

## WPLYW NIEDOPASOWANIA WIDMOWEGO LUKSOMIERZY NA DOKŁADNOŚĆ WYKONYWANYCH POMIARÓW NATĘŻENIA OŚWIETLENIA

Przemysław TABAKA<sup>1</sup>, Irena FRYC<sup>2</sup>

1. Politechnika Łódzka, Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Instytut Elektroenergetyki  
tel.: 42 631 2610 e-mail: przemyslaw.tabaka@wp.pl
2. Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Świetlnej  
tel: 85 746 9407 e-mail: i.fryc@pb.edu.pl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono zagadnienie wpływu niedopasowania widmowego luksomierza na dokładność pomiarów natężenia oświetlenia. W rozważaniach uwzględniono promieniowanie uzyskiwane przy użyciu współcześnie stosowanych do celów oświetleniowych źródeł światła. Dokładności pomiaru luksomierzem została zdefiniowana przez Międzynarodową Komisję oświetleniową CIE wartością błędu  $f_1$ . Wielkość tego błędu zależy od jakości widmowego dopasowania głowicy fotometrycznej luksomierza do krzywej czułości widmowej standardowego obserwatora kolorymetrycznego  $V(\lambda)$  określonej przy użyciu błędu niedopasowania  $f_1$ , oraz od względnego widmowego rozkładu mocy promienistej mierzonego źródła światła. Wykazano, że w zależności od jakości korekcji widmowej użytego luksomierza, dokładność pomiarów będzie najmniejsza w przypadku mierzenia źródeł LED, niezależnie od wartości ich temperatury barwowej najbliższej.

**Słowa kluczowe:** luksomierz, natężenie oświetlenia, źródła światła.

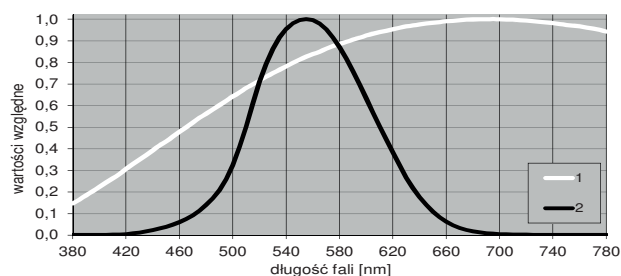
### 1. WSTĘP

Wyznaczanie parametrów technicznych źródeł światła i oświetlanych obiektów jest przedmiotem zainteresowania metrologii techniki świetlnej. Pomiar wielkości świetlnych stały się popularną praktyką w różnych dziedzinach życia, począwszy od fotografii a na aplikacjach przemysłowych kończąc. Konieczność przeprowadzania tego rodzaju pomiarów nie wynika jedynie z doraźnych potrzeb producentów czy projektantów oświetlenia, ale jest także efektem wynikłym z regulacji prawnych. Na terenie Polski, rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy [1] zobowiązuje pracodawców do przeprowadzania pomiarów i oceny parametrów jakości oświetlenia w środowisku pracy. Zgodnie z wymaganiami zawartymi w tym rozporządzeniu pracodawca zobowiązany jest do zapewnienia oświetlenia elektrycznego o parametrach zgodnych z wymaganiami Polskich Norm [2]. Najczęściej weryfikowana jest wartość natężenia oświetlenia przy użyciu luksomierza wywzorcowanego w luksach. Zaleca się, aby używane luksomierze były wywzorcowane przez akredytowane laboratorium wzorcujące tj. takie w których kalibracja luksomierzy, przeprowadzana jest zgodnie z wymaganiami zawartymi w dokumencie ISO/IEC 17025:2005 [3]. W Polsce przepisy metrologiczne o luksomierzach są

przedstawione w zarządzeniu nr 31 Prezesa Głównego Urzędu Miar z dnia 30 marca 1995 roku. W dokumencie tym stwierdzono, że luksomierze muszą odpowiadać wymaganiom zawartym w: Publikacji CIE 69–1987 [4], PN 83/E–04040 [5], PN 90/E – 01005 [6].

