

## Pomiary rozkładu luminancji w sali lekcyjnej z wykorzystaniem systemu typu Skywatcher

**Streszczenie.** Celem niniejszej pracy jest określenie możliwości wykorzystania zautomatyzowanego systemu typu Skywatcher, w celu wykonania pomiarów rozkładów luminancji na wybranych powierzchniach wewnątrz oświetlanych, takich jak sufity, ściany itp. W artykule przedstawiono procedurę pomiaru rozkładu luminancji powierzchni ścian i sufitu pomieszczenia biurowego z wykorzystaniem miernika luminancji współpracującego z systemem Skywatcher.

**Abstract.** The aim of this work is to determine the possibility of using an automated Skywatcher system to analyze the luminance distributions on selected surfaces in illuminated rooms, such as ceilings, walls, etc. The paper presents a procedure for measuring the luminance distribution of wall and ceiling surfaces of an office room using a luminance meter cooperating with the Skywatcher system. (**Luminance distribution measurements in a classroom using the Skywatcher system**).

**Słowa kluczowe:** luminancja, pomiar luminancji, ośnienie.

**Keywords:** luminance, luminance measurement, glare.

### Wstęp

Prawidłowo dobrana instalacja oświetleniowa w szkołach, biurach oraz w innych budynkach użyteczności publicznej, daje gwarancję wygody i bezpieczeństwa pracy. Nieodpowiednie oświetlenie wewnątrz powoduje dyskomfort, może wpływać na nasze samopoczucie, efektywność pracy, poziom koncentracji, a także znacząco wpływać na pogorszenie się jakości wzroku.

Podczas projektowania oświetlenia we wnętrzach, należy zwrócić szczególną uwagę na podstawowe parametry otoczenia świetlnego, scharakteryzowane w Polskiej Normie PN-EN 12464-1:2016. Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach [1]:

- rozkład luminancji,
- natężenie oświetlenia,
- kierunkowość światła, oświetlenie w przestrzeni wnętrza,
- zmienność światła (poziomy i barwa światła),
- oddawanie barw i wygląd barwy światła,
- ośnienie,
- migotanie.

W trakcie procesu projektowego, wykonuje się szereg obliczeń i symulacji, mających na celu dobranie odpowiedniego osprzętu oświetleniowego. Ocenie poddaje się zazwyczaj wartości natężenia oświetlenia oraz jego równomierność. Często pomijamy, aczkolwiek niezwykle istotnym czynnikiem, wpływającym na jakość widzenia i komfort pracy w danym pomieszczeniu, jest otoczenie świetlne, opisane za pomocą rozkładu luminancji.

Luminancja powierzchni w określonym kierunku jest wielkością fotometryczną, opisywaną jako stosunek światłości elementarnego pola powierzchni w określonym kierunku do pola powierzchni pozornej danego elementu [2]. Jednostką luminancji w układzie SI jest kandela na metr kwadratowy .

$$(1) \quad L_{\alpha} = \frac{dI_{\alpha}}{dS \cdot \cos\alpha} = \frac{d^2\phi}{d\omega \cdot dS \cdot \cos\alpha}$$

Prawidłowo zaprojektowana instalacja oświetleniowa, powinna zapewnić właściwie zrównoważony rozkład luminancji. Zbyt wysoka luminancja może powodować przykre wrażenie ośnienia, natomiast przy niskich wartościach, otoczenie sprawia wrażenie monotonnego oraz negatywnie wpływa na stymulację i chęć pracy. Aby

zwiększyć skuteczność i komfort pracy należy nie tylko przeanalizować wartości natężenia oświetlenia i równomierność, ale również zwrócić uwagę na rozkład luminancji na różnych powierzchniach pomieszczenia, takich jak sufity, ściany, itp.

Luminancję powierzchni rozpraszającej można scharakteryzować za pomocą jej współczynnika odbicia i natężenia oświetlenia na tej powierzchni. W normie PN-EN 12464-1:2016 [1] określono następujące zakresy współczynników odbicia głównych powierzchni we wnętrzach:

- płaszczyzna pracy: od 0,2 do 0,6,
- sufit: od 0,6 do 0,9,
- ściany: od 0,5 do 0,8,
- podłoga: od 0,2 do 0,4,
- główne przedmioty w pomieszczeniu: od 0,2 do 0,7.

