

Krzysztof Kolano, Jan Kolano
Politechnika Lubelska, Lublin

PRAKTYCZNA REALIZACJA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH Z TRÓJFAZOWYM SILNIKIEM INDUKCYJNYM ZASILANYM Z BATERII OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF 3 – PHASE AC DRIVE SYSTEMS SUPPLIED BY PV ARRAYS

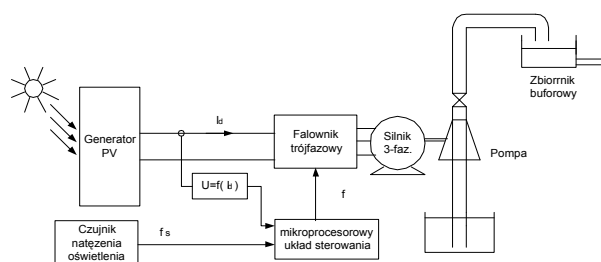
Abstract: The possibility of constructing autonomic PV low power generators used for electric driving systems feeding emerged within last few years. These systems, usually 1-phase AC driving systems, may be used in certain household advices. The amount of energy produced by these unconventional energy sources depends on current weather conditions. The paper describes a new method of maximum power point tracking for photovoltaic generator of 3-phase AC drive system without a buffer energy source. The specific quality of this method is assuring the maximum power working point of the generator in an indirect way - by maximization of motor input power. This method makes maximum power point tracking independent of generator cells temperature and insulation, and of any changes of generator output characteristic (voltage-current) curves caused by light cells aging and shading of some cells, when shaded with snow or dirt. Chosen results of laboratory tests are presented in figures.

1. Wprowadzenie

Perspektywy wyczerpywania się zasobów paliw kopalnych oraz obawy o stan środowiska naturalnego zwiększyły zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii także fotowoltaiką, co w konsekwencji doprowadziło do znacznego wzrostu ich zastosowania w wielu krajach świata. Koszty energii uzyskiwanej na drodze fotowoltaicznej są jednak ciągle kilkakrotnie większe niż koszty energii pobieranej z sieci elektroenergetycznej. Otrzymana w ten sposób energia elektryczna nie nadaje się do bezpośredniego zasilania typowych odbiorników wymagających absolutnej ciągłości zasilania, ponieważ jest mocno uzależniona od aktualnego natężenia promieniowania słonecznego. Stosowane są specjalne systemy zasilania z generatorów fotowoltaicznych różnych odbiorników także układów napędowych z bateriami akumulatorów jako buforowym źródłem energii bądź współpracujące z siecią elektroenergetyczną. Stosowanie akumulatorów jest często niezbędne dla zapewnienia odpowiedniej pracy takiego systemu. Podnosi to znacznie koszty i awaryjność systemu zwłaszcza, że żywotność tak eksploatowanych akumulatorów jest krótka. Praca obciążonego silnika indukcyjnego zasilanego stałą częstotliwością w systemie fotowoltaicznym bez baterii akumulatorów jest możliwa tylko w zakresie promieniowania słonecznego w wąskim zakresie jego zmian. Wiąże się

to z możliwością „utknięcia” silnika na skutek zmniejszenia się natężenia promieniowania przy niezmiennym momencie obciążenia. Ponadto systemy takie nie zapewniają pracy generatora fotowoltaicznego w punkcie maksymalnej możliwej do uzyskania w danych warunkach nasłonecznienia mocy.

2. Układy napędowe prądu przemiennego zasilane z generatorów fotowoltaicznych z czujnikiem natężenia oświetlenia



Rys. 1. Schemat blokowy silnika trójfazowego klatkowego zasilanego z generatora PV z mikroprocesorowym układem sterowania

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy systemu fotowoltaicznego z maksymalizacją mocy z mikroprocesorowym układem sterowania zasilającego trójfazowy silnik indukcyjny napędzający pompę wirową.

