

INSTALACJA FOTOWOLTAICZNA USYTUOWANA W KIERUNKU WSCHODNIO - ZACHODNIM

Michał Mizera

¹Uniwersytet Radomski im. Kazimierza Pułaskiego, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Polska, 110372@student.urad.edu.pl

Streszczenie – W artykule przedstawiono analizę wpływu nachylenia instalacji fotowoltaicznej (PV) w kierunku wschodnio-zachodnim oraz wpływu jej zacienienia na uzyski energetyczne instalacji. W pierwszej części przedstawione zostały podstawowe informacje na temat podjętej analizy. Następnie przedstawiono zagadnienia analizy zacienienia oraz jej symulacji. Przedstawione są charakterystyki nachylenia kąta nachylenia do strat odbicia na module. Zostały przedstawione również procentowe dane zacienienia wyliczone przez program użyte podczas analizy. Zaprezentowane zostały dane instalacji rozmieszczenie modułów fotowoltaicznych, jak również sam schemat instalacji pokazujący między innymi podział obwodów czy przekroje oraz długości przewodów użytych w symulacji, mających wpływ na straty. W dalszej części pracy pokazane zostały wyniki symulacji zaprezentowane w postaci tabel. Pokazują one jak wzrost kąta nachylenia wpływa na uzyski oraz jakie są uzyski instalacji południowej. Ma to na celu pokazać, jakie wartości można uzyskać i jakie są straty w poszczególnych wariantach pracy instalacji. Ostatnim rozdziałem są wnioski, które scalają pracę i ją podsumowują, pokazując jakie są najlepsze warunki pracy instalacji wschodnio-zachodniej oraz z jakimi stratami mamy do czynienia decydując się na wykonanie takiej instalacji. Wnioski przedstawiają wady i zalety wykonania instalacji wschodnio-zachodniej opierając się na przeprowadzonej analizie.

Słowa kluczowe – fotowoltaika, wpływ cieni, wpływ nachylenia, uzyski instalacji fotowoltaicznej

I. WSTĘP

W ostatnich latach instalacje fotowoltaiczne przeżywają ogromny rozkwit. Przyczyną tego jest przede wszystkim ich rozpowszechnienie na bardzo dużą skalę. Między innymi bardzo duża liczba gospodarstw domowych wyposażona została w takie systemy. Dlatego warto zastanowić się, jakie są problemy takich instalacji i jakie są najlepsze warunki dla instalacji wschodnio-zachodnich. W pracy pokazany został wpływ nachylenia instalacji oraz cieni wędrujących na ich wydajność energetyczną.

Nachylenie instalacji to kąt, pod jakim ustawione są panele fotowoltaiczne względem gruntu. Kąt ten ma wpływ na ilość docierającego do modułów promieniowania słonecznego, które jest podstawą działania każdej instalacji fotowoltaicznej. Ilość docierającego promieniowania ma wpływ na sprawność instalacji, choć i tak większość produkcji energii elektrycznej w naszym regionie odbywa się z promieni rozproszonych, czyli odbitych od innych przedmiotów usytuowanych w pobliżu takiej instalacji. Dużą część energii słonecznej pochłania również atmosfera ziemi, dlatego też przyjmuje się średnią wartość wyprodukowania energii elektrycznej z energii słonecznej w ilości około 950-1050 kWh/m² rocznie. Oczywiście jest to, że wartość ta może się różnić w poszczególnych latach,

ze względu na zmienność pogody (liczba dni słonecznych w stosunku do pochmurnych).

Kolejnym ważnym aspektem pracy jest wpływ cieni wędrujących. Są to cienie przemieszczające się po całej instalacji fotowoltaicznej, które pochodzą między innymi od kominów, drzew oraz innych obiektów znajdujących się w bliskim otoczeniu każdej instalacji. W dalszej części zostaną one uwzględnione i zostanie pokazany ich wpływ na uzyski instalacji.

