

Jan Kolano, Krzysztof Kolano
Politechnika Lubelska, Lublin

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

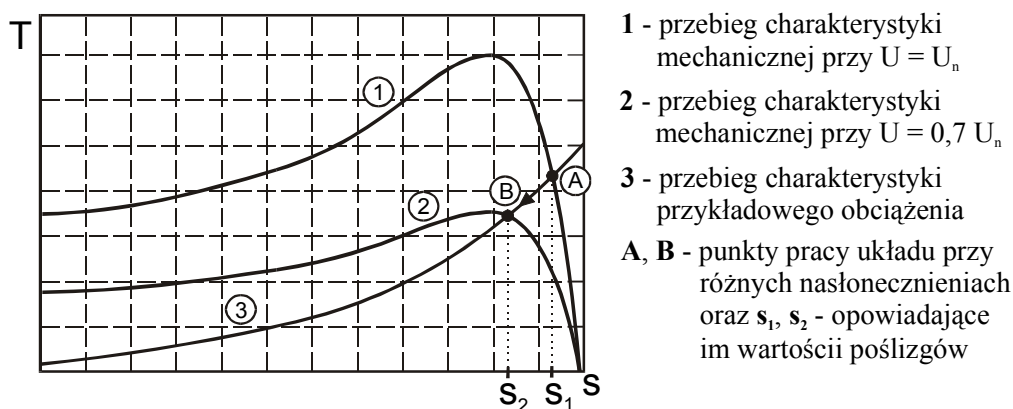
PRACTICAL IMPLEMENTATION OF 1 – PHASE AC DRIVE SYSTEMS SUPPLIED BY PV ARRAYS

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 1-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 insolation, 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

Praktyczna realizacja maksymalizacji mocy generatora PV wymaga zastosowania pomiędzy nim a elementem stanowiącym jego bezpośrednie obciążenie przekształtnika energoelektronicznego. Zadaniem tego przekształtnika jest płynna regulacja obciążenia generatora tak, aby było ono w każdej chwili równoważne podłączeniu do zacisków wyjściowych generatora rezystancji powodującej jego pracę w punkcie mocy maksymalnej (MPP).

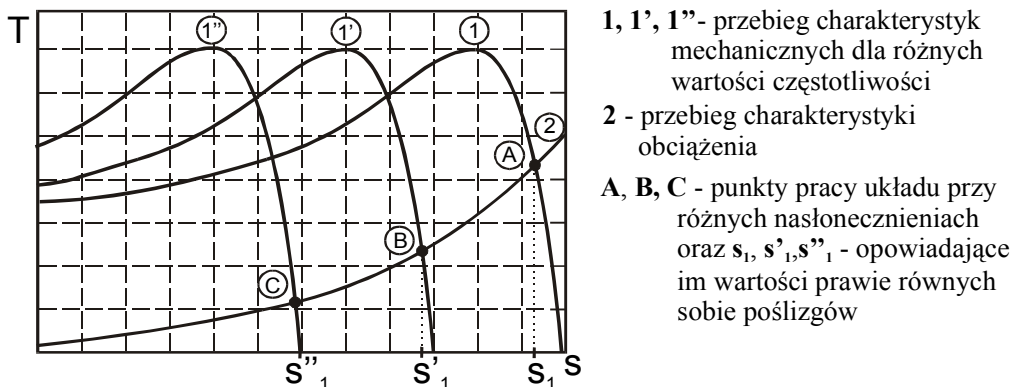
Praca układu prądu stałego w punkcie mocy maksymalnej w układach prądu przemiennego nie jest optymalnym rozwiązaniem w przypadku zasilania układów napędowych. Jest to związane z wpływem wartości skutecznej napięcia na przebieg charakterystyki mechanicznej tak zasilanego silnika. Obniżenie napięcia powoduje „zmiękczenie” tej charakterystyki, a tym samym zmianę położenia punktu pracy układu napędowego (rys 1).



Rys.1. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego obciążonego wentylatorem dla różnych wartości napięcia zasilającego

W skrajnym przypadku może to doprowadzić do utknięcia silnika z powodu zbyt dużego momentu obciążenia na wale maszyny. Przesunięcie punktu pracy układu napędowego w kierunku mniejszych prędkości spowodowane obniżeniem wartości skutecznej napięcia powoduje zwiększenie poślizgu, a co za tym idzie powiększenie strat w silniku napędowym i obniżenie sprawności układu.