Norma PN-EN 12464-1:2016 [1], odnosi się również do konieczności wytworzenia na powierzchniach pionowych (ściany i główne powierzchnie pionowe) średniej wartości natężenia oświetlenia nie mniejszej niż 50 lx (75 lx w pomieszczeniach min. biurowych), zaś na suficie nie mniejszej niż 30 lx (50 lx w pomieszczeniach min. biurowych), przy czym równomierność całkowita rozkładu natężenia oświetlenia nie może być mniejsza niż 0,1. Rozkład luminancji oceniany jest więc na podstawie rozkładu natężenia oświetlenia, przy założeniu, że powierzchnie w pomieszczeniu mają równomiernie rozproszony charakter odbicia światła. Należy się więc spodziewać w polu widzenia obserwatora poziomów luminancji ścian przekraczających 15 cd/m<sup>2</sup> i luminancji opraw przekraczających 20 kcd/m<sup>2</sup> (w pomieszczeniach z komputerami poniżej 1000 cd/m<sup>2</sup> w zależności od klasy ekranu), co prowadzi do powstania kontrastu luminancji nawet powyżej 1000:1.

### Metodyka pomiarowa

Pomiary rozkładu luminancji wykonuje się zazwyczaj wykorzystując punktowe mierniki luminancji, które w odróżnieniu od mierników matrycowych, charakteryzują się zwykle korekcją widmową  $V(\lambda)$  i zachowują warunki geometrii pomiaru, bez efektów dystorsyjnych, charakterystycznych w miernikach matrycowych. Są to jedne z najprostszych rozwiązań, które doskonale sprawdzają się przy pomiarach niewielkich obszarów we wnętrzach. W przypadku, kiedy analiza rozkładu luminancji obejmuje większą przestrzeń, pomiar z wykorzystaniem konwencjonalnego miernika luminancji może okazać się

niezwykle pracochłonny. Aby pomiary większych przestrzeni przebiegały sprawnie, a ich wyniki były jak najbardziej zbliżone do wartości rzeczywistych, warto wyposażyć stanowisko w dodatkowy sprzęt. Rozwiązaniem, znacznie ułatwiającym i przyspieszającym pomiary, może być wykorzystanie różnego rodzaju statywów ręcznych, bądź zautomatyzowanych. Zaproponowanym przed autorów rozwiązaniem, jest zastosowanie automatycznej głowicy fotograficznej z napędem elektrycznym typu SkyWatcher Virtuoso, połączonej kolejno z ręcznym miernikiem luminancji LS100 oraz miernikiem matrycowym LMK Mobile Air.

### Sky-Watcher Virtuoso

Zastosowane przy pomiarach luminancji urządzenie typu SkyWatcher Virtuoso jest zautomatyzowanym, rozbudowanym statywem fotograficznym z precyzyjnym napędem elektrycznym. Urządzenie pozwala na wykonanie serii zdjęć w wybranych odstępach czasowych, fotografowanie różnych elementów w zaplanowanej kolejności oraz pozwala na wykonanie zdjęć w formie panoramy 360°. Programowanie pozycji rejestrowanych obiektów odbywa się poprzez dołączony do głowicy pilot SynScan. Widok SkyWatcher'a Virtuoso przedstawiono na rysunku 1.

Urządzenie wyposażone jest w dwa bipolarne silniki krokowe, które napędzając przekładnie ślimakową umożliwiają ruch głowicy w osi pionowej i poziomej. Z uwagi na brak przekładni redukcyjnych, zredukowano powstawanie luzów co skutkuje wysoką dokładnością pozycjonowania głowicy. Rozwiązanie to zostało opatentowane przez firmę Sky Watcher jako Freedom Find™ [4] i jest stosowane we wszystkich głowicach tej firmy. Rozwiązanie to pozwala na poruszanie nim w obu osiach zarówno manualnie, poprzez zwolnienie sprzęgła, bądź elektronicznie, bez utraty aktualnej pozycji. Producent nie publikuje danych dotyczących dokładności pozycjonowania głowicy Virtuoso. Porównując inne głowice producenta oparte na tej samej technologii zauważono, że dokładność pozycjonowania głowicy EQ8 wynosi około 0,12 sekundy kątovej [7] co odpowiada przemieszczeniu punktu pomiarowego o  $\pm 6\text{mm}$  z odległości 10m.



Rys.1. Głowica fotograficzna SkyWatcher Virtuoso [3]

W literaturze [8] opublikowano wyniki pomiarów dokładności pozycjonowania głowicy pomiarowej. Stanowisko, zaprezentowane na rysunku 2, składało się z głowicy SkyWatcher Virtuoso, pilota SynScan oraz czujnika zegarowego firmy Mitutoyo o zakresie pomiarowym 1mm i

dokładności 0,01mm umieszczonego na podstawie magnetycznej.



