

Wyznaczenie skuteczności świetlnej wybranych źródeł światła

Cele ćwiczenia

- Wyznaczenie natężenia oświetlenia w funkcji odległości od źródła światła
- Wyznaczenie skuteczności świetlnej badanych źródeł światła (lampy LED, żarówki halogenowej oraz żarówki tradycyjnej)
- Wyznaczenie zależności skuteczności świetlnej żarówek od pobieranej mocy

Wprowadzenie

Opatentowana przez Thomasa Edisona w 1879 roku żarówka nadal cieszy się dużą popularnością w oświetleniu domowym. Jest to zasługa jej niskiego kosztu produkcji, braku efektu stroboskopowego oraz widma promieniowania zbliżonego do widma światła słonecznego. Zdecydowaną wadą żarówki jest jej niska skuteczność świetlna wynikająca z faktu, że zaledwie 2 - 4 % pobieranej przez nią energii jest przetwarzana na światło. Z tej przyczyny od lat są poszukiwane jej ekonomiczniejsze zamienniki. Obecnie można spotkać wiele różnorodnych elektrycznych źródeł światła, ale ich stosunkowo wysoka skuteczność świetlna łączy się niestety z wadami. Od kilkunastu lat w naszych domach coraz częściej pojawiają się świetlówki kompaktowe a od kilku lat bardzo wydajne lampy LED. Zaletą tych ostatnich jest duża żywotność oraz skuteczność świetlna (często ponad dziesięciokrotnie większa niż dla tradycyjnych żarówek). W niniejszym ćwiczeniu skupimy pomiary właśnie na tym ostatnim parametrze.

Wyznaczenie skuteczności świetlnej źródła światła

Skuteczność świetlną η definiujemy jako stosunek całkowitego strumienia świetlnego Φ_c emitowanego przez źródło światła do mocy pobieranej przez źródło P

$$\eta = \frac{\Phi_c}{P}. \quad (1)$$

Pobieraną moc można wyliczyć z iloczynu napięcia elektrycznego U oraz natężenia prądu elektrycznego I przepływającego przez źródło światła

$$P = UI. \quad (2)$$

Strumień świetlny Φ jest to ilość energii świetlnej przenoszanej przez dowolną powierzchnię w jednostce czasu. Mierząc energię fal świetlnych przechodzącą w jednostce czasu przez powierzchnię otaczającą źródło światła, otrzymamy całkowity strumień świetlny źródła światła Φ_c .

Pomiar Φ_c zwykle nie jest prosty ze względu na to, że źródła światła mają różnorodny kształt a energia wysyłanego promieniowania zwykle zależy od kierunku promieniowania (promieniowanie anizotropowe). Do wyznaczenia całkowitego strumienia świetlnego stosuje się specjalne metody eksperymentalne wykorzystujące kule fotometryczne lub fotometry umieszczone na ruchomym ramieniu umożliwiającym pomiar światła w różnych przestrzennych konfiguracjach. Ta ostatnia metoda pozwala stworzyć mapę przestrzennego rozsyłu światła. W niniejszym ćwiczeniu posłużymy się uproszczoną metodą pomiaru całkowitego strumienia świetlnego opartą na założeniu, że badane źródła światła są izotropowymi źródłami punktowymi. To znaczy, że ich rozmiar jest pomijalnie mały, a energia wysyłanego promieniowania świetlnego jest jednakowa we wszystkich kierunkach. Założenie to nie jest prawdziwe, ale w dalszych rozważaniach wykazemy, że w szczególnych przypadkach takie uproszczenie może być uzasadnione.

