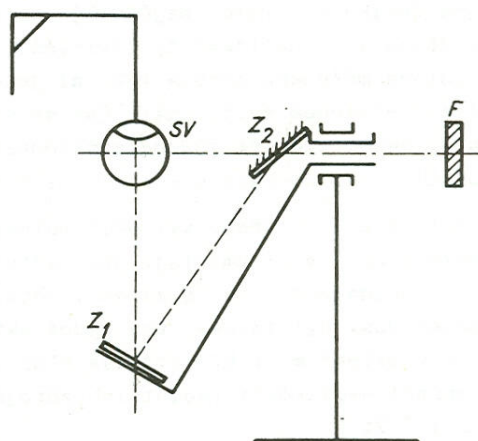
Goniofotometry s otočným zdrojem či svítidlem nejsou vhodným řešením, neboť u mnohých zdrojů je světelný tok závislý i na poloze zdroje.

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.

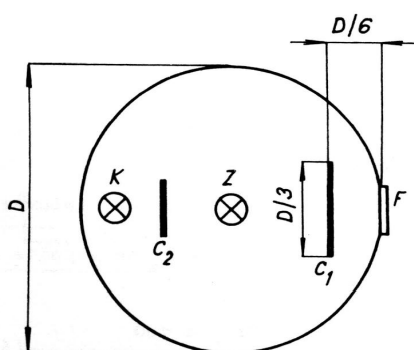
Konstrukce všech typů goniofotometrů musí být dostatečně tuhá, aby nedocházelo během rotace k deformaci či kývání nosných částí, čímž by se zaváděly přídavné chyby měření. Svítivost se obvykle v různých směrech neměří absolutně, ale stačí relativní měření, které dovoluje nakreslit tvar zjištěné křivky 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 kvádr, 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

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

kde k_i je konstanta integračního fotometru

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

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

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

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

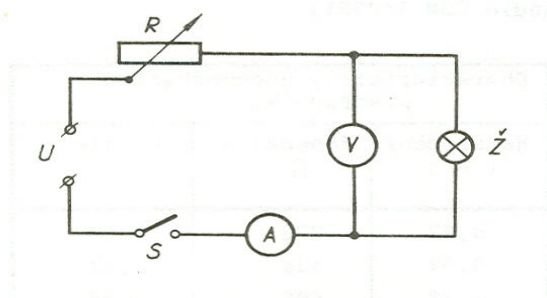
Obdobným postupem se může v integrátoru změřit i světelný tok svítidla. Pak je možno stanovit též účinnost svítidla jako poměr světelného toku vyzařovaného svítidlem ke světelnému toku zdrojů instalovaných ve svítidle.

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 přímodopadajícího 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.

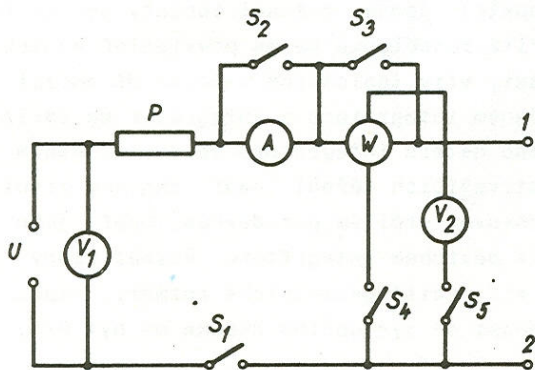
Přesnost měření světelného toku při použití teplotních pracovních etalonů bývá $\pm 2\%$, při měření zářivek a výbojek asi $\pm 3,5\%$. Při srovnávacích měřeních se žárovkami a vysokotlakými výbojkami musí být teplota okolí kulového integrátoru v rozmezí 22 až 27°C, při provozních měřeních 18 až 29°C. 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, Ž - zkoušená žárovka,
A - ampérmetr, V - voltmetr, S - vypínač

Při měření zářivek se měřící 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

Obr. 5-11 a

Obr. 5-11 b

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

U - zdroj napětí, P - předřadník, A - ampérmetr, W - wattmetr, V₁, V₂ - voltmetry,

S₁ až S₅ - vypínače, Z - zářivka, RV - výbojka, ZP - zapalovač

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

Měření osvětlenosti je v praxi nejčastější fotometrickou úlohou, při níž se ověřuje rozložení hladin osvětlenosti v různých osvětlovacích soustavách. K měření osvětlenosti se používají objektivní přístroje, **luxmetry**, které se skládají z přijímače s korigovaným (nejčastěji křemíkovým) fotočlánkem, opatřeným kosinusovým nástavcem, a z měřicího a vyhodnocovacího systému s digitálním nebo analogovým indikátorem.

