

ANALIZA OPŁACALNOŚCI ZASTOSOWANIA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH W WARSZTACIE NAPRAWY AUTOBUSÓW

W artykule przedstawiono informacje na temat możliwości zastosowania instalacji ogniw fotowoltaicznych do produkcji energii elektrycznej dla zaspokajania potrzeb własnych warsztatu, w których prowadzone będą naprawy autobusów. W jego pierwszej części omówiono warunki słoneczne panujące w Polsce oraz typowe rozwiązania, stosowane w takich instalacjach.

W drugiej części pracy przedstawiono obliczenia ekonomiczne oraz ekologiczne efektów, które można uzyskać po zamontowaniu i uruchomieniu 70 paneli PV o łącznej mocy 26,6 kWp. Wykazano, że pracująca instalacja przyniesie wymierne korzyści ekonomiczne w postaci zmniejszenia ilości kupowanej energii od aktualnego dostawcy oraz ekologiczne w postaci obniżenia emisji dwutlenku węgla do atmosfery u wytwórcy energii elektrycznej.

WSTĘP

W czasach, gdy świat coraz uważniej spogląda w kierunku wykorzystania odnawialnych źródeł energii, opartych o energię Słońca oraz Ziemi warto zająć się produkcją energii elektrycznej przy wykorzystaniu ogniw fotowoltaicznych, zwanych także panelami fotowoltaicznymi lub ogniwami PV. Ogniwa tego typu przekształcają światło słoneczne w energię elektryczną. Ilość wytworzonej energii zależy bezpośrednio od mocy padającego promieniowania. Warto nadmienić, że ogniwa PV nie wymagają dodatkowego zasilania ponieważ same wytwarzają energię elektryczną. Są one przetwornikami generacyjnymi, reagującymi na promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie widzialnym oraz podczerwonym, które przekształcają w energię elektryczną. [1]

W warunkach naszego kraju ogniwa PV stosowane są do produkcji energii elektrycznej zarówno w instalacjach dużej mocy (do kilku MWe) jak i instalacjach o mocy kilku lub kilkudziesięciu kWe. Wg danych statystycznych [2] w ostatnich latach wzrosła wielkość mocy elektrowni słonecznych – od 1 MWe w 2011 r. do 108 MWe w 2015 r.

W tym artykule zostanie omówione zagadnienie zastosowania ogniw fotowoltaicznych do produkcji energii elektrycznej, wykorzystywanej w warsztacie w którym naprawiane są autobusy. Przeprowadzona w dalszej części analiza zawierać będzie elementy ekonomiczne oraz ekologiczne.

1. ROZWIĄZANIA TECHNICZNE INSTALACJI PV

Projektując instalacje z panelami fotowoltaicznymi należy zdecydować się na jedno z dwóch stosowanych rozwiązań:

- on-grid (instalacja paneli fotowoltaicznych podłączona jest do ogólnodostępnej sieci elektroenergetycznej);
- off-grid (instalacja pracuje w sposób wyspowy tj. wyłącznie na potrzeby własne wytwórcy energii elektrycznej).

Zakłada się, że w przyszłości rozwój fotowoltaiki w Polsce będzie ukierunkowany na przyłączanie instalacji do niskonapięciowej sieci elektroenergetycznej.

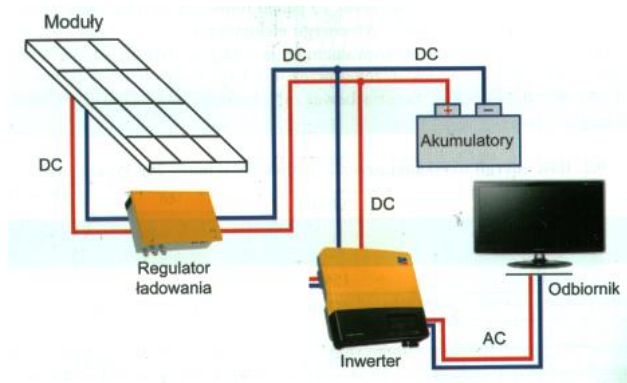
Ze względu na fakt, że przeprowadzona w dalszej części tego artykułu analiza opłacalności zastosowania ogniw fotowoltaicznych

dotyczy instalacji wyspowej dlatego poniżej omówiono szczegółowo to rozwiązanie.

