

WPŁYW UŻYTEGO LUKSOMIERZA NA WYNIKI POMIARÓW NATĘŻENIA OŚWIETLENIA W KONTEKŚCIE ZANIECZYSZCZENIA ŚWIATŁEM

DOI 10.34658/9788366741461.6

Przemysław Tabaka

Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka
przemyslaw.tabaka@p.lodz.pl

Justyna Wtorkiewicz

Pracownia Fizykochemii, Okręgowy Urząd Miar w Łodzi
oum.lodz.w42@poczta.gum.gov.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki pomiarów natężenia oświetlenia dla siedmiu typów luksomierzy z użyciem sześciu źródeł światła o różnych wartościach temperatury barwowej najbliższej. Pomiary przeprowadzono w punktach charakterystycznych przy ocenie immisji światła: 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx. Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują, że w przypadku stałych warunków oświetlenia, dokładność pomiaru zależy od odpowiedniego doboru przyrządu pomiarowego, w szczególności jego rozdzielczości. Nie bez znaczenia pozostaje także charakterystyka widmowa promieniowania emitowanego przez różne źródła światła.

Słowa kluczowe: luksomierz, wzorcowanie, rozdzielczość, błąd pomiaru, źródła światła

1. Wstęp

Trudno jest sobie wyobrazić funkcjonowanie współczesnego świata bez oświetlenia zewnętrznego. Oświetlenie publiczne wpływa na komfort i poczucie bezpieczeństwa mieszkańców. Na ten aspekt uwagę zwrócili autorzy wielu prac [1, 2, 3] jednoznacznie wskazując, że nocne oświetlenie zwiększa społeczne poczucie bezpieczeństwa. Dobrym przykładem ilustrującym wpływ braku oświetlenia na samopoczucie i komfort mieszkańców był sprzeciw łódzian wobec decyzji urzędników w 2011 roku, dotyczącej skrócenia czasu pracy oświetlenia ulicznego w Łodzi o 45 minut w ciągu doby [4]. Załączanie latarni ulicznych 15 minut po zachodzie słońca

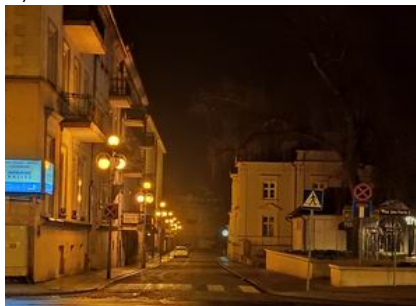
i wyłączenie 30 minut przed wschodem spowodowało, że osoby udające się do pracy lub z niej wracające, poruszały się po nieoświetlonych ulicach. Decyzja dotycząca ograniczenia czasu pracy oświetlenia była podyktowana oszczędnościami. W wyniku licznych skarg mieszkańców, urzędnicy mając na uwadze komfort i bezpieczeństwo łodzian, wycofali się z tego pomysłu, powracając tym samym do poprzedniego czasu pracy latarni.

Z użytkowaniem oświetlenia zewnętrznego wiąże się jednak emisja strumienia świetlnego w kierunku obszarów i obiektów, które nie są celem oświetlenia. Światło docierające do ścian budynków, okien, a także w górną półprzestrzeń (w kierunku nieboskłonu) jest źródłem zanieczyszczenia światłem. Przykłady immisji światła (wnikania światła do wnętrza budynków) zilustrowano na rysunku 1. Na pierwszych dwóch fotografiach (rys. 1a i 1b), źródłem niepożądanego światła, emitowanego w kierunku okien, są zainstalowane w pobliżu budynków oprawy oświetleniowe typu kula mleczna. Niestety tego typu rozwiązania nie należą do rzadkości, na co zwrócono uwagę w literaturze [5, 6, 7, 8].

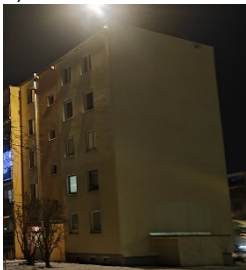
a)



b)



c)



d)



Rys. 1. Nocny krajobraz miast, przykłady immisji światła przez uliczne oprawy oświetleniowe w kierunku budynków mieszkalnych: a) Łódź, b) Kalisz, c), d) Konstancin-Jeziorna

Źródło: opracowanie własne.

Prawdopodobnie aspekt bezpieczeństwa zadecydował, że na szczycie budynku na jednym z osiedli mieszkaniowych, zainstalowano uliczną oprawę oświetleniową (rys. 1c). Konsekwencją tego stanu rzeczy jest oświetlenie nie tylko chodników oraz

placu zabaw, ale także elewacji budynku mieszkalnego zawierającego okna. Na powierzchni budynku mieszkalnego (rys. 1d) można dostrzec wyraźną granicę światła i cienia, której źródłem jest zainstalowana na sąsiednim budynku oprawa oświetleniowa (rys. 1c).

Wobec faktu, że zanieczyszczenie światłem jest przyczyną licznych problemów mających wpływ na samopoczucie użytkowników budynków oraz na funkcjonowanie środowiska, opracowane zostały wymagania dotyczące ograniczania światła przeszkadzającego. Zarówno w normach dotyczących oświetlenia zewnętrznego (PN-EN 12464-2:2008 [9], PN-EN 12464-2:2014-05 [10]), jak i w raporcie technicznym Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (CIE 150:2017 [11]) podano wartości graniczne światła przeszkadzającego, którego źródłem są instalacje oświetlenia zewnętrznego. Jednym z parametrów podlegającym weryfikacji przy ocenie ograniczenia światła przeszkadzającego jest natężenie oświetlenia E_v . Zmierzone na pionowej powierzchni okna natężenie oświetlenia E_v , nie powinno przekraczać wartości granicznych podanych w normach [9, 10] oraz w raporcie CIE [11].

Graniczne wartości natężenia oświetlenia uzależnione są od strefy oświetlenia środowiskowego (które oznaczono symbolami: E1, E2, E3 oraz E4), a także pory dnia. Wartości, które dopuszczalne są we wczesnych godzinach wieczornych, niekoniecznie są akceptowalne w późniejszych godzinach, dlatego też wprowadzono rozróżnienie na przed i po czasie przyciemniania (rys. 2). Najjaśniejszym obszarem jest strefa E4, do której zalicza się np. centra miast i strefy komercyjne, natomiast najciemniejszym strefa E1. Dla porządku należy wspomnieć, że w drugiej edycji raportu technicznego CIE 150, wydanym w 2017 r., wyodrębniono strefę samoistnie ciemną, którą oznaczono symbolem E0. Do strefy tej zalicza się np. parki UNESCO, parki ciemnego nieba, główne obszary obserwacji astronomicznych. Z uwagi na fakt, że w strefie tej pionowe natężenia oświetlenia (zarówno przed, jak i po czasie przyciemniania) ma być równe zero, nie uwzględniono jej na rysunku 2.



Rys. 2. Graniczne wartości pionowego natężenia oświetlenia dla poszczególnych stref środowiskowych

Źródło: opracowanie własne.

Wytyczne dotyczące ograniczenia światła przeszkadzającego ujęto także w Obwieszczeniu Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 7 czerwca 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [12]. W punkcie 6, w paragrafie 293 wspomnianego rozporządzenia [12] zapisano: „Urządzenia oświetleniowe, w tym reklamy, umieszczone na zewnątrz budynku lub w jego otoczeniu nie mogą powodować uciążliwości dla jego użytkowników ani też przechodniów i kierowców. Jeżeli światło skierowane jest na elewację budynku zawierającą okna, natężenie oświetlenia na tej elewacji nie może przekraczać 5 luksów w przypadku światła białego i 3 luksów w przypadku światła kolorowego lub światła o zmieniającym się natężeniu, błyskowego, ewentualnie pulsującego”.