Wyznaczenie całkowitego strumienia świetlnego punktowego, izotropowego źródła światła na podstawie pomiaru natężenia oświetlenia

Podstawowym parametrem fotometrycznym jest *światłość* I_s . Jest to stosunek strumienia świetlnego $d\Phi$ zawartego w granicach nieskończenie małego kąta bryłowego do wartości tego kąta $d\omega$ (rys.1)

$$I_s = \frac{d\Phi}{d\omega}. \quad (3)$$

Jednostką światłości jest *kandela* (*cd*). Jest to jednostka ściśle zdefiniowana, należąca do układu SI. Jej nazwa wywodzi się z języka łacińskiego (*candela* - świeca), a pierwotnie światłość o wartości 1 *cd* odpowiadała światłości specjalnie wykonanej świecy. Dziś oczywiście taka definicja kandel nie jest wystarczająco precyzyjna.

Jeżeli mamy do czynienia z izotropowym źródłem światła, to światłość możemy zapisać jako stosunek całkowitego strumienia świetlnego do wartości pełnego kąta bryłowego $I_S = \Phi_C/4\pi$. Po przekształceniu uzyskamy zależność na całkowity strumień świetlny

$$\Phi_C = 4\pi I_S. \quad (4)$$

Jednostką strumienia świetlnego jest *lumen* (*lm*) zdefiniowany jako strumień świetlny wysłany w granicach kąta bryłowego równego jednemu steradianowi przez izotropowe, punktowe źródło światła o światłości jednej kandel umieszczone w wierzchołku tego kąta ($1\text{lm} = 1\text{cd}\cdot 1\text{sr}$).

W naszych badaniach wyznaczmy Φ_C na podstawie innej wielkości fizycznej - *natężenia oświetlenia* E - posługując się luksomierzem. Natężenie oświetlenia jest to stosunek strumienia świetlnego $d\Phi$ do *powierzchni* dS na którą pada:

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (5)$$

Jednostką natężenia oświetlenia jest luks ($1\text{lx} = 1\text{lm}/\text{m}^2$). Na rys. 1 widać punktowe źródło światła oraz fragment powierzchni dS oświetlonej przez strumień $d\Phi$. Jeżeli za dS przyjmiemy powierzchnię całej sfery o promieniu r ($S = 4\pi r^2$), to $d\Phi$ będzie całkowitym strumieniem świetlnym emitowanym przez źródło Φ_C . Wzór na natężenie oświetlenia przybierze w tym przypadku następującą postać

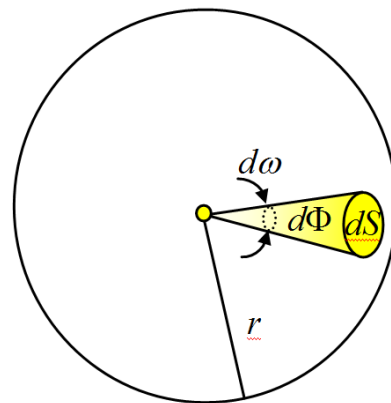
$$E = \frac{\Phi_C}{4\pi r^2}. \quad (6)$$

Z powyższego równania wynika, że - jeżeli mamy do czynienia z punktowym, izotropowym źródłem światła - pomiar natężenia oświetlenia E w odległości r od źródła umożliwi obliczenie całkowitego strumienia świetlnego emitowanego przez źródło.

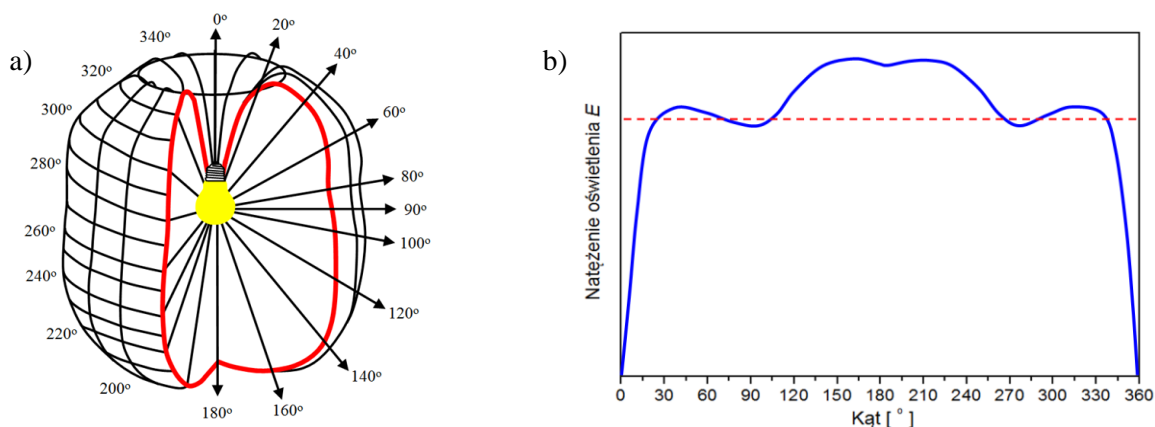
Czy żarówkę możemy potraktować jako punktowe, izotropowe źródło światła?