### 2. KONSTRUKCJA I PARAMETRY LUKSOMIERZY

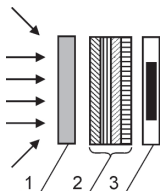
Istnieje wiele konstrukcji tego typu mierników, jednakże wszystkie muszą spełniać podstawowe wymagania stawiane luksomierzom. Aby mierzone natężenie oświetlenia odpowiadało wartości odniesienia, miernik ten musi spełniać szereg wymagań. Musi on mieć czułość widmową taką jak standardowy obserwator kolorymetryczny o czułości względnej oka  $V(\lambda)$  (rys. 1), a wartość sygnału wyjściowego z miernika ma się zmieniać zgodnie z funkcją kosinusa kąta padania promieniowania na jego płaszczyznę pomiarową.



Rys. 1. Krzywe czułości widmowej: 1 – fotoogniwa krzemowego, 2 – głowicy fotometrycznej luksomierza

Współcześnie luksomierze składają się z głowicy fotometrycznej oraz z elektronicznego układu analizy i wyświetlania danych. Dostępne są także aplikacje, które po zainstalowaniu na smartfonie oferują możliwość zarejestrowania natężenia oświetlenia. Warto jednak podkreślić, że są to jedynie wskaźniki, a nie przyrządy pomiarowe [7]. Częścią składową głowicy pomiarowej luksomierza jest detektor fotoelektryczny. Obecnie producenci mierników stosują detektory krzemowe. Warto jednak podkreślić, że czułość widmowa tych detektorów (rys. 1) w znacznym stopniu odbiega od wymaganej czułości widmowej luksomierza  $V(\lambda)$ , opracowanej przez

Międzynarodową Komisję Oświetleniową. W związku z tym, luksomierze w swej konstrukcji zawierają filtr korekcji widmowej (rys. 2). Zgodność wskazań miernika z kosinusem kąta padania światła zapewnia w luksomierzu element rozpraszający (rys. 2).

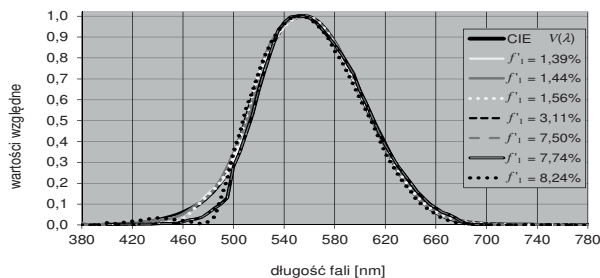


Rys. 2. Elementy składowe typowej głowicy fotometrycznej luksomierza: 1 – element korekcji przestrzennej, 2 – zestaw filtrów absorpcyjnych korekcji widmowej, 3 – detektor

Obecnie w ofertach handlowych dostępne są luksomierze o bardzo zróżnicowanych cenach (od kilkuset złotych do kilku tysięcy). Oczywiście jest, że przyrządy oferowane w niskiej cenie cieszą się dużym zainteresowaniem kupujących. Bardzo często ich koszt jednostkowy jest niższy od ceny wzorcowania. W związku z tym należy szczególną uwagę zwracać na parametry techniczne oferowanych przyrządów. Standard ISO/CIE 19476:2014 [8], wskazuje na 18 wielkości charakteryzujących jakość luksomierza. Jedynymi z istotniejszych wymagań dot. luksomierza [7, 9] są wartości błędów korekcji widmowej  $f_1'$  oraz błędów  $f_1$  wynikających z różnic w rozkładzie widmowym źródła mierzonego i kalibracyjnego.

