

Tadeusz RODACKI  
Andrzej KANDYBA

## HELIOELEKTRYCZNE WYKORZYSTYWANIE ENERGII PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono systemy wykorzystujące bezpośrednią przemianę energii promieniowania słonecznego na energię prądu elektrycznego. Opisano systemy autonomiczne, hybrydowe i współpracujące z siecią elektroenergetyczną oraz zwrócono uwagę na ekonomiczne aspekty wykorzystania ogniw słonecznych.

## HELIOELECTRICAL USE OF SOLAR RADIATION ENERGY

**Summary.** The systems using direct conversion of the solar radiation energy into electric one are presented in the paper. The autonomous systems, hybrid ones and those co-operating with the electric power network are described. Special attention is paid to the economic bearings of the use of solar cells.

### 1. WSTĘP

W ostatnich latach można zaobserwować bardzo dynamiczny rozwój technologii fotowoltaicznych. Dotyczy to zarówno technologii materiałowej wykonania pojedynczego złącza jak również konstrukcji urządzeń przekształtnikowych umożliwiających wykorzystanie uzyskanej energii przez typowe odbiorniki lub współpracę z siecią elektroenergetyczną. Pomimo wielu zalet masowe wykorzystanie tych technologii napotyka znaczne przeszkody takie jak: silna zależność rozkładu promieniowania od położenia geograficznego, pory roku i dnia, stosunkowo niska sprawność przetwarzania oraz wysoka cena modułów słonecznych i ich oprzyrządowania, a przez to bardzo wydłużony okres zwrotu poniesionych nakładów.

Ogniwa słoneczne są elementami półprzewodnikowymi, wykonanymi najczęściej na bazie krzemu. Aktualnie trwają prace związane z badaniami ogniw z arsenku galu (większa sprawność) oraz wykonanych ze związków półprzewodnikowych, takich jak tlenek kadmu lub selenek indowo-miedziowy. Pojedyncze ogniwo słoneczne pozwala na zasilanie jedynie odbiorników o niewielkim poborze mocy, jego moc zależy od typu w normalnych warunkach zawiera się w granicach  $1\div 1,5$  W przy napięciu  $0,5\div 0,6$  V i prądzie nie przekraczającym 2 A.

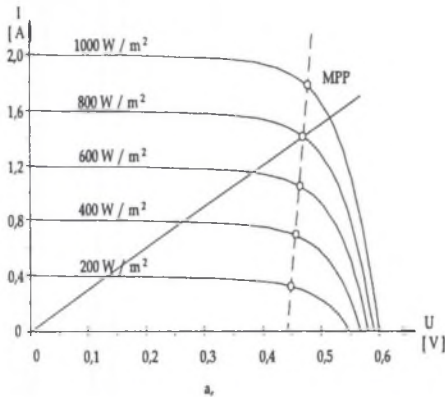
W praktyce konieczne są najczęściej wyższe napięcia i moce i dlatego, przez łączenie ogniw słonecznych w większe zespoły (moduły, panele słoneczne, szeregi itp.) możliwe jest dopasowanie parametrów wytwarzanej energii elektrycznej do wymogów odbiorcy lub sieci elektroenergetycznej.

## 2. FOTOELEKTRYCZNE OGNIWA SŁONECZNE

Metoda helioelektryczna wytwarzania prądu elektrycznego oparta jest na efekcie fotoelektrycznym, który umożliwia bezpośrednie przekształcanie energii promieniowania słonecznego w energię elektryczną. Materiałami wykazującymi takie własności są półprzewodniki, z których najszerze zastosowanie znalazł dotychczas krzem. Ogniwo słoneczne jest prostym elementem, który daje się praktycznie nieograniczenie rozbudowywać. Można zatem zasilac ogniwami słonecznymi zarówno zegarki ręczne o poborze mocy kilku mW, jak i oddawać do sieci energetycznej moce rzędu MW. Fotoogniwa nie wymagają prawie żadnych kosztów eksploatacyjnych, pracują absolutnie bezdźwięcznie (nie posiadają części ruchomych) i nie potrzebują do swej pracy paliwa. Listę ich zalet można by jeszcze przedłużyć, jednak należy stwierdzić, że istnieją również wady, jak np. wysokie koszty inwestycyjne, stosunkowo niska sprawność (ogniwa dostępne w handlu osiągają  $\eta=(8-14)\%$ ), a tym samym konieczność instalacji na dużej powierzchni dla uzyskania większych mocy.

