

Modernizace goniofotometru

Ing. Marek Bálský, prof. Ing. Jiří Habel, DrSc.,
Elektrotechnická fakulta ČVUT v Praze

Úvod

Rozbor prostorového rozložení svítivosti svítidel, popř. světelných zdrojů, založený na měření čar svítivosti ve vybraných fotometrických rovinách patří k nejčastějším úkolům fotometrických laboratoří. V laboratoři světelné techniky katedry elektroenergetiky Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze se čáry svítivosti měří v polorovinách fotometrické soustavy C- γ s využitím goniofotometru s otočným ramenem R nesoucím fotočlánek F (obr. 1) a zajišťujícím konstantní vzdálenost $l = 2$ m mezi fotočlánekem F a světelným středem měřeného svítidla (zdroje) Z.

Zkoušené svítidlo (zdroj) Z se pevně umístí (v jeho běžné provozní poloze) v ose o otáčení ramene R. Polorovina C se nastavuje natočením měřeného svítidla (zdroje) Z při zachování jeho pracovní polohy. V souladu s normou ČSN EN 13 032-1 se čáry svítivosti měří vždy ve dvou protilehlých polorovinách soustavy C- γ , např. $C = 0^\circ$ a $C = 180^\circ$, $C = 90^\circ$ a $C = 270^\circ$ apod. (obr. 2).

Ve zvolené polorovině C se pro každý úhel γ změří luxmetrem, jehož čidlem je fotočlánek F, osvětlenost E_γ , která je rovna podílu hledané svítivosti I_γ a čtverce vzdálenosti l fotočláneku F od světelného středu svítidla Z. Pro osvětlenost E_γ platí tedy vztah

$$E_\gamma = I_\gamma / l^2 \quad (\text{lx; cd, m}) \quad (1)$$

Po zkorigování naměřené hodnoty osvětlenosti E_γ podle kalibračního listu použitého luxmetru lze již s využitím rovnice (1) pro konkrétní úhel γ vypočítat hledanou svítivost I_γ ze vzorce

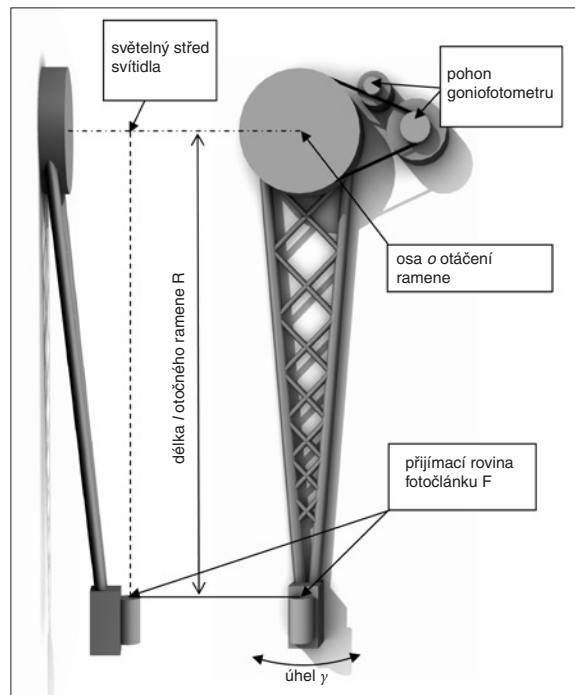
$$I_\gamma = E_\gamma \cdot l^2 \quad (\text{cd; lx, m}) \quad (2)$$

V daném případě, kdy $l = 2$ m, lze rovnici (2) zapsat ve tvaru

$$I_\gamma = 4E_\gamma \quad (\text{cd; lx}) \quad (3)$$

Pro zajištění požadované přesnosti laboratorního měření čar svítivosti goniofotometrem je důležité výrazně snížit nejistotu nastavení úhlu γ natočení ramene R goniofotometru, a to i při kroku měření po 2° . S ohledem na skutečnost, že se čáry svítivosti ověřují v celé řadě polorovin C, např. i po 5° , je nezbytné měření alespoň

jednotlivých čar svítivosti zautomatizovat. Cílem modernizace goniofotometru tedy bylo provést potřebné konstrukční úpravy řízení natáčení jeho ramene při zásadním snížení nejistoty nastavení úhlu γ a měření čáry svítivosti řídit počítačem, včetně tabelárního a grafického zpracování výsledků měření.