II. CIEŃ WĘDRUJĄCE NA INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ

Program prowadzi obliczenia dotyczące pogody oraz cieni w oparciu o dane szwajcarskiej grupy ekspertów z Meteonorm. Ważną zmienną w tworzeniu symulacji jest pozycja słońca. Pozycja słońca jest obliczana na podstawie czasu, długości i szerokości geograficznej oraz strefy czasowej (zgodnie z normą DIN 5034-2 lub NREL SPA). Położenie słońca opisują dwa kąty:

- kąt azymutu odpowiada punktom kardynalnym:
- półkula północna: 180° to północ, 270° wschód, 0° południe, 90° zachód.
- półkula południowa: 0° to północ, 90° wschód, 180° południe, 270° zachód.
- kąt elewacji 0° jest na horyzoncie, 90° to zenit.

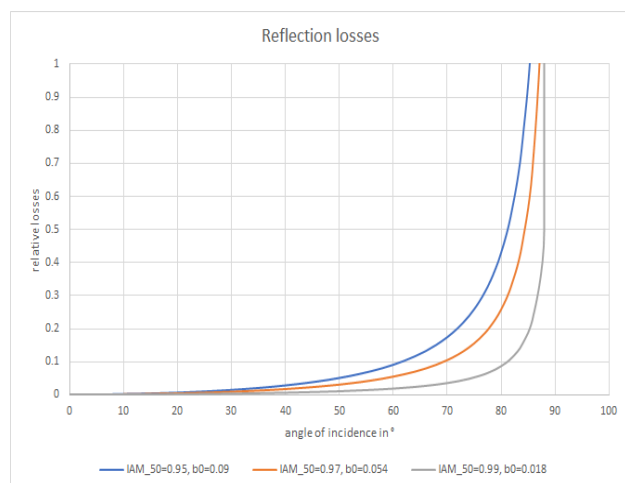
Ważnymi elementami wykorzystanymi w przeprowadzonych symulacjach są odbicia w płaszczyźnie modułu. Ma to realny wpływ na uzyski, ponieważ promieniowanie na nachylonej płaszczyźnie generatora PV odbija się od powierzchni modułu i prowadzi do strat promieniowania. Bezpośrednia składowa promieniowania jest odbijana w zależności od położenia słońca i współczynnika korekcji kąta modułu [1].

Dla strat odbicia w danych modułu jest określony modyfikator kąta padania, który wskazuje, jak duże jest odbicie przy kącie padania 50°. Odbicie dla dowolnego kąta padania można następnie obliczyć z tego współczynnika, zgodnie z modelem ASHRAE (pierwotnie z Souka i Safwat) -IAM50 [2,3].

$$b_0 = (1 - IAM_{50}) / (IAM_{50}^{\circ} - 1)$$

$$E_{\text{utrata odbicia}} = b_0 (IAM_{\theta_{\text{gen}}} - 1)$$

Wraz ze wzrostem, czyli bardziej płaskim kątem padania, rosną również straty odbicia na powierzchni modułu.

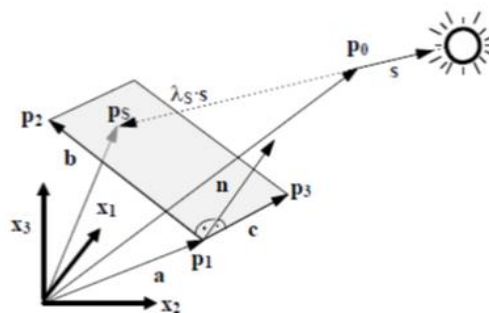


Wykres 1. Kąt padania w stosunku do strat odbicia na module.

Źródło: <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/pv-modules/reflection-in-module-plane/>

Wykres przedstawia zmniejszenia kąta padania do wzrostu strat odbitych.