1.1. Instalacja off-grid

Układ połączenia fotoogniw off-grid (rys.1.) jako sieć autonomiczna charakteryzuje się tym, że może być stosowany wszędzie tam, gdzie występuje brak dostępu do publicznej sieci elektroenergetycznej. Energii elektryczna wytworzona jest w panelach PV a następnie gromadzona w akumulatorach prądu stałego lub, bezpośrednio przez inwerter, przekazywana jest do użytku. Rolą inwertera jest zamiana prądu stałego na prąd zmienny jedno lub trójfazowy.

Nie występuje tutaj sprzedaż energii elektrycznej do ogólnej sieci elektroenergetycznej jak to ma miejsce w instalacjach on-grid.



Rys. 1. Schemat instalacji wyspowej off-grid [1]

Wytworzona w ten sposób energia elektryczna może być wykorzystywana do celów bytowych, np. przygotowanie ciepłej wody użytkowej lub produkcyjnych (zasilanie instalacji wewnętrznych).

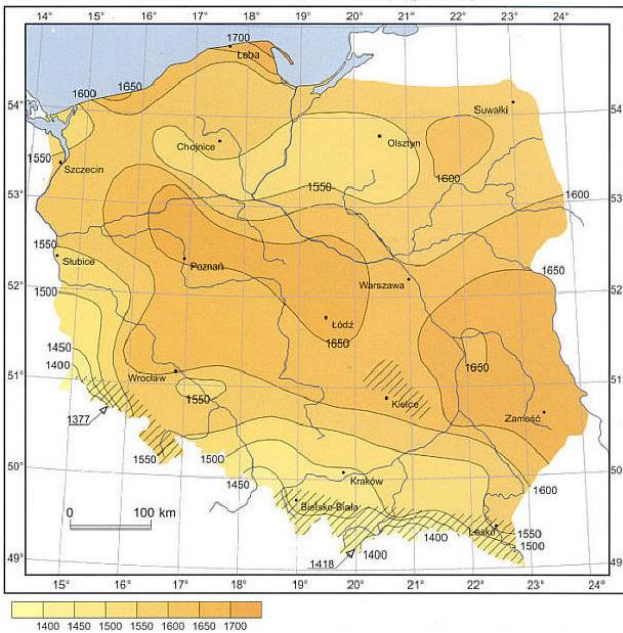
Zastosowanie układu autonomicznego przynosi wiele korzyści, z których najważniejsze to [1]:

- a) niezależność od sieci energetycznej,
- b) obniżenie opłat za pobieraną energię elektryczną lub całkowite ich wyeliminowanie,
- c) bezpośrednia konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną,
- d) możliwość magazynowania energii elektrycznej,
- e) możliwość rozbudowy instalacji PV,

f) korzyści ekologiczne, wynikające ze zmniejszenia emisji zanieczyszczeń do atmosfery przez tradycyjne źródła wytwarzania energii elektrycznej.

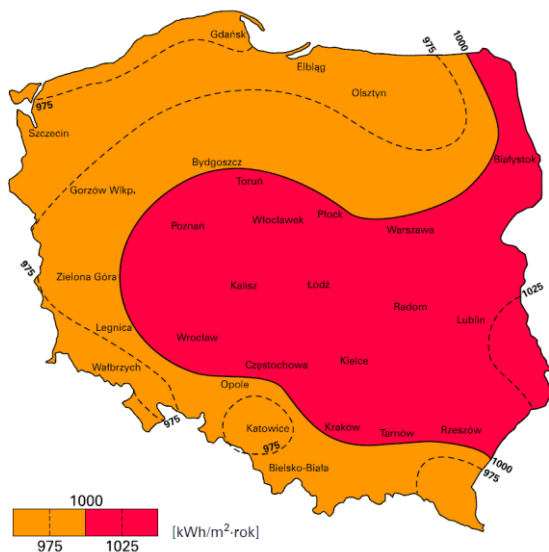
Ilość wyprodukowanej energii elektrycznej zależy głównie od liczby ogniw, ich mocy jednostkowej, sprawności całej instalacji oraz od usłonecznienia i nasłonecznienia w miejscu zamontowania instalacji PV. Przez usłonecznienie rozumie się czas w ciągu roku, wyrażony w godzinach, w którym można wykorzystać promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni Ziemi. [3]