Obr. 1. Princip goniofotometru (pohled z boku a zepředu)

1. Nová koncepce pohonu ramene goniofotometru

Doposud byl mezi asynchronním motorem a ramenem goniofotometru instalován lankový převod, který způsoboval po zastavení chodu motoru určité výkyvy ramene goniofotometru, což obsluže znesnadňovalo nastavení ramene goniofotometru v každé měřicí poloze podle úhlooměru, výrazně zvyšovalo nejistotu nastavení určitého úhlu natočení a neúměrně prodlužovalo dobu měření každé čáry svítivosti. Další nevýhodou dosavadního řešení bylo použití konvenčního digitálního luxmetru bez datového výstupu, kdy naměřené hodnoty osvětlenosti zaznamenávala obsluha.

Modernizovaný pohon goniofotometru je zajištěn krokovým motorem s úhlovým krokem $1,8^\circ$ a řetězovou převodov-

kou s převodem 1:16. Základní úhlový krok ramene goniofotometru je přibližně $0,1^\circ$ (tj. $6'$). Tento základní krok lze dále pomocí zvolené řídicí jednotky dělit až na 256 mikrokroků o velikosti $1,61$ úhlové vteřiny.

Krokový motor je napájen čtyřfázovou řídicí jednotkou pracující na principu pulzně šířkové modulace na frekvenci 20 kHz. Řídicí jednotka krokového motoru s patentovaným omezením rezonancí eliminuje oscilace při středních rychlostech v pracovní oblasti krokového motoru. Řídicí jednotka též umožňuje plynulý rozjezd a plynulé zastavení ramene, zamezující jeho kývání po zastavení v jednotlivých měřicích polohách goniofotometru. To umožňuje rychlejší a přesnější měření bez nutnosti čekat na ustálení ramene goniofotometru v každé měřicí poloze. Součástí pohonu goniofotometru je inkrementální čidlo s rozlišením 3 600 pulzů na otáčku, které zabezpečuje přesné nastavení polohy ramene goniofotometru.

Řídicí jednotka pohonu goniofotometru je propojena s počítačem s využitím analogově digitálního převodníku připojitelného na sběrnici USB (Universal Serial Bus), což dovoluje komplexně měřit při značném zjednodušení obsluhy zařízení. Lze tedy vykonávat jak rychlá a přesná měření, tak podrobná laboratorní měření rozložení svítivosti. Měření osvětlenosti je nově zajištěno fotočlánekem digitálního luxmetru s analogovým i digitálním datovým výstupem, který je též připojen na sběrnici analogově digitálního převodníku. Naměřené hodnoty jsou tak přenášeny pomocí sběrnice USB přímo do počítače, kde jsou dále zpracovávány v podobě tabulky či polárního diagramu.

Pro řízení krokového motoru a zpracování naměřených dat byl zvolen systém LabVIEW (z angl. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), který je založen na principu vizuálního programování za použití grafických bloků znázorňujících jednotlivá připojená

zařízení (viz obr. 3). To umožňuje vytvářet programy i bez znalosti programovacích jazyků – stačí vytvořit požadovanou strukturu grafických prvků reprezentující jednotlivá zařízení a jejich jednotlivé brány propojit spojovacími prvky.

2. Příklad grafického zpracování výsledku měření čar svítivosti na goniofotometru

Na obr. 4 je uveden příklad polárního diagramu s čarami svítivosti v rovinách C_0/C_{180} , C_{15}/C_{195} , $C_{22,5}/C_{202,5}$, C_{45}/C_{225} , $C_{67,5}/C_{247,5}$ a C_{90}/C_{270} , který je výsledkem měření prostorového rozložení svítivosti svítidla iGuzzini Archilede pro uliční osvětlovací soustavy.

3. Rozbor nejistoty měření čar svítivosti na goniofotometru

Měření čar svítivosti goniofotometrem je obdobně jako jiné měřicí postupy zatíženo chybami, a proto i nejistota tohoto měření zahrnuje mnoho složek charakterizovaných směrodatnými odchylkami. Každému možnému zdroji té které chyby měření tedy odpovídá určitá dílčí nejistota měření, kterou lze obecně stanovit buď jako dílčí nejistotu typu A (označovanou u_A), nebo jako dílčí nejistotu typu B (označovanou u_B).