Běžně se luxmetry zařazují do čtyř tříd přesnosti označovaných číslicemi 1, 2, 3, 4, popř., podle mezinárodních doporučení [CIE Illuminance Meters and Luminance Meters, 1983.] písmeny L, A, B, C. Uvedeným třídám odpovídají největší dovolené souhrnné chyby f_c luxmetrů 2, 5, 10 a 20 %.

Při tom se sleduje celkem jedenáct možných 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. (Viz též ČSN EN 13032-1 Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel).

Luxmetry třídy přesnosti L, A a B se využívají jako sekundární etalony a pro přesná laboratorní měření. Pro běžná provozní měření osvětlenosti postačují přístroje s třídou přesnosti B, poř. C.

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 fotočláanky, měnit, je zapotřebí luxmetry pravidelně kalibrovat prostřednictvím pověřeného (akreditovaného) pracoviště (např. ČMI - Český metrologický institut, EZÚ – Elektrotechnický zkušební ústav), a to podle ustanovení zákona č.119/200 o metrologii (popřípadě podle pokynů výrobce, jsou-li přísnější než uvádí zákon) a požadavků Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: 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; tím je zajištěno, že výsledky měření při čtení údajů nejsou nevhodně ovlivněny. Je-li fotočláanek zabudován přímo v pouzdře měřicího přístroje, je třeba, aby byl přístroj vybaven dálkově ovládanou fixací naměřené hodnoty. 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, lze je použít jen pro orientační měření. Podobné malé luxmetry jsou též základem expozimetrů užívaných ke zjištění potřebné doby osvitů při fotografování.



Příkladem přístroje určeného k provoznímu měření osvětlenosti je 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 nastavcem.

Přístroj lze zařadit do třídy přesnosti C.

Obr.5-12

Digitální provozní luxmetr typu PU 550
Metra Blansko

Příkladem přesného, komplexněji zaměřeného laboratorního přístroje je např. radiometr a luxmetr 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 poloválčové 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 poloválčové, válcové a kulové osvětlenosti

Při měření osvětlenosti je třeba dbát na to, aby nebyl překročen rozsah měřicího přístroje a aby (zejména u starších typů přístrojů) nedošlo k ozáření čidla nedovoleným světelným tokem. U luxmetrů s několika rozsahy a ručkovými měřicími přístroji se doporučuje neodečítat údaje v rozsahu do jedné pětiny stupnice, aby se takto nezvyšovala (již tak dost vysoká) nejistota měření.

Výsledky měření osvětlenosti jsou ovlivněny i mnoha dalšími faktory. Zvláště je třeba brát v úvahu změny světelného toku zdrojů v závislosti na kolísání napájecího napětí, na teplotě okolí a na době jejich provozu. Respektovat je třeba i míru znečištění světelné činných ploch, a to jak svítidel, tak i osvětlovaného prostoru. 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 světelné zdroje čisté, nepoškozené a musí odpovídat projektu. Svítidla i zdroje musí být instalovány ve správné poloze.

S ohledem na vlastnosti světelných zdrojů je třeba při měření osvětlenosti dodržovat především tyto zásady :

- 1) Nové zářivky a výbojky musí před měřením celkem svítit alespoň 100 h a nové žárovky alespoň 6 h (při jmenovitém napětí), neboť vlivem stárnutí zdroje klesá světelný tok. V záznamu o měření se uvádí, kolik hodin celkem byly již světelné zdroje v provozu.
- 2) Pro dostatečné zahoření zdrojů se osvětlenost v soustavách s výbojovými zdroji měří asi po 20 minutách nepřetržitého provozu. U uzavřených zářivkových svítidel může být stabilizace i

delší. 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 (zejména u zářivek). Proto je třeba vždy udát při jaké teplotě okolí se měřilo.
- 4) Světelný tok zdrojů se mění s napájecím napětím. Proto se při měření musí kontrolovat i napětí (odečítá se nejlépe současně s údaji o osvětlenosti). Naměřené hodnoty osvětlenosti se korigují v závislosti na odchylce skutečného napětí U od jeho jmenovité hodnoty U_N podle údajů výrobce. Nejsou-li tyto údaje k dispozici, násobí se naměřené hodnoty osvětlenosti korekčním činitelem k_u , který se vypočítá z výrazu

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

kde c je exponent závislý na druhu světelného zdroje (pozn.: nemusí být stejný v celé oblasti odchylek U od U_N). Obvykle udávané orientační průměrné hodnoty exponentu c jsou pro některé duhy světelných zdrojů uvedeny v tab.5-4.

