BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-B/2009
ZESZYT 5
ROK 106
ISSUE 5
YEAR 106

ELŻBIETA KOSSECKA*

INSTALACJE FOTOWOLTAICZNE W HOTELOWYM BUDYNKU ENERGOOSZCZĘDNYM

PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS IN THE ENERGY-SAVING HOTEL BUILDING

Streszczenie

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki analizy wydajności instalacji fotowoltaicznej na budynku energooszczędnego hotelu w Centrum Badawczym Energii Odnawialnych PAN w Jabłonnie. Instalacja, o łącznej mocy nominalnej 40 kW, zbudowana jest ze 144 modułów SW 175 rozmieszczonych na dachu i 165 modułów BP 790 ulokowanych na okapach i daszkach na fasadzie. W warunkach klimatu Polski może dostarczać do sieci średnio 101 kWh energii elektrycznej na dobę i 37 MWh na rok.

Słowa kluczowe: *promieniowanie słoneczne, energia odnawialna, instalacje fotowoltaiczne*

Abstract

Results of the performance analysis of the on-grid PV power plant, on the roof and façade of the energy-saving hotel building in the Research Centre Jabłonna, are presented. The power plant, of total rated power of 40 kW, is composed of 144 Solar World SW 175 PV modules located on the roof and 165 BP 790 modules located on the façade. In the climatic conditions of Poland, it may deliver, in average, 101 kWh of the electric energy per day and 37 MWh per year.

Keywords: *solar radiation, renewable energy, PV solar power plant*

* Prof. dr hab. Elżbieta Kossecka, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

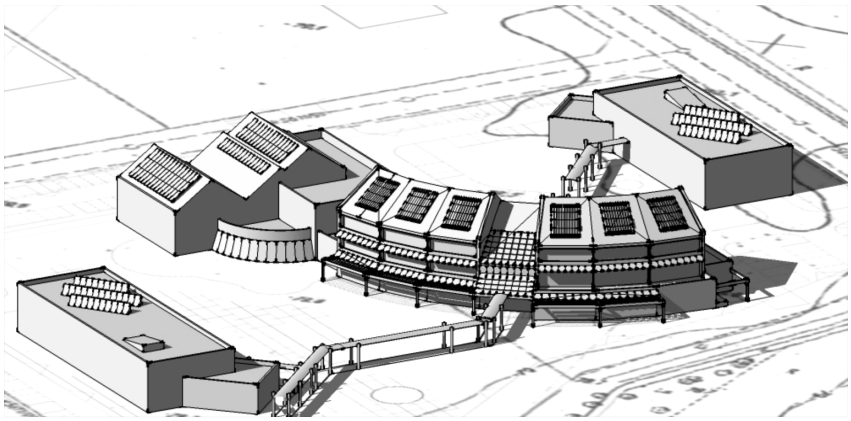
1. Wstęp

Energooszczędny budynek hotelowy, o którym mowa w niniejszym artykule, ma stanowić element składowy Centrum Przedsiębiorczości i Innowacji z zakresu konwersji energii i źródeł odnawialnych w Jabłonnie pod Warszawą. Założenia do projektu Centrum przedstawione są w ekspertyzie PAN [1]. Ma to być park i inkubator nowych i ekologicznych technologii wykorzystania oraz konwersji energii ze źródeł odnawialnych, który stanowić ma naturalne zaplecze laboratoryjne dla sieci naukowej EKO-ENERGIA, o specjalności naukowej „Czyste i bezpieczne technologie w wytwarzaniu i konwersji energii", którą tworzy pięć instytutów PAN i trzy instytuty resortowe o największym w kraju doświadczeniu z zakresu nowych technologii energetycznych.

Budynek, który pełnić ma funkcję hotelu i centrum konferencyjnego o wysokim standardzie, ma ucieleśniać ideę Energooszczędnego Domu Inteligentnego. Ma on być istotnym, upowszechniającym ideę Centrum, elementem składowym jego potencjału laboratoryjnego i równocześnie unikalną w kraju jednostką demonstracyjno-eksperymentalną. Ma być przykładem zintegrowanego wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych. Elementy systemu energetycznego stanowić będą: mikrosiłownia parowa zasilana kotłami na biomasę i odpady, pompa ciepła, ogniwa fotowoltaiczne wraz z termokolektorem, siłownia wiatrowa, magazyn energii skojarzony z basenem oraz moduł inteligentnego sterowania energią elektryczną i ciepłem [1, 2].

