

# Ćw. 1. Pomiary podstawowych parametrów elektrycznych i fotometrycznych wybranych typów źródeł światła

Opracował: dr inż. Krzysztof Skarżyński



ZAKŁAD TECHNIKI  
ŚWIETLNEJ

## 1. Wprowadzenie teoretyczne

### 1.1. Elektryczne źródła światła

Światło to promieniowanie elektromagnetyczne, które człowiek może zaobserwować za pomocą swojego narządu wzroku [1]. Zakres widzialny człowieka zawiera się w przedziale od 380 nm do 760 nm [2]. Na samym początku człowiek wykorzystywał jedynie naturalne źródła światła, takie jak Słońce czy Księżyc. Dzięki rozwinięciu umiejętności wytwarzania oraz posługiwania się ogniem powstały pierwsze sztuczne źródła światła: ogniska, pochodnie a następnie świece i lampy oliwne. Na przestrzeni kilkuset lat udoskonalano sztuczne źródła światła oparte na płomieniu, tworząc lampy naftowe oraz gazowe [3]. Następnie szybki rozwój technologiczny, przemysłowy oraz wdrażanie rozwiązań związanych ze zjawiskiem prądu elektrycznego przyczyniły się do stworzenia pierwszego elektrycznego źródła światła pod koniec XIX wieku [3]. Była to lampa żarowa, potocznie zwana żarówką. Wykorzystuje ona zjawisko promieniowania temperaturowego (inkandescencję). Z kolei w XX wieku postęp cywilizacyjny był bardzo duży, a zapotrzebowanie na wykorzystanie sztucznego oświetlenia znacznie się zwiększyło. W wyniku tego powstały kolejne konstrukcje elektrycznych źródeł światła oparte na wytwarzaniu światła poprzez luminescencję związaną z wyładowaniem elektrycznym. Były to lampy wyładowcze, takie jak niskoprężne lampy rtęciowe (światłówki), wysokoprężne lampy rtęciowe, wysokoprężne lampy sodowe, niskoprężne lampy sodowe, wysokoprężne lampy metalohalogenkowe [4]. Pod koniec XX wieku wytworzono elektryczne źródła światła oparte na technologii półprzewodnikowej i zjawisku rekombinacji promienistej – diody elektroluminescencyjne (LED – *eng. light emitting diode*).

Większość wymienionych powyżej typów źródeł światła i obszarów ich zastosowań zostało przedstawione na w filmiku do instrukcji laboratoryjnej. Można zaobserwować, że poszczególne typy źródeł światła różnią się między sobą zarówno kształtem, jak i konstrukcją. Różnice są również związane ze sposobem wytwarzania światła. Żarówka utożsamia promieniowanie temperaturowe (inkandescencję), światłówka luminescencję, a lampa LED promieniowanie elektroluminescencyjne związane ze zjawiskiem rekombinacji dziur i elektronów w złączu półprzewodnikowym [2]. Zatem, każde z tych źródeł światła posiada inne parametry elektryczne, fotometryczne, kolorymetryczne, eksploatacyjne a także inny typowy obszar zastosowań. Głównym celem tego ćwiczenia laboratoryjnego jest wykonanie pomiarów podstawowych parametrów fotometrycznych i elektrycznych różnych typów źródeł światła i dokonanie ich porównania między sobą.

### 1.2. Definicja strumienia świetlnego i skuteczności świetlnej źródła światła

Strumień świetlny to podstawowa wielkość fotometryczna pochodząca od strumienia energetycznego i określona na podstawie oceny promieniowania za pomocą odbiornika, którego czułość widmowa odpowiada czułości widmowej oka przystosowanego do jasności, czyli widzenia dziennego lub tzw. widzenia fotopowego (1) [5]. Jest to wielkość, która przede wszystkim w sposób ilościowy charakteryzuje źródło światła lub oprawę oświetleniową. Wartość strumienia świetlnego określa potencjał świecenia w każdym możliwym kierunku dla danego źródła światła lub oprawy oświetleniowej. Jednostką strumienia świetlnego u układzie SI jest lumen.