Wymóg ten z założenia ma ograniczyć wnikanie przez otwory okienne do wnętrza mieszkań światła, którego źródłem są instalacje oświetlenia zewnętrznego. Zbyt duże rozjaśnienie w porze nocnej pomieszczeń mieszkalnych (np. sypialni) może być źródłem dyskomfortu, złego samopoczucia. Jak wynika z literatury [13], ekspozycja w porze nocnej na światło niekorzystnie wpływa na organizm człowieka. A zatem poza podstawową funkcją oświetlenia zewnętrznego, jaką jest m.in. stworzenie poczucia bezpieczeństwa pieszych, istotne są także aspekty środowiskowe tj. immisja światła.

W celu dokonania oceny spełnienia wymagań normatywnych można przeprowadzić obliczenia numeryczne, wykorzystując do tego celu specjalistyczne oprogramowanie komputerowe lub wykonać pomiary terenowe [14]. Niestety zarówno w wymaganiach normatywnych [9, 10], jak i w rozporządzeniu [12] brakuje precyzyjnych informacji na temat metodyki pomiarów pionowego natężenia oświetlenia. W projekcie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 11 maja 2016 r., zmieniającego rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [15], w objaśnieniu wielkości E_v (pod tabelą, w której podano maksymalne poziomy światła przeszkadzającego dla poszczególnych stref środowiskowych) podano, że pionowe natężenie oświetlenia mierzone jest w centralnym punkcie płaszczyzny okna pomieszczenia stałego pobytu. W wyjaśnieniu tym nie doprecyzowano jednak, po której stronie okna (zewnątrznej czy wewnętrznej) należy umieścić głowicę fotometryczną luksomierza, co ma istotny wpływ na wynik pomiaru [14]. Warto jednak zaznaczyć, że zaproponowane zmiany w projekcie Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa nie weszły w życie. Wobec faktu, że w aktualnie obowiązującym rozporządzeniu, w którym poruszono kwestię uciążliwego wpływu światła pochodzącego od zewnętrznych instalacji oświetleniowych, mowa jest o natężeniu oświetlenia na elewacji, należy domniemywać, że pomiary należy przeprowadzać po zewnętrznej stronie okna (rys. 3).



Rys. 3. Pomiar pionowego natężenia oświetlenia na powierzchni okna w budynku mieszkalnym

Źródło: opracowanie własne.

Do pomiarów natężenia oświetlenia używa się luksomierza. Jest to fotometr, który zwykle składa się z miernika prądu fotoelektrycznego (mikroamperomierza) oraz głowicy fotometrycznej. Wytwarzany przez fotodiode (znajdącą się w głowicy fotometrycznej) prąd fotoelektryczny jest proporcjonalny do padającego na jej powierzchnię światłoczułą strumienia świetlnego. Mierzona wartość wskazywana na wyświetlaczu luksomierza wyskalowana jest w luksach (w jednostce wielkości mierzonej). Dokładność przeprowadzonego pomiaru zależy od wielu czynników. Jednym z istotnych elementów mającym wpływ na wynik pomiaru natężenia oświetlenia jest jakość metrologiczna użytego przyrządu. Zagadnienie to jest szczególnie ważne przy pomiarach niskich wartości natężenia oświetlenia (tj. 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx i 25 lx), które występują przy ilościowej ocenie zanieczyszczania światłem. Zaleca się, aby luksomierze były poddawane okresowemu wzorcowaniu. Jest to jeden z najprostszych sposobów umożliwiających weryfikację prawidłowości wskazań. Warto też podkreślić, że wzorcowanie jest podstawą utrzymania spójności pomiarowej.

W artykule zamieszczono przykładowe wyniki wzorcowania różnych typów luksomierzy. Zaprezentowano także wyniki pomiarów laboratoryjnych niskich wartości natężenia oświetlenia przy zastosowaniu luksomierzy o różnych rozdzielczościach (0,001 lx, 0,01 lx, 0,1 lx, 1 lx). Jednym z ważniejszych wymagań stawianych luksomierzom jest dostosowanie krzywej czułości widmowej głowicy fotometrycznej do czułości widmowej normalnego obserwatora fotometrycznego CIE. W praktyce czułość widmowa głowic fotometrycznych odbiega od charakterystyki widmowej zalecanej przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową. Fakt ten będzie źródłem różnic w zarejestrowanych wartościach natężenia oświetlenia.

W celu określenia stopnia rozbieżności w wynikach pomiarów natężenia oświetlenia, przeprowadzonych różnymi luksomierzami, uwzględniono w badaniach

charakterystyki spektralne promieniowania emitowanego przez typowe źródła światła stosowane w zewnętrznych oprawach oświetleniowych (lampy sodowe oraz źródła LED).

Problematyka wpływu charakterystyki spektralnej promieniowania na wyniki wskazań nie jest zagadnieniem nowym. Na problem ten zwrócono uwagę we wcześniejszych pracach eksperymentalnych [16, 17], jednak opublikowane wyniki pomiarów odnoszą się do większych wartości natężenia oświetlenia (znacznie przekraczających 25 lx), niż te, o których jest mowa przy ocenie zanieczyszczenia światłem.

2. Przedmiot, zakres i sposób przeprowadzenia badań

2.1. Przedmiot badań

Pomiarom laboratoryjnym poddano siedem luksomierzy. Jednym z kryteriów wyboru była rozdzielczość na pierwszym zakresie pomiarowym. Na potrzeby niniejszej pracy poszczególnym luksomierzom nadano numerację od 1 do 7. Fotometry uszeregowano od „najlepszego” do „najgorszego” przyjmując jako kryterium rozdzielczość oraz całkowity błąd. Luksomierze, które uwzględniono w eksperymencie charakteryzują się różnymi parametrami technicznymi.

Pierwszy fotometr (o numerze 1), jest reprezentantem popularnego w Polsce luksomierza o rozdzielczości 0,001 lx. Mając na uwadze, że najliczniejsze wśród użytkowników luksomierzy są takie, których rozdzielczość na pierwszym podzakresie wynosi 0,01 lx, do badań wybrano 3 różne typy o takim parametrze. Do badań wybrano także jeden luksomierz o rozdzielczości 0,1 lx i dwa luksomierze różnych typów o rozdzielczości 1 lx.

Wybrane do badań przyrządy są próbką z dostępnych na rynku luksomierzy. Reprezentują różny poziom pod względem jakości wykonania, dokładności pomiaru, wieku przyrządu, miejsca produkcji oraz ceny rynkowej. Wartość rynkowa najdroższego luksomierza jest około 20 razy większa od luksomierza najtańszego. Poszczególne egzemplarze pochodzą od różnych użytkowników i były eksploatowane w różnych warunkach i z różną intensywnością. Każdy z zaprezentowanych luksomierzy może być przeznaczony do typowych pomiarów natężenia oświetlenia w miejscach pracy. Podstawowe dane techniczne luksomierzy zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe informacje techniczne dotyczące luksomierzy, które poddano pomiarom

Nr	Błąd całkowity (dokładność)	Błąd f_1^*	Klasa luksomierza	Rozdzielczość na pierwszym zakresie	Zakresy pomiarowe, lx	Możliwość adiustacji
1	$\leq 2,5\%$	$\leq 2,0\%$	A	0,001	30 300 300000	TAK
2	$\pm(5\% \text{ odczytu} + 10 \text{ cyfr})$	$\leq 6\%$	x	0,01	40 400 4000 40000	BRAK
3	$\pm(3\% \text{ rdg} + 10 \text{ digits})$	x	x	0,01	20 200 200 20000	BRAK
4	$\leq 3\%$	$\leq 2,0\%$	A	0,01	40 400 4000 400000	BRAK
5	$\leq 3,5\%$	$\leq 3\%$	B	0,1	200 2000 20000	TAK
6	$\pm(3\% \text{ rdg} + 2 \text{ dgt})$	x	x	1	200 20000	TAK
7	$\pm(4\% \text{ rdg} + 0,5\% \text{ f.s})$	x	x	1	200 20000	BRAK
* – błąd niedopasowania widmowego x – brak informacji w specyfikacji luksomierza						

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych producentów luksomierzy.