Rys.2. Stanowisko do pomiaru powtarzalności ustawień napędu [8]

Wykonano [8] szereg pomiarów polegających na obrocie głowicy względem dwóch osi do wybranej dowolnej pozycji i powrocie urządzenia do punktu bazowego (przy którym umieszczono główkę czujnika zegarowego).

Obrona Strategia pomiarów:

- zapamiętanie położenia wskazówki czujnika zegarowego,
- odejście od wyznaczonej pozycji z obrotem w obu osiach na inną dowolnie wybraną pozycję,
- wybranie opcji automatycznego dojazdu głowicy na wyznaczoną pozycję,
- odczytanie położenia wskazówki czujnika zegarowego,
- zapisanie wyniku.

Wyniki pomiarów potwierdziły wysoką precyzję urządzenia SkyWatcher. Za każdym razem urządzenie wracało niemal idealnie w to samo miejsce. Różnica względem pozycji bazowej wyniosła 0,05-0,07 mm. Uznano, że wyniki dokładności pozycjonowania głowicy są zadowalające, co kwalifikuje ją do dalszych prac związanych z pomiarami luminancji.

Dodatkowo urządzenie SkyWatcher cechuje się mobilnością. Lekki statyw zasilany jest ośmioma bateriami AA, dzięki czemu można z niego korzystać w dowolnym miejscu, nie będąc ograniczonym koniecznością zlokalizowania urządzenia w bliskiej odległości gniazda elektrycznego. SkyWatcher Virtuoso posiada manipulator, którym można sterować manualnie w dwóch płaszczyznach (pionowej i poziomej), bądź zaprogramować go w taki sposób, by poruszał się płynnie pomiędzy 20 programowalnymi położeniami kątowymi głowicy i wykonywał fotografie w trybie „timelapse”. Prędkość poruszania się głowicy, można wybrać z pięciu dostępnych wariantów [4]:

- prędkość 1: 1 obrót o 360° w ciągu 24 godzin,
- prędkość 2: 1 obrót o 360° na sześć godzin,
- prędkość 3: 1 obrót o 360° na trzy godziny,
- prędkość 4: około 1,2° na sekundę,
- prędkość 5: około 2,5° na sekundę.

Pierwsze trzy prędkości służą przede wszystkim do obrazowania poklatkowego, natomiast prędkości cztery i pięć, polecane są do wykonania standardowej wideografii.

### Miernik luminancji LS100 LMK Mobile Air

Mierniki luminancji dzielą się na dwie grupy: punktowe i matrycowe. Klasa miernika punktowego zależy w głównej mierze od wielkości kątowej pola pomiarowego. Rozmiar kątowy pola pomiarowego miernika nie powinien być zbyt duży, aby można było precyzyjnie zmierzyć luminancję powierzchni. Miernik LS100 charakteryzuje się kątem pola pomiarowego równym  $1^\circ$ . Aby określić rozkład luminancji badanej powierzchni należy wykonać serię pomiarów złożoną z wielu pojedynczych punktów pomiarowych. Mierniki matrycowe w jednej ekspozycji rejestrują kilka milionów punktów (wartości) pomiarowych luminancji. Następnie analiza obrazu wyświetla wynik w postaci mapy rozkładu luminancji zarejestrowanego obrazu. Na rysunku nr 3 przedstawiono zastosowane przez autorów urządzenia.



Rys.3. Mierniki luminancji: a) Konica Minolta LS100, b) LMK Mobile Air [5,6]

### Wyniki pomiarów rozkładu luminancji w sali lekcyjnej

Pomiary rozkładu luminancji oraz symulacje komputerowe zostały przeprowadzone dla sali lekcyjnej o wymiarach 5,46m x 11,79m i wysokości 3,1m. Instalację oświetleniową stanowi piętnaście opraw firmy GLAMOX z czterema świetłówkami T8, każda o mocy 14W.



Rys.3. Widok sali lekcyjnej

Pomiary rozkładu luminancji dla wybranego pomieszczenia, przeprowadzone zostały dwuetapowo. W pierwszej kolejności pomiary wykonano wykorzystując ręczny miernik luminancji LS100, który zamontowano na statywie SkyWatcher Virtuoso. Głowicę fotograficzną zaprogramowano w taki sposób, aby wykonać pomiary dla punktów wskazanych na rysunku 4. Następnie urządzenie pomiarowe LS100 wymieniono na miernik matrycowy LMK Mobile Air.

Punkt numer 5 znajdował się w głównej osi miernika luminancji, został więc przyjęty jako punkt początkowy, równy  $0^\circ$ . Pomiary wykonano przesuwając głowicę równomiernie co  $5^\circ$  w górę i w dół. W trakcie analizy obrazu odczytano wartości luminancji we wskazanych punktach. Uzyskane wyniki zostały zestawione w tabeli 1.