Na rysunku 2 pokazano mapę średniego usłonecznienia, występującego w poszczególnych rejonach Polski. Przyjmuje się, że największe usłonecznienie w Polsce występuje w rejonie Kołobrzegu i wynosi ok. 1 624 h/rok.



Rys.2. Mapa średnich wartości usłonecznienia w Polsce [3]

Nasłonecznienie to nic innego jak suma natężenia słonecznego w jednostce czasu (np. 1h), padającego prostopadłe na 1 m² powierzchni Ziemi. Na rysunku 4 pokazano rozkład nasłonecznienia w Polsce.



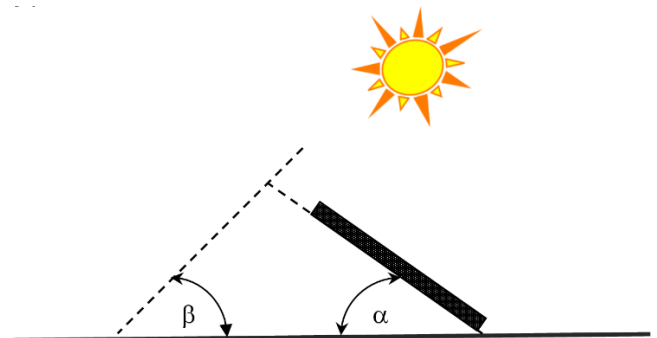
Rys.3. Mapa średnich wartości nasłonecznienia w Polsce [4]

Dla warunków polskich przyjmuje się średnio 1000 kWh/m²/rok. Jest to wartość odbiegająca od wartości rzeczywistych ponieważ w praktyce większość urządzeń, wykorzystujących energię słoneczną nie jest ustawiona prostopadłe do jego promieniowania.

W praktyce instalacje wykorzystujące promieniowanie słoneczne korzystają z jego zasobów nie tylko wtedy, gdy słońce znajduje się w zenicie. Stąd bardzo ważnym przy projektowaniu instalacji PV jest poznanie rzeczywistego rocznego natężenia promieniowania słonecznego padającego na jednostkę powierzchni pod wybranym kątem.

W praktyce te informacje pozyskuje się w lokalnych stacjach meteorologicznych lub korzysta się z danych wieloletnich [4]. W tym drugim przypadku należy pobrać dane z ogólnodostępnej bazy internetowej, zarejestrowane w stacji meteorologicznej zlokalizowanej najbliżej miejsca zainstalowania ogniw PV.

Na rys.4 pokazano schemat zależności geometrycznych, które powinny być uwzględnione przy projektowaniu instalacji PV.



Rys.4. Geometria układu z panelami PV

α – kąt nachylenia ogniw PV w stosunku do powierzchni Ziemi, β – kąt padania promieniowania słonecznego na powierzchnię Ziemi

2. ZAŁOŻENIA DO ANALIZY OPŁACALNOŚCI ZASTOSOWANIA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

Analizę opłacalności zastosowania ogniw PV do wytwarzania energii elektrycznej przeprowadzono dla warsztatu w którym w przyszłości będą naprawiane autobusy komunikacji międzymiastowej. Warsztat naprawy autobusów zostanie zlokalizowany w odległości ok. 30 km od stacji meteorologicznej Racibórz-Studzienna (rys.5). Mapę rozmieszczenia stacji meteorologicznych w Polsce zaczerpnięto z [5].

Warsztat o którym wspomiano wykonany jest w technologii tradycyjnej z betonowym stropodachem. Na stropodachu można zainstalować łącznie 70 ogniw PV. Liczba ta jest uwarunkowana powierzchnią stropodachu do wykorzystania oraz jego wytrzymałością na obciążenia.