Algorytm sterowania pracą takiego układu falownikowego powinien zapewniać pracę całego systemu z maksymalną możliwą do uzyskania w danych warunkach pogodowych sprawnością. W zaproponowanym układzie czujnik natężenia promieniowania słonecznego wytwarza impulsy, których częstotliwość uzależniona jest od mocy promieniowania słonecznego tak, by zapewnić pracę układu z częstotliwością umożliwiającą maksymalne wykorzystanie mocy generatora PV. Taki sposób sterowania silnika polega na tym, że mierzy się nasłonecznienie, wybiera się z pamięci programu odpowiadającą jej i danej charakterystyce obciążenia wartość częstotliwości pracy falownika tak, aby moc na wale silnika dla odpowiadającej jej prędkości kątowej maszyny roboczej była równa mocy maksymalnej możliwej do dostarczenia do maszyny roboczej w danych warunkach nasłonecznienia.

Cechą szczególną przedstawionego układu jest to, że zapewnia on wykorzystanie maksymalnej możliwej do uzyskania w danej chwili mocy generatora fotowoltaicznego oraz zapewnia prawidłową pracę silnika napędowego z małym poślizgiem i zabezpiecza silnik przed utknięciem na skutek obniżenia się poziomu nasłonecznienia. W przypadku małej wartości nasłonecznienia, dla której praca maszyny roboczej byłaby nieefektywna system mikroprocesorowy uniemożliwia pracę silnika napędowego wyłączając sterowanie zaworów falownika. Omawiany sposób umożliwia rezygnację ze stosowania awaryjnych i wymagających obsługi akumulatorów czyniąc cały układ prostym w obsłudze oraz mniej podatnym na uszkodzenia. Układ taki nadaje się do pracy w układzie autonomicznym, nie wymaga zewnętrznego zasilania ze względu na to, że wszystkie elementy układu zasilane są z tego samego, co silnik generatora fotowoltaicznego. Ponadto zastosowanie mikroprocesorów czyni go bardzo łatwym do ewentualnej modyfikacji. Charakteryzuje się prostą budową i dużą niezawodnością.

Częstotliwość pracy czujnika jest jednym z sygnałów sterujących dochodzących do mikroprocesora. Kolejnym sygnałem jaki do niego dochodzi jest wartość napięcia U . Napięcie to jest otrzymywane z przetwornika prąd-napięcie, który w zależności od prądu (I_d) pobieranego przez układ napędowy ustala jego wartość na odpowiednim poziomie. Wartość ta odpowiada aktualnemu położeniu punktu pracy układu na

charakterystyce prądowo-napięciowej generatora fotowoltaicznego.

Napięcie to stanowi sygnał sprzężenia zwrotnego i ma zapewniać optymalizację pracy w stanach przejściowych, nie tylko uzależnionych od warunków natężenia promieniowania słonecznego, ale i innych, do których można zaliczyć między innymi rozruchy układu.

W przedstawionym na rys. 1 układzie zastosowane obciążenie charakteryzuje się „wentylatorową” zależnością momentu oporowego w funkcji prędkości kątowej. Wychodząc z zależności:

$$\frac{U}{f^2} = \frac{U_n}{f_n^2} \quad \text{otrzymujemy } f = \sqrt{\frac{U}{U_n}} \cdot f_n \quad (1)$$

W zaproponowanej metodzie regulacji założono, że częstotliwość zadana f_z będzie częstotliwością wynikającą z warunków natężenia promieniowania słonecznego, dla której uzyskuje się maksimum sprawności.