Dílčí nejistota u_A se zjišťuje na základě rozboru statistického rozdělení výsledku dostatečně velkého reprezentativního souboru opakovaných měření veličiny X , vypočítá se dílčí nejistota u_A jako směrodatná odchylka střední hodnoty měřené veličiny X podle vztahu

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4)$$

kde X_i je hodnota měřené veličiny X při i -tém měření, \bar{X} střední hodnota měřené veličiny X stanovená ze souboru n skutečných měření.

Dílčí nejistota u_B se stanovuje na základě podrobné analýzy zdroje sledované chyby, odborného odhadu maxima možné odchylky a předpokládaného rozdělení pravděpodobnosti jeho výskytu. Dílčí relativní standardní nejistota u_B typu B odpovídající určitému posuzovanému zdroji chyby při měření veličiny X se vypočítá z výrazu

či relativní standardní nejistota u_B typu B odpovídající určitému posuzovanému zdroji chyby při měření veličiny X se vypočítá z výrazu

$$u_{BX} = \frac{Z_{X_{\max}}}{\chi X_{vzt}} \quad (5)$$

kde

$Z_{X_{\max}}$ je odhad maxima možné odchylky, resp. odchylka, jejíž překročení se nepředpokládá (popř. největší dovolená chyba určená z dokumentace použitého zařízení),

X_{vzt} vztahná hodnota měřené veličiny, χ koeficient pravděpodobnostního rozdělení odchylek měřené veličiny X v intervalu $\langle -Z_{\max}, +Z_{\max} \rangle$.

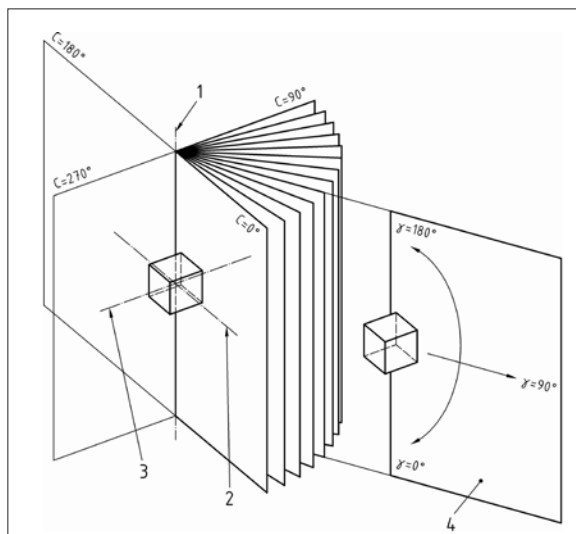
Za předpokladu nezávislosti jednotlivých zdrojů dílčích nejistot se výsledná kombinovaná standardní relativní nejistota u_C měření vypočítá sloučením všech dílčích relativních nejistot u_A a u_B na základě Gaussova principu šíření nejistot z rovnice

$$u_C = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + u_{A3}^2 + \dots + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \dots} \quad (6)$$

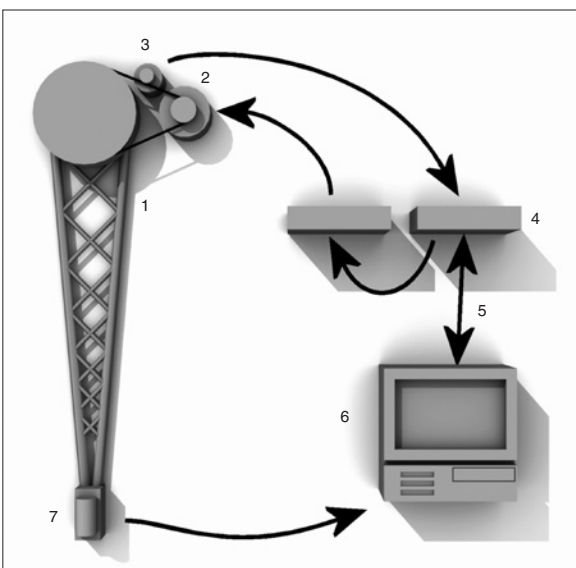
Při měření čar svítivosti na goniofotometru je třeba uvažovat zejména několik hlavních možných zdrojů chyb a jim odpovídajících dílčích nejistot, které jsou shrnuty v tab. 1. Uvedené dílčí nejistoty se běžně stanovují jako nejistoty typu B.

