

## OCENA WARUNKÓW NASŁONECZNIENIA I PROJEKTOWANIE ELEKTROWNI SŁONECZNYCH Z WYKORZYSTANIEM DEDYKOWANEGO OPROGRAMOWANIA ORAZ BAZ DANYCH

Jerzy BURIAK

Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel: 58 347 20-34 fax: 58 347 18 98 e-mail: j.buriak@ely.pg.gda.pl

**Streszczenie:** Przytoczono typowe dla obszaru Polski wartości nasłonecznienia. Zaprezentowano sposoby dokładniejszego określenia wartości nasłonecznienia w oparciu o bazy danych o nasłonecznieniu i aplikacje komputerowe. Narzędzia te pozwalają w pełniejszy sposób uwzględnić kąt nachylenia i azymut modułów fotowoltaicznych, linię horyzontu i zacinienie oraz zmienność nasłonecznienia w ciągu roku na podstawie statystycznych wartości nasłonecznienia w poszczególnych godzinach roku. Wykorzystano informacje o natężeniu promieniowania słonecznego dostępne za pośrednictwem serwisu internetowego PVGIS oraz w bazie danych meteorologicznych i klimatycznych Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju. Przy użyciu obu baz wykonano analizy dla różnych lokalizacji na terenie kraju i porównano wyniki. Wytypowano bazę danych oraz oprogramowanie z niej korzystające. Dla wybranego złożonego obiektu przedstawiono symulacje zacinienia.

**Słowa kluczowe:** baza danych o nasłonecznieniu, oprogramowanie do projektowania elektrowni słonecznych

### 1. WPROWADZENIE

#### 1.1. Definicje

Wśród pojęć związanych z energetyką słoneczną występują: natężenie promieniowania słonecznego, usłonecznienie i nasłonecznienie. Natężenie promieniowania słonecznego to gęstość mocy promieniowania słonecznego odpowiadająca energii promieniowania słonecznego padającego na  $1 \text{ m}^2$  w ciągu sekundy, która wyrażana jest w  $\text{W/m}^2$  oraz  $\text{kW/m}^2$ . Typowy zakres zmienności natężenia promieniowania słonecznego wynosi  $100 - 800 \text{ W/m}^2$ ; odnotowywane wartości przy bezchmurnym niebie osiągają  $1 \text{ kW/m}^2$ . Usłonecznienie jest liczbą godzin słonecznych, wyrażonych w godzinach w ciągu roku, podczas których na powierzchnię Ziemi padają bezpośrednio promienie słoneczne. Usłonecznienie opisuje warunki pogodowe a nie zasoby energii słonecznej. W Polsce średnia wieloletnia wartość usłonecznienia wynosi od 1460 do 1620 h/r i jest najmniejsza w kotlinach górskich a największa w miejscowościach z „niską” linią horyzontu, np. nadmorskich za wyjątkiem tych, w których występują pasy moren polodowcowych. Najważniejszym pojęciem, opisującym zasoby energii słonecznej w danym miejscu w określonym przedziale czasu, jest nasłonecznienie. Nasłonecznienie jest całką natężenia promieniowania słonecznego w danym czasie i na danej powierzchni – najczęściej 1 metra kwadratowego. Przedziałami czasu, w których wyznacza się

nasłonecznienie najczęściej są: godzina, dzień, rok. W efekcie jednostkami nasłonecznienia będą:  $\text{Wh/m}^2$ ,  $\text{kWh/m}^2$ ,  $\text{MJ/m}^2$ ,  $\text{GJ/m}^2$  odnoszone do dnia (d), miesiąca (mies.) lub roku (r).