$$f_z = f \quad (2)$$

Mikroprocesorowy układ sterowania powinien więc sterować pracą zaworów falownika tak, aby częstotliwość wyjściowa napięcia wynosiła f_z . Jej wartość po uwzględnieniu zależności (1) i (2) można wyznaczyć z następującej równości:

$$f_z = \sqrt{\frac{U}{U_n}} \cdot f_n \quad (3)$$

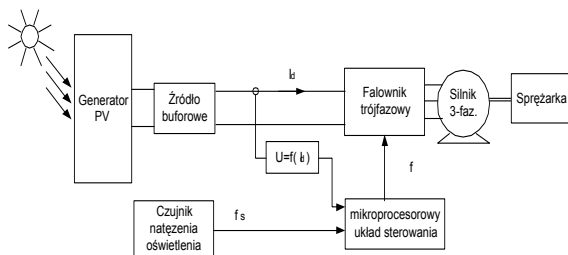
f_n	częstotliwość wyjściowa znamionowa napięcia falownika,
U_n	napięcie znamionowe falownika,
U	wartość napięcia zadawana z przetwornika prąd-napięcie,
f_z	częstotliwość odpowiadająca panującym warunkom, zapewniająca pracę układu z maksymalną sprawnością.

3. Układ napędowy z silnikiem indukcyjnym klatkowym obciążonym maszyną roboczą o stałym momencie oporowym

Maszynami roboczymi charakteryzującymi się stałym momentem oporowym są wszelkiego rodzaju sprężarki, zarówno w zastosowaniach przemysłowych jak i domowych (lodówki czy klimatyzatory). Do zasilania tego typu układów można wykorzystać dwa algorytmy sterowania oparte na całkowicie odmiennych założeniach.

Pierwszym może być układ z regulacją częstotliwości, dopasowujący ją do panujących warunków zasilania (częstotliwość falownika zależna od natężenia promieniowania słonecznego). Jednakże ze względu na to, że maszyny z takim przebiegiem momentu oporowego charakteryzują się „ciężkim” rozruchem, proponowany uprzednio układ należy dodatkowo wyposażać w źródło buforowe. Zadaniem źródła buforowego jest gromadzenie nadmiaru energii wytwarzanej przez generator fotowoltaiczny w korzystnych warunkach pogodowych i dostarczanie jej do układu w czasie rozruchów oraz w niekorzystnych warunkach atmosferycznych, kiedy energia wytwarzana przez generator fotowoltaiczny może być zbyt mała by zapewniać poprawną pracę układu.

Przykładową strukturę proponowanego rozwiązania w wykonaniu trójfazowym przedstawia rysunek 2.



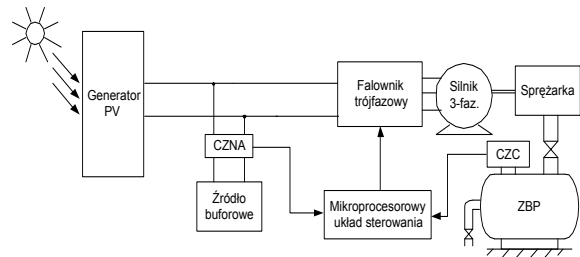
Rys. 2. Schemat blokowy systemu PV zasilającego układ napędowy o stałym momencie oporowym ze źródłem buforowym i czujnikiem natężenia oświetlenia

Źródłem buforowym w przedstawionym układzie może być kondensator lub akumulator. Z uwagi na wystąpienie tych dodatkowych elementów, algorytmy sterowania należy odpowiednio zmodyfikować.

Kolejnym rozwiązaniem, jakie można zaproponować do tego typu napędów jest układ zasilany z akumulatora, który z kolei jest zasilany z generatora fotowoltaicznego przy wykorzystaniu odpowiedniego algorytmu sterowania.

Zasadę sterowania drugiego typu układu napędowego można zrealizować w układzie przedstawionym na rys. 3. Układ sterowania przedstawionego powyżej napędu powinien tak sterować pracą falownika, aby nie rozładowywał on w pełni baterii akumulatorów, stanowiącej źródło buforowe i jednocześnie źródło zasilania. Metoda sterowania pracą takiego układu polega na tym, aby włączać maszynę obciążającą (sprężarkę wraz z napędzającym ją silni-

kiem indukcyjnym) tylko wtedy, gdy energia zgromadzona w akumulatorze jest wystarczająca do dokonania rozruchu.