Pravděpodobnost, že odchylka naměřené hodnoty od skutečné hodnoty nepřekročí hranici standardní nejistoty, závisí na rozdělení náhodné proměnné. Pro rovnoměrné rozdělení je tato pravděpodobnost 57,7% a pro normální rozdělení 68,3%. Existuje tedy poměrně velké riziko, že skutečná odchylka bude větší, než udává interval standardní nejistoty. Proto se zavádí rozšířená standardní nejistota U , která je definována jako součin kombinované standardní nejistoty u_C a koeficientu rozšíření k_U .

Nejčastěji používanou hodnotou koeficientu rozšíření je $k_U = 2$, v tomto případě je u normálního rozdělení 95,5% pravděpodobnost, že skutečná hodnota leží v intervalu určeném standardní nejistotou, u rovnoměrného rozdělení je tato pravděpodobnost 100%.



Obr. 2. Orientace svítidla v soustavě C-rovin
1 – první osa, osa svazku, 2 – druhá osa, 3 – třetí osa, 4 – C-rovina



Obr. 3. Modernizovaný počítačem řízený pohon goniofotometru
1 – goniofotometr, 2 – krokový motor, 3 – inkrementální čidlo polohy ramene, 4 – řídicí jednotka krokového motoru, 5 – analogově digitální převodník, 6 – řídicí počítač, 7 – fotočlánek

Tab. 1. Hlavní zdroje možných chyb a označení jim odpovídajících dílčích nejistot při měření čar svítivosti na goniofotometru

Číslo chyby	Popis zdroje chyby	Označení dílčí nejistoty
1	nastavování polohy ramene goniofotometru podle úhlu γ	u_{By}
2	nepřesnost použitého digitálního luxmetru	u_{BE}
3	určení vzdálenosti středu přijímací plochy fotočláneku od světelného středu svítidla	u_{Bl}
4	nestabilita použitých zařízení	u_{Bs}
5	vliv konečných rozměrů vyzářovací plochy svítidla (zdroje) a přijímací plochy fotočláneku	u_{Bk}
6	nastavení spojnice středu přijímací plochy fotočláneku a světelného středu svítidla do svislé polohy pro úhel $\gamma = 0$	u_{Bp}

3.1 Výpočet dílčích nejistot měření

3.1.1 Při stanovování nejistoty u_{By} odpovídající možné odchylce vznikající při určování polohy ramene goniofotometru při jeho natáčení podle úhlu γ se vychází ze skutečnosti, že:

a) modernizovaný pohon otáčení ramene goniofotometru zajišťuje nastavení výchozí polohy nulovým pulzem inkrementálního čidla s maximální možnou odchylkou $\Delta\gamma_{\max} = 0,025$, která vychází z úhlové šířky nulového pulzu inkrementálního čidla (uvedené v jeho dokumentaci),

b) v původním provedení lze, s ohledem na vizuální nastavování úhlu γ natočení ramene goniofotometru na úhloměru, maximální odchylku odhadnout hodnotou $\Delta\gamma_{\max} = 0,2^\circ$.

Za předpokladu, že se bude uvažovat normální pravděpodobnostní rozložení odchylek při nastavování polohy ramene goniofotometru, vypočítá se hledaná dílčí standardní nejistota u_{By} z výrazu

$$u_{By} = \frac{\Delta\gamma_{\max}}{\gamma_{vzt} \sqrt{3}} \quad (-; ^\circ; ^\circ) \quad (7)$$

kde

$\Delta\gamma_{\max}$ je uvažovaná největší odchylka úhlu γ ($^\circ$),

γ_{vzt} vztážná hodnota úhlu γ ($^\circ$).

Po dosažení uvedených maximálních odchylek a jejich vztahení k základnímu kroku nastavování úhlu $\gamma_{vzt} = 2^\circ$ vyplývají z rovnice (7) standardní relativní nejistoty nastavení ramene goniofotometru:

a) pro zmodernizovaný pohon

$$u_{By} = \frac{0,025}{2\sqrt{3}} 100 = 0,77\% \quad (8)$$

b) pro původní pohon goniofotometru

$$u_{By} = \frac{0,2}{2\sqrt{3}} 100 = 5,75\% \quad (9)$$

Je zřejmé, že se úpravou pohonu ramene a jeho vhodným řízením podařilo nejistotu nastavování ramene goniofotometru při kroku měření $\Delta\gamma = 2^\circ$ řádově snížit.