#### 1.2. Warunki nasłonecznienia w Polsce

W Polsce średnie roczne nasłonecznienie całkowite jednostkowej płaszczyzny horyzontalnej (poziomej) waha się od około  $850 \text{ kWh/m}^2$  na Żuławach do  $1200 \text{ kWh/m}^2$  na Wyżynie Lubelskiej. Wartości te mogą być jednak przyjmowane w nielicznych przypadkach elektrowni słonecznych, np. gdy farma słoneczna jest usytuowana w terenie, w którym na nasłonecznienie nie ma wpływu linia horyzontu oraz nie występuje zacinienie od pobliskich obiektów. W przypadku elektrowni słonecznych na dachach budynków często duże znaczenie mają zacinienia od kominów i innych instalacji dachowych, pobliskich drzew i budynków. W przypadku takich miejscowości jak np. Sopot i większość dzielnic Gdańska i Gdyni znaczenie ma również linia horyzontu oparta o pasmo wzgórz morenowych. Z powyższych względów wskazane jest stosowanie narzędzi komputerowych pozwalających na sumowanie wpływu poszczególnych zjawisk na wartość nasłonecznienia. Narzędzia te pozwalają także przeliczyć nasłonecznienie na powierzchnię horyzontalną na warunki powierzchni pochylonej z uwzględnieniem także kierunku pochylecia, czyli azymutu.

#### 1.3. Teza

Istnieje szereg metod tworzenia baz danych o nasłonecznieniu. Można wyróżnić dwie grupy metod:

- wyznaczania Typowych Lat Meteorologicznych i szacowania promieniowania całkowitego na podstawie danych pomiarowych ze stacji meteorologicznych [1] oraz
- integracji wyników pomiarów promieniowania słonecznego dokonywanych na poziomie gruntu z danymi obliczonymi na podstawie zdjęć z satelitów geostacjonarnych [3].

Korzystanie z oprogramowania wspomagającego projektowanie elektrowni słonecznych, które implementuje bazy danych utworzone tymi metodami, prowadzi do znacząco różnych wyników uzysku energii elektrycznej.

W artykule przedstawiono użycie dwóch zbiorów danych o nasłonecznieniu i dwóch narzędzi komputerowych

z nich korzystających. Pierwsza baza danych to baza Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju (MIiR), zawierająca typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków [1]. Oprogramowanie, które z niej korzysta to m.in. PV\*SOL. Drugą bazą danych jest baza Europejskiego Instytutu Energii i Transportu (IET – Institute for Energy and Transport), którego założycielem jest Komisja Europejska. Bazy danych rocznej sumy nasłonecznienia na powierzchnie poziomą i optymalnie nachyloną są publicznie dostępne i można z nich korzystać np. za pośrednictwem aplikacji internetowych serwisu PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Aplikacje te umożliwiają ocenę zasobów energii słonecznej w wybranej lokalizacji oraz szacują uzyski energii elektrycznej z elektrowni fotowoltaicznej [2].

Spośród wielu narzędzi wybór PV\*SOL uzasadnia uznawanie jego wyników przez instytucje finansujące budowę elektrowni słonecznych. Natomiast PVGIS został wybrany ze względu na firmowanie go przez instytucje Komisji Europejskiej oraz dużą popularność.

## 2. BAZY DANYCH O NASŁONECZNIENIU

### 2.1. Baza Ministerstwa Infrastruktury i Rozwoju

Baza MIiR zawierająca typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków powstała na podstawie danych źródłowych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Źródłowe dane pochodzą z 61 stacji pomiarowych, z których 43 stacje dostarczają pełne ciągi danych od 30 lat, w tym stacje: stacja 135 – Hel, stacja 160 – Elbląg, stacja 120 – Łeba. Dla pozostałych 19 stacji meteorologicznych długości ciągów danych źródłowych wynoszą od 11 do 29 lat, z tym, że nie zawsze są to kolejne lata: stacja 140 – Gdańsk Port Północny dostarcza dane od 1987, a stacja 125 – Łębork do 1993. Wśród mierzonych lub obserwowanych parametrów meteorologicznych jest m.in. wartość promieniowania całkowitego na powierzchnię poziomą oraz zachmurzenie ogólne i w czterech warstwach chmur (od chmur niskich do chmur wysokich). Dane podane są w postaci plików tekstowych zawierających 262800 linii (30 lat razy 8760 godzin). W każdej linii zawarto 16 parametrów. Za pomocą metodologii przedstawionej w normie EN ISO 15927:4 określono dla poszczególnych stacji typowe lata meteorologiczne, stąd nazywane są one typowymi latami meteorologicznymi ISO. Pewną wadą tworzenia typowego roku na potrzeby analizy nasłonecznienia jest to, że w wyborze typowych miesięcy metodologia ISO kieruje się odchyleniem od średniej prędkości wiatru, a nie wartościami nasłonecznienia. Zbiory typowego roku dla danej stacji zawierają tylko 8760 rekordów: dla każdej godziny roku jeden rekord. Zastosowana metodologia [1] opracowania danych klimatycznych do obliczeń energetycznych w budownictwie pozwoliła z danych źródłowych uzyskać m.in.:

- całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (ITH) [ $W/m^2$ ];
- bezpośrednie natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (IDH) [ $W/m^2$ ];
- rozproszone natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (ISH) [ $W/m^2$ ];
- całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię o zwrocie w kierunku N, NE, E, SE, S, SW,

W, NW oraz pochyleniu do poziomu 30°, 45°, 60°, 90° (N\_30, NE\_30, ...) [ $W/m^2$ ].

Na całkowite promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni składają się promieniowanie bezpośrednie i rozproszone. W przypadku, gdy powierzchnia jest pochylona, pojawia się trzecia składowa – promieniowanie odbite. Efekt fotowoltaiczny w ogniach wywołuje przede wszystkim promieniowanie bezpośrednie.

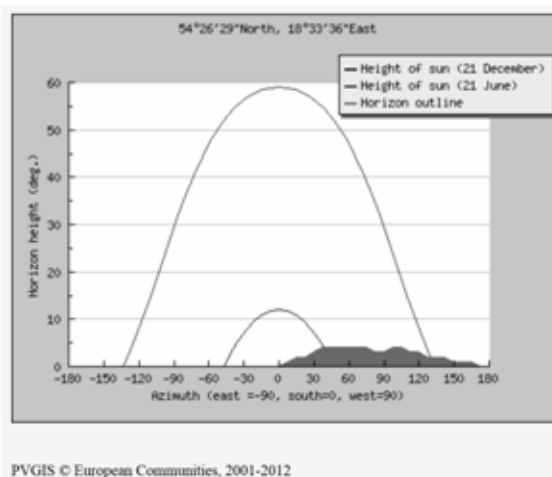
Dla każdej stacji opracowany jest również drugi plik z danymi tzw. statystyk. Są to statystyki dla 12 miesięcy typowego roku meteorologicznego, które zawierają:

- sumę całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (ITH) [ $Wh/(m^2 \text{ mies.})$ ];
- sumę bezpośredniego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (IDH) [ $Wh/(m^2 \text{ mies.})$ ];
- sumę rozproszonego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą (ISH) [ $Wh/(m^2 \text{ mies.})$ ];
- sumę całkowitego natężenia promieniowania słonecznego na powierzchnię o orientacji N, NE, E, SE, S, SW, W, NW oraz pochyleniu do poziomu 30°, 45°, 60°, 90° (I\_N\_30, I\_NE\_30, ...) [ $Wh/(m^2 \text{ mies.})$ ].

Z powyższych informacji wynika, że natężenie promieniowania słonecznego oraz nasłonecznienie określone są z azymutem rozróżnianym co 45° i tylko dla wybranych pochyleń do poziomu. Aby uzyskać wartości nasłonecznienia dla pośrednich azymutów lub przy innych pochyleniach konieczne jest dodatkowe przeliczanie podanych wartości lub użycie do tego odpowiednich programów.

### 2.2. Baza europejskiego Instytutu Energetyki i Transportu

Baza EC IET zawiera dane, które są wynikiem przetwarzania danych źródłowych przez systemy SoDa i USGS oraz z użyciem własnej metodologii [3].



Rys. 1. Przykładowy wynik analizy nasłonecznienia [oprac. własne z użyciem serwisu PVGIS]

Solar Radiation Data (SoDa) dystrybuje i przetwarza dane o nasłonecznieniu dostarczane przez państwa z obszaru Unii Europejskiej i spoza niej. Z kolei system trójwymiarowego skanowania powierzchni Ziemi za pomocą satelitów geologicznych działający w ramach Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) i należący do United States Geological Survey (USGS) wykorzystywany jest do określania linii horyzontu dla wybranej lokalizacji elektrowni słonecznej, jak na rysunku 1.