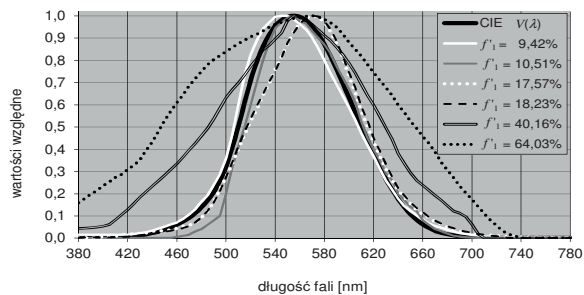
### 2.1. Błąd niedopasowania widmowego $f_1'$

W praktyce pomiarowej nie ma luksomierza, których czułość widmowa detektora została idealnie skorygowana do zalecanej przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE) charakterystyki widmowej  $V(\lambda)$ . Na rysunkach 3 oraz 4 zamieszczono rzeczywiste krzywe czułości widmowej głowic fotometrycznych kilkunastu luksomierzy. Analizując poszczególne czułości widmowe można dostrzec odstępstwa od wymaganej charakterystyki widmowej  $V(\lambda)$ , zarówno w krótkofalowym jak i długofalowym obszarze widma.



Rys. 3. Charakterystyki widmowe: CIE  $V(\lambda)$  – wymagana krzywa czułości widmowej, krzywe czułości widmowych głowic fotometrycznych luksomierzy o wartościach błędów  $f_1' < 9\%$

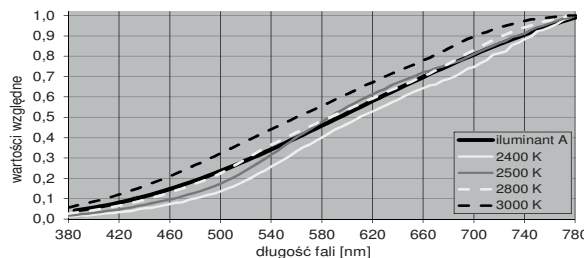
Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa (CIE) wprowadziła parametr  $f_1'$  (1) będący miarą niedopasowania czułości luksomierza do krzywej  $V(\lambda)$ . Wielkość  $f_1'$  definiowana jest przy kalibrowaniu luksomierza iluminantem A tj. źródłem żarowym o  $T_b = 2856$  K (rys. 5). A zatem za pomocą jednej liczby można opisać stopień niedopasowania czułości głowicy luksomierza do wymaganej krzywej czułości widmowej.



Rys. 4. Charakterystyki widmowe: CIE  $V(\lambda)$  – wymagana krzywa czułości widmowej, krzywe czułości widmowych głowic fotometrycznych luksomierzy o wartości błędów  $f_1' > 9\%$

$$f_1' = \frac{\int_{380}^{780} \frac{\int_{380}^{780} E_A(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} E_A(\lambda)S(\lambda)d\lambda} S(\lambda) - V(\lambda)}{\int_{380}^{780} V(\lambda)d\lambda} \cdot 100\% \quad (1)$$

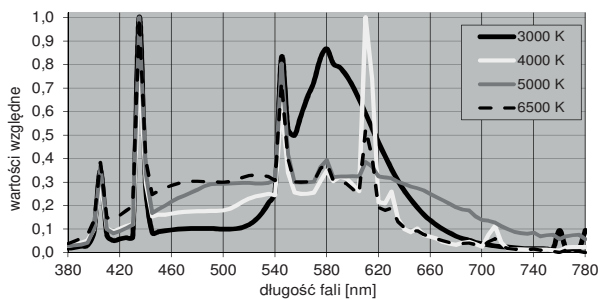
gdzie:  $E_A(\lambda)$  – względny rozkład widmowy mocy promieniowania, przy którym przeprowadzono wzorcowanie głowicy fotometrycznej,  $V(\lambda)$  – wymagana względna czułość widmowa głowicy fotometrycznej,  $S(\lambda)$  – względna rzeczywista czułość widmowa głowicy fotometrycznej.



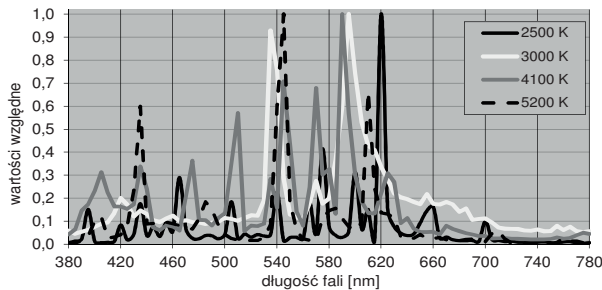
Rys. 5. Względny rozkład widmowy mocy promienistej iluminantu A oraz lamp żarowych (INC) o różnych mocach