Zdjęcia badanych fotometrów zamieszczono na rysunku 4. W celu uniknięcia posądzenia o uprawianie reklamy czy też antyreklamy odstąpiono od podawania producentów oraz typów luksomierzy, a symbole naniesione na jednostkach fotometrów przykryto czarnym prostokątem.

W specyfikacjach technicznych luksomierzy producenci podają informację na temat całkowitego błędu miernika. Jest to miara stopnia dokładności, która dostarcza informacji o największym dopuszczalnym względnym błędzie pomiaru. Podawana jest ona w formie liczby w procentach. Niektórzy producenci nie określają klasy dokładności swoich produktów. W takich przypadkach zamiast błędu całkowitego w specyfikacji technicznej występuje termin „dokładność”. Informacja ta podawana jest w formie składowych jako np. procent wartości wskazanej przez fotometr (skrót rdg od słowa *reading*) plus krotność rozdzielczości (skrót dgt od słowa *digit*).

W przypadku fotometrów, do określenia klasy luksomierzy używa się dużych liter. Rozróżnia się cztery klasy luksomierzy: L (przyrządy o najwyższej dokładności – stosowane np. w laboratoriach wzorcujących), A (o wysokiej dokładności – stosowane np. w laboratoriach fotometrycznych przy pomiarach z wykorzystaniem goniofotometru czy kuli całkującej), B (o średniej dokładności) oraz C (o niskiej dokładności).



Lüksomierz 1



Lüksomierz 2



Lüksomierz 3



Lüksomierz 4



Lüksomierz 5



Lüksomierz 6



Lüksomierz 7

Rys. 4. Zdjęcia luksomierzy, którymi przeprowadzono pomiary

Źródło: opracowanie własne.

Parametry opisujące jakość luksomierzy zdefiniowano w międzynarodowej normie ISO/CIE 19476:2014 [18], w której wyszczególniono aż 18 takich parametrów. W polskim prawodawstwie nie ma obecnie przepisów określających wymagania metrologiczne, jakie powinny być spełnione przez luksomierze wykorzystywane do pomiarów natężenia oświetlenia. Luksomierze od wielu lat nie podlegają prawnej kontroli metrologicznej (legalizacji) co skutkuje wprowadzeniem na rynek wielu przyrządów pomiarowych o wątpliwej jakości. Dopuszczalne wartości błędów dla poszczególnych klas luksomierzy, Międzynarodowa Komisja Oświetleniowa, opublikowała w raporcie technicznym nr 231 [19]. Graniczne wartości błędu całkowitego zestawiono w tabeli 2. Nie wszyscy jednak producenci zamieszczają tę informację w specyfikacji fotometru.

Tabela 2. Klasy luksomierzy i odpowiadające im wartości błędu całkowitego

Parametr	Klasa luksomierza			
	L	A	B	C
Błąd całkowity	±3,0%	±5,0%	±10,0%	±20,0%

Źródło: opracowanie własne na podstawie [19].

Na wynik pomiaru istotny wpływ ma także rozdzielczość. Pod pojęciem rozdzielczości luksomierza należy rozumieć najmniejszą wartość, jaka może być zarejestrowana przez fotometr na danym zakresie pomiarowym. Najwyższą rozdzielczością charakteryzuje się luksomierz nr 1, zaś najniższą fotometry o numerach 6 i 7.

W związku ze starzeniem się elementów elektronicznych i optycznych luksomierza, błędy pomiaru mogą przekraczać wartości akceptowane przez użytkownika urządzenia. Wtenczas rozwiązaniem może być przeprowadzenie adjustacji przyrządu pomiarowego. Jest to czynność, która ma na celu doprowadzenie fotometru do stanu działania odpowiadającego jego przeznaczeniu. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że nie wszystkie dostępne na rynku luksomierze umożliwiają przeprowadzenie adjustacji. Wiele przyrządów o niskiej cenie rynkowej nie ma tej funkcji. Spośród fotometrów, które poddano pomiarom, tylko trzy wyposażone są w układy pomiarowe umożliwiające wykonanie adiustacji, co w znaczący sposób pozwala wydłużyć czas eksploatacji i utrzymać dobrą zdolność pomiarową tych przyrządów.

Cechą charakterystyczną luksomierzy, które poddano badaniom jest to, że głowica fotometryczna nie jest zintegrowana z miernikiem wielkości mierzonej. Takie rozwiązanie umożliwia precyzyjne ustalenie geometrii pomiaru, co ma istotne znaczenie np. podczas wzorcowania luksomierzy.

2.2. Zakres badań

Zakres badań obejmował przeprowadzenie pomiarów natężenia oświetlenia w pięciu charakterystycznych punktach: 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx. W eksperymencie skorzystano z lampy żarowej o temperaturze barwowej 2856 K (illuminant A),

dwóch lamp wyładowczych: niskoprężnej lampy sodowej LPS (ang. *low pressure sodium*) oraz wysokoprężnej lampy sodowej HPS (ang. *high pressure sodium*), a także trzech źródeł LED (ang. *light emitting diode*) o różnych barwach emitowanego promieniowania. Fotografie źródeł światła wykorzystanych podczas eksperymentu zamieszczono na rysunku 5.

Uwzględnienie w badaniach lampy żarowej może budzić pewne zdziwienie, albowiem z uwagi na niską trwałość oraz skuteczność świetlną (wielkość będącą miarą energooszczędności), źródła te zostały wyparte nie tylko z oświetlenia zewnętrznego, ale także z oświetlenia wewnątrz. Warto jednak podkreślić, że w laboratoriach fotometrycznych na terenie naszego kraju nadal korzysta się ze wzorców, którymi są lampy żarowe. Przy użyciu tych lamp wciąż przeprowadza się wzorcowanie luksumierzy. Powodem tego stanu rzeczy jest prosta obsługa (łatwość uzyskania wymaganych parametrów elektrycznych żarówki, szybka stabilizacja strumienia świetlnego, zaledwie kilka – kilkanaście minut), akceptowalna stabilność parametrów elektrycznych i fotometrycznych w czasie, czego nie można powiedzieć w przypadku lamp wyładowczych. Z uwagi na fakt, że na całym świecie wycofywane są lampy żarowe, laboratoria fotometryczne borykają się z problemem związanym z pozyskaniem odpowiednich żarówek, których dostępność z roku na rok spada. Rodzi się zatem pytanie, czy celowym jest dalsze korzystanie z tych lamp?

