

Wpływ kąta padania światła na wartości natężenia oświetlenia zmierzone za pomocą czujników fotometrycznych

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań wpływu kąta padania światła na wartości natężenia oświetlenia zmierzone przy wykorzystaniu wybranych czujników fotometrycznych. Opisano stanowisko pomiarowe oraz zaprezentowano i przedyskutowano uzyskane wyniki pomiarów. Zbadano również wpływ osłon korygujących montowanych na fotodetektorach na zmierzone wartości natężenia oświetlenia.

Abstract. The paper presents the results of research on the influence of the angle of incidence of light on the values of illuminance measured with the use of selected sensors with photodetectors. The measurement set-up is described and the obtained measurement results are presented and discussed. The influence of the corrective shields mounted on the photodetectors on the measured values of the illuminance is also investigated. (*Influence of the angle of incidence of light on the values of illuminance measured with photodetectors*).

Słowa kluczowe: czujniki fotometryczne, pomiary, natężenie oświetlenia
Keywords: photodetectors, measurements, illuminance

Wprowadzenie

Od końca ubiegłego wieku trwa intensywny rozwój fotowoltaiki. Obecnie powstają farmy fotowoltaiczne o mocy szczytowej do kilku GW, a rynek fotowoltaiczny zajmuje trzecie miejsce pod względem zainstalowanej mocy wśród odnawialnych źródeł energii [1, 2]. Jak wiadomo [3 - 6], wydajność instalacji fotowoltaicznej zależy silnie od warunków pogodowych, charakteryzowanych m.in. przez natężenie oświetlenia i temperaturę. Dlatego zaprojektowanie instalacji fotowoltaicznych wymaga wiarygodnego pomiaru wymienionych parametrów. O ile pomiar temperatury otoczenia nie jest skomplikowany, to uzyskanie wiarygodnego wyniku pomiaru natężenia oświetlenia wymaga m.in. znajomości zakresu czułości widmowej zastosowanego czujnika oraz informacji o sposobie jego montażu [7-12]. Istotne znaczenie ma fakt, że kąt padania promieni słonecznych na elementy instalacji fotowoltaicznej zmienia się wraz z porą roku i porą dnia.

Na rynku można znaleźć szeroką gamę urządzeń służących do pomiaru natężenia promieniowania słonecznego. Na ogół są to urządzenia niezwykle kosztowne [12]. W celu zapewnienia wiarygodnych pomiarów i akceptowalnej ceny producenci tego typu urządzeń często wykorzystują czujniki fotometryczne z odpowiednim hardwarem i softwarem [11, 13-15]. Jednak pomimo tego, niewłaściwy sposób montażu fotodetektora może spowodować uzyskanie błędnych wyników pomiarów. W kartach katalogowych [7-9] można znaleźć zakres widmowy pracy czujników do pomiaru natężenia oświetlenia oraz ich czułość widmową, ale większość producentów nie udostępnia charakterystyk kątowych tych urządzeń, ani instrukcji ich montażu zapewniającego uzyskanie wiarygodnych wartości natężenia oświetlenia potrzebnych w procesie projektowania instalacji fotowoltaicznych [15].

Celem pracy jest zbadanie wpływu kąta padania światła na wartości natężenia oświetlenia zmierzone za pomocą wybranych czujników. Do badań wybrano trzy komercyjnie dostępne czujniki natężenia oświetlenia.

W rozdziale drugim opisano badane czujniki. Rozdział trzeci zawiera opis stanowiska pomiarowego. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono i przedyskutowano w rozdziale czwartym.