Oczywiście żarówkę trudno uznać za punktowe źródło światła. Udowodniono jednak, że z niewielkim przybliżeniem możemy potraktować źródło światła jako punktowe, jeżeli odległość pomiaru jest co najmniej 5 razy większa niż rozmiar źródła. Jeżeli będziemy więc wykonywali pomiary w dostatecznie dużej odległości, to nasze źródło światła możemy potraktować jako punktowe.

Bardziej złożony jest problem izotropowości źródła światła. Rzeczywiste źródła światła w mniejszym lub większym stopniu nie spełniają tego kryterium. Na przykład tzw. mleczone żarówki wysyłają światło w miarę równomiernie w każdym kierunku, ale jednak w kierunku trzonka (mocowania) żarówki nie jest ono emitowane. Na rysunku 2a przedstawiono tzw. powierzchnię rozsyłu światłości poglądowo obrazującą intensywność promieniowania w zależności od kierunku względem żarówki. Rysunek 2b ukazuje zależność natężenia oświetlenia od kąta (kierunku) względem żarówki. Łatwo zauważyć, że w przedstawionym przypadku największe natężenie obserwujemy dla kątów około 150° i 210° , natomiast dla kąta 0° wartość natężenia wynosi zero. Na rysunku 2b linią przerywaną zaznaczono również średnią wartość natężenia oświetlenia. Jak widać, nie odbiega ona znacznie od wartości natężenia w kierunku 90° . Tym samym w przybliżeniu możemy uznać, że pomiar natężenia oświetlenia w kierunku prostopadłym do osi symetrii żarówki (kąt 90°) jest wartością średnią natężenia oświetlenia. Oczywiście powyższe przybliżenie może być stosowane tylko w przypadku wybranych źródeł światła i nie można z niego korzystać w profesjonalnych pomiarach.



Rys. 1 Promieniowanie punktowego źródła światła.



Rys. 2 Przykład rozsyłu światła przez żarówkę a) powierzchnia rozsyłu światłości (tzw. bryła fotometryczna), b) zależność natężenia oświetlenia w funkcji kąta (kierunku) emisji. Linia przerywaną zaznaczono wartość średnią natężenia oświetlenia.

Dlaczego żarówki mają niską skuteczność świetlną?