Ze względu na dokładność luksomierze dzieli się na cztery klasy [4]. Luksomierze o najwyższej dokładności (klasa L) to takie których wartość błędów  $f_1'$  nie przekracza 1,5%. Dla wartości  $f_1'$  zawartych w przedziale (1,5%, 3%) luksomierz określany jest jako bardzo dobrej jakości (klasa A), natomiast luksomierze średniej jakości to takie, których wartość błędów  $f_1'$  zawiera się w przedziale (3%, 6%) (klasa B). Za luksomierze o niskiej dokładności uznaje się te których wartość błędów  $f_1'$  jest większa od 6% ale nie przekracza 9% (klasa C).

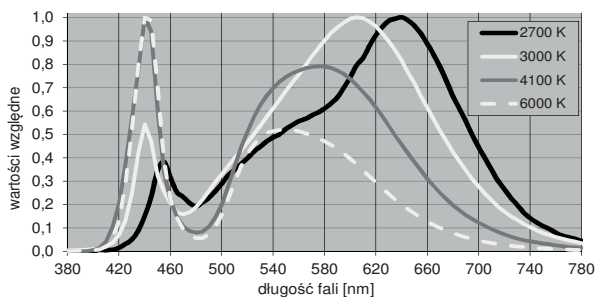
Współcześnie do oświetlenia wnętrz (pomijając gospodarstwa domowe), z uwagi na niską skuteczność świetlną, w zasadzie nie stosuje się już żarowych źródeł światła (rys. 5). Ich miejsce zajęły bardziej wydajne lampy, do których zalicza się źródła wyładowcze (rys. 6, rys. 7) oraz diody elektroluminescencyjne LED (rys. 8) [10]. Z uwagi na inny mechanizm wytwarzania światła, rozkłady widmowe emitowanego przez te lampy promieniowania różnią się od tego przy którym przeprowadzono wzorcowanie luksomierza. Jest to źródłem błędów pomiarowego oznaczanego, przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE), jako  $f_1$ .



Rys. 6. Względne rozkłady widmowe mocy promienistej świetlówek liniowych (FL) o różnych barwach emitowanego promieniowania



Rys. 7. Względne rozkłady widmowe mocy promienistej wysokoprężnych lamp metalohalogenkowych (MH)



Rys. 8. Względne rozkłady widmowe mocy promienistej LED

## 2.2. Błąd $f_1$

Wartość błędu luksomierza  $f_1$  informującego o wpływie zmiany źródła mierzonego na inne niż kalibracyjne, zależy od stopnia dopasowania czułości widmowej fotoogniwa do krzywej  $V(\lambda)$  i od charakteru rozkładu widmowego mierzonego promieniowania (2).

Chcąc korygować wyniki wskazań, w celu określenia prawidłowych wartości pomiarowych  $E_r$ , należy wskazania luksomierza  $E_z$  przemnożyć przez współczynniki korekcyjne  $k$  (3).

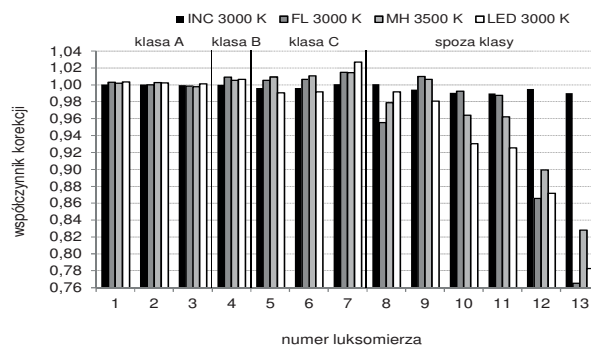
$$f_1 = \frac{\int_{380}^{780} E_z(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} E_z(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_{380}^{780} E_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} E_A(\lambda) S(\lambda) d\lambda} - 1 = k - 1 \quad (2)$$

gdzie:  $E_z(\lambda)$  – względny rozkład widmowy mocy promieniowania rozpatrywanego źródła światła, pozostałe oznaczenia identyczne jak w zależności (1).