2. Koncepcja architektoniczna budynku hotelowego w Centrum Badawczym PAN w Jabłonnie

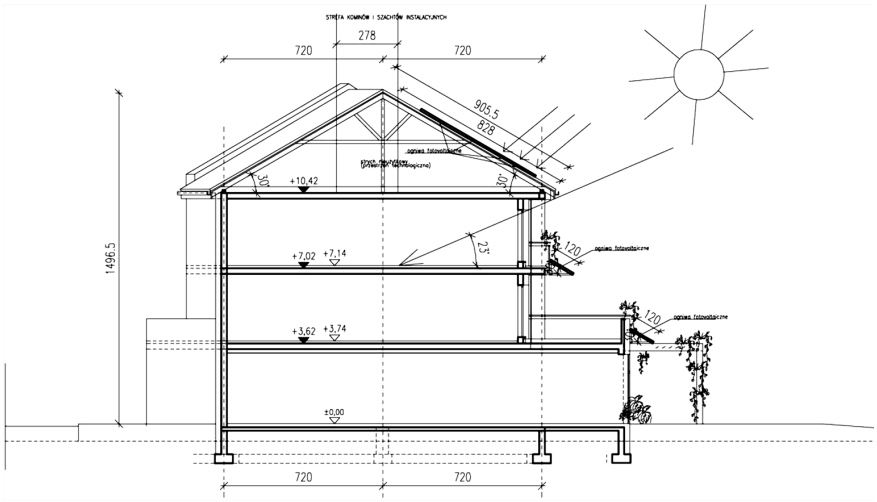
Wstępna koncepcja architektoniczna Centrum Badawczego PAN w Jabłonnie została opracowana na zlecenie Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, w ramach realizacji zadań sieci EKO-ENERGIA w 2007 r., przez zespół z Pracowni Architektonicznej „Graffiti" pod kierunkiem mgr. inż. arch. Piotra Murza-Muchy [3].



Rys. 1. Budynki Centrum Badawczego w Jabłonnie – widok od strony południowo-wschodniej
Fig. 1. Buildings of the Jabłonna Research Center – south-east view

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Kompleks budynków hotelu z basenem i dwu laboratoriów przedstawiono na rys. 1. Trzykondygnacyjny budynek hotelowy, wraz z basenem i łącznikiem, w którym ulokowano jego zaplecze, jest ukształtowany w formie łuku wygiętego w kierunku południowym. Główny dach hotelu jest dwuspadowy, o nachyleniu 30°, parter jest na części wysunięty od południa i tworzy taras dla części pokoi hotelowych. Od strony nasłonecznionej przewiduje się dużą ilość przeszkleń, chronionych przed nadmiernym nasłonecznieniem w lecie pergolami i odpowiednio ustawionymi żaluzjami. Powierzchnie dachu basenu nachylone są do



Rys. 2. Przekrój pionowy typowego segmentu budynku hotelowego
Fig. 2. Vertical cross section of the typical segment of the hotel building

poziomu pod kątem 35º; przewiduje się umieszczenie na nich kolektorów słonecznych. Na dachu oraz na pergolach i okapach nad balkonami, o nachyleniu 30º, umieszczone będą instalacje fotowoltaiczne. Przekrój pionowy typowego segmentu budynku hotelowego pokazano na rys. 2.

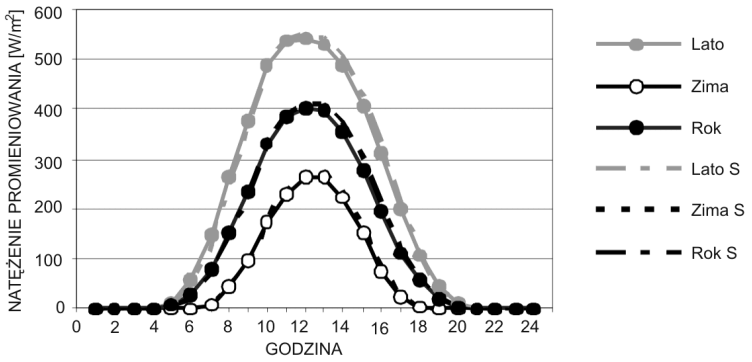
3. Obliczanie dostępnej energii promieniowania słonecznego na płaszczyzny nachylone

Celem niniejszego artykułu było oszacowanie średnich rocznych i sezonowych ilości energii, które mogą być dostarczone przez instalacje fotowoltaiczne umieszczone na dachu i na fasadzie energooszczędnego budynku hotelowego. Pierwszy etap stanowiło obliczenie godzinnych wartości natężenia promieniowania słonecznego, padającego na kolejne segmenty dachu oraz okapów i daszków pergoli nachylonych pod kątem 30º do poziomu.