$$\phi = K_m \int_0^{\infty} \phi_e(\lambda) V_\lambda d\lambda \quad [lm] \quad (1)$$

gdzie:

$\phi$  – strumień świetlny [lm]

$\phi_e(\lambda)$  – widmowy rozkład (gęstość) strumienia energetycznego (mocy promienistej)  $[\frac{W}{nm}]$

$V_\lambda$  – względna skuteczność świetlna promieniowania monochromatycznego dla widzenia fotopowego

$K_m$  – fotometryczny równoważnik promieniowania, dla widzenia fotopowego wynosi  $683 \frac{lm}{W}$

$\lambda$  – długość fali [nm]

Skuteczność świetlna to również parametr, który w sposób ilościowy charakteryzuje źródło światła (lub oprawę oświetleniową). Jest to iloraz strumienia świetlnego wypromieniowanego przez to źródło światła i mocy czynnej pobranej przez to źródło światła (2) [1]. Obecnie można zaobserwować duże nastawienie na produkcję i stosowanie źródeł światła o wysokiej wartości skuteczności świetlnej, powyżej 120 lm/W (np. diod elektroluminescencyjnych). Przykładowe zakresy wartości strumienia świetlnego i skuteczności świetlnej dla wybranych typów elektrycznych źródeł światła zostały przedstawione w tabeli 1.

$$\eta = \frac{\phi}{P} \left[ \frac{lm}{W} \right] \quad (2)$$

gdzie:

$\eta$  – skuteczność świetlna źródła światła  $[\frac{lm}{W}]$

$\phi$  – strumień świetlny źródła światła [lm]

$P$  – moc czynna źródła światła [W]

**Tabela 1. Przykładowe wartości strumienia świetlnego i skuteczności świetlnej dla wybranych typów źródeł światła [2], [6]**

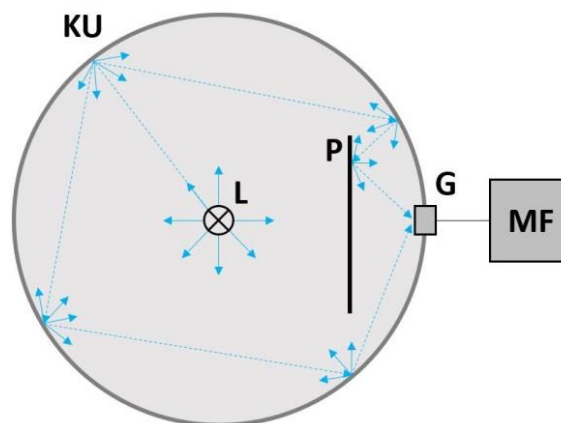
L.p.	Typ źródła światła	Strumień świetlny [lm]	Skuteczność świetlna [lm/W]
1.	żarówka głównego szeregu 60 W	710	12
2.	żarówka halogenowa 53 W	850	16
3.	światłówka kompaktowa 23 W	780	34
4.	światłówka liniowa 18 W	1350	75
5.	lampa rtęciowa 80 W	3800	48
6.	lampa sodowa wysokoprężna 70 W	6600	94
7.	lampa sodowa niskoprężna 180 W	32000	178
8.	lampa metalohalogenkowa 70 W	6300	90
9.	dioda świecąca (LED) 1 W	180	180

## 1.3. Pomiar strumienia świetlnego

Pomiar strumienia świetlnego odbywa się zazwyczaj przy wykorzystaniu urządzenia nazywanego lumenomierzem (lub kulą Ulbrichta). Urządzenie to ma najczęściej kształt kuli, której średnica może przyjmować bardzo różne rozmiary, od kilkunastu centymetrów do kilku metrów. Wygląd typowego lumenomierza został przedstawiony na rysunku 1, a jego przekrój poprzeczny na rysunku 2.