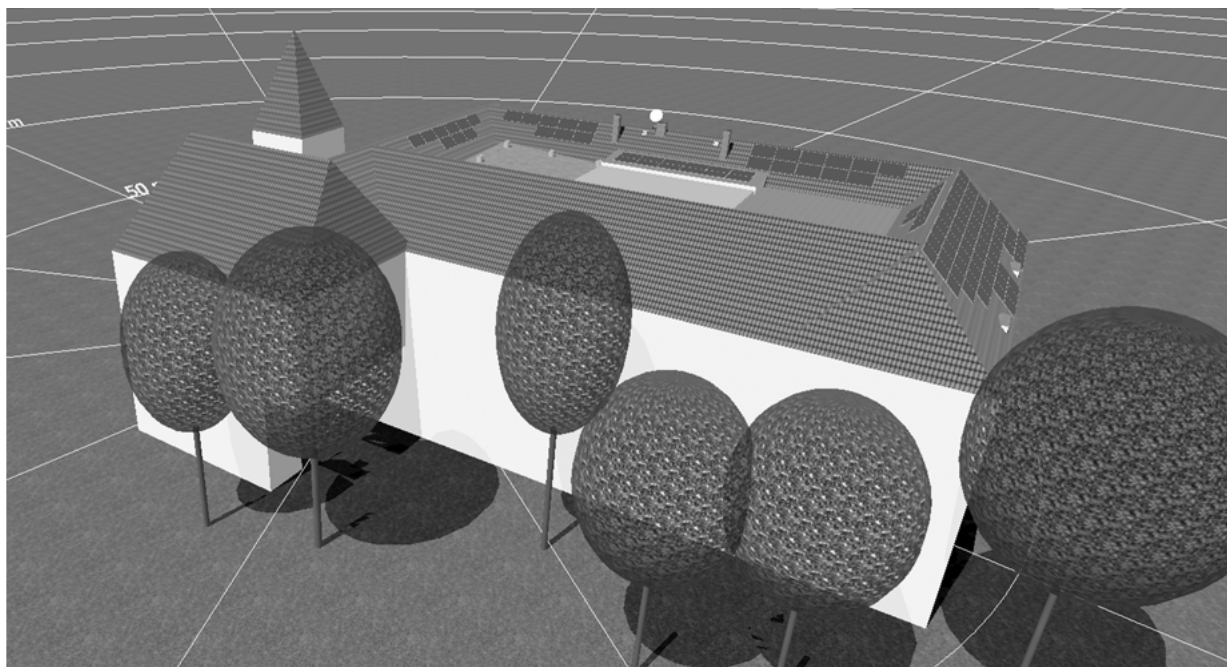
Tworzona przez narzędzia PVGIS linia horyzontu nie uwzględnia obiektów pobliskich dających zacinienie analizowanej powierzchni i o wysokości do 90 m, a jedynie wzgórz i inne istotne elementy krajobrazu.

### 3. OPROGRAMOWANIE WSPOMAGAJĄCE PROJEKTOWANIE ELEKTROWNI SŁONECZNYCH

#### 3.1. Aplikacje PVGIS

Na serwis internetowy PVGIS oprócz treści statycznych składają się aplikacje służące do wyznaczenia następujących parametrów dla określonej lokalizacji [2]:

- miesięcznych i rocznych średnich dziennych wartości nasłonecznienia. Nasłonecznienie prezentowane jest dla reprezentatywnego dnia każdego miesiąca na powierzchni horyzontalnej, nachylonej optymalnie i pod określonym kątem;
- dla wybranego miesiąca dzienne profile nasłonecznienia modułu o określonym nachyleniu i azymucie,
- uzysku energii elektrycznej z elektrowni słonecznej podłączonej do systemu elektroenergetycznego.



Rys. 2. Model budynku o niestandardowej bryle uzyskany jako złożenie szeregu modeli budynków prostych [opracowanie własne z użyciem programu PV\*SOL]

Program pozwala na zamodelowanie złożonych budynków poprzez możliwości uzupełniania bryły głównej budynku o przybudówki i wykusze. Prezentowany na rysunku 2 budynek jest kompozycją typowych brył budynków.