Przewiduje się, że średnioroczne zużycie energii elektrycznej w warsztacie naprawy autobusów będzie wynosiło ok. $E_0 = 90$ MWh/rok. Koszt jednostkowy energii elektrycznej, kupowanej od dostawcy, wraz z kosztami dystrybucji wynosi $K_e = 0,71$ zł/kWh.

2.1. Opis szczegółowy instalacji

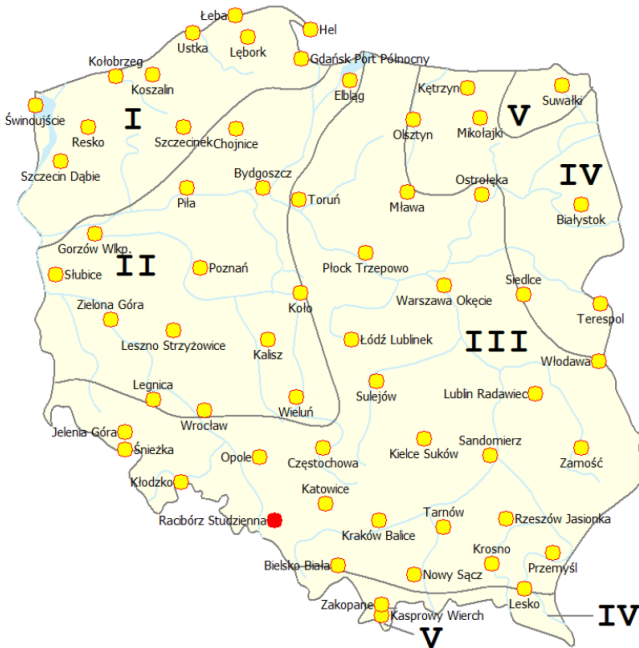
System fotowoltaiczny będzie produkował energię elektryczną z generatorów fotowoltaicznych w postaci prądu stałego, który następnie będzie przekształcany na prąd przemienny o napięciu 400V przez inwerter trójfazowy, zabudowany przy panelach. Moduły zostaną zainstalowane na stropodachu i będą nachylone pod kątem $\alpha = 35$ stopni względem powierzchni Ziemi.

W instalacji PV zostaną zamontowane ogniwa polikrystaliczne o mocy jednostkowej, wynoszącej 380 Wp i posiadającymi następujące parametry:

- moc maksymalna P_{max} 380Wp,
- napięcie pracy przy P_{max} 49 V,
- natężenie prądu I_{max} przy P_{max} 8 A,
- sprawność ogniwa η_{max} 15%,
- pole powierzchni absorbera A 2,5m²/szt.,
- jednostkowa masa panela PV 35 kg/szt.

W projektowanej instalacji PV zostaną zainstalowane dwa inwertery trójfazowe o mocy jednostkowej 15 kW każdy.

Panele PV w liczbie $n=70$ szt. i łącznej mocy maksymalnej 26,6 kWp zostaną skierowane na południowy zachód.



Rys.5. Lokalizacja stacji meteorologicznej Racibórz-Studzienna [5]

3. WIELKOŚCI NASŁONECZNIENIA, ZAREJESTROWANE W STACJI RACIBÓRZ-STUDIENNA

Zgodnie z danymi meteorologicznymi, udostępnionymi na stronie internetowej Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa [4], a przeznaczonych do obliczeń efektywności energetycznej, stacja meteorologiczna Racibórz-Studzienna zarejestrowała wartości całkowite nasłonecznienia promieniowania słonecznego, które przedstawiono w poniższej tabeli (tab. 1).

Ponieważ projektowany kąt nachylenia paneli PV wynosi $\alpha = 35^\circ$ do powierzchni Ziemi dlatego w obliczeniach zysków energetycznych należy zastosować dane dotyczące całkowitego promieniowania słonecznego, padającego pod kątem $\beta = 55^\circ$. W przypadku braku takiej wartości mierzonej należy zastosować interpolację.

Jak wynika z powyższych danych roczne obliczeniowe całkowite promieniowanie słoneczne, padające na 1 m² powierzchni ogniwa PV pod kątem 55° wynosi $U_{max} = 1\,121,5$ kWh. Ta wartość zostanie wykorzystana do dalszych obliczeń.