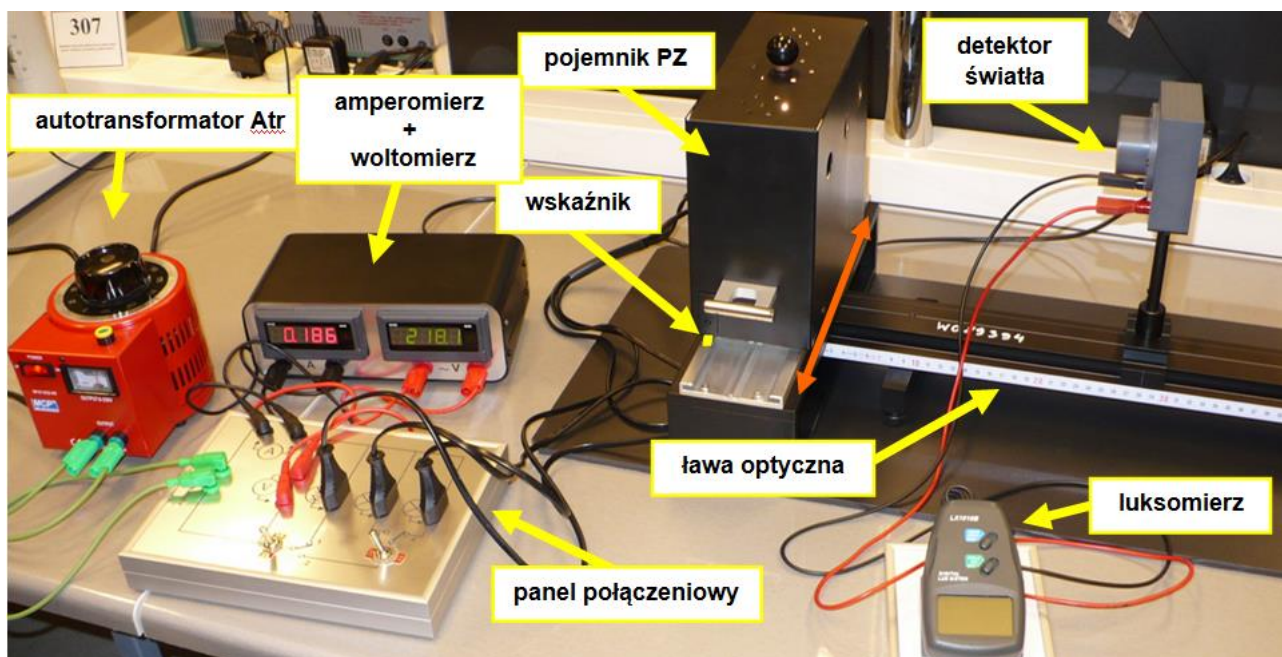
Budowa i zasada działania tradycyjnej żarówki niewiele zmieniła się w ciągu ostatnich stu lat. Jest to bańka szklana wypełniona najczęściej azotem, w środku której znajduje się cienki drucik wolframowy (żarnik). Na skutek przepływu prądu elektrycznego żarnik zostaje rozgrzany do temperatury ok. 2600 K. Każde ciało o temperaturze powyżej 0 K emituje fale elektromagnetyczne. Większość ciał, które nas otaczają, emituje fale podczerwone czyli w zakresie niewidzialnym dla człowieka. Dopiero po przekroczeniu temperatury około 1000 K ciało zaczyna świecić w kolorze ciemnoczerwonym. Wzrost temperatury powoduje emisję dalszych barw: żółtej, zielonej, niebieskiej. W wyniku ich nałożenia obserwujemy białe-żółte światło żarówki. Nadal jednak ponad 95% promieniowania to podczerwień. Poprawę skuteczności świetlnej dałoby zwiększenie temperatury żarnika. Na przykład przy temperaturze porównywalnej do temperatury powierzchni Słońca (6000 K) ponad 40% emitowanej energii fal znajdowałoby się w zakresie widzialnym. Niestety taka temperatura żarnika jest zbyt wysoka. Powszechnie stosowany wolfram zaczyna intensywnie wyparowywać w temperaturach powyżej 2600 K. W celu podniesienia temperatury żarnika żarówki zaczęto wypełniać halogenkami (np: jod, fluor, brom). Halogenki wiążą się z atomami odparowanego wolframu, a następnie, znajdując się w pobliżu rozgrzanego żarnika, związki rozpadają się, a wolfram ponownie osadza się na żarniku. Taki cykl nazywamy procesem regeneracyjnym a żarówkę - żarówką halogenową. Dzięki takiemu cyklowi żarniki żarówek halogenowych można rozgrzewać do temperatury 3000 K, co daje wzrost skuteczności świetlnej o około 30% w stosunku do żarówek klasycznych.