Rys. 1. Typowe konstrukcje lumenomierzy kulistych (fot. K. Skarżyński)



Rys. 2. Przekrój poprzeczny typowej konstrukcji lumenomierza: KU – kula Ulbrichta, P – przesłona, G – głowica fotometryczna, MF – miernik fotoprądu

W środku kuli, której powierzchnia została pokryta farbą odbijającą w sposób rozpraszający, zostaje umieszczone świecące źródło światła (rys 2). Efekt oświetlenia wnętrza kuli będzie sumą bezpośredniego natężenia oświetlenia oraz pośredniego natężenia oświetlenia, wynikającego ze zjawiska odbić wielokrotnych (3).

$$E = E_B + E_P = E_B + \frac{\phi_P}{S} = E_B + \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \phi_0 \rho^{i-1}}{4\pi R^2} \quad (3)$$

gdzie:

$E$  – całkowite natężenie oświetlenia [lx]

$E_B$  – bezpośrednie natężenie oświetlenia [lx]

$E_P$  – pośrednie natężenie oświetlenia [lx]

$\phi_P$  – strumień świetlny pochodzący od odbić wielokrotnych [lm]

$\phi_0$  – strumień świetlny źródła światła umieszczonego w kuli [lm]

$\rho$  – współczynnik odbicia wewnętrznej powierzchni kuli [-]

$S$  – powierzchnia kuli [m<sup>2</sup>]

$R$  – promień kuli [m]

Okazuje się jednak, że strumień świetlny jest wprost proporcjonalny jedynie do pośredniego natężenia oświetlenia (4). Zachodzi zatem potrzeba wyeliminowania składowej bezpośredniej. Jest to realizowane za pomocą nieprzepuszczającej promieniowania przesłony umieszczonej pomiędzy źródłem światła a głowicą pomiarową (rys. 2). Ponieważ współczynnik odbicia  $\rho$  musi być mniejszy od 1, zatem szereg geometryczny reprezentujący zjawisko odbić wielokrotnych jest zbieżny i wyrażenie (4) może przyjąć postać (5).

$$E = E_P = \frac{\phi_0}{4\pi R^2} \frac{\rho}{1 - \rho} = k\phi_0 \quad (5)$$

Warto zauważyć, że parametry związane z geometrią i pokryciem wnętrza kuli (promień oraz współczynnik odbicia) są stałe dla danego lumenomierza. Zatem, mogą być one traktowane jako stała  $k$ . Powstałe wyrażenie (5) określa, że strumień świetlny źródła światła umieszczonego we wnętrzu kuli jest wprost proporcjonalny do natężenia oświetlenia uzyskanego w okienku pomiarowym. To natężenie oświetlenia jest również wprost proporcjonalne do wartości prądu fotometrycznego (6). Zatem strumień świetlny jest wprost proporcjonalny do uzyskanej wartości prądu fotometrycznego (7).

$$E = ki_f \quad (6)$$

$$\phi_0 = ki_f \quad (7)$$

Na podstawie zależności (7) można wykonać pomiar strumienia świetlnego źródła światła poprzez porównanie wartości prądów fotometrycznych dla źródła badanego oraz źródła wzorcowego (pomiar porównawczy) [5]. Odniesienie stanowi lampa wzorcowa, dla której wartość strumienia świetlnego w ustalonych warunkach pracy (m.in. dla określonej wartości napięcia znamionowego) jest znana. Najczęściej lampą wzorcową jest żarówka o specjalnej konstrukcji, zwana lampą wolframową, a wzorcowanie odbywa się według ścisłych reguł na dedykowanym stanowisku badawczym [7], [8]. Obecnie stosuje się również wzorce bazujące na diodach elektroluminescencyjnych [9].