Rys.4. Widok siatki pomiarowej



Rys.5. Rozkład luminancji sali lekcyjnej z analizowanymi punktami pomiarowymi

### Symulacje komputerowe

Dostępne obecnie oprogramowanie do obliczania oświetlenia może wykonać obliczenia i zaprezentować wyniki rozkładów luminancji. W celu sprawdzenia poprawności działania ogólnodostępnych programów symulacyjnych, umożliwiających analizę rozkładu luminancji, otrzymane wyniki pomiarów rzeczywistych porównano z rezultatami, jakie wygenerowało oprogramowanie DIALux i Relux.

Na podstawie zmierzonych i obliczonych rozkładów luminancji w analizowanym wnętrzu, przyjmując jako referencyjne, wartości luminancji zmierzone obiektywnym punktowym miernikiem luminancji LS100, wyznaczono względne różnice luminancji w punktach od 1 do 16 (tabela2).

Największe rozbieżności występują w punktach pomiarowych 9, 15 i 16, które odpowiadają najwyższemu poziomom badanej luminancji. Różnice w przypadku miernika LMK sięgają 20%, zaś luminancja obliczona w DIALux jest mniejsza nawet o ponad 90%, gdy Relux zaniża wartości luminancji o nie więcej niż 60% dla poziomów powyżej  $500 \text{ cd/m}^2$ .

### Podsumowanie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów, uzyskanych przy pomocy dwóch różnych mierników luminancji, współpracujących z systemem SkyWatcher Virtuoso i porównano je z wynikami symulacji z programu DIALux i Relux.

Tabela 1. Wyniki symulacji rozkładu luminancji oraz wartości zmierzone

Punkt pomiarowy	DIALux	Relux	LS100	LMK Mobile Air
	L [cd/m <sup>2</sup> ]	L [cd/m <sup>2</sup> ]	L [cd/m <sup>2</sup> ]	L [cd/m <sup>2</sup> ]
1	98,00	68,12	75,55	71,87
2	78,00	67,05	70,25	69,09
3	86,00	59,22	64,21	62,19
4	24,00	26,60	24,77	27,65
5	15,00	34,60	32,47	32,73
6	27,00	46,00	36,04	34,74
7	68,00	65,15	69,21	67,71
8	69,00	57,02	61,50	57,58
9	536,00	515,02	476,60	382,91
10	9,60	3,80	9,08	9,34
11	83,00	44,10	60,25	60,73
12	85,00	45,90	59,16	63,03
13	77,00	47,89	60,02	65,21
14	74,00	43,00	58,12	65,96
15	80,00	449,06	780,00	801,72
16	82,00	427,90	912,00	780,64

Tabela 2. Względne różnice luminancji w punktach pomiarowych

Punkt pomiarowy	DIALux	Relux	LMK Mobile Air
	L [%]	L [%]	L [%]
1	29,72	-9,83	-4,87
2	11,03	-4,56	-1,65
3	33,94	-7,77	-3,15
4	-3,11	7,39	11,63
5	-53,80	6,56	0,80
6	-25,08	27,64	-3,61
7	-1,75	-5,87	-2,17
8	12,20	-7,28	-6,37
9	12,46	8,06	-19,66
10	5,73	-58,15	2,86
11	37,76	-26,80	0,80
12	43,68	-22,41	6,54
13	28,29	-20,21	8,65
14	27,32	-26,02	13,49
15	-89,74	-42,43	2,78
16	-91,01	-53,08	-14,40

Zastosowanie SkyWatcher'a Virtuoso umożliwiło dokładne i powtarzalne skierowanie punktowego miernika luminancji w zdefiniowane pola pomiarowe, zgodnie z założoną ścieżką punktów pomiarowych. Dokładność pozycjonowania kąтового nie przekracza 12"(0,033°), zatem jest to układ precyzyjny, który może być wykorzystany do pomiarów rozkładu luminancji wewnątrz, oceny wskaźnika ośnienia UGR oraz rozkładu luminancji dróg.