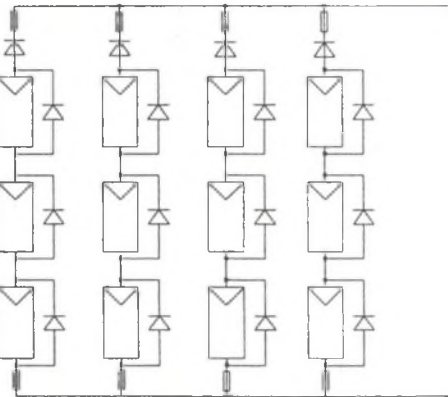
Ogniwa słoneczne wykonane z krzemu monokrystalicznego mają sprawność do 20%, z krzemu polikrystalicznego - sprawność do 17% lub z krzemu amorficznego - sprawność do 12%. W tych ostatnich wraz z czasem użytkowania sprawność może zmaleć nawet do 6%. Obecnie testowane są ogniwa słoneczne z innych materiałów np.: arsenku galu, w których można osiągnąć sprawność rzędu 27%. Pojedyncze ogniwo słoneczne ma zwykle wymiary (100x100) mm lub koła o średnicy 100 mm i nie dostarcza dużo energii. Charakterystykę prądowo-napięciową takiego ogniwa przedstawia rys.1. Muszą być one zatem łączone szeregowo lub równolegle, aby uzyskać pożądaną poziom prądu lub napięcia. Grupa ogniw zwana modułem jest montowana fabrycznie na podłożu (około 1 m<sup>2</sup>) i zabezpieczona przed wpływem otoczenia. Moc uzyskiwana z modułu zawiera się w granicach (50-150) W przy napięciach rzędu 17 V lub 35 V. Moduły mogą być dalej łączone i odpowiednio zabezpieczane tworząc grupy modułów (rys.2) [3]. Grupy modułów odpowiednio połączone tworzą systemy fotowoltaiczne, których ogólny podział pokazano na rys. 3

Systemy autonomiczne nie mają połączenia z siecią elektroenergetyczną, a więc korzystają jedynie z energii produkowanej w ogniwach słonecznych. Mogą one zawierać następujące elementy składowe: moduły fotowoltaiczne, baterie akumulatorów, urządzenia kontrolujące stopień naładowania i rozładowania akumulatorów oraz falowniki. Systemy takie można podzielić na: systemy bez baterii akumulatorów pracujące zwykle jako układy prądu stałego oraz systemy z baterią akumulatorów, które w zależności od wymagań użytkownika budowane są jako układy prądu stałego lub przemiennego. Zaletą układów bez baterii akumulatorów jest niski koszt inwestycyjny oraz prostota, a co za tym idzie duża niezawodność. Mogą one być stosowane jedynie tam, gdzie dopuszczalne są przerwy w dostawie energii elektrycznej. Największym obszarem zastosowań takich układów jest rolnictwo, np.: wentylacja, nawadnianie, pojenie bydła itp. W urządzeniach takich zwykle zapotrzebowanie na energie rośnie wraz ze wzrostem napromieniowania.