Badane czujniki natężenia oświetlenia

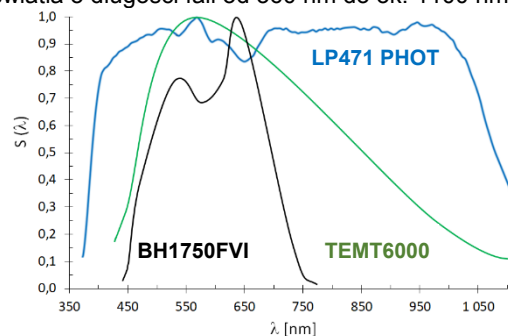
W celu zmierzenia wpływu kąta padania światła na zmierzone wartości natężenia oświetlenia, użyto trzy arbitralnie wybrane czujniki natężenia oświetlenia.

Najważniejszym komponentem tych urządzeń są fotodetektory. W dwóch z badanych urządzeń, tzn. w czujniku BH1750FVI oraz sondzie LP471 PHOT współpracującej z luksomierzem typu HD2302.0 jest to fotodioda [7, 9], a w trzecim – czujniku TEMT6000 fotodetektorem jest fototranzystor [8]. Charakterystyki czujników BH1750FVI oraz TEMT6000 rozważano m.in. w pracy [19], natomiast właściwości sondy LP471 PHOT przedstawiono w pracy [16].

Mierniki natężenia oświetlenia z czujnikiem BH1750FVI poza fotodiody dodatkowo zawiera wzmacniacz operacyjny, który pracuje jako konwerter prądowo-napięciowy, przetwornik analogowo-cyfrowy oraz układ logiczny z interfejsem komunikacyjnym I²C.

Czujnik BH1750FVI mierzy wartości natężenia oświetlenia w zakresie od 1 do 65535 lx. Jego czułość widmowa $S(\lambda)$ opisana jest charakterystyką widmową przedstawioną na rysunku 1 (linia czarna). Pasma tego czujnika obejmuje przedział długości fali od 440 do 750 nm. Przedstawiona charakterystyka zawiera dwa maksima – pierwsze przy długości fali $\lambda = 510$ nm drugie przy długości fali $\lambda = 590$ nm [7]. Ponadto w zakresie długości fali od 600 nm do 650 nm wartość $S(\lambda)$ wyraźnie maleje (ok. 20%) w stosunku do maksimum czułości widmowej [7].

Z kolei, za pomocą sondy LP471 PHOT można wykonać pomiar natężenia oświetlenia w zakresie od 0,01 lx do 199,99 klx. Jak można zaobserwować na rysunku 1 (linia niebieska), sonda ta może mierzyć natężenie oświetlenia dla światła o długości fali od 360 nm do ok. 1100 nm [9].

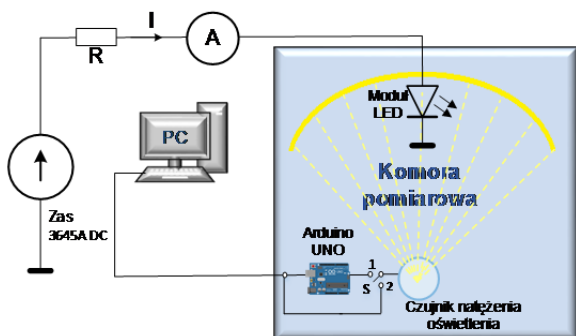


Rys. 1. Względna czułość widmowa badanych czujników

Trzeci z wybranych do badań czujników (TEMT6000) - pracuje w przedziale długości fali od 400 nm do 1050 nm (linia zielona na rysunku 1). Jego charakterystyka widmowa posiada jedno maksimum zlokalizowane przy $\lambda = 550$ nm [8].