W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają lampy LED. Lampa LED to najczęściej zbiór diod elektroluminescencyjnych pokrytych luminoforem umieszczonych w oprawie przeznaczonej dla żarówek. Zasada działania diody elektroluminescencyjnej jest zupełnie inna niż żarówki. Nie rozgrzewa się ona do wysokich temperatur (nie żarzy się), dlatego potoczna nazwa "żarówka LED" nie jest poprawna. Diody emitują światło niebieskie, które wzbudza do świecenia luminofor. Żółto-zielone światło emitowane przez luminofor po zmieszaniu z niebieskim światłem diody daje barwę białą. Zatem w przypadku lampy LED, w odróżnieniu od żarówki, całe światło jest emitowane w zakresie widzialnym dla ludzkiego oka. Straty wynikają jedynie ze sprawności urządzenia, co sprawia, że skuteczność świetlna lamp LED jest znacznie wyższa od skuteczności żarówek.

Układ pomiarowy

Układ pomiarowy jest tak zaprojektowany, aby można wyznaczyć skuteczność świetlną trzech źródeł światła: lampy LED, żarówki halogenowej i żarówki tradycyjnej (wypełnionej azotem). Dodatkowo można przeprowadzić badania skuteczności świetlnej żarówek w funkcji pobieranej przez nie mocy. Na rys. 3 pokazano układ eksperymentalny. Badane źródła światła znajdują się w pojemniku PZ, który można przesuwac w kierunku prostopadłym do ławy optycznej. Na wyskalowanej ławie znajduje się detektor światła połączony z luksomierzem, który pozwala wyznaczyć natężenie oświetlenia w wybranej odległości od źródła światła. Do zasilania źródeł światła służy autotransformator ATr. Źródła światła, woltomierz, amperomierz oraz autotransformator są połączone za pośrednictwem panelu połączeniowego. Tam też

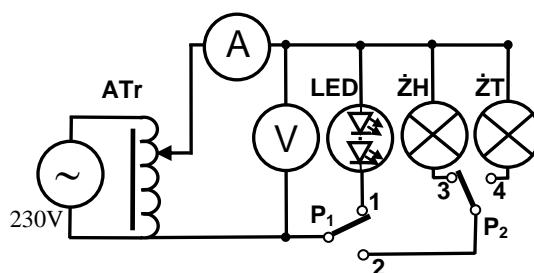
znajdują się przełączniki P_1 i P_2 umożliwiające włączenie wybranego źródła światła. Na rysunku 4 przedstawiono schemat elektryczny układu.



Rys. 3 Układ eksperymentalny do pomiaru skuteczności świetlnej wybranych źródeł światła.

Wyznaczenie skuteczności świetlnej η badanych źródeł światła

W celu wyznaczenia skuteczności świetlnej badanego źródła światła należy przesunąć pojemnik PZ tak, aby źródło znalazło się naprzeciwko detektora światła. W skrajnym położeniu "do siebie" badamy lampę LED, w położeniu środkowym (wskaźnik pojemnika na znaczniku suwnicy) badamy żarówkę halogenową a skrajnym położeniu "od siebie" - żarówkę tradycyjną. Po włączeniu wybranego źródła światła należy wyznaczyć wartości napięcia U i natężenia prądu I , a następnie wykonać pomiary natężenia oświetlenia E w funkcji odległości r od źródła. Aby wyznaczyć całkowity strumień świetlny Φ_C , należy posłużyć się równaniem (6). Dokonując w nim następujących podstawień, $y = E$, $x = 1/r^2$ oraz $a = \Phi_C/4\pi$, uzyskuje się zależność typu $y = ax+b$. Jest to zależność liniowa, gdzie wartość a jest współczynnikiem kierunkowym prostej. Wykreślając zależność natężenia oświetlenia w funkcji odwrotności kwadratu odległości od źródła światła: $E = f(1/r^2)$, powinno się otrzymać linię prostą. Stosując metodę regresji liniowej do tak otrzymanych wyników, można wyznaczyć współczynnik nachylenia prostej a , a następnie całkowity strumień świetlny $\Phi_C = 4\pi a$. Korzystając z wyników pomiarów napięcia U i natężenia prądu I , należy wyznaczyć moc pobieraną przez źródło światła $P = UI$. Ostatecznie posługując się wzorem (1), możemy wyznaczyć skuteczność świetlną.