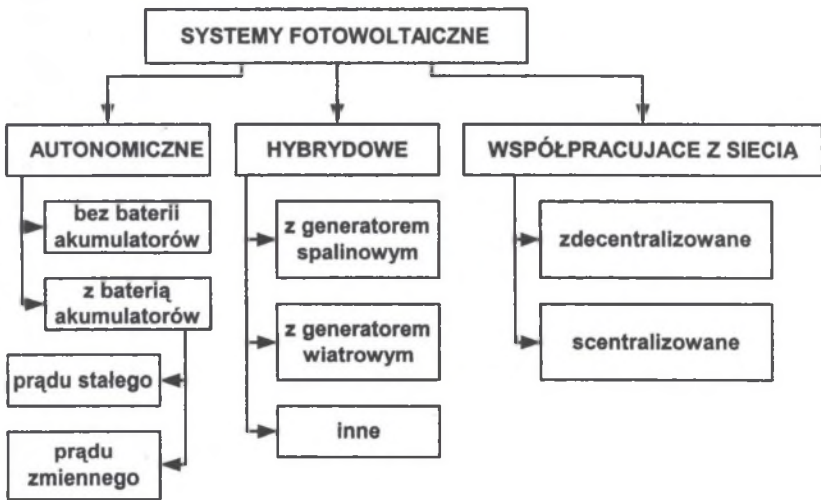
Rys. 1. Charakterystyki prądowo-napięciowe typowego ogniwa słonecznego

Fig. 1. Current-voltage characteristics of a typical solar cell



Rys. 2. Schemat łączenia modułów słonecznych w grupy

Fig. 2. Diagram of connecting solar modules in groups



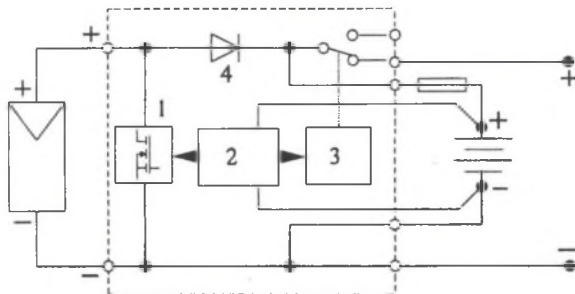
Rys. 3. Klasyfikacja systemów fotowoltaicznych

Fig. 3. Classification of photovoltaic systems

Istnieją też możliwości magazynowania wody na okres braku energii elektrycznej. W takich napędach stosowane są głównie silniki elektryczne prądu stałego bezpośrednio zasilane z modułów słonecznych.

Systemy z baterią akumulatorów wymagają większych nakładów inwestycyjnych, ale dzięki istnieniu akumulatorów mogą dostarczać energię elektryczną w czasie nocy lub przy małym nasłonecznieniu. Akumulatory działają tu też jako element dopasowujący obciążenie (silnik z maszyną roboczą) do modułów słonecznych, ponieważ napięcie na zaciskach baterii waha się w znacznie mniejszym zakresie niż na zaciskach modułu i jest to zwykle zakres optymalny przy współpracy z silnikiem elektrycznym.

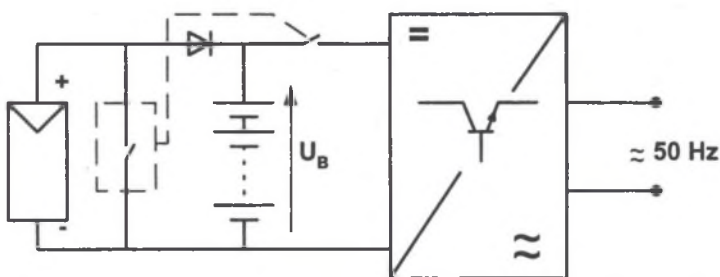
Konieczne jest jednak stosowanie regulatorów prądu ładowania. Istnieją dwie zasadnicze grupy regulatorów: pracujące szeregowo lub równoległe. Przykład regulatora równoległego przedstawia rys.4 [4].