Budynek hotelowy, wraz z basenem i łącznikiem, jest oparty na łuku stanowiącym ćwierć okręgu. Azymuty segmentów jego dachu zmieniają się co 11,25º, od 25,57º (segment 1 zorientowany najbardziej na zachód) do –41,93º (segment 7 zorientowany najbardziej na wschód); azymut środkowego segmentu 4, nad głównym wejściem, jest równy –8,18º, całość jest zatem lekko skręcona ku wschodowi.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Obliczenia wykonano z wykorzystaniem godzinowych danych pogodowych Typowego Roku Meteorologicznego (TRM) dla Warszawy [4]. Przy obliczaniu natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego na płaszczyzny nachylone zastosowano znane wzory z zakresu geometrii słońca [5–7]; przy obliczaniu promieniowania rozproszonego wykorzystano model anizotropowy, który zaproponowano w [8], z uwzględnieniem albedo gruntu wg [9].



Rys. 3. Porównanie średnich dobowych przebiegów natężenia promieniowania słonecznego na dach hotelu w Centrum Jabłonna i na płaszczyznę południową o nachyleniu 30º
Fig. 3. Comparison of mean daily profiles of solar radiation on the roof of the hotel in the Jabłonna Centre and on the plane tilted 30º facing south

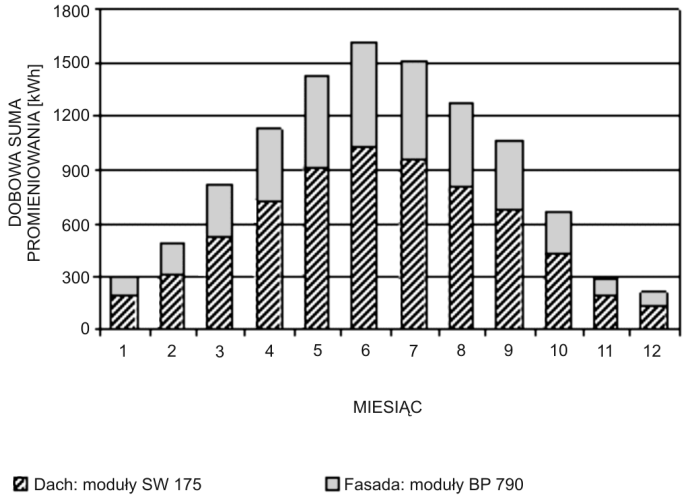
Natężenie całkowitego promieniowania słonecznego na nachylone pod kątem 30º do poziomu powierzchnie segmentów dachu hotelu oraz okapów i daszków pergoli, obliczone z zastosowaniem wspomnianego modelu anizotropowego, jest średnio 3,5% większe niż obliczone przy założeniu izotropii promieniowania rozproszonego i średnio 12% większe niż natężenie promieniowania na płaszczyznę poziomą. Średnie roczne dobowe sumy promieniowania na płaszczyzny o nachyleniu 30º i o azymutach odpowiadających kolejnym segmentom dachu i fasady budynku hotelu niewiele różnią się od siebie; zmieniają się od 3,0 do 3,1 [kWh/m^2], osiągając maksimum dla segmentu środkowego. Maksima średniego natężenia promieniowania w ciągu doby dla segmentów skrajnych dachu hotelu są przesunięte względem siebie o ok. 2 godziny, jednak przebiegi natężenia średniego dla wszystkich segmentów nie różnią się znacząco od przebiegów natężenia na płaszczyznę południową o nachyleniu 30º (płaszczyzna S, rys. 3). Okres „lata” obejmuje miesiące od kwietnia do września, natomiast „zimy” miesiące od października do marca.