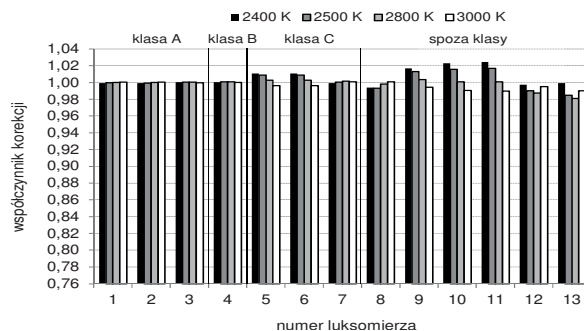
$$E_r = k \cdot E_z \quad (3)$$

## 3. WPŁYW NIEDOPASOWANIA WIDMOWEGO LUKSOMIERZA NA WARTOŚĆ BŁĘDU $f_1$

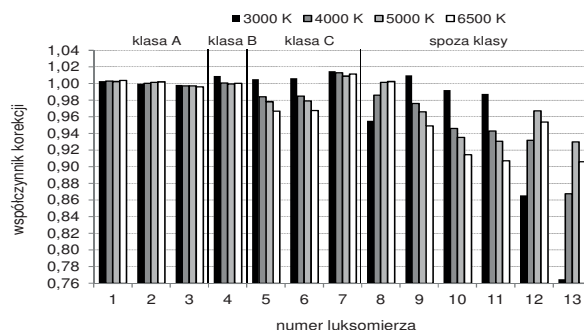
W odniesieniu do trzynastu współcześnie oferowanych luksomierzy (których krzywe czułości widmowej zamieszczono na rysunkach 3 i 4) obliczono współczynniki korekcyjne  $k$ , uwzględniając różne rozkłady widmowe mierzonego promieniowania (rys. 5-8). Pomimo identycznej bądź podobnej barwy promieniowania wytworzonego przez różne typy lamp, współczynniki te nie będą miały jednakowych wartości (rys. 9). Obliczone współczynniki korekcji dla różnych typów źródeł światła, których promieniowanie było mierzone poszczególnymi luksomierzami, przedstawiono na rysunkach od 10 do 13. W przypadku pomiaru promieniowania emitowanego przez lampy żarowe różnymi luksomierzami (także tymi spoza klasy, których wartość błędu  $f_1$  przekracza 9%), różnice w zarejestrowanych wartościach nie będą znaczne (rys. 10).



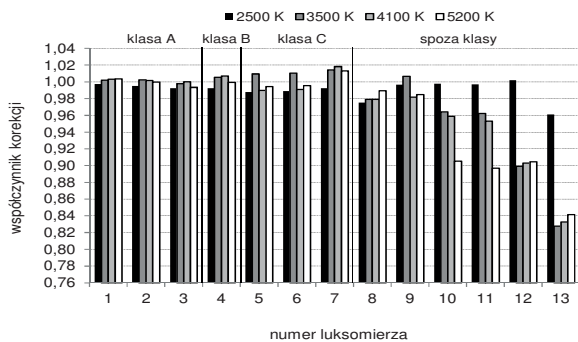
Rys. 9. Współczynniki korekcyjne dla lamp o identycznej lub podobnej temperaturze barwowej



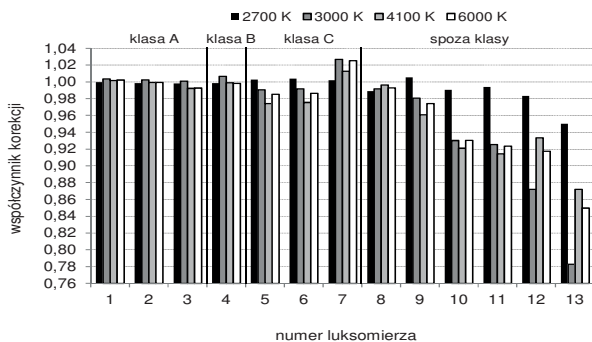
Rys. 10. Współczynniki korekcyjne w przypadku mierzenia promieniowania emitowanego przez żarówki