Wyniki pomiarów luminancji, zestawione w tabeli 1, pokazują zbliżone wartości luminancji w punktach pomiarowych, przy czym miernik matrycowy odbiega wartościami luminancji o ok. 5%, względem miernika LS100&SkyW. Kłopotliwa jest ocena luminancji, gdy zmienia się ona skokowo. Stosując miernik matrycowy można z dokładnością do jednego piksela uzyskać informację o wartości luminancji, a gdy stosowany jest miernik punktowy, o wartości luminancji decyduje rozmiar pola pomiarowego. Pomiar punktowym miernikiem luminancji umożliwia bezpośrednie określenie wartości

luminancji obserwowanej powierzchni, dokładniej małego jej obszaru. Wykonanie rozkładu luminancji powierzchni wymaga przeprowadzenia serii pomiarów. Dokładność wyników będzie uzależniona od liczby punktów pomiarowych oraz rozłożenia ich w przestrzeni, a co za tym idzie czasu poświęconego na badania.

Korzystając z programów DIALux i Relux zasymulowano oświetlenie rozpatrywanej sali lekcyjnej. W tabeli 1 zestawiono wyniki luminancji uzyskanych obliczeniowo oraz zmierzonych. Różnice wynikają przede wszystkim z optycznych właściwości powierzchni, nadanych w obliczeniach numerycznych, a cechami rzeczywistymi. W analizowanym przypadku nie zmierzono rzeczywistego współczynnika odbicia ścian, podłóg i sufitu lecz przyjęto wartości jako standardowe zgodne z normą PN-EN 12464-1:2016. W programie DIALux niemożliwym było uzyskanie wiarygodnego wyniku obliczeń luminancji (różnica bliska 100%) w miejscach gdzie były zainstalowane oprawy (punkt pomiarowy 15 i 16), natomiast dla tych samych punktów w programie Relux obliczono wartości prawie o połowę mniejsze od rzeczywistych (tabela 2). Różnice te wynikają także z dokładności odwzorowania rzeczywistej krzywej światłości w plikach fotometrycznych. W celu zobrazowania różnic w luminancji mierzonej i obliczanej za pomocą oprogramowania, należy w przyszłości przeprowadzić szereg dodatkowych badań, uwzględniających cechy geometryczne i właściwości materii oraz krzywe światłości stosowanych opraw oświetleniowych.

Artykuł został zrealizowany w Katedrze Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Światłej Politechniki Białostockiej w ramach pracy statutowej SWE/4/2013 oraz w ramach pracy MB/WE/5/2017 i MB/WE/7/2017 finansowanych ze środków MNiSW.

**Autorzy:** mgr inż. Magdalena Sielachowska, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Światłej, ul. Wiejska 45D/124, 15-351 Białystok, E-mail: [m.sielachowska@doktoranci.pb.edu.pl](mailto:m.sielachowska@doktoranci.pb.edu.pl) mgr inż. Damian Tyniecki, Politechnika Białostocka, Katedra Elektroenergetyki, Fotoniki i Techniki Światłej, ul. Wiejska 45D/124, 15-351 Białystok, E-mail: [d.tyniecki@doktoranci.pb.edu.pl](mailto:d.tyniecki@doktoranci.pb.edu.pl) dr hab. inż. Maciej Zajkowski, prof. PB, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki Fotoniki i Techniki Światłej, ul. Wiejska 45D/124, 15-351 Białystok, E-mail: [m.zajkowski@pb.edu.pl](mailto:m.zajkowski@pb.edu.pl)

#### LITERATURA

- [1] Polska Norma PN-EN 12464-1:2012, *Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy. Część 1: Miejsca pracy we wnętrzach*, PKN, Warszawa, 2012.
- [2] Musiał E.: Podstawowe pojęcia techniki oświetleniowej, *Biul. SEP INPE „Informacje o normach i przepisach elektrycznych”* 75/2005, str. 3-38.
- [3] <https://deltaoptical.pl/montaz-sw-virtuoso>, [dostęp: 14 maja 2018]
- [4] Instruction Manual SkyWatcher Virtuoso, Sky-Watcher U.S.A., Torrance, 2012.
- [5] Karta katalogowa miernika Konica/Minolta LS-100 Hand Held Luminance Meter, <http://www.us-instrument.com/konicaminolta-ls-100-hand-held-luminance-meter>, [dostęp: 29 maja 2018]
- [6] Karta katalogowa miernika LMK Mobile Air, [https://www.technoteam.de/product\\_overview/lmk/products/lmk\\_mobile\\_air/index\\_eng](https://www.technoteam.de/product_overview/lmk/products/lmk_mobile_air/index_eng), [dostęp: 29 maja 2018]
- [7] Karta katalogowa urządzenia Skywatcher EQ8 Mount, <https://www.bintel.com.au/product/skywatcher-eq8-mount/?v=9b7d173b068d> [dostęp: 29 maja 2018]
- [8] Hożdźko J. „Opracowanie stanowiska do pomiaru luminancji niebosłonu”, *praca dyplomowa inżynierska*, Białystok 2018