4. Instalacje fotowoltaiczne w energooszczędnym budynku hotelowym

Przy projektowaniu instalacji konieczne było dopasowanie wymiarów zestawów złożonych z dostępnych na rynku prostokątnych paneli do założonych przez architekta wymiarów segmentów dachu i okapów. Należało również zapewnić dopasowanie maksymalnego napięcia prądu generowanego przez szeregi paneli do zakresów napięcia wejściowego inwerterów.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

W energooszczędnym budynku hotelowym przewidziane są trzy rodzaje instalacji fotowoltaicznych: prostokątne zestawy paneli na segmentach dachu 1–3 i 5–7, o łącznej wysokości do 6,6 m i szerokości do 6 m, pojedyncze szeregi paneli o wysokości do 1,2 m i łącznej szerokości 8,2–8,3 m na okapach segmentów fasady 1–3 i 5–7 i dachach segmentów pergoli 1–3 i 5–6 oraz instalacja na segmencie środkowym, która ma być zbudowana z paneli przepuszczających częściowo promieniowanie słoneczne, co zapewni doświetlenie głównego hallu światłem dziennym.



Rys. 4. Średnie sumy dobowe promieniowania pozyskiwanego przez instalacje PV
Fig. 4. Mean daily radiation available for the solar power plant

Niniejszy artykuł zawiera wyniki szacowania wydajności dwu pierwszych rodzajów instalacji z zastosowaniem wybranych typów paneli fotowoltaicznych, reprezentujących technologię krzemu monokrystalicznego.

Założono, że instalacja dachowa zbudowana jest z paneli fotowoltaicznych SW 175 firmy Solar Word, o wymiarach 1,61 × 0,81 m i mocy nominalnej 175 W. Na każdym z sześciu segmentów dachowych może zmieścić się zestaw 24 paneli ustawionych pionowo w układzie 6 × 4, o powierzchni 31,3 m^2. Instalacja na fasadzie frontowej budynku zbudowana jest z paneli BP 790, o wymiarach 1,21 × 0,54 m i mocy nominalnej 90 W. Na każdym segmencie okapu i daszku pergoli umieszczonych jest w rzędzie 15 takich paneli, o łącznej powierzchni 9,8 m^2. Powierzchnia całkowita instalacji dachowej wynosi 188 m^2, instalacji na fasadzie 107 m^2, a powierzchnia łączna obu instalacji 295 m^2. Na rysunku 4 pokazano średnie wartości dobowych sum promieniowania pozyskiwanego przez te instalacje w kolejnych miesiącach.

5. Szacowanie średniej wydajności instalacji PV

Do celów oceny wydajności instalacji fotowoltaicznych (PV) na etapie projektowania wykorzystuje się proste metody przybliżone, w których parametrami są charakterystyki

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

elektryczne poszczególnych elementów podawane przez producentów [6, 10–12]. Uwzględnia się przy tym zależność charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw fotowoltaicznych od ich temperatury. Zakłada się, że instalacje oddające prąd do sieci mają regulatory ustawiające punkt pracy tak, aby moc była maksymalna.

Średnią dobową wydajność i sprawność modułów fotowoltaicznych SW 175 i BP 790, przy orientacji południowej i nachyleniu 30º, wyznaczoną metodą symulacyjną z użyciem przebiegów promieniowania i temperatury dla Warszawy (TRM), pokazano w tab. 1.

Tabela 1

Średnia dobowa wydajność modułów fotowoltaicznych SW 175 i BP 790 przy orientacji południowej i nachyleniu 30º

Okres	Moduł SW 175		Moduł BP 790	
	energia [kWh/d]	sprawność [%]	energia [kWh/d]	sprawność [%]
Lato	0,77	13,0	0,40	13,4
Zima	0,29	13,8	0,15	14,2
Rok	0,53	13,2	0,27	13,6

Moc nominalna zestawu 24 paneli SW 175 wynosi 4,2 kW, a całej instalacji dachowej 25,2 kW. Założono, że każdy zestaw paneli, połączonych w układzie szeregowo-równoległym 8 × 3, współpracuje z inwerterem Sunny Boy SB 4000 US, o średniej sprawności 94,5% [13]. Moc nominalna zestawu połączonych w szereg 15 paneli BP 790 wynosi 1,35 kW, a jedenastu takich zestawów na fasadzie 14,9 kW. Każdy zestaw współpracuje z inwerterem Sunny Boy SB 1100 U, o średniej sprawności 93% [13].