Stanowisko pomiarowe

W celu zbadania wpływu kąta padania promieni światła na zmierzone wartości natężenia oświetlenia zbudowano stanowisko pomiarowe składające się z: komory pomiarowej oraz stanowiska kontrolnego. Schemat zbudowanego stanowiska pomiarowego pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Schemat stanowiska pomiarowego

W centralnym punkcie dolnej ściany komory pomiarowej umieszczony jest badany czujnik natężenia oświetlenia wraz z układem sterującym (mikrokontrolerem Atmel328 zamontowanym na płytce Arduino UNO dla czujników BH1750 oraz TEMA6000) lub luxomierzem HD 2302.0 dla sondy LP471 PHOT. Na ruchomym ramieniu wyprowadzonym ku górze komory pomiarowej, zamontowano moduł LED z trzema diodami, które oświetlają badany czujnik. Moduł LED zasilany z zasilacza ARRAY Electronic 3645A DC Power Supply przez rezystor R świeci światłem białym o temperaturze barwowej z zakresu 5700 K - 6100 K. Maksymalny strumień świetlny wytwarzany przez każdą z diod LED wynosi 139 lm. Dodatkowo, w celu uzyskania wąskiej wiązki światła na module LED umieszczono kolimator LL03LU-DO25L. Kąt świecenia użytego modułu LED wraz z kolimatorem wynosi 20°.

Komora pomiarowa zawiera goniometr, opisany w pracy [16], dzięki któremu można regulować kąt padania światła z modułu LED na badany czujnik. Ramię z zamontowanym modulem LED porusza się po półokręgu. Kąt padania światła regulowano co 2,5°.

Na stanowisku kontrolnym znajduje się komputer, w którym odczytywano zmierzone wartości natężenia światła. W przypadku, gdy pomiary prowadzone były przy użyciu czujników TEMA6000 oraz BH1750 przełącznik S znajdował się w pozycji 1, a odczyt wyników pomiaru jest możliwy dzięki napisanemu w kodzie Arduino programowi dla mikrokontrolera Atmel ATmega328 zarządzającego pomiarem. Czujnik zasilany jest z płytki Arduino UNO połączonej z komputerem kablem USB AB. Komunikacja z czujnikami TEMA6000 oraz BH1750FVI odbywa się przy pomocy interfejsu I²C - szeregowej, dwukierunkowej magistrali służącej do komunikacji pomiędzy mikrokontrolerem a sterowanym elementem elektronicznym. Transmisja danych między mikrokontrolerem a czujnikiem BH1750FVI odbywa się na liniach: SCL – odpowiedzialnej za przesyłanie impulsów zegarowych synchronizujących transmisję; SDA – przesyłającej dane w obu kierunkach.

W celu wykonania pomiarów sondą LP471 PHOT podłączono ją za pomocą fabrycznego przewodu do luksomierza HD2302.0 firmy Delta Ohm [9], który wskazywał wynik pomiaru natężenia oświetlenia na wyświetlaczu cyfrowym. W tym czasie przełącznik S znajduje się w pozycji 2.

Wykorzystując opisane stanowisko pomiarowe przeprowadzono badania za pomocą czujników TEMA6000

i BH1750 bez osłony korygującej oraz za pomocą tych samych czujników z osłoną korygującą z czujnikiem LB – 900 używanymi m.in. w stacjach pogodowych [17, 18]. Osłonę tę pokazano na rysunku 3. Jest to stożek o średnicy podstawy 45 mm wykonany z poliamidu. Zamontowany jest on w górnej ścianie metalowej puszki o wymiarach: 3,5 cm x 10 cm x 7 cm. Przez osłonę tę przenika światło do czujnika natężenia oświetlenia, który umieszczony jest wewnątrz metalowej puszki.