Rys. 4. Schemat ideowy regulatora równoległego: 1 – łącznik tyrystorowy 2 - układem sterowania 3 – zabezpieczenie przed głębokim rozładowaniem 4 – dioda prądu wstecznego

Fig. 4. Schematic diagram of a parallel controller: 1 – transistor switch; 2 – controller of the charging current; 3 – protection against deep discharging; 4 – backward current diode

W przypadku konieczności zasilania odbiorników prądu przemiennego (napędy z silnikami indukcyjnymi, oświetlenie, urządzenia gospodarstwa domowego) stosowane są falowniki tranzystorowe przetwarzające napięcie stałe na prąd przemienny o częstotliwości 50 Hz (rys.5).



Rys. 5. Uproszczony schemat systemu prądu przemiennego z baterią akumulatorów. Linia przerywana zaznaczono schematycznie równoległy regulator napięcia ładowania

Fig. 5. Simplified diagram of an ac system with an accumulator battery. Broken line marks the parallel controller of charging voltage

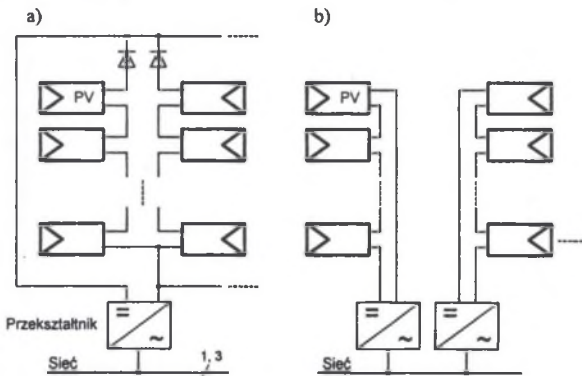
**Systemy hybrydowe** są połączeniem autonomicznego systemu fotowoltaicznego z innym systemem wytwarzania energii elektrycznej, takim jak: generator spalinowy, generator wiatrowy lub mała elektrownia wodna. Stosowane są w celu pokrycia pełnego zapotrzebowania na energię elektryczną w określonym, z reguły niewielkim obszarze, będącym poza zasięgiem sieci elektroenergetycznej.

Powinny one zapewnić dużą pewność zasilania i dlatego zawsze zawierają odpowiednio dobraną baterię akumulatorów. Charakteryzują się bardziej skomplikowanym systemem sterowania niż systemy autonomiczne, ale ze względu na istnienie dodatkowego źródła energii moc modułów słonecznych, a co za tym idzie, ich koszt może być mniejszy.

**Systemy współpracujące z siecią zasilającą** (nazywane też elektrowniami słonecznymi) składają się z odpowiednio połączonych modułów słonecznych dołączonych do sieci zasilającej poprzez przekształtnik energoelektroniczny. Nie zawierają one akumulatorów, a cała produkowana energia elektryczna jest przyjmowana przez sieć elektroenergetyczną. Systemy takie można podzielić na:

- zdecentralizowane montowane na dachach i elewacjach budynków, barierach dźwiękochłonnych przy autostradach itp. Ich moc nie przekracza zwykle 100 kW i nie posiadają one urządzeń śledzących ruch Słońca,
- scentralizowane zajmujące duże powierzchnie terenu, wyposażone w urządzenia śledzące ruch Słońca, często także w koncentratory promieniowania. Ich moce przekraczają obecnie 1 MW.

Obecnie można wyróżnić dwie dominujące konfiguracje połączeń modułów słonecznych do współpracy z siecią elektroenergetyczną (rys.6). Konfiguracja wysokonapięciowa (rys. 6 a) do połączenia z siecią wykorzystuje jeden przekształtnik o znacznej mocy dopasowanej do wielkości generatora słonecznego. Generator ten uzyskuje na wyjściu napięcie stałe rzędu kilkuset woltów. Ten poziom napięcia wymaga stosowania odpowiedniego (drogiego) osprzętu łączeniowego, zabezpieczeń, okablowania i ochrony przeciwporażeniowej. Równoległe łączenie grup modułów wymaga użycia wysokonapięciowych diod odcinających, mających za zadanie blokowanie przy nierównomiernym nasłonecznieniu wzajemnego obciążania się modułów. Przekształtnik zaprojektowany do optymalnej pracy systemu uniemożliwia dalszą rozbudowę elektrowni o kolejne moduły słoneczne. W przypadku awarii przekształtnika współpraca z siecią zasilającą staje się niemożliwa.