Przy obliczaniu wydajności instalacji PV przyjęto stałe sprawności inwerterów, podane przez producentów, oraz założono różne straty mocy na poziomie 10%. W tabeli 2 zestawiono wartości mocy nominalnych instalacji PV na dachu i fasadzie budynku hotelu, obliczone szacunkowe średnie dobowe i roczne sumy dostarczanej energii elektrycznej, jej względne udziały, średnie sprawności instalacji oraz średnie dobowe wartości mocy użytecznej dostarczanej do sieci.

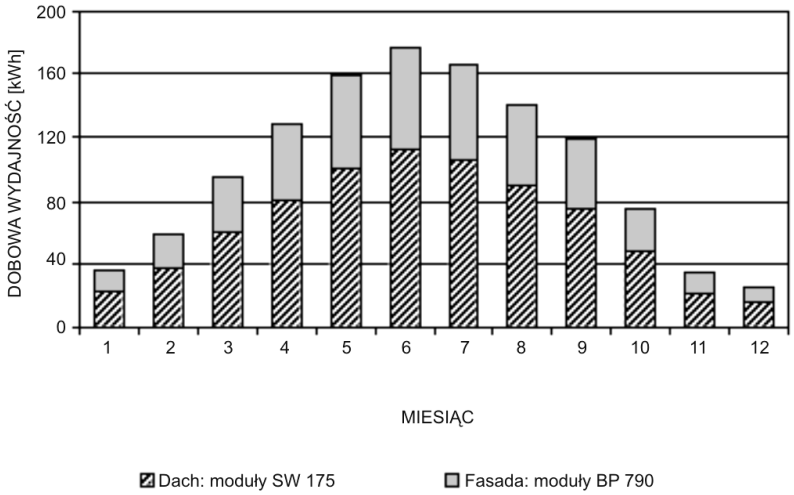
Tabela 2

Zestawienie rocznej wydajności instalacji fotowoltaicznych na dachu i na fasadzie frontowej budynku hotelu

Instalacja PV	Moc max [kW]	Energia wytworzona			Sprawność [%]	Moc użyteczna [kW]
		doba [kWh/d]	rok [MWh/a]	udział [%]		
Na dachu	25,2	64,0	23,4	63,3	11,2	2,7
Na fasadzie	14,9	37,2	13,6	36,7	11,5	1,6
Razem	**40,1**	**101,2**	**37,0**	**100,0**	**11,3**	**4,2**

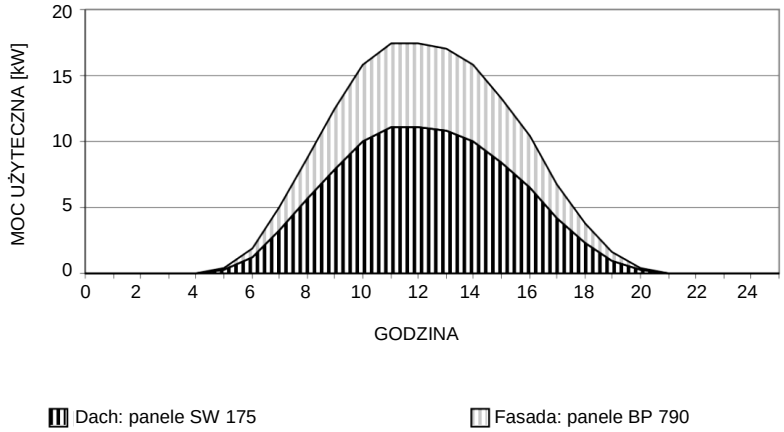
Średnie dobowe ilości energii elektrycznej produkowanej przez instalację PV w poszczególnych miesiącach pokazano na rys. 5. W sezonie letnim średnia wydajność całej instalacji to 148 kWh/d, w zimowym 54 kWh/d; średnia roczna to 101 kWh/d.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 5. Średnia dobowa wydajność instalacji PV w kolejnych miesiącach
Fig. 5. Mean daily energy generated by the solar power plant in subsequent months

Na rysunku 6 pokazano średni dobowy przebieg użytecznej mocy elektrycznej dostarczanej łącznie przez całą instalację w okresie lata (od kwietnia do września). Jedynie w środku dnia, między godziną 10 i 14, moc ta przekracza 15 kW. Moc średnia w godzinach 9–16 to 14,9 kW, w godzinach 9–20 11 kW, a średnia dla całej doby to 6,2 kW. W załączniku [2] do ekspertyzy [1] przyjęto, że zapotrzebowanie na energię do celów klimatyzacji, szacowane na 20 kW (restauracja i sala seminaryjna), może być pokryte przez