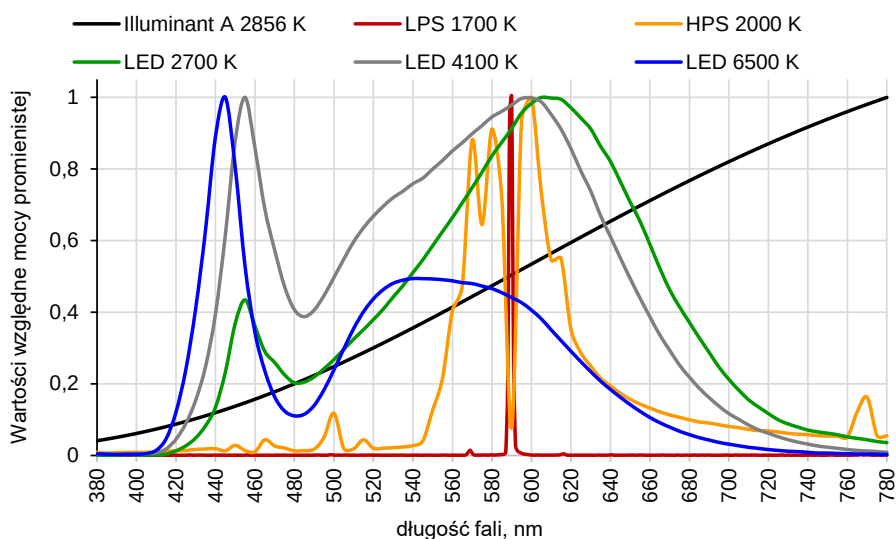
W literaturze [20, 21] podkreśla się zalety nowych, referencyjnych źródeł LED, które zostały ujęte w raporcie technicznym Międzynarodowej Komisji Oświetleniowej (CIE 15:2018 [22]). Niestety aktualnie referencyjne źródła LED nie są jeszcze powszechnie dostępne. Należy jednak oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości, w laboratoriach fotometrycznych źródła te będą stosowane w charakterze wzorców.



Rys. 5. Źródła światła wraz z wartościami temperatury barwowej (najbliższej)
Źródło: opracowanie własne.

W przypadku oświetlenia zewnętrznego szczególnie istotną rolę odgrywa efektywność energetyczna. Poziom zużycia energii elektrycznej na potrzeby oświetleniowe zdeterminowany jest m.in. rodzajem zastosowanego źródła światła. Jeszcze do niedawna najpopularniejszymi źródłami światła stosowanymi w oprawach zewnętrznych były lampy wyładowcze. Najwyższą skutecznością świetlną wykazują niskoprężne lampy sodowe (LPS). Światło emitowane z wyładowania łukowego w parach sodu o niskim ciśnieniu jest praktycznie monochromatyczne (rys. 6), co sprawia, że trudno jest mówić o jakimkolwiek oddawaniu barw oświetlanych przedmiotów. Z tego też powodu ich zakres zastosowań jest ograniczony i sprowadzał się zwykle do oświetlania dróg szybkiego ruchu, autostrad, dużych parkingów, czy dużych obszarów zewnętrznych [23, 24]. Warto jednak podkreślić, że z punktu widzenia niepożądanego zjawiska, jakim jest zanieczyszczenie światłem, światło emitowane przez te lampy jest bardzo atrakcyjne (nie zakłóca obserwacji astronomicznych). Z tego też powodu zdecydowano się uwzględnić to źródło światła w badaniach.

W oświetleniu drogowym oraz terenów zewnętrznych powszechne zastosowanie znajdują wysokoprężne lampy sodowe (HPS). Charakteryzują się one stosunkowo wysoką skutecznością świetlną i lepszym oddawaniem barw. Wyładowanie w parach sodu sprawia, że barwa światła jest żółta o temperaturze barwowej około 2000 K. Względny rozkład mocy promienistej lampy sodowej nie jest ciągły, z widocznymi maksimami w przedziale 560 nm–610 nm.



Rys. 6. Względne rozkłady widmowe mocy promieniowania źródeł światła o różnych barwach emitowanego promieniowania

Źródło: opracowanie własne.

Niezwykle dynamicznie rozwijającymi się źródłami światła w oświetleniu zewnętrznym są źródła LED. W miastach, a także gminach realizowana jest systematyczna modernizacja oświetlenia. Najczęstszą przesłanką do przeprowadzenia modernizacji oświetlenia zewnętrznego jest poprawa efektywności energetycznej. Idea funkcjonowania białych źródeł LED polega na przekształcaniu przez luminofor wytworzonego przez chip światła niebieskiego. W zależności od składu chemicznego luminoforu możliwym jest uzyskanie barwy światła o różnych temperaturach barwowych. Innymi słowy, luminofor pełni funkcję konwertera światła niebieskiego na światło białe. Konsekwencją takiego mechanizmu wytwarzania światła będą dwa „wzniesienia” widoczne na rozkładzie względnej mocy promienistej. Pierwsze, którego maksimum przypada zwykle w przedziale długości fal 430 nm–480 nm, to promieniowanie emitowane przez diodę niebieską; drugie zaś jest efektem odpowiedzi luminoforu.

W rozważaniach uwzględniono źródła LED o barwie ciepłej (2700 K), neutralnej (4100 K) oraz chłodnej (6500 K). Ze względu na wysoką skuteczność świetlną początkowo w oświetleniu zewnętrznym powszechnie stosowano źródła LED o temperaturach barwowych powyżej 5000 K. Niestety, wraz ze wzrostem temperatury barwowej w widmie promieniowania lamp, zwiększa się zawartość promieniowania niebieskiego, co jest zjawiskiem niepożądanym w kontekście zanieczyszczenia światłem. Jak wynika z literatury [25, 26] promieniowanie krótkofalowe intensywniej rozprasza się w atmosferze potęgując efekt zanieczyszczenia światłem. Z tego też powodu, rekomendowane są źródła LED o niższych temperaturach barwowych.

2.3. Opis metodyki przeprowadzenia badań

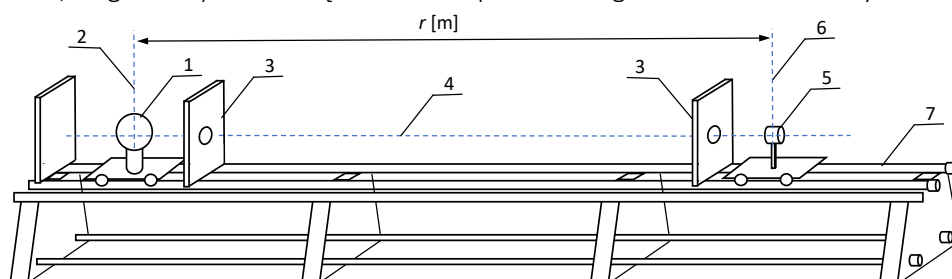
Wzorcowanie luksomierzy przeprowadza się w specyficznych warunkach – przy istotnie ograniczonym oświetleniu w pomieszczeniu. Badany miernik umieszcza się na ławie fotometrycznej, która znajduje się w ciemni fotometrycznej (pomieszczeniu, którego ściany i sufit pokryte są czarną, matową farbą).

Na potrzeby przeprowadzenia eksperymentu, skorzystano ze stanowiska pomiarowego będącego własnością Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi, podmiotu akredytowanego przez Polskie Centrum Akredytacji, m.in. w zakresie wzorcowania luksomierzy (nr AP 087). Stanowisko przeznaczone do wzorcowania luksomierzy znajduje się w specjalnie przystosowanym do tego celu pomieszczeniu Pracowni Fizykochemii, w ciemni fotometrycznej.

Głównym elementem stanowiska jest ława fotometryczna o długości 6,5 m. Wyposażona jest ona w elementy i przyrządy umożliwiające precyzyjne ustalenie geometrii pomiaru. Parametry elektryczne lamp zainstalowanych na stanowisku pomiarowym są kontrolowane za pomocą amperomierza i woltomierza. Wszystkie wzorce i przyrządy pomiarowe, mające wpływ na wyniki pomiarów na stanowisku pomiarowym, są wzorcowane z ustaloną częstością przez akredytowane pracownie Okręgowego Urzędu Miar w Łodzi lub przez laboratoria Głównego Urzędu Miar

w Warszawie. Jako przyrząd odniesienia zastosowano luksomierz laboratoryjny typu I-500 produkcji LMT (klasa L).