3.1.2 Dílčí standardní relativní nejistotu způsobenou nepřesností použitého měřicího zařízení, tj. digitálního luxmetru, lze podle [3] obecně určit ze vztahu

$$u_{BE} = \frac{\delta_1 + NR}{100 + X} \frac{1}{\sqrt{3}} 100\% \quad (10)$$

kde

δ_1 je chyba luxmetru v %,

X údaj přístroje (lx),

N počet platných číslic s možnou chybou, R hodnota platné číslice s nejmenší vahou (lx).

Výrobce použitého digitálního luxmetru s měřicími rozsahy 0,01 až 29,99 lx, 0,1 až 299,9 lx atd. až 100 až 299 900 lx v do-

Tab. 2. Shrnutí vypočítaných hodnot relativních dílčích standardních nejistot typu B při měření čar svítivosti na goniofotometru

Číslo chyby	Popis zdroje chyby	Označení dílčí nejistoty	Vypočítaná dílčí nejistota (%)
1	nastavování polohy ramene goniofotometru podle úhlu γ	u_{By}	0,77
2	nepřesnost použitého digitálního luxmetru	u_{BE}	3,08
3	určení vzdálenosti středu přijímací plochy fotočlánku od světelného středu svítidla	u_{Bl}	0,29
4	nestabilita použitých zařízení	u_{Bs}	0,50
5	vliv konečných rozměrů vyzařovací plochy svítidla (zdroje) a přijímací plochy fotočlánku	u_{Bk}	0,93
6	nastavení spojnice středu přijímací plochy fotočlánku a světelného středu svítidla do svislé polohy pro úhel $\gamma = 0$	u_{Bp}	0,03

kumentaci uvádí: chyba měření $2\% \pm 1$ platná číslice (tj. $\delta_1 = 2\%$ a $N = 1$).

Při měření na goniofotometru lze předpokládat nejnižší možný údaj přístroje přibližně $X = 0,30$ lx (kdy $R = 0,01$ lx).

Relativní standardní nejistota u_{BE} , odpovídající vlivu nepřesnosti luxmetru, tedy bude pro údaj přístroje $X = 0,30$ lx rovna

$$u_{BE} = \frac{2 + \frac{1 \cdot 0,01 \text{ lx}}{100 + 0,3 \text{ lx}}}{\sqrt{3}} 100 = 3,08\% \quad (11)$$

Při kalibraci příslušného přístroje byla v ověřovacím listu stanovena dílčí nejistota měření $u_{BEk} = 1,05\%$. Ověření bylo provedeno pro údaje přístroje větší než 3 lx.

Zanedbají-li se nepodstatné okrajové části čar svítivosti změřené na goniofotometru, je možné předpokládat minimální údaj přístroje větší než 3 lx uvedené v ověřovacím listu a odpovídající dílčí nejistotu určenou podle (10) pro $X > 3$ lx takto:

$$u_{BEz} = \frac{2 + \frac{1 \cdot 0,01 \text{ lx}}{100 + 3 \text{ lx}}}{\sqrt{3}} 100 = 1,35\% \quad (12)$$

3.1.3 Pro dílčí relativní standardní nejistotu u_{Bl} , odpovídající možné odchylce v určení vzdálenosti l středu přijímací plochy fotočlánku od světelného středu svítidla, platí výraz

$$u_{Bl} = \frac{Z_{l\max}}{l_d \sqrt{3}} \quad (13)$$

kde

$Z_{l\max}$ je největší předpokládaná odchylka vzdálenosti středu přijímacího povrchu fotočlánku od světelného středu svítidla (m),

l_d deklarovaná vzdálenost středu přijímacího povrchu fotočlánku od světelného středu svítidla (m); v daném případě $l_d = 2$ m.

Na základě zkušeností z předchozích měření lze předpokládat, že maximální odchylka nepřekročí hodnotu $Z_{l\max} = 0,01$ m (při $l_d = 2$ m). Po dosažení ze vztahu (14) vychází hledaná dílčí nejistota u_{Bl}

$$u_{Bl} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} 100 = 0,29\% \quad (14)$$

3.1.4 Dílčí relativní standardní nejistota u_{Bs} , odpovídající vlivu nestability použitých zařízení, je způsobena nestabilitou světelného zdroje, nestabilitou (únavou) fotočlánku a nestabilitou napájecího zdroje. Oddělený popis jednotlivých vlivů na celkovou nestabilitu použitých zařízení není možný. Proto se nejistota způsobená nestabilitou použitých zařízení určuje ze změny údaje fotometru během určité doby T svícení zkoušeného svítidla (zdroje).

$$u_{Bs} = \frac{\left| \frac{Y_{\max}}{Y_{\min}} - 1 \right|}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

kde

Y_{\max} je maximální hodnota údaje fotometru v čase od $t = 0$ (počítá se až po zahoření světelného zdroje) do $t = T$, Y_{\min} minimální hodnota údaje fotometru v čase od $t = 0$ do $t = T$.