Tab.5 - 4 Orientační 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 znečištění svítidla, a proto je v protokolu zapotřebí tento stav uvést.

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.

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 osvětlenost měří v pravidelné čtvercové síti kontrolních míst.

V prázdných místnostech nebo v jejich funkčně vymezených částech se půdorys rozdělí na dílčí plochy o straně přibližně 1 až 2 m (výjimečně u rozsáhlých ploch i 6 m) a osvětlenost se měří v úrovni srovnávací roviny uprostřed každé dílčí plochy. Průměrná osvětlenost je pak rovna aritmetickému průměru všech naměřených hodnot.

Jestliže se síť kontrolních bodů shoduje se sítí svítidel celkového osvětlení, je třeba počet kontrolních míst zvýšit, aby nevznikaly větší chyby. Počet kontrolních míst se zvětšuje i proto, aby síť těchto bodů odpovídala tvaru měřené místnosti.

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 vykonávají 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 v obvyklé pracovní pozici. Důležité je, aby se fotočlánek luxmetru umístil na skutečnou pracovní rovinu, 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. Měří se za suchého počasí, bez sněhové pokrývky a pokud možno za čistého ovzduší. Světlo výkladních skříní apod. se vyloučí např. vhodným zastíněním fotočlátku. Na komunikacích se osvětlenosti měří v pravidelné síti kontrolních míst ve vodorovné rovině ve výšce do 20 cm nad povrchem vozovky, při čemž umístění fotočlátku do vodorovné polohy se zajišťuje např. křížovým (tzv. kardanovým) klobem. 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.

Protokol a zpráva o měření musí (ČSN 36 0011) obsahovat označení a charakteristiku kontrolovaného prostoru, účel, druh a jeho přesnost (včetně odhadu nejistoty 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 údaje o napájecím napětí a teplotě okolí v průběhu měření, popis podmínek a způsobu měření, naměřené a korigované hodnoty osvětlenosti zpracované tabelárně (popř. zaznamenané do výkresů), porovnání výsledků měření (u nových soustav po vynásobení udržovacím činitelem uvažovaným v projektu) s požadavky norem, zhodnocení výsledků měření s přihlédnutím k nejistotám měření a s uvedením, zda soustava vyhovuje platným normám, popřípadě se uvede návrh na úpravu osvětlovací soustavy, a konečně soupis použitých přístrojů s údaji o jejich přesnosti a kalibraci. V závěru nesmí chybět datum a čas měření, jména pracovníků, kteří měření prováděli nebo byli měření přítomni a rovněž 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 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ a na komunikacích v $\text{kW}\cdot\text{km}^{-1}$. 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

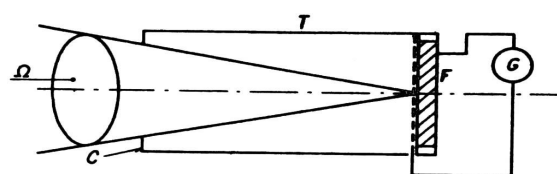
Dříve se měření jasu redukovalo na měření kolmé svítivosti přesně ohraničené a změřené plošky. Například na rozptýlné kouli se vymezi černým papírem plocha 10 cm a změřila se její svítivost ze vzdálenosti asi 300 až 500 mm. Vhodnější je k měření jasů využít jasoměru. Požadavky na jasoměry jsou shrnuty v normě ČSN 360011. Přípustná celková chyba jasoměru pro přesná měření je $\pm 7,5\%$ (kalibrace max. po 2 letech), pro provozní měření $\pm 10\%$ (kalibrace max. po 3 letech).

Pozn. 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%.

Přísnější podmínky jsou stanoveny (ČSN EN 13032-1) pro jasoměry pro měření parametrů svítidel.

Jasoměry pro přesná a provozní měření mají být přizpůsobeny pro upevnění na stativ, umožňující měřit jas v různých směrech prostoru.