Rys. 4 Schemat elektryczny układu zasilania i pomiaru pobieranej mocy.

Wyznaczenie zależności skuteczności świetlnej żarówki w funkcji pobieranej mocy $\eta = f(P)$

W celu wyznaczenia zależności skuteczności świetlnej żarówki w funkcji pobieranej mocy należy detektor światła umieścić w stałej odległości r naprzeciwko badanej żarówki. Następnie, zmieniając napięcie autotransformatorem, wykonać pomiary natężenia oświetlenia E . Korzystając ze wzorów (1), (2) oraz (6), możemy zapisać następującą zależność na skuteczność świetlną punkowego, izotropowego źródła światła

$$\eta = \frac{4\pi r^2 E}{UI}. \quad (7)$$

Moc należy wyznaczyć z równania (2).

Przebieg ćwiczenia

A. Wyznaczenie skuteczności świetlnej η badanych źródeł światła

1. Ustaw położenie pojemnika PZ w skrajnej pozycji "do siebie", aby lampa LED znajdowała się naprzeciwko detektora luksomierza.
2. Ustaw przełącznik P_1 w pozycji 1. Włącz zasilanie woltomierza, amperomierza i autotransformatora a następnie ustaw wartość napięcia - 230V. Zapisz odczytane wartości napięcia i natężenia prądu.
3. Wykonaj 10 ÷ 12 pomiarów natężenia oświetlenia w funkcji odległości od źródła światła w zakresie 25 ÷ 90 cm. Ze względu na nieliniową zależność oświetlenia od odległości początkowo zmieniaj dystans co 2 cm, potem co 5 cm a na koniec co 10 ÷ 15 cm.
4. Pomiary powtórz dla żarówki halogenowej (przełączniki P_1 i P_2 w pozycjach 2 i 3) oraz żarówki tradycyjnej (przełączniki P_1 i P_2 w pozycjach 2 i 4)
5. Korzystając z otrzymanych wyników wykreśl na wspólnym wykresie zależności natężenia oświetlenia od odwrotności kwadratu odległości od źródła światła $E=f(1/r^2)$ dla badanych źródeł światła.
6. Posługując się metodą regresji liniowej, wyznacz współczynniki nachylenia otrzymanych prostych a oraz ich błędy a następnie wartości całkowitego strumienia świetlnego $\Phi_C = 4\pi a$ i ich błędy pomiarowe.
7. Korzystając z otrzymanych wyników oraz równań (1) i (2), wyznacz skuteczność świetlną badanych źródeł światła oraz błędy pomiarowe.
8. Porównaj uzyskane wyniki i zapisz wnioski.

B. Wyznaczenie zależności skuteczności świetlnej żarówek w funkcji pobieranej mocy $\eta = f(P)$.

1. Ustaw żarówkę tradycyjną naprzeciwko detektora luksomierza w odległości $r = 35$ cm. Następnie włącz obwód żarówki i posługując się autotransformatorem ustaw napięcie zasilające na 230 V.
2. Wykonaj 10 pomiarów natężenia oświetlenia zmniejszając napięcie zasilające co 10 V. Każdorazowo zapisuj wartości napięcia i natężenia prądu.
3. Posługując się równaniami (2) i (7), wyznacz poszczególne wartości mocy oraz skuteczności świetlnej.
4. Powtórz powyższe pomiary dla żarówki halogenowej.
5. Na wspólnym wykresie wykreśl zależności skuteczności świetlnej żarówek od pobieranej mocy $\eta = f(P)$.
6. Zapisz wnioski.