Rys. 3. Schemat blokowy systemu PV zasilającego układ napędowy o stałym momencie oporowym

Można więc założyć, że wynosi ona nie mniej niż 95% energii znamionowej, co zapewnia dodatkowo największą sprawność całego układu. Poziom naładowania akumulatora badany jest przez specjalny czujnik, oznaczony na schemacie jako CZNA. Czujnik ten przekazuje sygnał o stanie naładowania baterii akumulatorów w postaci impulsów do nadrzędnego mikroprocesorowego układu sterowania, który wysterowuje lub blokuje zawory falownika (w zależności od energii zgromadzonej w akumulatorze). Po dokonaniu rozruchu, akumulator jest rozładowywany przez silnik napędowy i jednocześnie doładowywany przez generator fotowoltaiczny. Nadrzędny układ sterowania zezwala na wysterowanie zaworów falownika do momentu, gdy akumulator zostanie rozładowany do np. 85% stanu pełnego naładowania lub gdy otrzyma on sygnał z czujnika ciśnienia (CZC) o przekroczeniu dopuszczalnej wartości ciśnienia roboczego w zbiorniku buforowym sprężonego powietrza (ZBP). Następuje wówczas zablokowanie zaworów falownika i doładowywanie baterii akumulatorów. Proces doładowywania zachodzi do momentu, w którym czujnik stanu naładowania akumulatorów wyśle sygnał do nadrzędnego mikroprocesorowego układu sterowania o osiągnięciu 95% stopnia ich naładowania. Występuje wtedy kolejny rozruch silnika indukcyjnego napędzającego sprężarkę i cały cykl pracy się powtarza.

Jak można zauważyć proponowany układ napędowy, ze względu na zastosowany w nim algorytm sterowania, wymaga zbiornika buforowego, gromadzącego zapas sprężonego powietrza. Zbiornik ten jest niezbędny z uwagi na okresowość pracy całego systemu.

4. Praktyczna realizacja układu napędowego zasilanego bezpośrednio z generatora PV

Jednym z trzech elementów systemu bez źródła buforowego z bezpośrednim zasilaniem napędu elektrycznego z generatora PV jest falownik. Ma on za zadanie zamianę sygnału wejściowego, którym jest napięcie stałe, na napięcie przemiennie. Zaprojektowany oraz wykonany falownik w Katedrze Napędów Elektrycznych odwzorowuje napięcie trójfazowe sinusoidalne o zmiennej amplitudzie i częstotliwości w zależności od wartości nasłonecznienia w danej chwili [2].

Do realizacji praktycznej opisanego powyżej układu dla trójfazowego silnika indukcyjnego klatkowego o mocy znamionowej 1,1 kW użyto mikrokontrolera MB90F594A serii LX produkcji FUJITSU. Jest to szybki (minimalny czas wykonania instrukcji 62,5 ns) i wyposażony w wiele użytecznych funkcji szesnastobitowy mikrokontroler. W jego obszernej 256 kilobajtowej pamięci typu FLASH zapisany został program modulacji częstotliwości PWM zależnej od aktualnego poziomu mocy dostępnej z generatora fotowoltaicznego. Z uwagi na parametry uzwojeń zasilanych silników i chęć dobrego odwzorowania sinusoidy założona częstotliwość przełączania zaworów falownika wynosi 10 kHz. W programie zapisano z rozdzielczością szesnastobitową 50 wartości funkcji sinus z przedziału od 0 do $\pi/2$. Ponieważ MB90F594A nie jest mikrokontrolerem specjalizowanym do zastosowań w trójfazowej modulacji PWM konieczna stała się programowa generacja impulsów sterujących tranzystory zgodnie z zadaniem algorytmem. Wykorzystano do tego trzy zaimplementowane w mikrokontrolerze układy generacji impulsów zwane PPG (Program Pulse Generator). W odpowiednie rejestry PPG wpisywane są odpowiadające stanom wysokim i niskim szesnastobitowe wartości czasów ich trwania. Suma czasu trwania sygnału wysokiego i niskiego daje razem długość trwania okresu impulsu. Z uwagi na niekorzystne właściwości tego typu układów przy małych prędkościach zdecydowano się ograniczyć minimalną wartość amplitudy sygnału. W układzie prototypowym umożliwiono sterowanie częstotliwością jak również jej ograniczenie za pomocą interfejsu użytkownika. Wybrane parametry można zmieniać zdalnie za pomocą zaimplementowanego w urządzeniu interfejsu