Na základě výsledků laboratorního měření v [4] lze uvažovat $u_{Bs} \sim 0,5\%$.

3.1.5 Dílčí relativní standardní nejistota typu B vlivem konečných rozměrů zkoušeného svítidla (světelného zdroje) a fotočlánku je podle [4] dána vztahem:

$$u_{Bk} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

kde

r_0 je osová vzdálenost světelného středu svítidla (zdroje) od středu přijímací plochy fotočlánku (m),

a polovina charakteristického rozměru svítidla (světelného zdroje) v řezu kolmém na spojnici světelného středu svítidla a fotočlánku (m),

b poloměr přijímacího povrchu fotočlánku (m).

Pro oblasti vzdálené od svítidla více než pětinašobek charakteristického rozměru vyzařovací plochy svítidla je při určení svítivosti z druhé mocniny vzdálenosti bodu v prostoru od svítidla a osvětlenosti roviny procházející tímto bodem, která je kolmá na spojnici svítidla s tímto bodem (viz vztah 2), chyba menší než 1%, viz [1]. Maximální možný charakteristický rozměr svítidla pro daný goniofotometr vychází z délky jeho otočného ramene ($l = 2\text{ m}$) a na základě již uvedeného požadavku $2a = 1/5$, l je tedy $2a = 0,4\text{ m}$, tj. $a = 0,2\text{ m}$. Poloměr přijímacího povrchu fotočlánku je $b = 0,00825\text{ m}$:

$$u_{Bk} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{2}{\sqrt{2^2 + (0,2 + 0,00825)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} 100 = 0,93\% \quad (17)$$

3.1.6 Dílčí relativní standardní nejistota nastavení polohy fotočlánku vzhledem ke světelnému středu svítidla je podle [4] určena vztahem

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (18)$$

kde β je úhel vyosení fotočlánku od spojnice fotočlánku se světelným středem zkoušeného svítidla (rad).

Lze předpokládat, že úhel vyosení fotočlánku od spojnice fotočlánku se světelným středem zkoušeného svítidla nepřekročí 2° . Potom

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos 2^\circ}{2} 100 = 0,03\% \quad (19)$$

Vypočítané hodnoty relativních dílčích standardních nejistot typu B při měření čar svítivosti na goniofotometru jsou uvedeny v tab. 2.

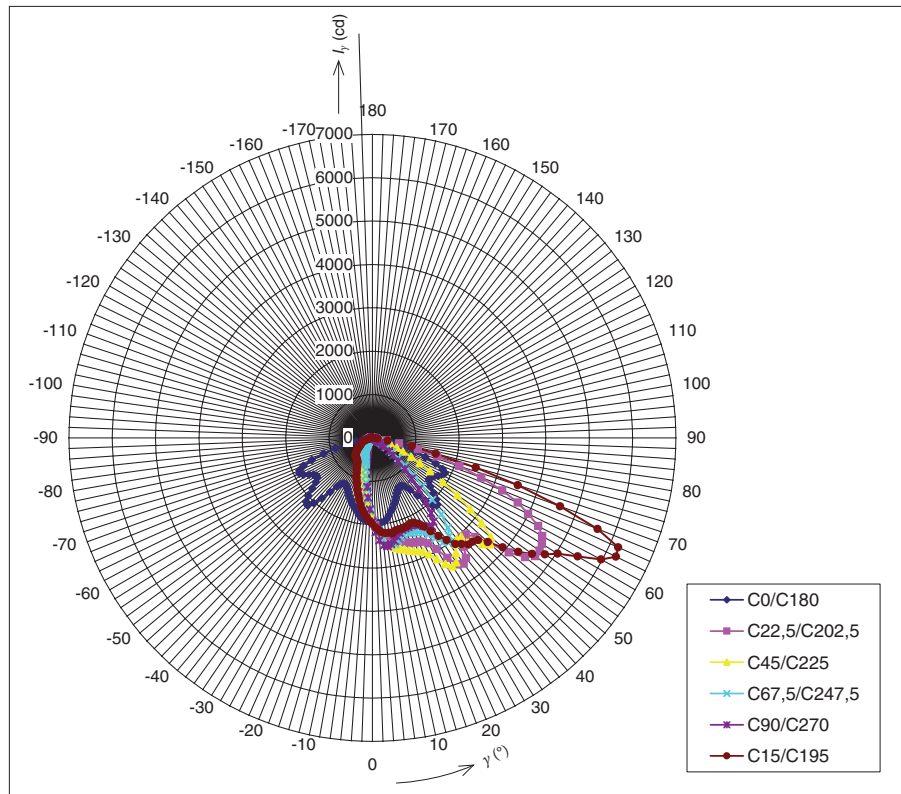
3.2 Výpočet kombinované a rozšířené nejistoty měření