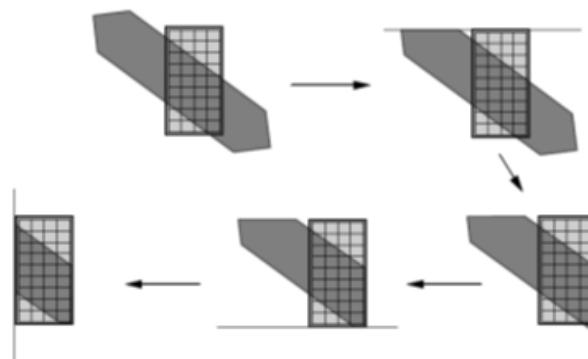
Najbardziej interesującym narzędziem obliczeniowym programu jest obliczanie cieni oraz jakie straty powoduje ich powstawanie, program korzysta z wektorowego obliczania cieni obiektów znajdujących się w pobliżu modułów fotowoltaicznych.



Rys. 1. Wektorowe zacinienie modułu.

Źródło: <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/pv-modules/shading-due-to-nearby-objects/>

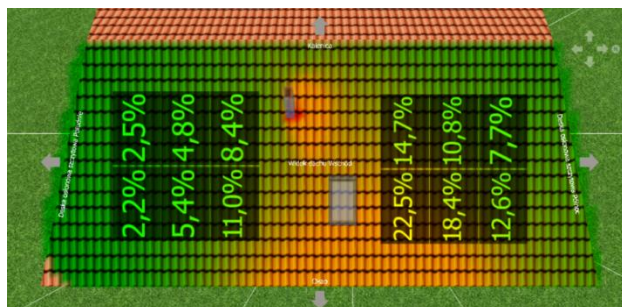
Rysunek przedstawia, na jakiej zasadzie padania promieniowania program oblicza straty wynikające z zacinienia.



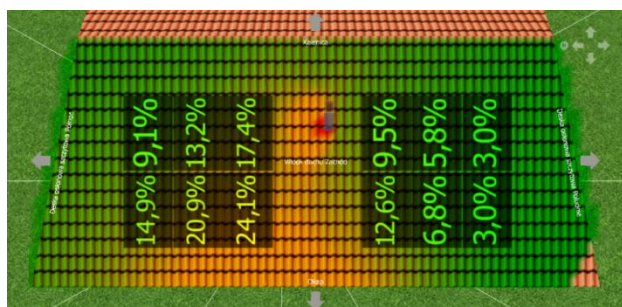
Rys. 2. Dopasowanie cienia do powierzchni modułu

Źródło: <https://help.valentin-software.com/pvsol/en/calculation/pv-modules/shading-due-to-nearby-objects/>

Rysunek przedstawia, w jaki sposób program dopasowuje powstałe cienie do wielkości modułu, aby obliczyć powierzchnię zacienną. Stosunek wielkości cienia do powierzchni modułu daje stopień zaciennia. W PV*SOL wektory cieniowania xy są obliczane na poziomie łańcucha lub komórki, aby zapewnić najwyższą dokładność symulacji. W zaciennym obszarze modułu do ogniw fotowoltaicznych dociera tylko promieniowanie rozproszone. W niezaciennym obszarze modułu dociera pełne globalne promieniowanie, co pozwala na określenie poziomu strat powstałych wskutek obecnego zaciennia.



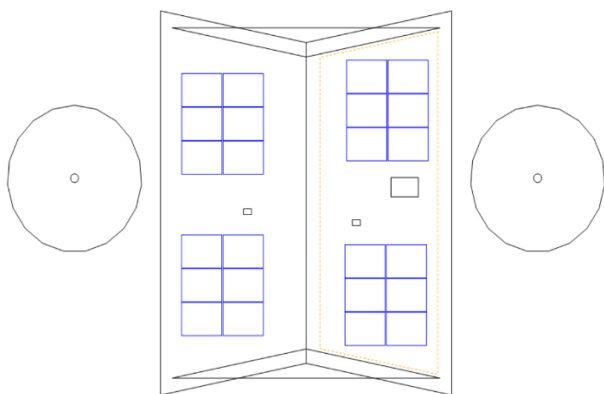
Rys. 3. Procentowe zacielenie modułów od strony wschodniej