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



Obr. 5-14

Princip objektivního jasoměru

T - černý tubus, F - fotonka,

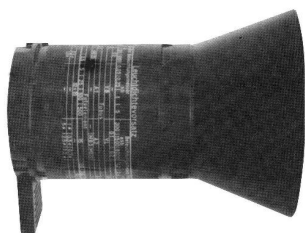
G - galvanoměr, C - clona,

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 nástavce s fotočlánekem pro objektivní měření jasu je na obr. 5-15.



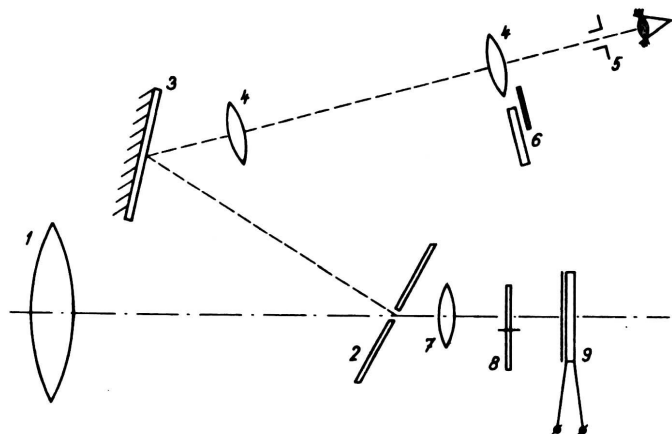
Obr. 5-15

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°).

Při měření jasu je třeba mít vždy na zřeteli, že se jasoměrem zjišťuje střední hodnotu jasu měřené plochy, kterou vymezuje optika přístroje v závislosti na vzdálenosti jasoměru od měřeného povrchu. Proto je nutné dbát na to, aby měřená plocha zahrnovala pouze povrch, jehož

jas se hodnotí. 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.

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.

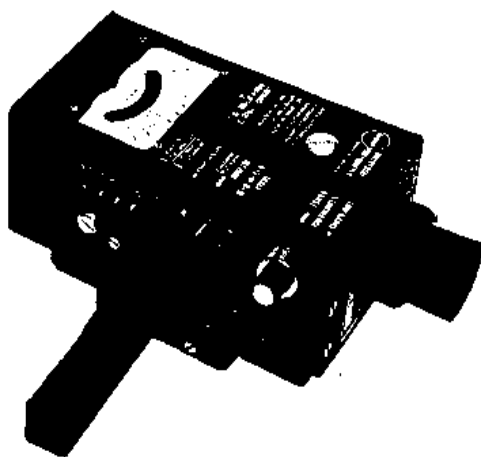
Objektiv 1 přístroje zobrazuje měřený záběr na plošku 2, na které je možno pozorovat obraz přes zrcátko 3 a optiku 4 okulárem 5. Do jeho zorného pole se zobrazuje i údaj stupnice měřícího přístroje 6.

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°.

Příklad objektivního jasoměru je na obr.5-17. Jde o univerzální 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

Univerzální 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 měřicím 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 Kjaer 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 nepřímo 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.

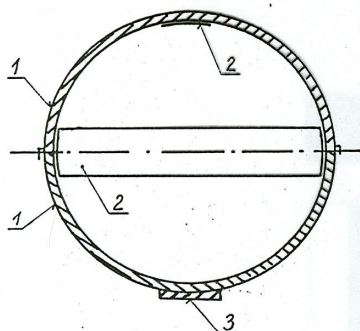
5.6 Měření integrálních charakteristik světelného pole

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 fotočláneků 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 [5.2] vybavenými obdobně jako luxmetry, ovšem kosinusové nástavce jsou nahrazeny zvláštními nástavci 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 [4.3] 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 fotočláneku 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 pravoúhlého 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 ϵ .

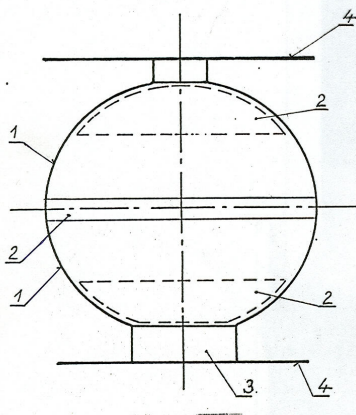
Pro průměty ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z vektoru ϵ do souřadnicových os x , y , z platí vztahy

$$\epsilon_x = E_{+x} - E_{-x} = \epsilon \cdot \cos\gamma_x ; \quad \epsilon_y = E_{+y} - E_{-y} = \epsilon \cdot \cos\gamma_y ; \quad \epsilon_z = E_{+z} - E_{-z} = \epsilon \cdot \cos\gamma_z$$

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

Velikost ϵ vektoru ϵ se stanoví ze známého výrazu $\epsilon = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2}$.