W podobnych obliczeniach często przyjmuje się, że nasłonecznienie wynosi 1000 kWh/(m² rok). Ta wartość jest charakterystyczna dla regionu Polski południowej i dla promieniowania słonecznego, padającego na powierzchnię Ziemi pod kątem 90°. Wg udostępnionych danych meteorologicznych dla stacji Racibórz-Studzienna w rzeczywistości wynosi ona 957,8 kWh/(m² rok).

4. ILOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ WYPRODUKOWANEJ Z PROJEKTOWANYCH PANELI PV

W celu wyznaczenia ilości energii, jaka mogą wyprodukować projektowane panele fotowoltaiczne, zamontowane na stropodachu warsztatu naprawy autobusów należy przeprowadzić obliczenia, których tok omówiono poniżej.

A. Pole powierzchni absorberów paneli A_{PV}

$$A_{PV} = n A, \text{ m}^2. \quad (1)$$

Po podstawieniu danych do równania (1) uzyskuje się całkowitą powierzchnię absorbującą paneli fotowoltaicznych, wynoszącą

$$A_{PV} = 175 \text{ m}^2.$$

Tab. 1. Wielkości nasłonecznienia, zarejestrowane w stacji meteorologicznej Racibórz-studzienna [4]

Lp.	miesiąc	Całkowite natężenie promieniowania słonecznego w Wh/(m ² m-c) wg kąta padania promieni słonecznych na kierunku południowozachodnim		
		SW – 45°	SW – 60°	SW – 55° wartość interpolowana
1.	Styczeń	43 489	44 775	43 918
2.	Luty	50 397	50 648	50 481
3.	Marzec	76 399	75 084	75 961
4.	Kwiecień	112 860	108 524	111 415
5.	Maj	164 218	153 654	160 697
6.	Czerwiec	141 107	134 462	138 892
7.	Lipiec	149 002	141 436	146 480
8.	Sierpień	149 166	141 153	146 495
9.	Wrzesień	103 476	101 199	102 717
10.	Październik	59 394	59 534	59 441
11.	Listopad	45 910	47 117	46 312
12.	grudzień	38 179	39 574	38 644
Razem rocznie		1 133 597	1 097 160	1 121 453

B. Roczna ilość energii brutto E_{nom} wytworzona przez projektowane panele PV z uwzględnieniem sprawności maksymalnej pojedynczego ogniwa

$$E_{nom} = U_{max} A_{PV} \eta_{max}, \text{ kWh/rok}. \quad (2)$$

W wyniku obliczeń uzyskuje się wartość

$$E_{nom} = 29\,439,4 \text{ kWh/rok}.$$

C. Sprawność pozostałych elementów instalacji η_{inst}

Aby obliczyć sprawność pozostałych elementów instalacji założono sprawność inwerterów $\eta_{in} = 0,98$ oraz sprawność przesyłu energii elektrycznej pomiędzy panelami PV, inwerterami oraz przyłączem do sieci elektrycznej w budynku wynoszącą $\eta_p = 0,97$. Sprawność pozostałych elementów instalacji wyraża wzór

$$\eta_{inst} = \eta_{in} \eta_p. \quad (3)$$

W takim razie sprawność pozostałych elementów instalacji PV wynosi

$$\eta_{inst} = 0,95.$$

D. Roczna ilość energii netto E , możliwa do pozyskania z paneli fotowoltaicznych

Tę ilość energii wyraża zależność

$$E = E_{nom} \eta_{inst}, \text{ kWh/rok}, \quad (4)$$

co po podstawieniu wartości liczbowych i wykonaniu obliczeń daje

$$E = 27\,967,4 \text{ kWh/rok}.$$

Podsumowując, zainstalowanie projektowanych paneli fotowoltaicznych na stropodachu warsztatu może obniżyć ilość kupowanej przez niego energii o 27 967,4 kWh/rok. Biorąc pod uwagę roczne przewidywane zapotrzebowanie warsztatu napraw autobusów na tę energię, wynoszące ok. $E_0 = 90\,000$ kWh/rok (p. rozdział 2), zastosowanie ogniw PV może spowodować obniżenie tej ilości do $E_1 = 62\,032,6$ kWh/rok, tj. o ok. 31%.