CAN. Jako element wykonawczy zastosowano (w prototypie) falownik produkcji APATOR z nowym układem elementów wyzwalających tranzystory – driverami produkcji MITSUBISHI (typ M57962AL). Z uwagi na to, że również program modulacji i komunikacji zapisany był w pamięci mikrokontrolera, cały dotychczasowy układ sterujący pracą falownika został również usunięty. Chociaż układ z kluczami IGBT TOSHIBA typu MG25Q2YS40 może przetworzyć moc rzędu kilku kilowatów, założoną moc określono na około 1,5 kW. Do pomiaru mocy pobieranej z generatora fotowoltaicznego służą dwa z ośmiu 10-bitowych przetworników zawartych w strukturze wewnętrznej MB90F594A [4].

Do rozruchu silnika zastosowano algorytm ciągłej zmiany częstotliwości od 3 Hz do wartości odpowiadającej maksymalnej mocy generatora fotowoltaicznego. Krok tych zmian uzależniony jest od natężenia oświetlenia, co zapobiega utknięciu silnika podczas rozruchu. Zmiany wartości częstotliwości wykonywane są z krokiem 0,02 Hz. Tak mała wartość została możliwa do przyjęcia ze względu na zastosowanie przetworników 10-bitowych pozwalających na rozróżnienie ponad 1 miliona wartości mocy generatora. Czas, jaki musi upłynąć od zmiany częstotliwości do odczytu mocy generatora musi być co najmniej kilkanaście razy dłuższy od okresu napięcia zasilającego silnik w danym momencie. Jest to konieczne w celu wyeliminowania niekorzystnych oscylacji częstotliwości generowanych przez odczyty mierzonych wartości mocy generatora, gdy ta nie zdążyła się jeszcze ustabilizować.

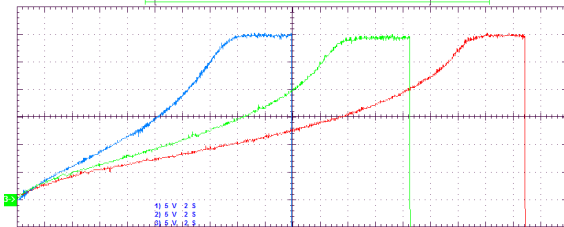
5. Badania laboratoryjne

Wykonany trójfazowy falownik zasilony z generatora PV umieszczonego na dachu budynku o mocy nominalnej 1,6 kW został poddany badaniom w laboratorium Katedry Napędów Elektrycznych Politechniki Lubelskiej. Poniżej przedstawiono wybrane wyniki przeprowadzonych badań dotyczące:

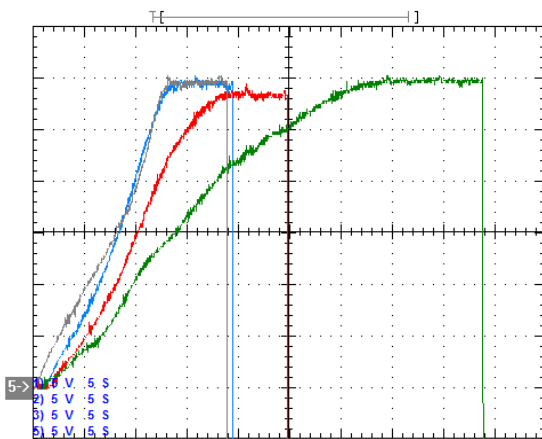
1. Rejestracji prędkości katowej silnika napędowego o mocy znamionowej 1,1 kW zasilanego z falownika podczas rozruchu układu napędowego bez maksymalizacji mocy oraz z maksymalizacją mocy.
2. Rejestracji prądu na wyjściu falownika dla różnych wartości nasłonecznienia.