Podczas pomiarów były monitorowane warunki środowiskowe (temperatura otoczenia, wilgotność). Strukturę stanowiska pomiarowego zamieszczono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat układu pomiarowego: 1 – źródło światła, 2 – oś symetrii lampy, 3 – przesłona,

4 – oś optyczna, 5 – głowica fotometryczna luksomierza, 6 – oś pionowa, stykająca się z częścią czynną głowicy fotometrycznej, 7 – ława fotometryczna

Źródło: opracowanie własne.

Na jednym z końców ławy fotometrycznej (7) umieszczono wzorec światłości (lampę żarową), którą zasilono ze stabilizowanego źródła prądu stałego. Lampę wzorcową ustawiono w taki sposób, aby płaszczyzna żarnika znajdowała się wzdłuż osi pionowej (2), (osi symetrii lampy), prostopadłej do osi optycznej ławy. W pobliżu lampy zamieszczono przesłonę, ograniczającą niepożądane światło rozproszone. W pewnej odległości r , na ławie fotometrycznej, za przesłoną (3), na ruchomym wózku zainstalowano głowicę fotometryczną luksomierza. Zadbane, aby środek części czynnej głowicy fotometrycznej znajdował się w osi optycznej ławy fotometrycznej. Pomiary wykonano po upływie minimum 15 minut od momentu ustawienia wymaganych parametrów elektrycznych lampy wzorcowej podanych w świadectwie wzorcowania. Wzorcowanie luksomierzy przeprowadzono w 5 charakterystycznych punktach (1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx).

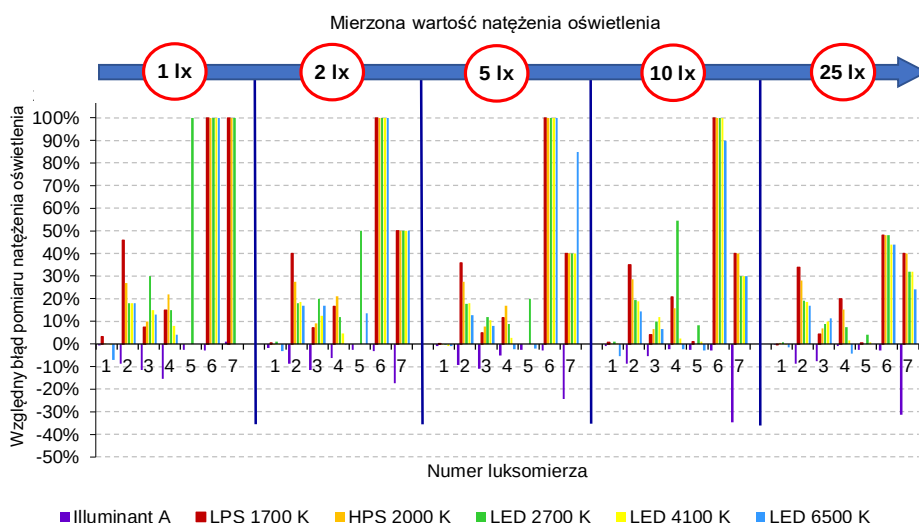
W dalszej części badań, wzorcowe źródło światła zastąpiono odpowiednio lampami sodowymi oraz źródłami LED. W pomiarach wykorzystano luksomierz odniesienia (luksomierz wzorcowy). Zmieniając na ławie fotometrycznej odległość pomiędzy źródłem światła a luksomierzem, można uzyskać żądaną wartość natężenia oświetlenia.

3. Wizualizacja rezultatów przeprowadzonych pomiarów

3.1. Względny błąd pomiaru natężenia oświetlenia

Na podstawie uzyskanych wyników z przeprowadzonych pomiarów, dla poszczególnych wartości mierzonego natężenia oświetlenia różnymi luksomierzami,

obliczono względny błąd pomiaru. Rezultaty zilustrowano graficznie na rysunku 8. Oś rzędnych reprezentuje względny błąd pomiaru zmierzonego natężenia oświetlenia, natomiast oś odciętych numer luksonierza, który poddano pomiarom. Numeracja luksonierzy jest tożsama z tą przyjętą w tabeli 1. oraz na rysunku 4.



Rys. 8. Zestawienie obliczonych wartości względnego błędu pomiaru natężenia oświetlenia przeprowadzonego różnymi luksonierzami, przy różnych źródłach światła

Źródło: opracowanie własne.

Analizując dane zestawione na rysunku 8 można dostrzec, że na względny błąd pomiaru poszczególnych luksonierzy wpływ ma nie tylko rodzaj użytego w eksperymencie źródła światła, ale także mierzona wartość natężenia oświetlenia. Uogólniając, można zauważyć, że największe wartości błędów występują przy pomiarze małych wartości natężenia oświetlenia (szczególnie dla 1 lx). Wraz ze wzrostem mierzonej wartości, względny błąd pomiaru maleje.

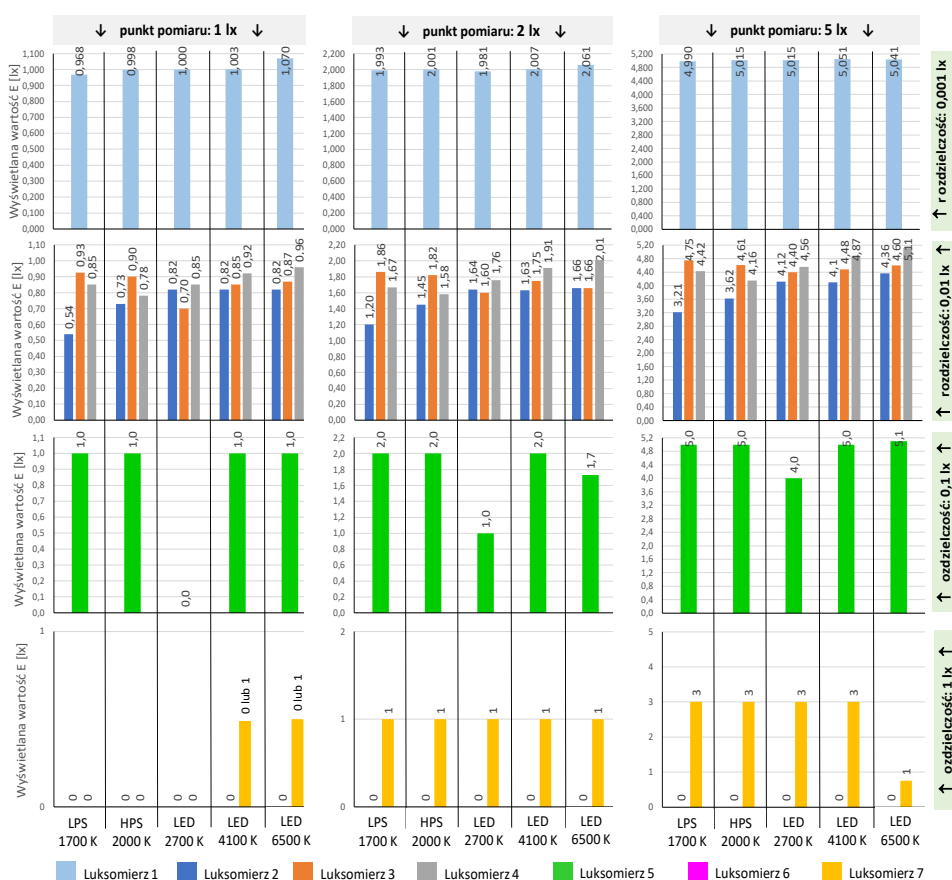
Dodatnie wartości błędu mają miejsce wtenczas, gdy wskazania fotometrów są mniejsze od tych uzyskanych przy luksonierzu odniesieniowym (wzorcowym). Błędy, których wartości są mniejsze od zera dotyczą przypadków, kiedy wskazania badanych luksonierzy są zawyżone.