Problem ten można rozwiązać poprzez sterowanie silnika zasilanego z baterii PV za pomocą skorelowanej z nasłonecznieniem zmiany częstotliwości napięcia zasilającego układ napędowy [1], [2].



Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego obciążonego wentylatorem lub pompą wirową z regulacją częstotliwościową

Sterowanie takie (rys. 2) powoduje nie tylko zmniejszenie poślizgu silnika przy pracy w warunkach mniejszego nasłonecznienia, ale również uzależnia wartość prądu, a tym samym i mocy, jaka pobierana jest z generatora PV. Jak można zauważyć poprzez odpowiednie sterowanie częstotliwością napięcia na wyjściu falownika układ jest w stanie pracować w punkcie mocy maksymalnej w szerokim zakresie zmian wartości nasłonecznienia, przy małym poślizgu silnika.

2. Opis części praktycznej układu

Spośród wielu wcześniej przetestowanych struktur napędowych w niniejszym artykule zostanie bliżej opisana wybrana struktura z jednofazowym silnikiem indukcyjnym, zasilanym z generatora fotowoltaicznego za pomocą falownika, pracującego ze zmienną częstotliwością wyjściową, dopasowaną do panujących warunków nasłonecznienia.

W maszynach roboczych o charakterystyce „wentylatorowej” moment oporowy na wale podczas rozruchu jest niewielki, co korzystnie wpływa na wartość prądu rozruchowego. Prąd ten jest jednak i tak znacznie większy od prądu znamionowego. W tym przypadku korzystne

jest również zastosowanie rozruchu częstotliwościowego. Programowa realizacja takiego rozwiązania nie nastęca wielu trudności, jednakże jest ona możliwa do wykorzystania tylko w silnikach indukcyjnych trójfazowych lub jednofazowych z rezystancyjną fazą rozruchową. W projektowanym układzie odbiornikiem ma być pompa wodna (lub wentylator) małej mocy, w których stosowane zazwyczaj silniki jednofazowe posiadają kondensatorową fazę rozruchową. Ze względu na zmieniającą się wraz z częstotliwością reaktancję pojemnościową gałęzi rozruchowej (1), rozruch częstotliwościowy nie jest dobrym rozwiązaniem. Przy małych częstotliwościach napięcia zasilającego wartość momentu wytworzonego przez sumę pól współ i przeciwbieżnego może okazać się niewystarczająca do pokonania momentu oporowego (zwłaszcza większego momentu spoczynkowego maszyny roboczej).

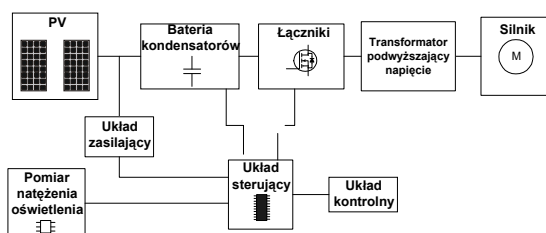
$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

gdzie:

- X_c – reaktancja pojemnościowa fazy rozruchowej,
- f – częstotliwość,
- C – pojemność kondensatora fazy rozruchowej.

Uwzględniając wyżej wymienione trudności, rozruch w zaprojektowanym układzie (rys. 3) jest dokonywany przy częstotliwości znamionowej (50 Hz), a dopiero po jego zakończeniu częstotliwość napięcia zasilającego na wyjściu z falownika może zostać dopasowana do istniejących warunków nasłonecznienia.

Wymóg niezawodności układu sprawia, że jego struktura musi być zwarta i prosta, co czyni go łatwym w eksploatacji i ewentualnym serwisowaniu. Na rysunku 3. przedstawiono koncepcyjny schemat blokowy układu napędowego wraz z bateriami PV.



Rys.3. Schemat blokowy układu napędowego prądu przemiennego zasilanego z baterii PV

Z uwagi na duży prąd rozruchowy takiego układu korzystne jest stosowanie buforowego źródła energii, którym może być kondensator. Układ czerpałby z niego energię potrzebną do rozruchu wówczas, gdy poziom nasłonecznienia byłby niewystarczający.