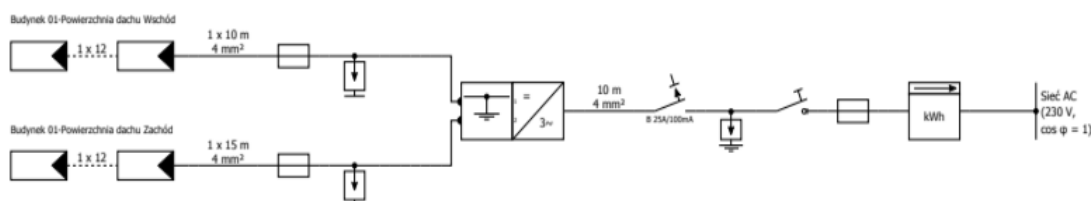
Rys. 4. Procentowe zacielenie strona zachodnia.

W przypadku obu połaci dachu widzimy, że procentowe zacielenie modułów wynosi od ponad 24% do około 2%, w zależności od rozmieszczenia i strony, na której się znajdują.

III. 3. INSTALACJA WSCHODNIO-ZACHODNIA



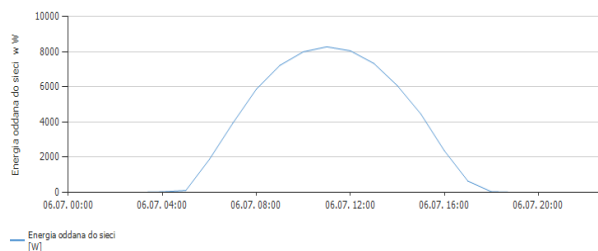
Rys. 5. Rzut poglądowy dla instalacji wschodnio zachodniej. Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6. Schemat wschód-zachód. Źródło: Opracowanie własne

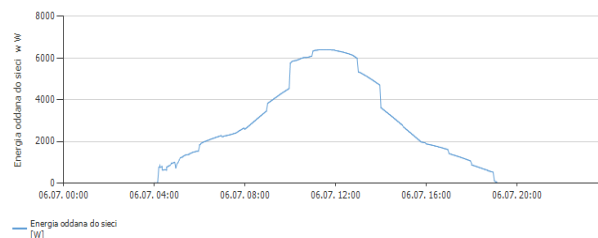
Rysunek 5 przedstawia rzut dachu oraz otoczenia, w jakim były prowadzone symulacje, które posłużą do zbadania wpływu kąta nachylenia oraz otoczenia względem produkcji.

Rysunek 6 przedstawia schemat elektryczny dla połączenia instalacji wschodnio-zachodniej do sieci elektrycznej wraz z podanymi danymi dotyczącym liczby modułów w łańcuchu, długościami użytych przewodów oraz ich przekrojami.



Wyk. 2. Wykres dobowy dla połaci południowej. Źródło: Opracowanie własne

Wykres przedstawia uzysk instalacji południowej w ciągu doby dla dnia 6 lipca. Zaobserwować można, że instalacja zaczyna pracę spokojnie od godziny 5 i swój maksymalny uzysk ma minimalnie przed południem, kiedy słońce jest w zenicie oraz kończy swoją pracę około godziny 17, co daje 12 godzin produkcji. Zauważalne jest również że wykres jest półsinusoidalny, z minimalnymi zniekształceniami na dole wykresu oraz w szczycie.



Wyk. 3. Wykres dobowy dla połaci wschodnio-zachodniej. Źródło: Opracowanie własne

Wykres przedstawia uzysk dobowy dla instalacji wschodnio-zachodniej w dniu 6 lipca. Zauważalne jest to, że wykres w porównaniu do południowego nie jest idealnie sinusoidalny a raczej delikatnie postrzępiony. Kąt nachylenia instalacji to 25°, co okaże się w dalszej części pracy optymalnym ustawieniem instalacji.