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 měření 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 fotočlánků 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 fotočlánku svisle umístěného v kontrolním bodě pole. Běžně postačí měřit vertikální osvětlenosti po 30° a ze změřených 12 hodnot stanovit aritmetický průměr. Pripustí-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

Přesnost měření, tj. míra souhlasu naměřené hodnoty s pravou (skutečnou) hodnotou sledované veličiny, byla dříve určována chybou měření, tedy rozdílem mezi výsledkem měření a pravou (skutečnou) hodnotou sledované veličiny. Vzhledem k tomu, že pravou hodnotu veličiny neznáme, nemůžeme určit ani chybu měření. Abychom při měřeních měli k dispozici alespoň určitou vztahnou hodnotu, zavádí se tzv. *konvenčně pravá hodnota*, což je hodnota sledované veličiny, která pro daný účel nahrazuje její pravou hodnotu, např. hodnota referenčního etalonu aj.. V souvislosti s tím se pak hovoří o *absolutní chybě měření*, rovné rozdílu mezi naměřenou hodnotou a konvenčně pravou hodnotou veličiny.

Chyba měření se dělí na chybu náhodnou (složka chyby měření, která se při opakovaných měřeních nepředvídatelně mění) a na chybu systematickou (zůstává při opakovaných měřeních stálá nebo se mění předvídatelným způsobem). Systematická chyba se skládá ze systematické chyby měřicího zařízení (měřidla) a ze systematické chyby metody. Systematické chyby měřidla se určují porovnáváním jeho údajů s etalonem, tedy *kalibrací*. Dokladem o kalibraci je *kalibrační list*, který obsahuje hodnoty systematických chyb měřidla a informace o nejistotě jejich určení. Na základě údajů v kalibračním listu lze některé složky systematické chyby přístroje korigovat buď přičtením korekce k výsledku měření, nebo jeho vynásobením korekčním činitelem. I kdyby se podařilo odhalit všechny zdroje systematických chyb a tyto chyby korigovat, přesto by zůstala určitá pochybnost (nejistota) o tom, do jaké míry se zjištěný korigovaný výsledek shoduje s pravou hodnotou měřené veličiny.

V současnosti se proto přesnost měření, vyjadřuje právě **nejistotou** měření. Jde o parametr, který se přidružuje k výsledku měření a který udává interval hodnot okolo výsledku měření, v němž lze s určitou pravděpodobností očekávat výskyt pravé hodnoty měřené veličiny.

Základní charakteristikou nejistoty je standardní nejistota (u) vyjádřená hodnotou směrodatné odchylky. Standardní nejistota se udává buď v hodnotách měřené veličiny (*absolutní standardní nejistota*) nebo poměrem absolutní nejistoty a hodnoty příslušné veličiny (*relativní standardní nejistota*).

Pro jeden z možných zdrojů chyby měření (pro jednu z možných příčin nejistoty) se standardní nejistota může stanovit

- statistickou analýzou série naměřených hodnot, tedy z opakovaných měření stejné veličiny. V takovém případě je výsledkem standardní nejistota **typu A**;
- jinými způsoby, pak je výsledkem standardní nejistota **typu B**.

Příčiny nejistot typu A jsou neznámé a proto se vyčíslují statistickým zpracováním souboru naměřených dat. Např. při n opakovaných měřeních (při tom by mělo být $n > 20$) určité veličiny X se získá n naměřených hodnot $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$. Aritmetický průměr \bar{x} z naměřených hodnot se určí z výrazu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.7)$$

Standardní nejistota u_{Ax} typu A udaná v procentech a vztažená ke zjištěnému aritmetickému průměru \bar{x} se pak stanoví s využitím výběrové směrodatné odchylky střední hodnoty z rovnice

$$u_{Ax} = \frac{100}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\%) \quad (5.8)$$

Standardními nejistotami typu B se obvykle charakterizují známé příčiny chyb s určitou pravděpodobností jejich výskytu okolo pravé, resp. konvenčně pravé hodnoty. K takovým příčinám nejistot metody měření patří např. nepřesné umístění fotočlánku v kontrolním bodě, nesprávné umístění čidla do vodorovné polohy aj. Pokud jde o rozdělení odchylek, nejčastěji se uvažuje rozdělení normální (Gaussovo) nebo rovnoměrné (pravoúhlé). Normální rozdělení přichází v úvahu, pokud je sledovanou chybou zatížen jen malý počet měření. Není-li však možno v rámci daného intervalu předpokládat soustředění odchylek a zmíněná chyba se může v daném intervalu vyskytnout kdekoliv, uvažuje se rozdělení rovnoměrné.