Zaprojektowany układ sterowania składa się z trzech zasadniczych części: układu zasilania, mikrokontrolera oraz układu nadzorującego.

Do zasilania układu sterowania wykorzystano scalony, stabilizowany zasilacz impulsowy, którego sprawność jest znacznie wyższa od standardowych stabilizatorów liniowych.

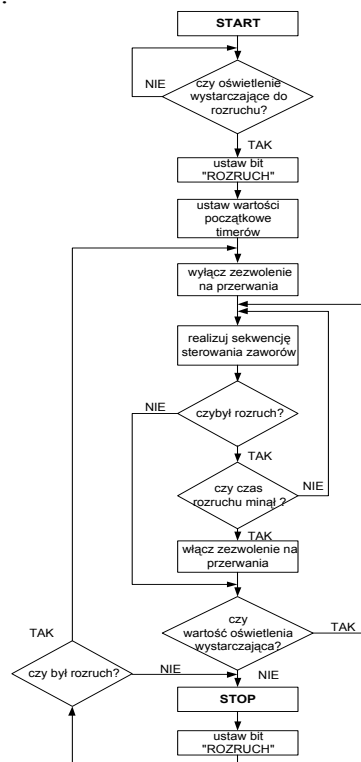
W celu uniknięcia niestabilnej pracy układu przy warunkach nasłonecznienia niewystarczających do jego funkcjonowania zastosowano jako element załączający przełącznik, który włącza sterowanie układu, gdy poziom napięcia zasilającego przekroczy pewną wartość (w opisywanym układzie jest to ok. 15 V), natomiast wyłącza gdy wartość ta obniży się poniżej 9V.

3. Układ sterujący

W zaprojektowanym układzie w celu zminimalizowania kosztów, awaryjności i złożoności zastosowano mikrokontroler z wpisanym w jego wnętrzu odpowiednim programem sterującym. Mikroprocesorowy układ sterowania wykorzystano ze względu na szereg jego zalet.

Jako mikrokontroler został wykorzystany układ AT89C2051 firmy Atmel.

W pamięci mikrokontrolera został zapisany program generujący impulsy sterujące zaworami falownika. Schemat blokowy algorytmu tego programu można przedstawić następująco (rys. 4):



Rys.4. Algorytm działania programu głównego generatora impulsów sterujących zaworami falownika zasilającego silnik napędowy

Jak wynika z powyższego schematu, algorytm sterowania opiera się na ciągłej rejestracji wartości odpowiadającej natężeniu promieniowania słonecznego (nasłonecznienia) i na tej podstawie, odpowiednim ustawianiu parametrów pracy falownika (częstotliwości i napięcia zasilającego). Jest to realizowane poprzez wykorzystanie przerwania, które jest generowane co dwadzieścia milisekund. W programie obsługi ustalone są aktualne parametry związane ze zmianą nasłonecznienia. Na początku sprawdzone zostaje natężenie promieniowania słonecznego. Jeżeli jest ono wystarczające do rozruchu zostaje ustawiony na wartość równą 1 bit „RM” (rozruch możliwy). Jeżeli natomiast nasłonecznienie nie jest wystarczające do rozruchu, bit ten zostaje wyzerowany. Wartości te dają sygnały, w zależności od których jest następnie sprawdzana kolejna zależność, a mianowicie czy przy danym nasłonecznieniu jest możliwa praca. Jeżeli bit „RM=1”, to oznacza,