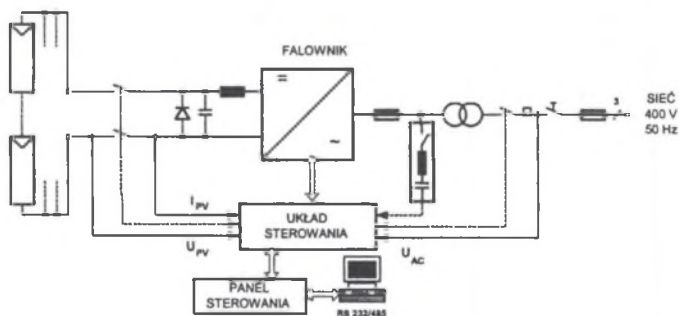


Rys. 6. Konfiguracja układu połączeń z siecią elektroenergetyczną, a) wysokonapięciowa b) strunowa

Fig. 6. Configuration of the scheme of connections with the power network; a) high-voltage; b) string

Tę ostatnią wadę można pomniejszyć modyfikując konfigurację w ten sposób, że z siecią współpracują dwa równoległe połączone przekształtniki, każdy o mocy równej połowie mocy systemu. Wtedy w przypadku awarii jednego możliwe jest oddawanie do sieci połowy mocy systemu.

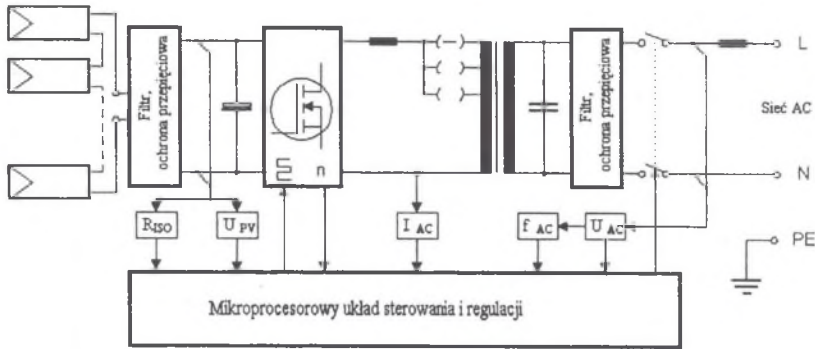
Do zalet takiego rozwiązania można natomiast zaliczyć łatwą obsługę i prosty sposób monitorowania przebiegu pracy systemu. W konfiguracjach wysokonapięciowych przekształtniki energoelektroniczne budowane są z reguły zgodnie z techniką tyrystorową. Uproszczony schemat blokowy takiego systemu zaprezentowano na rys. 7.



Rys. 7. Przykładowe rozwiązanie systemu współpracującego z siecią zasilającą  
Fig. 7. Simplified block diagram of the system high-voltage configuration