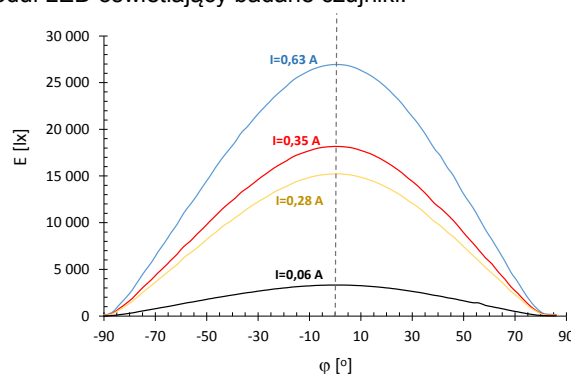


Rys.3. Osłona korygująca firmy LB – 900

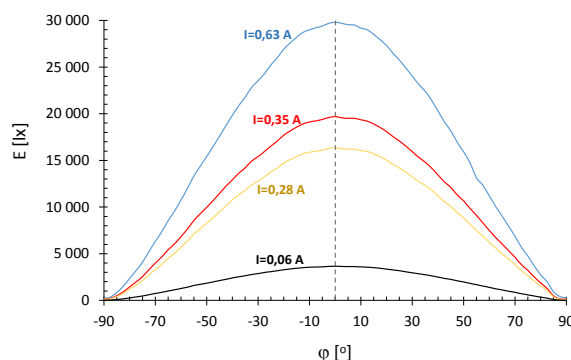
Wyniki badań

Wykorzystując stanowisko pomiarowe opisane w rozdziale 3 zarejestrowano wartości natężenia oświetlenia uzyskanego z modułu LED. Pomiary wykonano dla 4 różnych, arbitralnie wybranych wartości prądu zasilającego diody LED. Zmierzone zależności natężenia oświetlenia E w funkcji kąta padania światła φ pokazano na rysunkach 4 - 10.

Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono zależność natężenia oświetlenia E od kąta padania światła φ na czujniki LP471 PHOT (rys. 4) oraz BH1750 (rys. 5). Charakterystyki E(φ) wykreślono dla czterech wartości prądu I zasilającego moduł LED oświetlający badane czujniki.



Rys.4. Zależność zmierzonej wartości natężenia oświetlenia od kąta padania światła na czujnik LP471 PHOT



Rys.5. Zależność zmierzonej wartości natężenia oświetlenia od kąta padania światła na czujnik BH1750

Jak można zaobserwować, zmierzona wartość natężenia oświetlenia jest rosnącą funkcją prądu zasilania modułu LED. Widoczny jest także silny wpływ kąta padania światła na uzyskane wyniki pomiaru natężenia oświetlenia.

Największą wartość E uzyskano, gdy źródło światła znajdowało się w osi czujnika. Wówczas przy zmianie prądu zasilania od 60 mA do 630 mA zmierzono wartości natężenia oświetlenia zmieniające się w zakresie od 3,6 lx do 30 klx. Zależność $E(I)$ ma charakter liniowy. Jednocześnie obserwowano, dla wszystkich wartości prądu zasilającego moduł LED, iż wartość natężenia oświetlenia zmieniała się w funkcji kąta padania promieni światła na czujniki.

Zmierzone charakterystyki $E(\varphi)$ są symetryczne względem osi czujników – szara przerywana linia na rysunkach 4-10. Zależność $E(\varphi)$ można opisać za pomocą zależności o postaci:

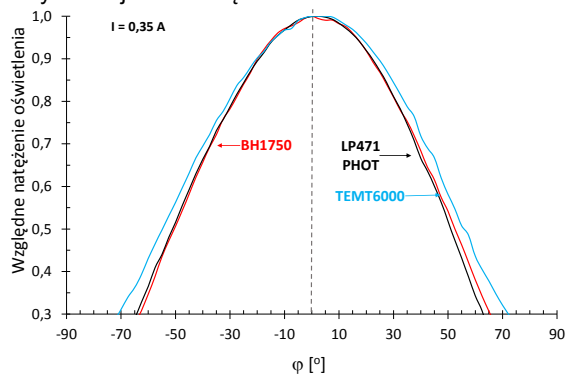
$$E = E_{max} \cdot \cos(A \cdot \varphi)$$

gdzie A to empirycznie dobrany współczynnik równy 1,13.