Na wykresie widać jednak, że instalacja pracuje dłużej, ponieważ zaczyna produkcję minimalnie po godzinie 4, a kończy dopiero w okolicach godziny 19, co daje 15 godzin produkcji. Jest to o około 3 godziny dłużej niż w przypadku instalacji południowej.

Tabela 1. Zacienienie wędrujące

Symulacja instalacji w zależności od nachylenia			
Wschód-zachód			
Lp.	Nachylenie instalacji	Moc instalacji	Uzysk roczny
1.	5°	9,6 kWp	6842 kWh/rok
2.	10°	9,6 kWp	6768 kWh/rok
3.	15°	9,6 kWp	6722 kWh/rok
4.	20°	9,6 kWp	6547 kWh/rok
5.	25°	9,6 kWp	6511 kWh/rok
6.	30°	9,6 kWp	6357 kWh/rok
7.	35°	9,6 kWp	6233 kWh/rok
8.	40°	9,6 kWp	6003 kWh/rok
9.	45°	9,6 kWp	5780 kWh/rok
10.	50°	9,6 kWp	5578 kWh/rok
11.	55°	9,6 kWp	5360 kWh/rok
12.	60°	9,6 kWp	5127 kWh/rok
13.	65°	9,6 kWp	4878 kWh/rok
14.	70°	9,6 kWp	4623 kWh/rok
Południe			
1.	25°	9,6 kWp	9344 kWh/rok
2.	30°	9,6 kWp	9503 kWh/rok
3.	35°	9,6 kWp	9612 kWh/rok
4.	40°	9,6 kWp	9644 kWh/rok

Tabela 2. Warunki bez zacienienia

Symulacja instalacji w zależności od nachylenia			
Wschód-zachód			
Lp.	Nachylenie instalacji	Moc instalacji	Uzysk roczny
1.	5°	9,6 kWp	8377 kWh/rok
2.	10°	9,6 kWp	8334 kWh/rok
3.	15°	9,6 kWp	8277 kWh/rok
4.	20°	9,6 kWp	8204 kWh/rok
5.	25°	9,6 kWp	8116 kWh/rok
6.	30°	9,6 kWp	8011 kWh/rok
7.	35°	9,6 kWp	7891 kWh/rok
8.	40°	9,6 kWp	7752 kWh/rok
9.	45°	9,6 kWp	7594 kWh/rok
10.	50°	9,6 kWp	7415 kWh/rok
11.	55°	9,6 kWp	7217 kWh/rok
12.	60°	9,6 kWp	7001 kWh/rok
13.	65°	9,6 kWp	6767 kWh/rok
14.	70°	9,6 kWp	6514 kWh/rok
Południe			
1.	25°	9,6 kWp	9774 kWh/rok
2.	30°	9,6 kWp	9874 kWh/rok
3.	35°	9,6 kWp	9914 kWh/rok
4.	40°	9,6 kWp	9900 kWh/rok

Powyżej zostały przedstawione wyniki przeprowadzonych symulacji dla dwóch opcji z wystąpieniem cieni wędrujących oraz dla przypadku, gdy cienie nie wystąpią. Dla porównania zostały przedstawione wyniki symulacji instalacji południowej. Wykonane zostały w dużo węższym paśmie kątów ze względu na zaobserwowaną tendencję wzrostową dla kątów od 25°-35°, po czym następuje tendencja malejąca dla uzysku, jest to spowodowane różnorodnością pór roku w naszym regionie. Optymalny kąt całoroczny dla naszego regionu przyjmuje się w granicach 35°-37°, co potwierdza przeprowadzona symulacja. Z dalszych obserwacji zauważyć można, że na instalację południową mniejsze działanie ma występowanie cieni wędrujących zasymulowanych poprzez duże drzewa o średnicy korony 3 m identycznie dla obu instalacji. Porównanie instalacji wschodnio-zachodniej można zauważyć, że występuje duża różnica między instalacją zacienioną oraz niezacienioną.