W celu wykonania takiego pomiaru porównawczego, należy najpierw wywzorcować układ. Odbywa się to przez umieszczenie w kuli lampy wzorcowej, zasileniu jej zgodnie z protokołem wzorcowania, a następnie odczytaniu wskazania miernika fotoprądu  $i_w$ . Następnie należy w kuli umieścić badane źródło światła i po ustabilizowaniu się jego warunków pracy również odczytać wartość wskazania miernika fotoprądu  $i_x$ . Strumień świetlny badanego źródła światła można wtedy obliczyć stosując wyrażenia (8).

$$\phi_x = \phi_w \frac{i_x}{i_w} [lm] \quad (8)$$

gdzie:

$\phi_x$  – strumień świetlny źródła badanego [lm]

$\phi_w$  – strumień świetlny źródła wzorcowego (z protokołu wzorcowania) [lm]

$i_x$  – wartość wskazania miernika fotoprądu dla źródła badanego [-]

$i_w$  – wartość wskazania miernika fotoprądu dla źródła wzorcowego [-]

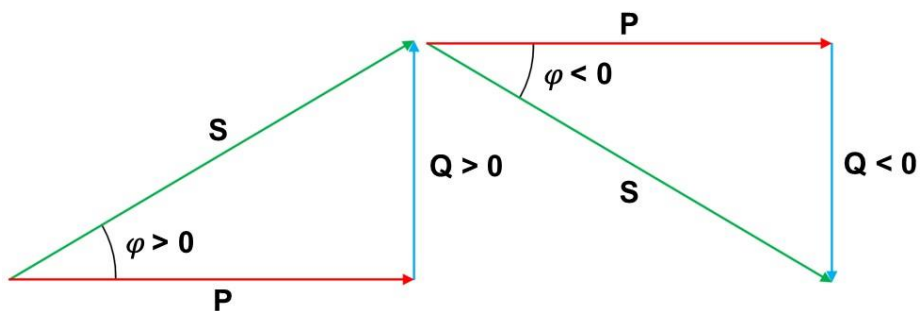
Na koniec należy jeszcze podkreślić, że przedstawiona metodyka pomiaru strumienia świetlnego jest słuszna tylko w przypadku, gdy źródło wzorcowe oraz badane posiadają podobne gabaryty. W innym przypadku należy zastosować czynnik korekcyjny uzyskiwany poprzez pomiary wykonane ze źródłem pomocniczym. Pomiar strumienia świetlnego jest stosunkowo prosty, jednak wiele czynników ma wpływ na dokładność uzyskanych wyników. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć: konstrukcję lumenomierza, parametry odbiciowe zastosowanej farby rozpraszającej, różnice w rozkładach widmowych źródła wzorcowego i pomocniczego, parametry zastosowanej głowicy fotometrycznej itp. Dodatkowo konstrukcja typowego lumenomierza jest stosunkowo prosta, więc w obecnych czasach można nawet spróbować wytworzyć lumenomierz przy wykorzystaniu technologii druku 3d [10]. Te zagadnienia są dokładnie poruszane w kolejnych semestrach studiów w ramach specjalności Technika Światłna i Multimedialna.

#### 1.4. Parametry elektryczne źródeł światła i ich pomiar

Prąd rozruchu to prąd, który pojawia się w obwodzie zasilania źródła światła podczas jego załączania, czyli w przejściowym stanie nieustalonym. Występuje przede wszystkim dla źródeł światła, które są zasilane poprzez układy stabilizacyjno-zapłonowe lub zasilacze elektroniczne np. lampy wyładowcze lub lampy LED. Ma on duże znaczenie, jeżeli chodzi o dobór zabezpieczenia nadprądowego do danej instalacji oświetleniowej. Po załączeniu źródła światła i ustabilizowaniu się warunków jego pracy, wartość skuteczna natężenia prądu, który występuje w obwodzie zasilania źródła światła jest nazywana prądem znamionowym. Z kolei wartość skuteczna napięcia, przy którym pracuje dane źródło światła jest nazywana napięciem znamionowym.