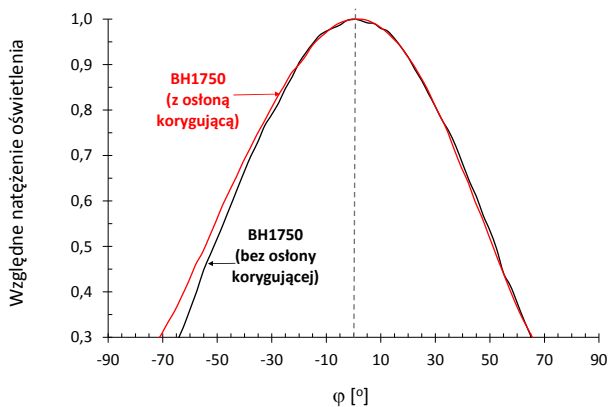
Przykładowo, przy prądzie zasilającym $I = 0,63$ A wartość natężenia oświetlenia zmierzonego sondą LP471 PHOT zmienia się od 165 lx, gdy światło pada równoległe do osi czujnika do 27 klx., gdy oświetlający sondę moduł LED znajduje się w osi badanego czujnika.

Podobnie, gdy moduł LED oświetla czujnik BH1750 dla wszystkich wartości prądu zasilającego moduł LED obserwowano zmianę wartości natężenia oświetlenia w funkcji kąta padania światła na detektor BH1750. Przy prądzie zasilającym $I = 0,63$ A wartość natężenia oświetlenia zmierzonego czujnikiem BH1750 zmieniała się od 220 lx, gdy światło pada prostopadłe do osi czujnika, do 30 klx, gdy diody znajdują się w osi czujnika.

Na rysunku 6 porównano zależności względnego natężenia oświetlenia od kąta padania światła dla trzech badanych czujników natężenia oświetlenia.



Rys.6 Zależność względnej wartości natężenia oświetlenia od kąta padania światła

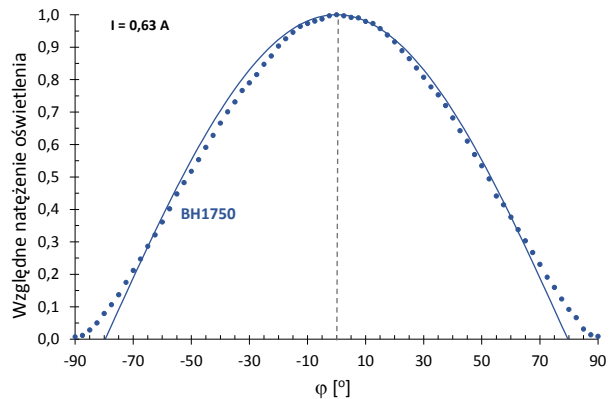


Rys. 7 Zależność względnego natężenia oświetlenia od kąta padania światła na czujnik BH1750 bez osłony korygującej oraz z osłoną korygującą

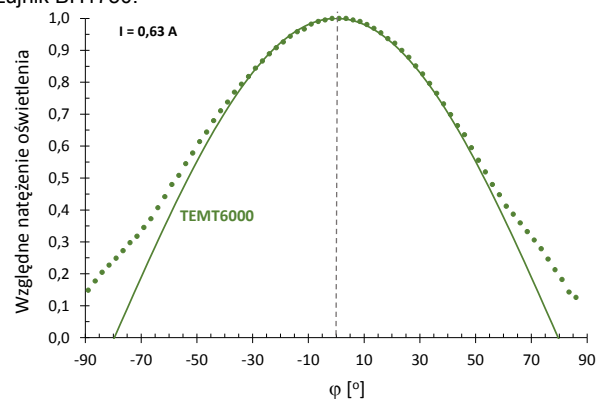
Analizując rysunek 6 widać, iż uzyskano prawie identyczne przebiegi charakterystyk dla wszystkich badanych czujników natężenia oświetlenia.

Zbadano również wpływ osłony korygującej na rozważane charakterystyki. Uzyskane wyniki zobrazowano na rysunku 7.