Rys. 6. Średni przebieg dobowy mocy użytecznej instalacji w okresie lata
Fig. 6. Mean daily profile of usable power produced in the summer season

instalację fotowoltaiczną na terenie obiektu. Wyniki przedstawionej analizy wskazują, że rozpatrywana instalacja, o mocy nominalnej 40,1 kW, nie pokryje całkowicie tego zapotrzebowania; niezbędna byłaby instalacja o mocy 25–30% większej. Oczywiście, zapotrze-

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

bowanie na energię do celów klimatyzacji jest zmienne i rośnie wraz z ilością promieniowania słonecznego pozyskiwanego przez budynek, kiedy też rośnie wydajność instalacji fotowoltaicznych; szczegółowa analiza tego procesu wymagałaby wykonania symulacji wymiany ciepła w pomieszczeniach budynku, które mają być klimatyzowane.

6. Podsumowanie

Średnia dobowa wydajność modułów fotowoltaicznych jest w sezonie „lata", od kwietnia do września, średnio około dwuipółkrotnie wyższa niż w sezonie „zimy", od października do marca.

Szacunkowa ilość energii elektrycznej, która może być dostarczona przez analizowaną instalację fotowoltaiczną w warunkach klimatu Polski, z uwzględnieniem różnych strat na poziomie 10%, wynosi średnio ok. 101 kWh na dobę i 37 MWh na rok. Średnia szacunkowa moc wyjściowa instalacji fotowoltaicznej w ciągu całej doby to w skali roku ok. 10,5% jej mocy nominalnej, w sezonie lata ok. 15,4%, a zimy 5,6%. Wydajność instalacji latem nie pokryje całkowicie zapotrzebowania hotelu na moc do klimatyzacji.

Literatura

[1] Włosiński W., Domański R., Kiciński J., Ekspertyza pt. „Badania możliwości powstania Centrum Przedsiębiorczości i Innowacji w gminie Jabłonna", Centrum Badawcze PAN „Konwersja Energii i Źródła Odnawialne", Warszawa–Gdańsk, grudzień 2005.

[2] Mikielewicz J., Kiciński J., *Energooszczędny Dom Inteligentny – EDI*; Załącznik nr 1 do ekspertyzy pt. „Badania możliwości powstania Centrum Przedsiębiorczości i Innowacji w gminie Jabłonna", Centrum Badawcze PAN „Konwersja Energii i Źródła Odnawialne", Gdańsk, grudzień 2005.

[3] Murza-Mucha P., Murza-Mucha M., Puławski S. („Graffiti"), Centrum Badawcze PAN „Konwersja Energii w zakresie Źródła Odnawialne", Koncepcja wstępna – Architektura, Warszawa, grudzień 2007.

[4] Gawin D., Kossecka E. (red.), *Typowy Rok Meteorologiczny do symulacji procesów wymiany ciepła i masy w budynkach*, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002.

[5] Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar engineering of thermal processes*, John Wiley & Sons, Inc., 3rd ed., 2006.

[6] Markvart T. (ed.), *Solar Electricity*, John Wiley & Sons, 2nd ed., 2005.

[7] Luque A., Hegedus S. (eds.), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2006.

[8] Reindl D.T., Beckman W.A., Duffie J.A., *Evaluation of Hourly Tilted surface Radiation Models*, Solar Energy 45(1), 9–17, 1990.

[9] Podogrocki J. i in., *Opracowanie porównawczego sezonu grzewczego do oceny zapotrzebowania ciepła budynków*, Cz. II: *Opracowanie charakterystyk aktynometrycznych*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Zakład Klimatologii, Warszawa 1990.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

[10] Clean Energy Project Analysis, *Photovoltaic Project Analysis Chapter*, *RETScreen® Engineering and Cases Textbook*, www.retscreen.net.
[11] K o s s e c k a E., W a l c z a k T., *Wydajność instalacji fotowoltaicznych w warunkach klimatu Polski*, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Czasopismo Naukowe, t. II, 2007, 141-146.
[12] www.solarworld.de, www.bpsolarex.com.
[13] www.sma-america.com.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