Moc czynna to część mocy pobranej przez źródło światła i jego układ zasilania, która jest zamieniona na światło oraz ciepło [11]. Natomiast moc bierna to część mocy pobranej przez źródło światła i jego układ zasilania, która jest niezbędna do poprawnego funkcjonowania układu zasilania (np. ładowania i rozładowywania kondensatorów w przetwornicach zasilających źródła LED lub magazynowania energii w polu magnetycznym dławika w przypadku układów źródeł konwencjonalnych). Suma mocy czynnej oraz biernej jest nazywana mocą pozorną [11]. Natomiast zależność pomiędzy mocą czynną i bierną w danym obwodzie oświetleniowym może być opisana za pomocą tzw. trójkąta mocy (rys. 3) oraz współczynnika mocy (9). W przypadku źródeł światła współczynnik ten powinien dążyć do 1, ze względu na potrzebę eliminacji mocy biernej. Jest to jednak trudne w przypadku niektórych typów źródeł światła. Świetłówki i lampy wyładowcze charakteryzują się odbiorem indukcyjnym (posiadają dodatnią wartość mocy biernej). Natomiast lampy LED charakteryzują się przeważnie odbiorem pojemnościowym – w takim przypadku moc bierna przyjmuje wartości ujemne. Dla ledowych źródeł światła ustalono, jakimi wartościami współczynnika mocy muszą się one charakteryzować w zależności od wartości pobieranej mocy czynnej (tabela 2) [6].

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} [-] \quad (9)$$



Rys. 3. Trójkąt mocy w zależności charakterystyki impedancyjnej: a – indukcyjny, b – pojemnościowy.

Tabela 2. Wymagane wartości współczynnika mocy dla lamp LED w zależności od ich wartości mocy czynnej [6]

P [W]	$\cos\varphi [-]$
$P \leq 5$ W	bez ograniczeń
$5 \text{ W} < P \leq 10$ W	$\geq 0,5$
$10 \text{ W} < P \leq 25$ W	$\geq 0,7$
$25 \text{ W} < P$	$\geq 0,9$

Współczynniki zawartości harmonicznych prądu i napięcia są określane poprzez stosunek wartości skutecznej wyższych harmonicznych sygnału (odpowiednio prądu lub napięcia), do wartości skutecznej składowej podstawowej (odpowiednio prądu lub napięcia) (10-11) [12]. Stanowią miarę odkształceń sieci zasilającej, wytworzonych przez dane źródło światła. Pomiary wartości poszczególnych wielkości elektrycznych źródła światła odbywa się przy wykorzystaniu analizatora mocy.

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (11)$$

### 1.5. Pomiar skuteczności świetlnej

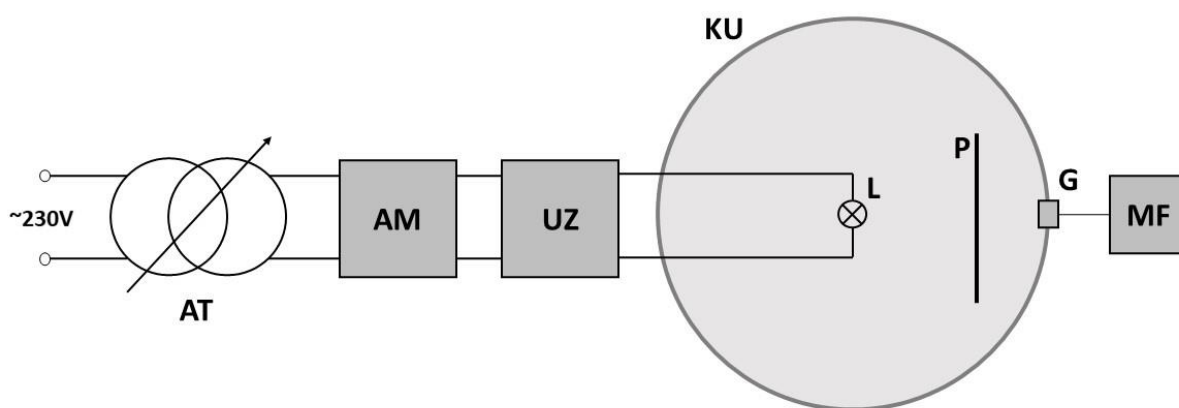
Biorąc pod uwagę definicję skuteczności świetlnej źródła światła można zauważyć, że do wyznaczenia jej wartości należy wykonać pomiary strumienia świetlnego oraz mocy czynnej źródła światła. Po wykonaniu pomiarów należy zatem podzielić uzyskaną wartość strumienia świetlnego przez uzyskaną wartość mocy czynnej, otrzymując wartość skuteczności świetlnej dla badanego źródła. W trakcie wykonywania pomiarów należy również pamiętać, że wiele czynników może wpływać na uzyskaną wartość skuteczności świetlnej. Do najważniejszych z nich należą: stabilność zasilania i warunków pracy danego źródła światła, wcześniejsze wyświecenie źródeł przed przystąpieniem do wykonywania pomiarów (np. dla źródeł wyładowczych zaleca się wyświecanie przez przynajmniej 100h), temperatura otoczenia, jakość stosowanego wzorca fotometrycznego, jakość stosowanego analizatora mocy itp.