Inną możliwość konfiguracji przedstawia system z rys. 6 b. Opiera się on na idei sumowania energii po stronie prądu przemiennego. Generator słoneczny tworzą moduły połączone szeregowo, tak zwane struny o napięciu wyjściowym stałym rzędu 120 V. Energia elektryczna przekazywana jest do sieci przez falownik strunowy małej mocy rzędu kilku kilowatów. Większą moc elektrowni uzyskuje się poprzez równoległe dołączenie do sieci kolejnych identycznych zestawów. System taki eliminuje drogą aparaturę łączeniową i zabezpieczeniową oraz pracuje przy bezpiecznym napięciu po stronie prądu stałego. Pozwala też uzyskać większą sprawność systemu dzięki indywidualnemu sterowaniu małej grupy modułów słonecznych (struny). Rozwiązanie strunowe charakteryzuje się dużą elastycznością przy rozbudowie systemu, ponieważ poszczególne struny pracują niezależnie od siebie. Wadą tej koncepcji są problemy z obsługą, konserwacją i monitorowaniem dużej liczby falowników. Przy konfiguracjach strunowych elektrowni słonecznych falowniki budowane są zgodnie z techniką tranzystorową. Przykładowe rozwiązanie takiego systemu przedstawia rys. 8.

Falowniki tranzystorowe sterowane są głównie metodą modulacji szerokości impulsów (MSI), dzięki temu mają znaczną przewagę nad falownikami tyrystorowymi, ponieważ udział generowanych do sieci wyższych harmonicznych jest znacznie mniejszy. Mikroprocesorowy układ sterowania falownika realizuje na podstawie danych pomiarowych algorytmy sterowania zaworów tak, aby utrzymać wymagany przebieg prądu wyjściowego oraz realizuje optymalną regulację obciążenia modułów słonecznych. Zastosowanie transformatora z odczepami pozwala na dopasowanie obciążenia falownika do aktualnej mocy modułów w strunie.



Rys. 8. Schemat blokowy konfiguracji strunowej

Fig. 8. Block diagram of the string configuration

### 3. EKONOMICZNE ASPEKTY WYKORZYSTANIA OGNIW SŁONECZNYCH

Opierając się na o informacjach literaturowych [3] można stwierdzić, że koszty inwestycyjne systemów fotowoltaicznych małej mocy wahają się w granicach 8 do 12 Euro/Wp. Dla systemów dużej mocy powyżej 100 kWp są wyższe i mogą osiągać wartość do 15 ECU/Wp. Jest to konsekwencją bardziej rozbudowanej infrastruktury, wyższych kosztów projektowania i montażu. Duży wpływ na ostateczne koszty systemu ma lokalizacja systemu.

Ilość wyprodukowanej przez system fotowoltaiczny energii może być w przybliżony sposób oszacowana ze wzoru:

$$W_{zm} = W_{pr} \eta_{mod} \eta_u \eta_f$$

- gdzie:  $W_{zm}$  – ilość energii uzyskanej po stronie prądu zmiennego,  
 $\eta_{mod}$  – sprawność zastosowanych modułów (0,125 dla modułów z krzemu monolitycznego 0,08 dla modułów z krzemu amorficznego),  
 $\eta_u$  – sprawność układu uwzględniająca straty mocy w elementach układu, okresy pracy poza punktem maksymalnej mocy oraz stopień wykorzystania systemu,  
 $\eta_f$  – średnia sprawność falownika (0,9 ÷ 0,95).

Przyjmując roczną całkowitą ilość energii promieniowej (promieniowania bezpośredniego i rozproszonego) przy nachyleniu modułów do poziomu o kąt  $30^0$  na poziomie  $1100 \text{ kWh/m}^2$  można oszacować ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w okresie roku przez system z modułami krzemu krystalicznego:

- autonomiczny ( $\eta_u = 0,2 \div 0,6$ )-(25÷74) kWh/m<sup>2</sup>,
- hybrydowy ( $\eta_u = 0,5 \div 0,7$ )-(60÷96) kWh/m<sup>2</sup>,
- współpracujący z siecią elektroenergetyczną ( $\eta_u = 0,8 \div 0,85$ )-(100÷110) kWh/m<sup>2</sup>.

Cena energii elektrycznej wytworzonej przez system fotowoltaiczny określona jest przez następujące czynniki:

- koszt inwestycyjny systemu,
- koszty eksploatacji związane z obsługą i diagnostyką w czasie funkcjonowania systemu (składnik ten często jest bez znaczenia, z wyjątkiem kosztów wymiany akumulatorów),
- czas pracy systemu (20 – 25 lat),
- stopa oprocentowania kredytu,
- ilość energii wyprodukowanej w okresie roku.