3.2. Uzyskane wskazania luksonierzy

W celu zwrócenia uwagi na praktyczne problemy związane z pomiarami niskich wartości natężenia oświetlenia, na rysunku 9, dla trzech punktów pomiaru (1 lx, 2 lx i 5 lx) zamieszczono uzyskane wyniki wskazań poszczególnych luksonierzy, których głowice fotometryczne oświetlono lampami o różnych charakterystykach widmowych. Rezultaty pomiarów dla pozostałych dwóch punktów (10 lx i 25 lx) zestawiono na rysunku 10. Tym razem na osiach rzędnych podano wartości wielkości mierzonej,

a na osiach odciętych symbol źródła światła wraz z wartością temperatury barwowej najbliższej. Liczba miejsc po przecinku, przy prezentowaniu zmierzonych wartości natężenia oświetlenia wynika z rozdzielczości użytego luksomierza.

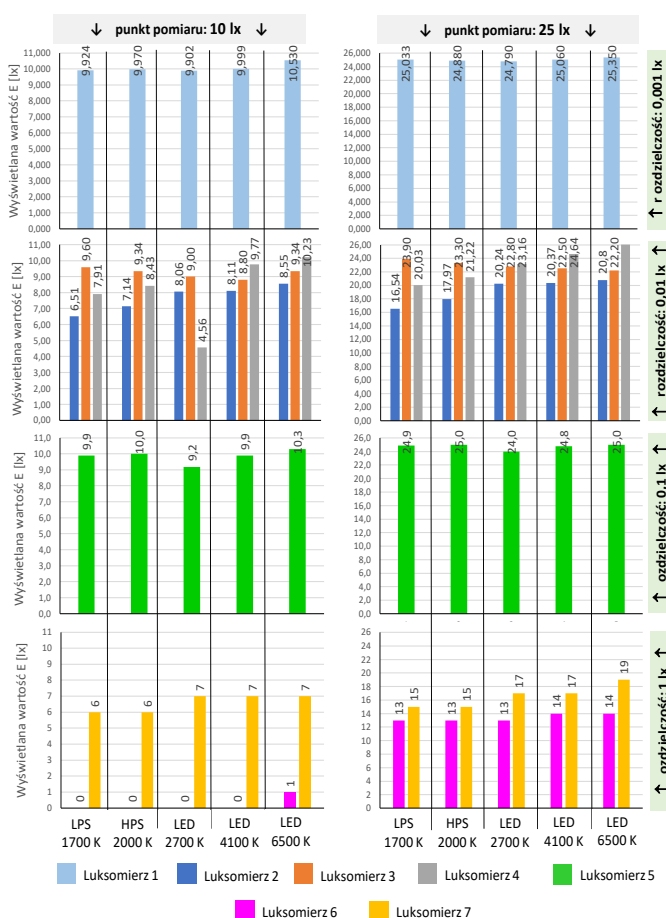
Pomimo stałych warunków oświetleniowych widoczne są rozbieżności pomiędzy nominalnymi wartościami natężenia oświetlenia, a tymi zarejestrowanymi przez poszczególne fotometry. Bez względu na rodzaj użytego w eksperymencie źródła światła oraz mierzoną wartość (punkt pomiaru), nieznaczne różnice odnotowano w przypadku luksomierza 1, co upoważnia do stwierdzenia, że wyniki pomiarów uzyskane za pomocą tego luksomierza są najbardziej wiarygodne. Najmniej optymistyczne rezultaty uzyskano w przypadku luksomierzy o numerach 6 i 7. Bez względu na rodzaj zastosowanego źródła światła, luksomierz 6 przy pomiarach w punktach 1 lx, 2 lx oraz 5 lx wskazuje wartość równą zero.



Rys. 9. Wskazania luksomierzy dla punktów pomiarowych 1 lx, 2 lx, 5 lx przy ekspozycji na promieniowanie emitowane przez lampy stosowane w oświetleniu zewnętrznym

Źródło: opracowanie własne.

Wartość różna od zera wyświetlana jest przez fotometr dopiero w punkcie 10 lx, ale jedynie przy ekspozycji na promieniowanie emitowane przez źródło LED o chłodnej barwie światła (6500 K). W przypadku lukso mierza 7, w punkcie pomiaru 1 lx przy lampach wyładowczych (LPS i HPS) oraz źródle LED o ciepłej barwie światła wyświetlana jest wartość 0 lx. Przy świetle emitowanym przez źródła LED o temperaturach barwowych najbliższych 4100 K i 6500 K, na fotometrze numer 7 na przemian wyświetlane są wartości 0 lx i 1 lx. Stabilne wskazania lukso mierza są w punktach od 2 lx wzwyż. Należy jednak zauważyć, że wyświetlane wartości natężenia oświetlenia są zaniżone. Oznacza to, że przy ocenie poziomu światła przeszkadzającego, uzyskane wartości pionowego natężenia oświetlenia mogą prowadzić do błędnych wniosków.



Rys. 10. Wskazania lukso mierzy dla punktów pomiarowych 10 lx i 25 lx przy ekspozycji na promieniowanie emitowane przez lampy stosowane w oświetleniu zewnętrznym

Źródło: opracowanie własne.

3.3. Wyniki wzorcowania luksomierzy o rozdzielczości 1 lx

Analizując dane zamieszczone na rysunkach 8–10 można stwierdzić, że luksomierze o numerach 6 i 7 nie są odpowiednie do pomiarów natężenia oświetlenia. Stwierdzenie takie jest słuszne, ale przy pomiarach niskich wartości natężenia oświetlenia (nieprzekraczających 25 lx). Przy większych poziomach mierzonego natężenia oświetlenia (występujących np. na stanowiskach pracy we wnętrzach), błędy pomiaru będą znacznie niższe.

W celu zilustrowania problemu, w tabeli 3. zamieszczono wyniki wzorcowania dla 9 luksomierzy dwóch typów. Pierwszy typ odpowiada luksomierzowi nr 6, drugi typ luksomierzowi nr 7. Poszczególne egzemplarze luksomierzy oznaczono literami od a do i. Zamieszczona przed literą cyfra oznacza typ luksomierza. Zestawione w tabelach wartości błędów względnych uzyskano na podstawie przeprowadzonych pomiarów w latach 2019–2021. Pomiary wykonano w sześciu punktach: 200 lx, 1000 lx, 1900 lx, 2000 lx, 5000 lx oraz 10000 lx.

Tabela 3. Wyniki wzorcowania kilku luksomierzy dwóch typów

Wartość nominalna	Względny błąd pomiaru w %								
	Luksomierze								
	6a	6b	6c	6d	6e	6f	6g	6h	6i
200	-18,7	3,6	-13,8	-5,7	-17,0	-17,0	-4,8	-6,1	-4,8
1000	-17,4	3,3	-13,3	-4,5	-16,2	-16,2	-3,7	-3,9	-2,9
1900	-17,1	3,2	-13,3	-4,3	-16,1	-16,1	-3,7	-3,8	-2,5
2000	-17,1	2,7	-16,0	-7,7	-15,9	-15,9	-5,9	-7,1	-5,8
5000	-16,3	2,0	-15,3	-7,0	-14,8	-14,8	-5,0	-5,1	-4,6
10000	-16,9	1,0	-16,6	-7,4	-15,2	-15,2	-5,3	-5,5	-4,8
Wartość nominalna	Luksomierze								
	7a	7b	7c	7d	7e	7f	7g	7h	7i
200	-2,0	-1,0	-0,5	-2,4	-1,5	-14,2	12,4	-2,0	-1,5
1000	-1,3	-0,2	-0,4	-1,9	-1,5	-13,8	12,4	-1,2	-0,9
1900	-0,8	0,2	-0,3	-1,9	-1,6	-13,7	12,4	-0,6	-0,5
2000	-0,4	0,3	-0,2	-1,4	-1,6	-13,5	12,5	0,3	-0,3
5000	0,7	0,9	0,3	-0,7	-1,7	-13,0	12,9	1,3	1,0
10000	1,2	2,1	0,1	-0,8	-1,6	-12,8	12,8	2,1	1,5

Źródło: opracowanie własne.