Určuje-li se pro konkrétní zdroj chyby nejistota u_B typu B, vychází se z předpokládané maximální velikosti z_{\max} (%) odchylky (např. největší dovolená chyba uvedená v dokumentaci, největší předpokládaná odchylka v nastavení fotočlánku aj.), jejíž překročení se v uvažovaném intervalu neuvažuje, a nejistota u_B se vypočte ze vztahu

$$u_B = \frac{z_{\max}}{\chi} \quad (\%) \quad (5.9)$$

kde χ je činitel (bezrozměrný) daný pravděpodobností statistického rozdělení uvažované chyby.

Pro normální Gaussovo rozdělení chyby se volí $\chi = 2$, je-li překročení z_{\max} málo pravděpodobné; je-li z_{\max} nepřekročitelné uvažuje se $\chi = 3$. Pro rovnoměrné (obdélníkové) rozdělení se volí $\chi = \sqrt{3} \doteq 1,73$.

Výsledná **kombinovaná standardní nejistota** u_C (%) se podle Gaussova principu šíření nejistot stanoví sloučením všech dílčích nejistot, ať již typu A či typu B, zjištěných pro jednotlivé uvažované zdroje chyb, ze vztahu

$$u_C = \sqrt{(u_{A1})^2 + (u_{A2})^2 + (u_{A3})^2 + \dots + (u_{B1})^2 + (u_{B2})^2 + (u_{B3})^2 + \dots} \quad (5.10)$$

Pravděpodobnost, že rozdíl mezi naměřenou a pravou (skutečnou) hodnotou nepřekročí určenou standardní nejistotu, závisí na rozdělení chyb. Při normálním rozdělení chyb je tato pravděpodobnost 68,3 % a při rovnoměrném rozdělení 57,7 %. Pro praktické použití jsou však uvedené hodnoty pravděpodobnosti nízké.

Požaduje-li se pravděpodobnost podstatně vyšší, udává se **rozšířená standardní nejistota** U , která se stanoví z výrazu

$$U = k_U \cdot u_C \quad (5.11)$$

kde činitel k_U rozšíření se obvykle volí $k_U = 2$.

V takovém případě je pravděpodobnost, že pravá hodnota leží v intervalu

$$\langle \text{naměřená hodnota} - U, \text{naměřená hodnota} + U \rangle$$

při normálním rozdělení chyb 95,5 % a při rovnoměrném rozdělení chyb prakticky 100 %.

Udávané hodnoty nejistot se zaokrouhlují na dvě platné číslice, při čemž se dává přednost zaokrouhlování nahoru.

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 $14 < U \leq 20$ [%].

Literatura :

- [5.1] Helbig, E.: Lichtmeßtechnik. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1977.
- [5.2] Krochmann, J.: Über ein neues Raumbeluchtungs-Meßgerät. Lichttechnik, 1964, č.4.
- [5.3] Mezinárodní doporučení CIE Illuminance Meters and Luminance Meters. 1983.
- [5.4] ČSN IEC 50 (845) Mezinárodní elektrotehický slovník. Kapitola 845: Osvětlení. 1996.
- [5.5] Photometry – The CIE systém of Physical Photometry. CIE, 2004.
- [5.6] Návrh zákona o metrologii z r.2005 (změna zákona č.505/1990 a č.119/2000).
- [5.7] ČSN EN 360011 Měření osvětlení vnitřních prostorů (2005); část 1 – Základní ustanovení, část 2 – Měření denního osvětlení, část 3 – Měření umělého osvětlení.
- [5.8] ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel; část 1 – Měření a formát souborů dat (2005), část 2 – Způsob údajů pro vnitřní a venkovní prostory (2005), část 3 Způsob uvádění údajů pro nouzové osvětlení pracovních prostorů (2008).
- [5.9] CIE 69 Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters (1987).
- [5.10] Habel J.: Osvětlování. ČVUT, Praha 1998.