Także możliwe jest zamodelowanie otoczenia budynku i instalacji na budynku w celu uwzględnienia efektu zacinienia powierzchni, na której planowana jest budowa elektrowni słonecznej (rysunek 3). Dodatkowo można wprowadzić do programu linię horyzontu, aby uwzględnić opóźnianie się wschodu Słońca lub przyspieszanie zachodu, co może być spowodowane wzgórzami, np. morenami. Linia horyzontu zadawana jest odcinkami z podaniem azymutu (przyjęto, że kierunek południowy to azymut  $0^{\circ}$ ) i wysokości horyzontu w stopniach.

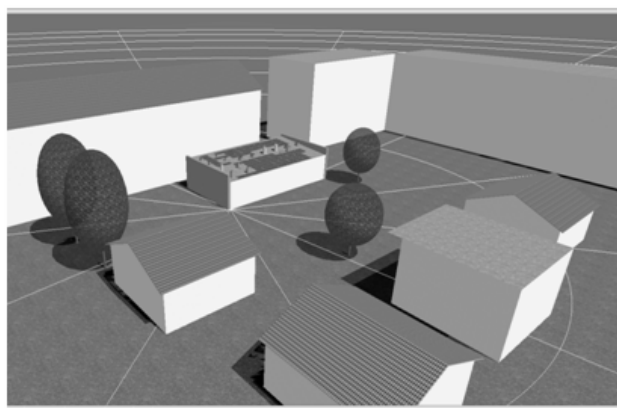
Dla każdego z tych zadań możliwe jest również graficzne przedstawienie linii horyzontu jak na rysunku 1.

Dodatkowe opcje tego internetowego kalkulatora to uwzględnienie w analizie pracy jedno- i dwuosiowych układów nadążnych, tzw. trackerów, pozwalających śledzić ruch Słońca i utrzymywać panel z modułami PV w pozycji prostopadłej do promieniowania bezpośredniego.

Serwis posiada także narzędzie do wstępnego wymiarowania autonomicznych elektrowni słonecznych, czyli nie współpracujących z siecią elektroenergetyczną.

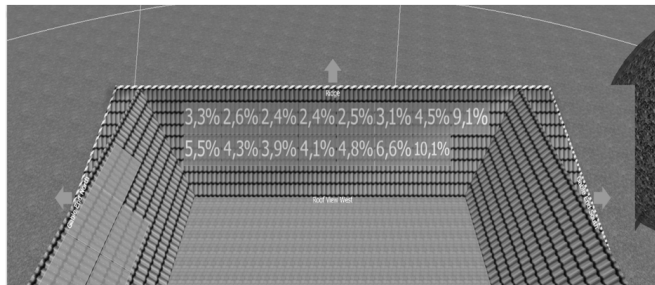
#### 3.2. Program PV\*SOL

Obliczenia w oparciu o dane takie jak w bazie MiR wykonuje program PV\*SOL, który jest kompletnym narzędziem projektowania elektrowni słonecznych łącznie z doborem modułów, inwerterów oraz projektem okablowania elektrowni. Pozwala on zamodelować budynek trójwymiarowo wraz z obiektami zaciniającoymi w jego pobliżu i na nim samym.



Rys. 3. Zamodelowanie otoczenia budynku i instalacji na budynku w celu analizy zacinienia [opracowanie własne z użyciem programu PV\*SOL]

Stosując stworzony model budynku i jego otoczenia program oblicza w procentach straty nasłonecznienia w wyniku zacielenia, np. jak na rysunku 4. Na tej podstawie projektant może odrzucić niedogodne lokalizacje i dobrać do szeregowej pracy moduły o podobnych warunkach pracy. Pozwoli to układowi MPPT (Maximal Power Point Tracking) przekształtników elektrowni słonecznej śledzić punkt pracy i dobrać optymalne parametry pracy dla ogniw.



Rys. 4. Przykładowy wynik analizy nasłonecznienia [oprac. własne z użyciem programu PV\*SOL]

Nieodrzućenie miejsc o gorszym nasłonecznieniu i montaż w tym miejscu modułów sprzęgniętych w łańcuch z innymi lepiej nasłonecznionymi modułami może powodować, że uzysk energii z instalacji będzie mniejszy niż przy mniejszej liczbie modułów. Stanie się tak w wyniku tego, że algorytm działania układu MPPT dobiera punkt pracy przyjmując, że mierzone napięcie i prąd są wynikiem pracy modułów w identycznych warunkach [4].