Wybrane do badań egzemplarze są próbką luksomierzy dostępnych na rynku polskim i nie należy ich traktować jako reprezentatywne dla danego typu. Luksomierze mogą się różnić jakością metrologiczną w obrębie tego samego typu, jednak zwykle obserwuje się błędy wskazań na podobnym poziomie. W przypadku luksomierzy tego samego typu co luksomierz numer 6, rozbieżności pomiędzy wartościami wyznaczonego błędu względnego dla poszczególnych przyrządów są głównie związane z wykonaną przed wzorcowaniem adiustacją. Adiustację wykonuje się na życzenie użytkownika luksomierza i nie zawsze jest ona możliwa ze względów technicznych.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów można sformułować następujące wnioski praktyczne. Wielu użytkowników luksomierzy, niezajmujących się na co dzień profesjonalnymi pomiarami natężenia oświetlenia uważa, że jeśli dolna wartość zakresu pomiarowego fotometru wynosi 0 lx i luksomierz został wywzorcowany, to bez względu na mierzoną wartość, wskazania można uznać za wiarygodne. Przyjęcie takiego założenia jest błędne, co potwierdzają zamieszczone wyniki pomiarów. Przy pomiarach małych wartości natężenia oświetlenia wpływ (związany z użytym przyrządem) na wynik pomiaru mają m.in.: rozdzielczość przyrządu, wartość wielkości mierzonej, dopasowanie widmowe głowicy fotometrycznej oraz dokładność przyrządu.

Wpływ rozdzielczości na błąd pomiaru jest odwrotnie proporcjonalny do wartości mierzonej. Im niższa jest mierzona wartość natężenia oświetlenia, tym większe znaczenie ma rozdzielczość przyrządu. Prawdopodobnie tę można dostrzec, analizując wyniki pomiarów otrzymane dla luksomierza numer 1 o rozdzielczości 0,001 lx i luksomierzy o numerach 6 i 7 o rozdzielczości 1 lx. Najmniejsze błędy pomiaru otrzymano w przypadku luksomierza opatrzonego numerem 1. Najmniej optymistyczne wyniki pomiarów uzyskano w przypadku luksomierzy o rozdzielczości 1 lx. Wyniki pomiarów zilustrowane graficznie na rysunkach 8, 9 i 10 wskazują na nieużyteczność tych fotometrów przy pomiarach natężenia oświetlenia o wartościach mniejszych niż 25 lx. W przypadku pomiarów wartości 1 lx i 2 lx dla omawianych luksomierzy błędy względne pomiaru przyjmują znaczne wartości (nawet 100%), wobec czego nie powinny być one używane podczas pomiarów małych wartości natężenia oświetlenia.

Do interesujących spostrzeżeń można dojść zestawiając uzyskane wartości błędów w przypadku luksomierza numer 5 o rozdzielczości 0,1 lx z danymi uzyskanymi dla luksomierzy opatrzonych numerami 2, 3 i 4, których rozdzielczość wynosi 0,01 lx. Jeśli pominąć wyniki pomiarów z wykorzystaniem źródła LED o ciepłej barwie światła (2700 K), to wartości względnego błędu pomiaru natężenia oświetlenia są mniejsze w przypadku luksomierza o niższej rozdzielczości. Oznacza to, że nie w każdym przypadku pomiar wykonany przyrządem o wyższej rozdzielczości tożsamy jest z większą precyzją pomiaru (mniejszym błędem pomiaru).

Jakość wykonania poszczególnych elementów przyrządu pomiarowego ma duży wpływ na wyniki pomiarów. W przypadku luksomierzy szczególnie istotną rolę odgrywa stopień dopasowania względnej czułości widmowej głowicy fotometrycznej do krzywej $V(\lambda)$, opracowanej przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową CIE. Wobec faktu, że krzywa czułości widmowej detektorów krzemowych, w które obecnie wyposaża się głowice fotometryczne luksomierzy, znacznie różni się od wymaganej krzywej $V(\lambda)$, zachodzi potrzeba zastosowania filtrów. Od rodzaju i liczby zastosowanych filtrów zależy stopień odwzorowania krzywej $V(\lambda)$. Im większe będą odstępstwa pomiędzy krzywą czułości widmowej głowicy fotometrycznej luksomierza a tą opracowaną przez CIE, tym większy wpływ na wyniki pomiarów będzie miał

rozkład widmowy mocy promienistej promieniowania emitowanego przez oprawę oświetleniową. Jest to zagadnienie szczególnie ważne ze względu na dużą różnorodność stosowanych obecnie źródeł światła. W przypadku fotometrów, które poddano pomiarom, bez względu na rodzaj użytego źródła światła, małe wartości błędów uzyskano w odniesieniu dla luksomierzy o numerach 1 i 5, co może świadczyć o bardzo dobrej korekcji widmowej głowic fotometrycznych. Inaczej sytuacja przedstawia się w przypadku luksomierza 2. Można tu dostrzec (pomimo stałych warunków oświetleniowych) pewną zależność uzyskanych wskazań od rozkładu widmowego mocy promienistej lamp. Wraz ze wzrostem temperatury barwowej najbliższej odnotowano mniejsze wartości błędów pomiaru. Prawidłowość tę można zaobserwować przy wszystkich mierzonych wartościach natężenia oświetlenia (1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx oraz 25 lx).

Zamieszczone w pracy wyniki pomiarów oraz obliczeń odnoszą się do konkretnych egzemplarzy luksomierzy. Wskazania przyrządów o innych numerach fabrycznych będą się różnić od tych zaprezentowanych tutaj. Należy też mieć na uwadze fakt, że pomiary przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych. W przypadku pomiarów terenowych, różnice w wynikach pomiarów zarejestrowanych poszczególnymi luksomierzami będą się różnić od tych otrzymanych w ciemni fotometrycznej.

Z uwagi na fakt, że to użytkownik przyrządu pomiarowego ponosi odpowiedzialność za wykonane pomiary, kwestia wyboru luksomierza jest bardzo istotna. Z pewnością do pomiarów natężenia oświetlenia w kontekście oceny zanieczyszczenia światłem nie nadają się luksomierze 6 i 7, których rozdzielczość wynosi 1 lx. Jaki więc zatem luksomierz wybrać? Udzielenie odpowiedzi na to pytanie nie jest łatwe. Wiarygodnych wyników pomiarów niewątpliwie należy oczekiwać w przypadku luksomierzy klasy A i o rozdzielczości 0,001 lx. Wobec faktu, że niskie poziomy natężenia oświetlenia występują w przypadku oceny oświetlenia awaryjnego, do oceny zanieczyszczenia światłem słusznym wydaje się zarekomendowanie luksomierzy przewidzianych do pomiarów oświetlenia ewakuacyjnego. Luksomierz taki powinien mieć na pierwszym zakresie pomiarowym rozdzielczość nie mniejszą niż 0,01 lx, a całkowity błąd pomiaru (zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 1838 [27]), nie powinien przekraczać 10%. Wskazane jest także, aby luksomierz był wywzorcowany, szczególnie w zakresie małych wartości natężenia oświetlenia.