IV. WNIOSKI

Podsumowując całość pracy można zaobserwować, że w przypadku instalacji wschodnio-zachodniej im mniejszy kąt, tym lepsza produkcja. Oczywiście jest to spowodowane dużą płynnością przejścia słońca ze wschodu na zachód, jednak dość mocno zauważalne jest działanie cieni wędrujących, czyli w symulowanym przypadku drzew. W instalacjach południowych cień nie działa na tak dużym obszarze i z czasem przejścia słońca całkowicie może zniknąć z powierzchni modułów, natomiast w przypadku w/w instalacji wschodnio-zachodniej im bliżej instalacji jest przeszkoda tym dłużej instalacja może być zacieniona. Najgorszą opcją jest przypadek, w który np. drzewa są po obu stronach zarówno po wschodniej, jak i zachodniej (Tabela 1 i 2). Częściowym wyjściem z takiej sytuacji może być zastosowanie modułów half-cut w orientacji pionowej, których głównym założeniem tego rozwiązania jest podzielenie generatora fotowoltaicznego na dwie połowy celem niewyłączenia całego modułu, a tylko jednej połowy, która jest w danym czasie zacieniona.

Kolejnym rozwiązaniem, które może usprawnić działanie instalacji jest zastosowanie optymalizatorów pracy, które w czasie, gdy panel jest zacieniony zwierają obwód powodując jego pominięcie. Ma to na celu działanie pozostałej instalacji w sposób nieprzerwany, co również może zwiększyć produkcję (rys 2).

Kolejnym wnioskiem płynącym z przeprowadzonej symulacji są wykresy dobowej produkcji instalacji fotowoltaicznej strony południowej i wschodnio-zachodniej. Porównane są wykresy wykonane dla tego samego dnia i identycznych warunków, zaobserwować można, że instalacja południowa zaczyna pracę o godzinie 5, a koniec produkcji jest w okolicach godziny 17-17:30 co daje 12 godzin produkcji. Charakterystyka południowa jest dość gładka bez skoków i zniekształceń jedyne wyróżniające się anomalie występują podczas rozpoczęcia pracy i zakończeniu pracy instalacji.

Wykres dobowy instalacji wschodnio-zachodniej wygląda bardziej skomplikowanie, jednak zaczyna pracę

już o godzinie 4 i pracuje do około 10, stale wzrastając. Natomiast w okolicy godziny 10 zauważalna jest pionowa kreska na wykresie. W tym momencie zaczyna działać strona zachodnia instalacji aż do godziny 12 stale rosnąc. Kolejną zmianę wykresu widać w okolicach godziny 14 gdzie zauważyć można drugą pionową kreskę na wykresie jest to moment, gdy wschodnia strona przestaje pracować i następuje powolny spadek produkcji do godziny 19 gdzie instalacja przestaje działać. W efekcie instalacja nie działała z tak dużą produkcją niż instalacja południowa, jednak pracowała o 3 godziny dłużej co jest dużą zaletą (wyk 2 i 3).

Ostatnim wnioskiem nasuwającym się z całości pracy jest aspekt nachylenia instalacji wschodnio-zachodniej. Kąt nachylenia ma znaczący wpływ na uzyski, jednak w zakresie od 5° do 45° jest to zmiana poniżej 10%. Dlatego też za najbardziej optymalny kąt można przyjąć około 20-25° nachylenia instalacji fotowoltaicznej. Powyżej 45° spadek uzysków spada znacznie w efekcie porównując 5°, a ostatnią symulację przy 70° uzysk jest mniejszy o 22% dodając do tego zacinienie może się okazać że instalacja będzie działała na około 50%. Gdy dodamy do całości spadek sprawności modułów okazuje się że instalacja jest nie rentowna (Tabela 1 i 2).