Nejistota nastavení polohy ramene goniofotometru není primárně zdrojem nejistoty měření svítivosti, ovlivňuje pouze správnost orientace měřených čar svítivosti v rovině soustavy C- γ . Rozšířením standardní relativní nejistoty určení polohy ramene goniofotometru $u_{B\gamma}$ koeficientem $k_U = 2$ tedy lze stanovit rozšířenou nejistotu určení polohy ramene goniofotometru

$$U_{\gamma} = k_U u_{B\gamma} = 2 \cdot 0,77 = 1,54\% \quad (20)$$

Výsledná kombinovaná standardní nejistota měření rozložení svítivosti na goniofotometru je na základě platnosti (6)

$$u_{CI} = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{BI}^2 + u_{BS}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bp}^2} = 3,35\% \quad (21)$$



Obr. 4. Prostorové rozložení svítivosti svítidla s diodami LED pro uliční osvětlovací soustavy ve vybraných C-rovinách

Rozšířená kombinovaná nejistota měření prostorového rozložení svítivosti na goniofotometru s koeficientem rozšíření $k_U = 2$ je pak

$$U_I = k_U u_{CI} = 2 \cdot 3,27\% = 6,54\% \quad (22)$$

Zanedbají-li se okrajové části čar svítivosti (12), je výsledná kombinovaná standardní nejistota měření rozložení svítivosti na goniofotometru $u_{CIz} = 1,74\%$ a rozšířená kombinovaná nejistota měření $U_{Iz} = 3,48\%$.

Provedený rozbor nejistot měření prokázal, že měření čar svítivosti na zmodernizovaném goniofotometru je v toleranci běžných přesných měření fotometrických laboratoří.

Závěr

Popsaná modernizace goniofotometru v laboratoři světelné techniky katedry elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze umožnila:

- zpřesnit fotometrickou analýzu prostorového rozložení svítivosti svítidel, resp. světelných zdrojů,
- zautomatizovat vlastní měření jednotlivých čar svítivosti,
- výrazně snížit nejistotu měření na goniofotometru,
- zlepšit počítačové zpracování naměřených hodnot i tabelární a grafickou úpravu výstupů.

To vše se projeví zejména ve zkvalitnění a zatraktivnění laboratorní výuky zajišťované v jednotlivých světelnotechnických předmětech i v rámci různých projektů a experimentálních částí bakalářských, diplomových a doktorských prací, ale též při plnění dalších odborných úkolů řešených na pracovišti.

Popsaná modernizace goniofotometru byla finančně zajištěna rozvojovým projektem MŠMT č. 4/25.2 Rozvoj informačních a komunikačních technologií pro podporu elektronických forem výuky i praktickou přípravu studentů.

Literatura:

[1] HABEL, J. et al.: *Světelná technika a osvětlování*. FCC Public, Praha, 1995, 448 s., ISBN 800-901985-0-3.
 [2] Evropská norma ČSN EN 13 032-1. *Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel – Část 1: Měření a formát souboru údajů*. Český normalizační institut, Praha, 2004, 54 s.
 [3] HAASZ, V. – SEDLÁČEK, M.: *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 2. vyd. ČVUT, Praha, 1998, 337 s.
 [4] VLACH, J.: *Nejistoty světelné technických měření*. Praha, 2007. ČVUT, FEL, katedra elektroenergetiky. Diplomová práce.

Recenze: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D., ústav elektroenergetiky FEEC VUT v Brně