Poniższy rysunek 4 obrazuje przebiegi prędkości w funkcji czasu podczas bezpośredniego rozruchu silnika bez maksymalizacji mocy dla różnych wartości nasłonecznienia

$$\left(1000 \frac{W}{m^2}, 900 \frac{W}{m^2}, 750 \frac{W}{m^2}\right).$$



Rys. 4. Przebiegi prędkości w funkcji czasu podczas bezpośredniego rozruchu silnika bez maksymalizacji mocy dla różnych wartości nasłonecznienia

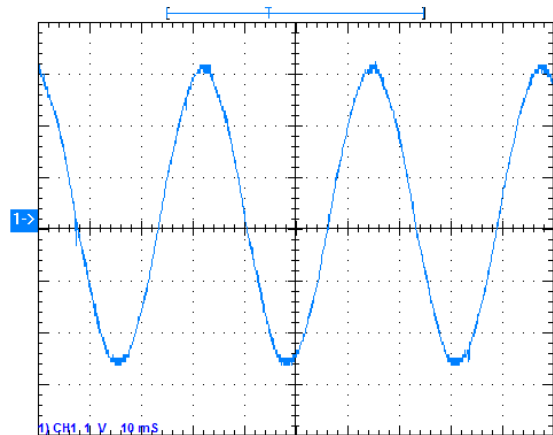


Rys. 5. Przebiegi prędkości w funkcji czasu podczas rozruchu silnika nieobciążonego z maksymalizacją mocy dla różnych wartości nasłonecznienia

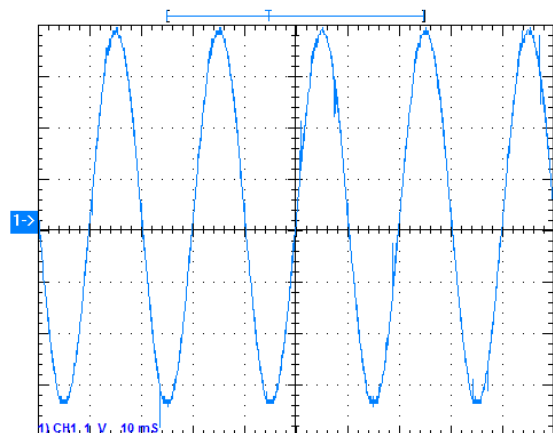
Na rys 5 przedstawiono rozruch silnika indukcyjnego dla różnych wartości nasłonecznienia zmieniającego się od $(370 - 1000 \frac{W}{m^2})$ Jak wi-

dać z porównania powyższych przebiegów w układzie z maksymalizacją mocy czas rozruchu jest o wiele krótszy a zakres możliwości przeprowadzenia go znacznie się wydłuża. Możliwe jest przeprowadzenie rozruchu przy dwukrotnie mniejszym nasłonecznieniu jak w przypadku układu bez maksymalizacji mocy. Zadaniem układu mikroprocesorowego falownika jest ciągłe śledzenie zmieniającego się nasłonecznienia i taka zmiana częstotliwości pracy falownika,

aby wykorzystanie przetworzonej energii było maksymalne. Otrzymane oscylogramy potwierdzają prawidłową pracę algorytmu sterowania falownikiem. Widoczna jest zmiana częstotliwości oraz amplitudy prądu w zależności od nasłonecznienia (rys.6 i rys.7).