5. RACHUNEK EKONOMICZNY

Analizę opłacalności ekonomicznej proponowanej instalacji należy rozpocząć od wykonania kosztorysu uproszczonego, z którego wynikać będzie wielkość nakładów finansowych na realizację całości robót.

Na podstawie cen rynkowych ustalono, że całkowity koszt realizacji tego projektu K_i wyniesie ok. 195 500 zł brutto, w tym 124 800 zł brutto wyniesie koszt 70 paneli PV. Pozostała kwota obejmuje zakup niezbędnych materiałów takich jak stelaże do przymocowania paneli PV, osprzęt i przewody, przyłącze oraz robociznę.

5.1. Prosty czas zwrotu nakładów

Prosty czas zwrotu $SPBT$ to najczęściej spotykane statyczne kryterium oceny opłacalności inwestycji (efektywności ekonomicznej). Określa on czas potrzebny do odzyskania nakładów inwestycyjnych poniesionych na realizację danego przedsięwzięcia. Jest liczony od momentu uruchomienia inwestycji do chwili, gdy suma korzyści brutto uzyskanych w wyniku realizacji inwestycji zrównoważy poniesione nakłady [6]. W przypadku, gdy roczne korzyści brutto Z_{br} są stałe wartość $SPBT$ można obliczyć z wyrażenia

$$SPBT = \frac{K_i}{Z_{br}}, \text{ lata.} \quad (5)$$

Roczne korzyści Z_{br} brutto to w analizowanym przypadku nic innego jak oszczędność finansowa, wynikająca ze zmniejszenia ilości energii kupowanej od dostawcy.

$$Z_{br} = K_e E, \text{ zł / rok.} \quad (6)$$

Po podstawieniu danych do równania (6) uzyskuje się

$$Z_{br} = 19\,856,85 \text{ zł / rok.}$$

Podsumowując, inwestycja związana z wykorzystaniem ogniw fotowoltaicznych do wytwarzania energii elektrycznej dla potrzeb warsztatu naprawy autobusów, zwróci się po 9,8 lat. Ta wartość jest wynikiem obliczeń, wykonanych przy zastosowaniu równania (5). Biorąc pod uwagę średnią żywotność paneli PV (35 ÷ 40 lat) inwestycja jest opłacana ponieważ już w dziesiątym roku eksploatacji będzie przynosić wymierne zyski.

6. RACHUNEK EKOLOGICZNY

Montaż ogniw fotowoltaicznych w celu wytwarzania energii elektrycznej do zaspokajania potrzeb warsztatu naprawy autobusów pozwoli na zmniejszenie wielkości jej zakupu od dostawcy o $E = 27\,967,4$ kWh/rok.

Aby obliczyć, o ile zmniejszy się ilość energii netto u wytwórcy energii elektrycznej trzeba uwzględnić także straty (sprawność) przesyłu energii w Polskich Sieciach Elektroenergetycznych. Wg [7] straty te wynoszą ok. 7% ($\eta_{PSE} = 0,93$).

W celu obliczenia o ile zmniejszy się produkcja energii elektrycznej netto w elektrowni można posłużyć się zależnością

$$\Delta E = \frac{E}{\eta_{PSE}}, \text{ MWh / rok,} \quad (8)$$

co po podstawieniu danych daje wartość

$$\Delta E = 30,1 \text{ MWh / rok} = 108,4 \text{ GJ / rok.}$$

Tak więc produkcja netto energii elektrycznej w elektrowni zmniejszy się o 30,1 MWh/rok tj. 108,4 GJ/rok.

6.1. Planowany efekt ekologiczny

W celu obliczenia efektu ekologicznego, polegającego na zmniejszeniu wielkości emisji CO_2 do atmosfery przez emitera, którym są elektrownie węglowe można posłużyć się wskaźnikami, zawartymi w [8].

Z tabeli 1 opracowania [8], dotyczącej wielkości emisji CO_2 w elektrowniach i elektrociepłowniach zawodowych wynika, że wskaźnik emisji tego gazu do atmosfery wynosi $WECO_2 = 92,30$ kg/GJ.