## 2. Cel i opis ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wykonanie pomiarów i wyznaczenie dla wybranych, różnych typów źródeł światła następujących parametrów fotometrycznych i elektrycznych: strumienia świetlnego  $\Phi$ , skuteczności świetlnej  $\eta$ , prądu znamionowego  $I$ , mocy czynnej  $P$ , mocy biernej  $Q$ , współczynnika mocy  $\cos \varphi$ , współczynników zawartości harmonicznych prądu i napięcia  $THD_i$  oraz  $THD_U$ . W tym celu należy skorzystać z układu pomiarowego przedstawionego na rysunku 4 i wykonać następujące czynności:

1. Spisać parametry znamionowe badanych źródeł światła.
2. Podłączyć układ pomiarowy zgodnie z zasadami bezpieczeństwa użytkowania urządzeń elektrycznych (przy wyłączonym napięciu zasilania i przy ustawieniu największych zakresów pomiarowych).
3. Wywzorcować kulę Ulbrichta za pomocą odpowiedniego roboczego wzorca strumienia świetlnego (wartości należy zanotować w protokole pomiarowym). Wzorzec należy umieścić w kuli Ulbrichta i zasilić zgodnie z protokołem wzorcowania, stosując się do wskazówek prowadzącego zajęcia. Wzorzec wyjąć z kuli, używając ochronnych rękawic i umieścić w miejscu dla niego przeznaczonym.

4. Umieścić w kuli Ulbrichta badane źródło światła. Jeżeli wymaga ono dodatkowego układu zasilania, należy go podłączyć.
5. Zasilic badane źródło światła napięciem znamionowym 230V. W zależności od rodzaju źródła światła należy poczekać do momentu ustabilizowania się jego warunków pracy (brak istotnych zmian we wskazaniach miernika fotoprądu).
6. Po stabilizacji pracy źródła światła należy odczytać z analizatora mocy oraz miernika fotoprądu wartości wszystkich parametrów podlegających analizie.
7. Czynności punktów 3-7 należy powtórzyć dla kilku następnych źródeł światła zgodnie z instrukcjami prowadzącego zajęcia.
8. Należy pamiętać, że wszystkie wielkości elektryczne są możliwe do odczytania w sposób bezpośredni z analizatora mocy. Natomiast w celu obliczenia strumienia świetlnego oraz skuteczności świetlnej należy skorzystać ze wzorów (3) i (13).



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego: AT – autotransformator, AM – analizator mocy, UZ – układ zasilania źródła światła, KU – kula Ulbrichta, L – źródło światła, P – przesłona, G – głowica fotometryczna, MF – miernik fotoprądu.

### 3. Sprawozdanie

Każdy zespół laboratoryjny jest zobowiązany do przygotowania jednego sprawozdania, które musi zawierać następujące sekcje:

- krótki wstęp teoretyczny,
- znamionowe dane badanych źródeł światła,
- wyniki pomiarów i obliczeń strumienia świetlnego oraz skuteczności świetlnej,
- porównanie wartości poszczególnych parametrów z danymi producentów oraz poszczególnych źródeł światła między sobą,
- wnioski i podsumowanie.