Rys. 11. Współczynniki korekcyjne w przypadku mierzenia promieniowania emitowanego przez świetlówki



Rys. 12. Współczynniki korekcyjne w przypadku mierzenia promieniowania emitowanego przez lampy metalohalogenkowe



Rys. 13. Współczynniki korekcyjne w przypadku mierzenia promieniowania emitowanego przez źródła LED

W przypadku źródeł LED, wartości współczynników korekcyjnych, w zależności od używanego luksomierza, przyjmują wartości zmieniające się w granicach od 1 do 0,78.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można sformułować wnioski iż im większa będzie różnica pomiędzy krzywą czułości głowicy fotometrycznej luksomierza, a tą wymaganą, to tym w większym stopniu uzyskiwane wyniki będą uzależnione od charakterystyki widmowej mierzonego promieniowania. W celu uzyskania prawidłowych wyników (bez względu na rodzaj zastosowanych źródeł światła) należy stosować takie fotometry, których czułość na promieniowanie o określonej długości fali będzie w jak największym stopniu zbliżona do czułości krzywej  $V(\lambda)$ . Niestety w celu dobrego

dopasowania czułości odbiorników fotoelektrycznych do wymaganej krzywej czułości zachodzi potrzeba zastosowania zestawu odpowiednio dobranych filtrów korekcyjnych. Jednakże świadomość tego faktu, wśród wielu osób przeprowadzających pomiary luksomierzem, jest często niewystarczająca. Często osoby te, traktują świadectwo wzorcowania luksomierza, jako gwarant poprawności jego wskazań, bez względu na rozkład widmowy mierzonego promieniowania.

Autorzy w swoich kolejnych pracach, oprócz wpływu rozkładu widmowego źródła światła na dokładność przeprowadzanych przy użyciu luksomierza pomiarów, zamierzają uwzględnić również wpływ:

- rodzaju oprawy oświetleniowej (jej krzywej światłości),
- charakteru odbicia oświetlanych powierzchni.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (Dz.U. 1997 nr 129 poz. 844)
2. PN-EN 12464-1:2012 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Oświetlenie miejsc pracy we wnętrzach.
3. ISO/IEC 17025:2005 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących
4. Publikacja CIE 69-1987 Methods of characterizing illuminance
5. PN 83/E-04040 Pomiary fotometryczne i radiometryczne - Pomiar natężenia oświetlenia
6. PN 90/E - 01005 Technika świetlna. Terminologia
7. Fryc I.: Spectral correction of detector used in illuminance measurements, Proc. SPIE Vol. 3820
8. ISO/CIE 19476:2014 Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters
9. Fryc I.: Korekcja widmowa i przestrzenna fotometrów, Rozprawy Naukowe Nr 71, Politechnika Białostocka, Białystok, 2000
10. Banaszak A., Tabaka P., Wtorkiewicz J.: Analiza wybranych właściwości różnych typów luksomierzy, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt 268, 2015

### THE INFLUENCE OF SPECTRAL CORRECTION ACCURACY OF LUXMETERS ON ILLUMINANCE QUALITY MEASUREMENTS

The paper discusses the effect of the illuminance meter (luxmeter) spectral correction mismatch on the accuracy of contemporary typical light source measurements. Considered are: light bulbs, fluorescent lamps, high-pressure metal halide lamps and LEDs. Those lamps are having different correlation color temperature. The method of determining illuminance meter accuracy when measured source differs from calibration source has been defined by the CIE International Lighting Commission as an error  $f_1$ . The magnitude of this error depends on the quality of the spectral correction of the luxmeter photometric head to the spectral sensitivity curve of the standard photometric observer  $V(\lambda)$  (this inaccuracy is known as  $f_1'$ ) and the relative spectral power distribution of the radiated emitted by measured light source. Depending on the lamp type, luxmeter correction factors  $k$  have been calculated. It has been shown that the accuracy of measurements taken by luxmeter will be the weak when LEDs are measured. In that case the value of  $k$  correction factor is varying from 1 up to 0,78. In comparison the value of  $k$  correction factor is near 1 when the incandescent lamps are measured.

**Keywords:** luxmeter, illuminance, light sources.