Podsumowując wszystkie przedstawione w pracy czynniki mają znaczący wpływ na działanie każdej instalacji, niestety instalacje usytuowane w kierunku wschodnio- zachodnim są dużo bardziej narażone na działanie cieni i w większym stopniu wpływa to na uzyski. Instalacje południowe, przy dobrych warunkach i odpowiednim kącie nachylenia, są w stanie w ciągu roku wyprodukować ponad 100% zainstalowanej mocy, co jest nie do osiągnięcia w przypadku instalacji wschodnio-zachodnich.

Instalacje wschodnio-zachodnie mają natomiast inną zaletę, w postaci czasu produkcji ze względu wcześniejszej produkcji oraz późniejszego wyłączenia się instalacji. Można wykorzystać to do efektywnego gospodarowania energią tzn. osoby pracujące do godziny 16, docierając do domu korzystają jeszcze przez około 2h z mocy wyprodukowanej z instalacji fotowoltaicznej w przypadku, gdy południowa nie będzie już pracować.

PHOTOVOLTAIC INSTALLATION LOCATED IN AN EAST-WEST DIRECTION

Abstract: This paper presents an analysis of the impact of the east-west tilt of a photovoltaic (PV) installation and the effect of shading on the energy yield of the installation. The initial section presents fundamental details regarding the analytical process that was conducted. Subsequently, the subject of shading analysis and its simulation is addressed. The characteristics of the slope angle with regard to reflection losses on the module are presented. Additionally, the percentage shading data calculated by the utilized program are presented. The data

regarding the installation of the photovoltaic modules, as well as the installation diagram, are presented. The diagram illustrates, among other things, the division of circuits and the cross-sections and lengths of the wires used in the simulation that affect losses. The remainder of the paper presents the simulation results in tabular form. The results demonstrate the impact of an increase in the angle of inclination on the yields of both the northern and southern installations. This is to demonstrate the potential yields and losses associated with the various operational configurations of the installation. The final chapter presents the conclusions, which integrate the findings and provide a summary of the optimal conditions for an east-west installation, as well as an analysis of the associated losses. The conclusions highlight the advantages and disadvantages of an east-west installation based on the analysis.

Key words: photovoltaics, shadow effect, tilt effect, photovoltaic installation yields

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Figura, W. Zientarski, Analiza parametrów pracy modułu fotowoltaicznego. Czasopismo Autobusy, 2016.
- [2] M.T. Sarniak, Systemy fotowoltaiczne, tom I, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2020.
- [3] B. Szymański, Instalacje fotowoltaiczne, wydanie V, Kraków, Wydawnictwo Geosystem Burek, Kotyza S.C, 2016.
- [4] M. Lipiński, Pozyskiwanie energii elektrycznej ze słońca, Kraków, Wydawnictwo Instytutu GSMiE PAN, 1998.
- [5] E. Klugmann-Radziemska, Fotowoltaika w teorii i praktyce, wydanie I, Legionowo, Wydawnictwo BTC, 2010.
- [6] M. Michalski, Energetyka słoneczna-fotowoltaika. https://www.viessmann.ovh/wp-content/uploads/T3_SEO-B22_Fotowoltaika_M_Michalski_29_11_2016.pdf
- [7] Nowicki M., Nadchodzi era Słońca, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [8] Oszczak W., Kolektory słoneczne i fotoogniwa w twoim domu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa, 2012.
- [9] Tytko R., Odnawialne Źródła Energii, Lotos Poligrafia sp. z o.o., 2009.
- [10] Tytko R., Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków 2015.
- [11] Wacławek M., Rodziewicz T., Ogniwa słoneczne. Wpływ środowiska naturalnego na ich pracę, Wydawnictwo Naukowo Techniczne sp. z o.o., Warszawa 2014.