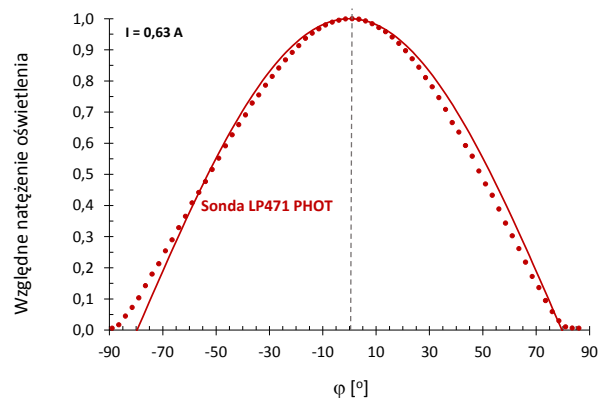
Jak można zaobserwować, zastosowana osłona korygująca ma znikomy wpływ na charakterystyki zmierzone za pomocą obu czujników. Drobne różnice występują jedynie dla granicznych wartości zakresu pracy detektorów. Tym samym zastosowanie osłony korygującej praktycznie nie wpływa również na przebieg zależności $E(\varphi)$.



Rys. 8 Zmierzone (punkty) oraz obliczone (linie) zależności względnego natężenia oświetlenia od kąta padania światła na czujnik BH1750.



Rys. 9 Zmierzone (punkty) oraz obliczone (linie) zależności względnego natężenia oświetlenia od kąta padania światła na czujnik TEMT6000.



Rys. 10 Zmierzone (punkty) oraz obliczone (linie) zależności względnego natężenia oświetlenia od kąta padania światła na sondę LP471 PHOT.

Na rysunkach 8-10 zilustrowano przydatność zależności (1) do opisu charakterystyki $E(\varphi)$. Na rysunku tym punkty oznaczają wyniki pomiarów, a linie wyniki obliczeń przy wykorzystaniu wzoru (1).

Jak można zauważyć, dla wszystkich rozważanych czujników uzyskano bardzo dobrą zgodność między wynikami obliczeń i pomiarów dla wartości φ od 0° do 60° . Drobne rozbieżność widoczne są jedynie poza tym zakresem. Potwierdza to użyteczność wzoru (1) do wyznaczania rzeczywistej wartości E przy zmiennym ustawieniu źródła promieniowania względem osi czujnika.

Wnioski

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów ilustrujących wpływ kąta padania światła na wartości natężenia oświetlenia zmierzone za pomocą różnych czujników. Zależność $E(\varphi)$ obserwowano przy różnych wartościach prądu zasilania modułu LED i dla wszystkich badanych czujników.

Przeprowadzając pomiary natężenia oświetlenia za pomocą czujników zawierających fotodiodę lub fototranzystor uzyskano identyczne jakościowo zależności $E(\varphi)$. Wykazano tym samym, iż sposób montażu fotodetektorów natężenia oświetlenia może wpływać na otrzymane wartości natężenia oświetlenia. Zaproponowano opis analityczny zależności $E(\varphi)$ i wykazano jego praktyczną użyteczność.

Zbadano również wpływ osłony korygującej na otrzymane wyniki pomiarów rejestrując wartości natężenia oświetlenia przy pomocy czujników BH1750 i TMT6000 z osłoną korygującą i bez niej, a także czujnik fabrycznie wyposażony w osłonę korygującą. Stwierdzono, że obecność tej osłony praktycznie nie ma wpływu na uzyskane wyniki pomiarów.

Przedstawione wyniki badań zostaną wykorzystane przy modelowaniu własności rzeczywistej instalacji fotowoltaicznej przy uwzględnieniu dobowych i sezonowych zmian warunków jej oświetlenia. Wyniki te mogą być także przydatne dla projektantów instalacji fotowoltaicznych.