Uzyskane wyniki pomiarów laboratoryjnych wskazują, że zarejestrowane wartości natężenia oświetlenia dla większości luksomierzy (w przypadku lamp stosowanych w oświetleniu zewnętrznym) są zaniżone. Należy mieć na uwadze fakt, że w przypadku wykonywania pomiarów w terenie, warunki tam panujące będą znacznie odbiegać od tych mających miejsce podczas badań laboratoryjnych. Można więc spodziewać się, że błędy pomiaru przyjmą większe wartości. Oznacza to, że pomimo przekroczenia granicznych wartości pionowego natężenia oświetlenia, konkluzje zawarte w protokole badań nie będą wskazywały na ewentualne nieprawidłowości.

Zagadnienie pomiarów natężenia oświetlenia z wykorzystaniem różnych luksomierzy oraz źródeł światła jest na tyle rozległe, że można by mu poświęcić obszerną

pracę. Z tego też powodu poruszona problematyka nie może być uznana za wyczerpaną. Autorzy przewidują kontynuowanie badań i sukcesywne publikowanie uzyskanych rezultatów.

Literatura

- [1] Boyce P.R, Eklund N.H., Hamilton B.J., Bruno L.D., *Perceptions of safety at night in different lighting conditions*, Lighting Research & Technology, 2000, 32, 2, s. 79–91, DOI: 10.1139/er-2014-0041.
- [2] Haans A., De Kort Y.A.W., *Light distribution in dynamic street lighting: two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape*, Journal of Environmental Psychology, 2012, 32, s. 342–352, DOI: 10.1016/j.jenvp.2012.05.006.
- [3] Lorenc T., Petticrew M., Whitehead M., Neary D., Clayton S., Wright K., Thomson H., Cummins S., Sowden A., Renton A., *Fear of crime and the environment: systematic review of UK qualitative evidence*, BMC Public Health, 2013, 13, s. 496, DOI: 10.1186/1471-2458-13-496.
- [4] Bereszyński M., *XXI wiek, a w Łodzi nadal ciemno*, Dziennik Łódzki z dn. 26.08.2011.
- [5] Tabaka P., Rózga P., *Influence of a Light Source Installed in a Luminaire of Opal Sphere Type on the Effect of Light Pollution*, Energies 2020, 13, 2, s. 306, DOI: 10.3390/en13020306.
- [6] Tabaka P., *Pilot Measurement of Illuminance in the Context of Light Pollution Performed with an Unmanned Aerial Vehicle*, Remote Sensing, 2020, 12, 13, DOI: 10.3390/rs12132124.
- [7] Górczewska M., *Oświetlenie dróg publicznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, nr 4, s. 100–102.
- [8] Raczak A., Zalesińska M., Wandachowicz K., *Modyfikacja wyposażenia szklarni w kurtyny jako sposób na zmniejszenie zanieczyszczenia światłem oraz poprawę efektywności energetycznej instalacji oświetleniowej – stadium przypadku* [w:] Andrzej Kotarba (red.) *Zanieczyszczenie światłem – źródła, obserwacje, skutki*, Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa 2019, s. 121–136.
- [9] PN–EN 12464–2:2008 Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.
- [10] PN–EN 12464–2:2014–05 Światło i oświetlenie – Oświetlenie miejsc pracy – Część 2: Miejsca pracy na zewnątrz.
- [11] *CIE 150:2003 Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light*, International Commission on Illumination, 2017, DOI: 10.25039/TR.150.2017.
- [12] Obwieszczenie Ministra Inwestycji i Rozwoju z dnia 8 kwietnia 2019 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2019 r., poz. 1065).
- [13] Skwarło-Sońta K., *Skażenie światłem: co dziś wiemy o jego wpływie na funkcjonowanie organizmu człowieka?*, Kosmos, 2015, t. 64, nr 4, s. 633–642.
- [14] Skarżyński K., *Penetracja światłem obiektu iluminowanego w kontekście polskich wymagań normatywnych*, Polish Journal for Sustainable Development, 2017, 21, 2, s. 107–116, DOI: 10.15584/pjsd.2017.21.2.12.

- [15] Śląska Okręgowa Izba Architektów Rzeczypospolitej Polskiej, Projekt Rozporządzenia Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 11 maja 2016 r., http://slaska.iarp.pl/wp-content/uploads/2016/05/dokument221821_l.pdf?akcja=pobierz (dostęp: 17.12.2021).
- [16] Banaszak A., Tabaka P., Wtorkiewicz J., *Analiza wybranych właściwości różnych typów luksomierzy*, Prace Instytutu Elektrotechniki, 2015, z. 268, s. 83–100.
- [17] Tabaka P., Wtorkiewicz J., *Ocena przydatności świadectwa wzorcowania luksomierza w odniesieniu do wybranych problemów przy pomiarach fotometrycznych* [w:] *Metrologia naukowa, normatywna i przemysłowa – wybrane zagadnienia*, J. Roj (red.), Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2020, s. 63–76.
- [18] ISO/CIE 19476:2014 Characterization of the performance of illuminance meters and luminance meters.
- [19] CIE 231:2019 Classification System of Illuminance and Luminance Meter.
- [20] Pulli T., Dönsberg T., Poikonen T., Manoocheri F., Kärhä P., Ikonen E., *Advantages of white LED lamps and new detector technology in photometry*, Light: Science & Applications, 2015, 4, e332, DOI: 10.1038/lsa.2015.105.
- [21] Kokka A., Poikonen T., Blattner P., Jost S., Ferrero A., Pulli T., Ngo M., Thorseth A., Gerloff T., Dekker P., Stuker F., Klej A., Ludwig K., Schneider M., Reinert T., Ikonen E., *Development of white LED illuminants for colorimetry and recommendation of white LED reference spectrum for photometry*, Metrologia, 2018, 55, 4, s. 526–534, DOI: 10.1088/1681-7575/aacae7.
- [22] CIE 15:2018 Colorimetry. International Commission on Illumination, 2018, DOI: 10.25039/TR.015.2018.
- [23] Wiśniewski A., *Elektryczne źródła światła*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2010.
- [24] Wiśniewski A., *Źródła światła*, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2013.
- [25] Strutt, J.W., *On the transmission of light through an atmosphere containing many small particles in suspension, and on the origin of the blue of the sky*, Philosophical Magazine, 1899, 47, s. 375–384.
- [26] Sakurada, Y., Nakamura, T., *Demonstration of the light scattering phenomenon in the atmosphere*, [w:] *Seventh International Conference on Education and Training in Optics and Photonics, Singapore, 26–30 November 2001*, Proceedings of SPIE, vol. 4588, s. 490–498.
- [27] PN-EN 1838:2013–11 Zastosowanie oświetlenia. Oświetlenie awaryjne.

INFLUENCE OF APPLIED ILLUMINANCE METER ON THE RESULTS OF MEASUREMENTS OF LIGHT INTENSITY IN THE CONTEXT OF LIGHT POLLUTION

Abstract: The article presents the results of illuminance measurements for seven types of luxmeters using six light sources with different values of the correlated color temperature. The measurements were carried out at the characteristic points for the assessment of light immission: 1 lx, 2 lx, 5 lx, 10 lx and 25 lx. The results clearly indicate that in the constant lighting conditions, the accuracy of the measurement depends on the appropriate selection of the measuring instrument, in particular its resolution. The spectral characteristics of the radiation emitted by various light sources are also important.

Keywords: illuminance meter, calibration, resolution, measurement error, light sources