Planowany efekt ekologiczny, który zostanie osiągnięty po zamontowaniu ogniw fotowoltaicznych, wyznacza się z równania

$$\Delta CO_2 = \Delta E WECO_2, \text{ kg / rok.} \quad (9)$$

Po podstawieniu danych uzyskuje się

$$\Delta CO_2 = 10005, \text{ kg / rok.}$$

PODSUMOWANIE

Ogniwa fotowoltaiczne jako niezależne i odnawialne źródło energii są coraz powszechniej stosowane we wszelakiego rodzaju rozwiązaniach technicznych. Dynamiczny rozwój paneli, wzrastająca ich sprawność oraz zmniejszające się koszty powodują, że w Polsce wzrasta liczba instalacji.

W artykule zawarto podstawowe informacje nt. ogniw fotowoltaicznych i typowych rozwiązań instalacji.

W głównej części publikacji przedstawiono obliczenia instalacji z ogniwami PV, która będzie użytkowana w warsztacie naprawy autobusów. Instalacja będzie składać się z 70 paneli polikrystalicznych zamontowanych na stropodachu warsztatu.

Wyznaczono efekty ekonomiczne oraz ekologiczne, które powstaną w czasie użytkowania instalacji. Cała produkcja energii elektrycznej zostanie przeznaczona na potrzeby własne warsztatu.

Zaprojektowana instalacja już w 10 roku eksploatacji zacznie przynosić korzyści ekonomiczne. Okres ponad 9 lat użytkowania potrzebny jest na odzyskanie nakładów finansowych, poniesionych na jej budowę i uruchomienie.

Wymiernym efektem ekologicznym jest zmniejszenie emisji dwutlenku węgla w elektrowni zawodowej o ponad 10 ton/rok.

Podsumowując, warto rekomendować inwestorowi montaż takiej instalacji ze względu na możliwość uzyskania korzyści finansowych oraz środowiskowych.

BIBLIOGRAFIA

- Góralczyk I., Tytko R., Fotowoltaika. Urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne. Wyd. Towarzystwo Słowaków w Polsce, Kraków 2015
- Energia ze źródeł odnawialnych w 2015 roku. Wyd. Główny Urząd Statystyczny, 2016
- www.instsani.pl, dostęp w dniu 03-02-2017r.
- Podręcznik architekta, projektanta i instalatora. Kolektory słoneczne. Viessmann, 2010
- Strona internetowa Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa; www.mib.gov.pl, dostęp w dniu 01-03-2017r.
- Instrukcja do programu Audytor OZC firmy Sankom z Warszawy
- Termomodernizacja budynków dla poprawy jakości środowiska. Poradnik dla audytorów energetycznych, inspektorów środowiska

- ska, projektantów oraz zarządców budynków i obiektów budowlanych. Wyd. Narodowa Agencja Poszanowania Energii S.A., Warszawa, 2004
8. Materiały konferencyjne VII Konferencji Naukowo-Technicznej *Straty energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych*, Kołobrzeg 2016
 9. Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2014 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2017. KOBIZE, Warszawa, 2016

Analysis of profitability of applying photovoltaic cells in a bus service station

This paper contains information on the potential for a photovoltaic cell installation use in the production of electricity for the demand of a bus service station. The first part discusses the solar conditions prevailing in Poland and the typical solutions applied in such installations.

The later part of the paper contains the results of economic calculations of the effects that can be gained by installing and launching 70 PV panels with the total capacity of 26.6 kWp. The study shows that the installation can offer tangible economic benefits in terms of reducing the volume of electricity purchased from the current power supplier and can lead to the improvement of the ecology aspects represented by reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere by electricity supplier.

Autorzy:

mgr inż. **Arkadiusz Guźda** – Politechnika Opolska w Opolu, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Środowiska, email: a.guzda@doktorant.po.edu.pl

dr hab. inż. **Norbert Szmolke**, prof. PO – Politechnika Opolska w Opolu, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Środowiska, email: n.szmolke@po.opole.pl