Autorzy: mgr inż. Ewa Krac, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mails: e.krac@we.umg.edu.pl k.gorecki@we.umg.edu.pl

LITERATURA

- [1] Raport Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2020, EC BREC Instytut Energetyki Odnawialnej, 2020 (<https://ieo.pl/pl/raport-pv>)
- [2] Rynek Elektryczny (<https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-fotowoltaiki-w-polsce/>)
- [3] Matuszczyk P., Popławski T., Flaszka J.: Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych; Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, nr 12, 2015, s. 159-162.
- [4] Castaner L., Silvestre S.: Modelling photovoltaic systems using Pspice, John Wiley&Sons, 2002

- [5] Dyvak M., Górecki K., Zarębski J., Porplytsya N., Dąbrowski J., Krac E.: Mathematical model of weather conditions influence on properties of photovoltaic installation and method of its identification. Advanced Computer Information Technologies ACIT 2019, Ceske Budejovice, 2019, pp. 35-39.
- [6] Górecki K., Krac E.: Measurements of thermal parameters of a solar module. Journal of Physics: Conference Series, Vol. 709, 2016, MicroTherm'2015 and SENM'2015, 012007, p. 1-6, doi:10.1088/1742-6596/709/1/012007
- [7] Czujnik natężenia oświetlenia BH1750 <https://www.vishay.com/docs/81579/temt6000.pdf>
- [8] Czujnik natężenia oświetlenia TMT6000 <https://www.mouser.com/datasheet/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
- [9] Czujnik natężenia oświetlenia LP471 PHOT https://acse.pl/wpcontent/uploads/filebase/karty_katalogowe/czujniki-natezenia-oswietleni-i-promieniowania-lp.pdf
- [10] Markowicz K.: Pomiary promieniowania słonecznego; Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski; <http://www.igf.fuw.edu.pl/~kmark/PolandAOD/PDF/PromienowanieSloneczne.pdf>
- [11] Tabaka P., Fryc I.: Wpływ niedopasowania widmowego luksomierzy na dokładność wykonywanych pomiarów natężenia oświetlenia; Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej; nr 54; 2017; s. 221—224
- [12] Piecuch G., Ożug D.: Metody pomiaru promieniowania słonecznego i natężenia oświetlenia za pomocą czujników elektronicznych; Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce – Nauki techniczne i inżynieryjne. Część III; s. 74-79
- [13] Panek M., Chojnowski S., Mikołajczyk J., Wojtas J.: Ocena możliwości zastosowania wybranych technik przetwarzania sygnałów do badań parametrów detektorów promieniowania optycznego; Przegląd Elektrotechniczny, R. 93, nr 10, 2017, s. 87 – 90
- [14] Fryc I., Tabaka P.: The influence of different photometric observers on luxmeter accuracy for LEDs and FLs lamps measurements; Optica Applicata; Vol. 49, No. 2, 2019, pp. 345—354
- [15] Gołąbka A.: Odnawialne źródła energii, Wybrane zagadnienia, Agencja Użytkowania i Poszanowania Energii; Politechnika Łódzka; 2014 <http://www.auipe.pl/wgrane-pliki/odnawialne-zrodla-energii.pdf>
- [16] Górecki K., Ptak P., Bruski Ł.: Spatial Radiation Patterns of Selected Solid State Light Sources; 28th Int. Conf. on Mixed Design of Integrated Circuits and System; Łódź, 2021, pp. 222-227;
- [17] Miernik natężenia oświetlenia [tps://www.label.pl/po/rek900.html](https://www.label.pl/po/rek900.html)
- [18] Dąbrowski J., Krac E., Górecki K.: Analysis of long-time efficiency of photovoltaic installation; Przegląd Elektrotechniczny, R. 93, nr 2, 2017, s. 202—205.
- [19] Ptak P., Górecki K., Gensikowski M.: Porównanie właściwości dynamicznych wybranych czujników fotometrycznych; Przegląd Elektrotechniczny, R. 96, nr 12; 2020; s. 110-114