Rys. 6. Przebieg prądu na wyjściu falownika o częstotliwości 30 Hz odpowiadający nasłonecznieniu około $600 \frac{W}{m^2}$



Rys. 7. Przebieg prądu na wyjściu falownika o częstotliwości 50 Hz odpowiadający nasłonecznieniu $1000 \frac{W}{m^2}$

6. Wnioski końcowe

Zastosowanie generatorów fotowoltaicznych (PV), jako podstawowych źródeł energii dla silników elektrycznych stosowanych w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych wiąże się z koniecznością rozwiązania kilku problemów natury technicznej związanych ze stosunkowo trudnym ich rozruchem. Urządzenia te charakteryzują się stosunkowo dużym momentem spoczynkowym oraz poborem bar-

dzo dużego prądu rozruchowego. W przypadku zastosowania silników jednofazowych jest bardzo utrudnione przeprowadzenie rozruchu częstotliwościowego. Dlatego też, gdzie tylko jest możliwe w urządzeniach tych należy dążyć do stosowania silników trójfazowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych zaprojektowanego mikroprocesorowego układu sterowania pracą trójfazowego falownikowego układu napędowego zasilanego z baterii PV można stwierdzić, że wykonany układ działa prawidłowo. Układ sterowania prawidłowo reaguje na zmiany natężenia promieniowania słonecznego, dostosowując częstotliwość pracy falownika do panującego nasłonecznienia, zgodnie z założonym algorytmem sterowania. Dzięki temu możliwe jest optymalne wykorzystanie mocy dostarczanej do układu napędowego przez generator fotowoltaiczny.

W zaprojektowanym układzie sterowania zastosowano mikrokontroler do generowania impulsów sterujących pracą falownika. Dzięki takiemu rozwiązaniu (mały pobór mocy) sprawność opisywanego falownika, a tym samym i sprawność całego układu jest dość duża, czego nie dałoby się uzyskać w rozwiązaniu analogowym. Dodatkową zaletą stosowania mikroprocesorowego układu sterowania jest jego reprogramowalność (możliwość udoskonaleń, unowocześnień). Zalet takich nie wykazują układy analogowe, w których to w celu udoskonaleń należałoby ingerować w strukturę wewnętrzną. Technika cyfrowa, a w szczególności programowalne układy mikroprocesorowe, dzięki swoim zaletom doskonale nadają się do zastosowania w układach sterowania napędów pracujących w systemach fotowoltaicznych.

Nowoczesne technologie wytwarzania ogniw fotowoltaicznych z pewnością przyczynią się do obniżenia ich ceny. Spowoduje to spadek kosztów produkcji energii przez generatory PV co sprawi, iż ta czysta ekologicznie energia będzie mogła śmiało konkurować z energią elektryczną wytwarzaną przez konwencjonalne elektrownie.

W rzeczywistości energia elektryczna uzyskiwana z promieniowania słonecznego jest jeszcze dużo droższa od konwencjonalnej, ale jej wytwarzanie nie zanieczyszcza środowiska naturalnego.

Uzasadnioną przyczyną wykorzystywania generatorów PV w naszym kraju są dogodne warunki geograficzne oraz klimatyczne, w szcze-

gólności w okresie wiosenno-letnim. Najwyższą wartość nasłonecznienia w Polsce notuje się na jej wschodnich terenach. Tutaj też rozwój fotowoltaiki ma największą możliwość w szczególności w rolnictwie i ogrodnictwie.

7. Bibliografia

- [1]. Hofierka J., Šúri M.: *The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications*. Materiały z konferencji, Trento 2002r.
- [2]. Kolano J.: *Sposób i układ maksymalizacji mocy silnika indukcyjnego zasilanego z generatora fotowoltaicznego*. Zgłoszenie patentowe P-348535 z dnia 06.07.2001 r.
- [3]. Kolano J.: *Sposób i układ sterowania silnika indukcyjnego zasilanego z generatora fotowoltaicznego*. Zgłoszenie patentowe P-348537 z dnia 06.07.2001 r.
- [4]. Pawelski W.: *Sterowanie tranzystorów IGBT*. PŁ, Łódź 2001 r.