#### **UWAGA:**

*Wstępu teoretycznego do sprawozdania nie należy przygotowywać na podstawie informacji zawartych w tej instrukcji laboratoryjnej.*

#### 4. Pytania weryfikacyjne

##### Wymienić typy elektrycznych źródeł światła

*Prawidłowa odpowiedź: lampy żarowe, lampy wyładowcze w tym: niskoprężne lampy rtęciowe (tzw. świetlówki), wysokoprężne lampy rtęciowe, niskoprężne lampy sodowe, wysokoprężne lampy sodowe, lampy metalohalogenkowe, lampy LED, lampy ksenonowe.*

##### Omówić zjawisko inkandescencji i luminescencji

*Prawidłowa odpowiedź: Inkandescencja to wytworzenie światła poprzez promieniowanie temperaturowe wytworzone poprzez przepływ prądu elektrycznego, luminescencja to wytworzenie światła pod wpływem innego czynnika niż temperatura np. wyładowanie elektryczne, rekombinacja promienista itp.*

##### Omówić znaczenie strumienia świetlnego i skuteczności świetlnej źródła światła

*Prawidłowa odpowiedź: Strumień świetlny to wielkość fotometryczna, która charakteryzuje potencjał świecenia źródła światła w każdym (możliwym) kierunku. Skuteczność świetlna to parametr, który w sposób ilościowy charakteryzuje źródło światła. Określa jaki strumień świetlny (ile lumenów) jest wytwarzanych z 1 W mocy czynnej danego źródła światła.*

##### Omówić metodę pomiaru strumienia świetlnego w kuli Ulbrichta

*Prawidłowa odpowiedź: Pomiar strumienia świetlnego w kuli Ulbrichta jest pomiarem porównawczym. Oznacza to, że do jego wykonania potrzebny jest stosowany wzorzec fotometryczny. Pomiar odbywa się poprzez zmierzenie wartości*

##### Omówić definicję współczynnika mocy

*Współczynnik mocy to stosunek mocy czynnej i mocy pozornej. Określa on wykorzystanie energii elektrycznej pobieranej przez odbiornik (np. źródło światła) z sieci zasilającej (sieci energetycznej).*

#### 5. Literatura

- [1] Żagan W., Podstawy Techniki Świetlnej, OWPW, Warszawa 2014.
- [2] Wiśniewski A., Źródła światła, SEP COSIW, Warszawa, 2013.
- [3] D. R. Bertenshaw, "The standardisation of light and photometry – A historical review," Light. Res. Technol., vol. 52, no. 7, pp. 816–848, 2020, doi: 10.1177/1477153520904755.
- [4] M. Rea, Lighting handbook: Reference & application, IESNA. 2000.
- [5] International Commission on Illumination (CIE), Technical Report No. 84: Measurement of luminous flux, CIE, Vienna, 1989.
- [6] Rozporządzenie Komisji (UE) 2019/2020 z dnia 1 października 2019 r. ustanawiające wymogi dotyczące ekoprojektu dla źródeł światła i oddzielnego osprzętu sterującego na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE oraz uchylające rozporządzenia Komisji (WE) nr 244/2009, (WE) nr 245/2009 i (UE) nr 1194/2012.
- [7] International Commission on Illumination (CIE), The use of tungsten filament lamps as secondary standard sources, CIE, Vienna, 2002.
- [8] Główny Urząd Miar, Fotometria radiometria - przewodnik po dziedzinie, GUM, Warszawa, 2019.
- [9] Yan J.Y, et al., Led Filament Standard Lamps for Total Luminous Flux and Luminous Intensity, Proceedings 2019 29th Quadrennial Session, pp. 1274–1282, 2019, doi: 10.25039/x46.2019.po114.
- [10] Au gustyniak M., Model mini lumenomierza do pomiarów strumienia świetlnego źródeł LED, praca inżynierska, Wydział Elektryczny Politechniki Warszawskiej, 2018, promotor: Krzysztof Skarżyński. .
- [11] Osowski S., Siwek K., Śmiałek M., Teoria obwodów, OWPW, Warszawa, 2013.
- [12] T. Popławski, M. Kurkowski, and J. Mirowski, "Improving the quality of electricity in installations with mixed lighting fittings," Energies, vol. 13, no. 22, pp. 1–17, 2020, doi: 10.3390/en13226017.