Jednostkowy koszt energii z elektrowni fotowoltaicznej [Euro/kWh] oblicza się jako stosunek rocznych kosztów systemu sprowadzonych do roku zerowego i wielkości rocznej produkcji energii elektrycznej. Największy wpływ na końcową cenę ma koszt inwestycyjny, w następnej kolejności istotne są: stopa oprocentowania kredytu, ilość wytworzonej energii elektrycznej oraz czas pracy systemu. Aktualnie cena energii elektrycznej uzyskanej z systemów fotowoltaicznych w Europie Zachodniej jest rzędu  $(0.5 \div 1)$  Euro/kWh, natomiast w Europie Południowej  $(0.35 \div 0.7)$  Euro/kWh. Ten zakres zmian ceny zależy głównie od lokalizacji systemu i jego mocy znamionowej. Jak stąd wynika, energia słoneczna nie może jeszcze konkurować z energią ze źródeł konwencjonalnych. Po uwzględnieniu negatywnego wpływu na środowisko cena energii z sieci elektroenergetycznej waha się od 0.15 do 0.19 Euro/kWh. Przewiduje się, że w 2005 roku możliwe będzie w Europie Południowej uzyskanie ceny energii z elektrowni fotowoltaicznych porównywalnej z ceną z elektrowni konwencjonalnych. Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że jeżeli potrzebna jest tylko mała ilość energii, to w wielu rejonach systemy fotowoltaiczne mogą być konkurencyjne z rozbudową sieci elektrycznej, nawet w przypadku odległości rzędu jednego kilometra, szczególnie w obszarach górskich. Należy jeszcze podkreślić, że cena energii ze źródeł fotowoltaicznych jest porównywalna z ceną energii z generatorów spalinowych.

#### **4. ROZWIĄZANIA HYBRYDOWE, KOLEKTOR SŁONECZNY – OGNIWO SŁONECZNE**

Zaliczyć do nich można płaskie kolektory cieczowe, które zamiast blaszanego absorbera, mają wbudowane krzemowe ogniwa fotowoltaiczne [2]. Kolektor taki dostarcza jednocześnie energię cieplną i energię elektryczną o napięciu 12 V. Istnieją również kolektory z podzielonym panelem, gdzie na krawędziach istnieje ogniwo fotowoltaiczne zaś w środku znajduje się płaski cieczowy panel słoneczny. Rozwiązania hybrydowe mają większą sprawność, ponieważ ogniwa słoneczne pracują przy niższej temperaturze (wzrost temperatury powoduje obniżenie ich sprawności), mają też jeszcze tę zaletę, że z jednego urządzenia otrzymujemy energię elektryczną i ciepłą wodę użytkową.

#### **5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI**

Jak wynika z danych zamieszczonych w pracy [1], w 1999 r. w kraju zainstalowanych było około 50-60 sztuk instalacji kolektorów powietrznych o powierzchni  $6000 \text{ m}^2$  zastosowanych w rolnictwie do suszenia płodów rolnych i około 1000 kolektorów cieczowych do podgrzewania wody użytkowej o łącznej powierzchni przekraczającej  $10 \text{ tys m}^2$ .



Ogniwa słoneczne, z wyjątkiem nielicznych przypadków (Materiały VII Ogólnopolskiego Forum Odnawialnych Źródeł Energii, Łódź 2000) nie są aktualnie w Polsce użytkowane.