### 3.3. Porównanie wyników obliczeń nasłonecznienia wybranymi programami

Obliczenia nasłonecznienia wykonano dla kilkunastu lokalizacji w Polsce w oparciu o dane zawarte na stronie MIiT oraz stronie IET/PVGIS (tabela 1). Pomijano wpływ zacielenia. Oczekiwano, że wyniki z bazy IET/PVGIS będą niższe ze względu na uwzględnianie lokalnej linii horyzontu. Dane MIiR także uwzględniają horyzont ale jedynie w oparciu o lokalizację stacji meteorologicznej. Niższe wartości dla danych MIiR sugerują, że linia horyzontu w wielu stacjach meteorologicznych jest bardzo niekorzystna. W kolejnej pracy zostaną przedyskutowane linie horyzontu oraz warunki zacielenia w miejscach lokalizacji stacji meteorologicznych.

Dwie wybrane lokalizacje dotyczyły budynków w miejscowości Hel. W tej miejscowości znajduje się również stacja meteorologiczna. Jednak i w tych przypadkach, mimo tej samej linii horyzontu, wyniki z

bazy PVGIS są bardziej optymistyczne niż uzyskane w oparciu o bazy MIiR.

Tablica 1. Zestawienie danych o nasłonecznieniu dla wybranych lokalizacji - porównanie wyników z różnych baz danych o nasłonecznieniu

Obiekt, kierunek, nachylenie	PVGIS kWh/(m <sup>2</sup> ·r )	MIiR kWh/(m <sup>2</sup> ·r )
Toruń, azymut SE, nachylenie 35°	1190	888
Gdańsk Kiełpino, azymut S, nachylenie 40°	1220	962
Hel, azymut SE, nachylenie 30°	1170	932
Hel, azymut S, nachylenie 30°	1236	959
Gdańsk, Sobieszewo, azymut SW, nachylenie 22°	1192	928
Kwidzyn, azymut S, nachylenie 40°	1273	935
Gdynia, azymut S, nachylenie 30°	1250	959
Piskorzówek (Dolnośląskie), azymut S, nachylenie 45°	1294	1086
Czaple k.Gdańska, azymut S, nachylenie 38°	1260	960

### 4. WNIOSKI KOŃCOWE

Potwierdzono tezę, że metody przeliczania danych meteorologicznych na bazy danych o nasłonecznieniu, stosowane w oprogramowaniu wspomagającym projektowanie elektrowni słonecznych, prowadzą do znacząco różnych wyników uzysku energii elektrycznej.

Przy inwestycjach w elektrownie słoneczne, w szczególności z dofinansowaniem lub kredytowaniem przez bank, należy wykonać kompletną analizę uzysków energii elektrycznej. Rzetelności analizy inwestycji zagrażają: nieuwzględnienie zacielenia i wpływu linii horyzontu oraz użycie niewłaściwie przeliczonych danych o nasłonecznieniu.

### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Narowski P.G., Dane klimatyczne do obliczeń energetycznych w budownictwie, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, 11, 2006
2. Šúri M., Huld T.A., Dunlop E.D. Ossenbrink H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. Solar Energy, 81, 1295–1305, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.
3. Huld T., Müller R., Gambardella A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. Solar Energy, 86, 1803-1815.
4. Szymański B.: Instalacje fotowoltaiczne. Wydanie II, GlobEnergia Kraków 2013, ISBN: 978-83-64339-00-4

## ASSESSMENT OF IRRADIATION CONDITIONS AND DESIGN OF SOLAR POWER PLANT USING DEDICATED SOFTWARE AND DATABASES

**Key-words:** solar radiation databases, software for photovoltaic power plant design

This article presents a method to determine the approximate value of solar irradiation. This is followed by a more accurate method which uses a solar radiation databases and computer applications. These tools allow you to more fully take into account: the angle of inclination and azimuth solar modules, the horizon line and shading, and solar variability during the year. The chosen software uses information about the intensity of solar radiation contained in two databases: the PVGIS database and in the database of meteorological and climatic owned by Ministry of Infrastructure and Development. For both these databases the analyzes were performed for different locations across the country and the results were compared. Article presents results of shading calculation for the selected complex object done with use of one dedicated software.