Założenia polityki energetycznej Polski do roku 2020 przewidują trzy scenariusze udziału energii ze źródeł odnawialnych w roku 2010 (7,5%, 9%, 12,5%). W dwóch pierwszych scenariuszach w zakresie energetyki słonecznej przewiduje się do 2010 roku zainstalowanie systemów fotowoltaicznych o mocy 2 MW, kolektorów słonecznych powietrznych o mocy 100 MW oraz kolektorów słonecznych wodnych o mocy 70 MW. Spełnienie tych założeń będzie niezmiernie trudne, bowiem rozwój energetyki słonecznej napotyka problemy finansowe. Są to problemy związane z wysokimi nakładami inwestycyjnymi przy stosunkowo niskich kosztach eksploatacyjnych. Taki układ kosztów przy obecnym poziomie cen energii ze źródeł odnawialnych jest przyczyną długich okresów zwrotów poniesionych nakładów. Dodatkowym problemem jest to, że inwestorzy w swoich rachunkach nie biorą pod uwagę kosztów redukcji zanieczyszczeń atmosfery ( $\text{CO}_2$ , tlenki siarki,  $\text{NO}_x$ ). Istotny jest też problem braku niezbędnej wiedzy i doświadczenia w przygotowaniu projektów i uruchomieniu właściwych źródeł ich dofinansowania.

Istnieje jednak dość duży zakres zastosowań techniki słonecznej już dzisiaj ekonomicznie uzasadnionych, szczególnie jeśli uwzględni się preferencyjne pożyczki lub dotacje z działających w kraju proekologicznych instytucji finansowych wspierających odnawialne źródła energii. Można tu wymienić niektóre instalacje kolektorów słonecznych powietrznych lub wodnych, wykorzystanie ogniw słonecznych do zasilania odbiorników energii elektrycznej odległych od sieci elektroenergetycznych, zdecentralizowane systemy fotowoltaiczne współpracujące z siecią elektroenergetyczną lub kolektory słoneczne budowane jako zintegrowane z fasadami, dachami budynków itp. Ten ostatni przykład cieszy się coraz szerszym zainteresowaniem, ponieważ pozwala obniżyć koszt inwestycji.

## LITERATURA

1. Ministerstwo Środowiska: Strategia rozwoju energetyki odnawialnej, Materiały VII Ogólnopolskiego Forum Odnawialnych Źródeł Energii. Łódź 2000.
2. Lewandowski W.: Proekologiczne źródła energii odnawialnej, WNT, Warszawa 2001.
3. Pluta Z.: Słoneczne instalacje przygotowania wody użytkowej w warunkach polskich, Materiały VII Ogólnopolskiego Forum Odnawialnych Źródeł Energii. Łódź 2000.
4. Rodacki T. Kandyba A.: Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych, Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Skoczkowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 września 2001 r.

## Abstract

The systems using direct conversion of the solar radiation energy into electric one in solar cells are described in the paper. Solar cells are semiconductor elements. In the standard conditions the power of a single cell does not exceed 1.5W at the voltage of 0.5-0.6V and current up to 2A. The connecting of solar cells in modules, series, lines and so on allows to constructing systems enabling to match the parameters of the generated electric energy with the requirements of consumers or the electric power network. Photovoltaic systems can be divided into:

- autonomous ones without or with accumulator battery used for supplying energy consumers within the given area cut off from the power network,
- hybrid ones co-operating with the other system generating electric energy, for example a combustion, wind or other generator,
- those co-operating with the electric power network.

Special attention is paid to the systems co-operating with the electric power network and to the solutions of electric power systems enabling this co-operation. The economic bearings of the use of solar cells and the conclusions relating to the possibilities of photovoltaic technique development are also presented in the paper.

## Conclusions

1. Development of solar electrical power systems still is not so dynamic as expected because of high investment costs.
2. Using facades and roofs of buildings the photovoltaics systems can easily be installed in urban areas.
3. Applications of photovoltaics power systems in areas, where utility grid is not available are cost-effective (stand-alone PV power systems) and in that cases they are well-grounded.
4. Grid connected PV systems are not so well-grounded because of the very high energy production costs even compared to other renewable resources.