że rozruch jest możliwy, a więc i praca także, obliczone zostają wartości częstotliwości (wybór z tablicy). Wartości te są następnie ustawiane w programie głównym i po ponownym uruchomieniu timerów (odliczanie kolejnych dwudziestu milisekund) następuje powrót z podprogramu obsługi przerwania. Sekwencja sterowania zaworów falownika jest zawarta w programie głównym, którego schemat blokowy przedstawiono wcześniej. Jak widać z tego schematu praca falownika zaczyna się od wydania rozkazu „START”. Następnie program, wykorzystując dane pochodzące z przerwania (otrzymywane co 20 ms), sprawdza poziom nasłonecznienia. Jeżeli jest ono wystarczające do rozruchu, zostaje ustawiony bit „ROZRUCH” oraz wartości początkowe timerów. Wyłączone zostaje zezwolenie na przerwania i dokonany zostaje rozruch silnika, według określonej sekwencji sterowania (z częstotliwością niezależną od nasłonecznienia wynoszącą 50 Hz). Sekwencja ta jest powtarzana aż do momentu przekroczenia czasu przewidzianego do rozruchu. Jeżeli rozruch został dokonany, włączone zostaje zezwolenie na przerwania w celu ponownego określenia wartości optymalnej częstotliwości pracy falownika (zapewnienie minimalnego poślizgu). Następnie zostaje ponownie sprawdzona wartość natężenia promieniowania słonecznego i jeśli jest ono dostatecznie duże zostanie powtórzona sekwencja sterowania zaworów (z częstotliwością odpowiadającą aktualnym warunkom nasłonecznienia). W przypadku, gdy rozruch nie wystąpił oraz wartość panującego natężenia oświetlenia jest zbyt mała, następuje zatrzymanie wykonywania sekwencji sterującej zaworami falownika. Następnie ponownie zostaje ustawiony bit „ROZRUCH” i sprawdzanie, czy przy danym nasłonecznieniu rozruch jest możliwy. Gdy nasłonecznienie jest zbyt małe, program zamyka się w pętli, w której sprawdza cały czas warunek dostatecznego nasłonecznienia. W takim stanie pracy zawory falownika nie są wysterowywane, a więc układ napędowy nie jest zasilany. Dzieje się tak do momentu, w którym natężenie promieniowania słonecznego osiąga wartość, która jest wystarczająca do dokonania kolejnego rozruchu. W programie uwzględniono histerezę, dzięki której uniknięto niekontrolowanego załączania się układu przy progowych wartościach nasłonecznienia. Dzięki takiemu rozwiązaniu praca po dokonaniu rozruchu jest możliwa tylko w pewnym zakresie na-

śłonecznień, dla których jest to ekonomicznie i technicznie uzasadnione. Założono w trakcie projektowania i w oparciu o badania, że układ zachowuje się poprawnie w warunkach nasłonecznienia od 50% do 100% warunków znamionowych (1000 W/m^2). Takim poziomowi nasłonecznień odpowiadają częstotliwości od 38 Hz dla najgorszych warunków nasłonecznienia do 52 Hz dla warunków najlepszych. W histerezie zawarto także graniczną wartość natężenia promieniowania słonecznego, poniżej której rozruch jest niemożliwy. Dzięki temu uzyskuje się kolejne zabezpieczenie przed niewłaściwą pracą silnika (wytwarzany moment napędowy jest zbyt mały aby pokonać opory ruchu, silnik byłby niepotrzebnie przegrzewany). Program źródłowy powyższego algorytmu został napisany w asemblerze, czyli języku programowania niskiego poziomu, wykorzystującego instrukcje procesora.

4. Zawory falownika

Wymagania stawiane zastosowanym łącznikom nie są zbyt duże, ponieważ częstotliwość przełączania jest niewielka. Nie przekracza ona bowiem trzech kiloherców. Ponieważ do praktycznej realizacji zastosowano układ typu „push-pull”, należy liczyć się z tym, że napięcie na łącznikach będzie chwilami dwa razy większe od napięcia zasilającego, co trzeba wziąć pod uwagę przy doborze odpowiedniego typu łączników, gdyż w przeciwnym razie, przy niewłaściwym ich doborze, może łatwo dojść do ich uszkodzenia. W zaprojektowanym układzie, napięcie na wyjściu generatora fotowoltaicznego w stanie jałowym może osiągnąć 21 V, tak więc łączniki należy dobrać na napięcie co najmniej 42 V. Dobierając łączniki należy także zwrócić uwagę na prądy, jakie mogą przepływać przez tranzystory w czasie rozruchu silnika napędzającego maszynę roboczą. Wartości tych prądów mogą być kilkakrotnie większe od wartości znamionowych. Użyte łączniki powinny dodatkowo charakteryzować się małym spadkiem napięcia (małą rezystancją w stanie przewodzenia), dzięki czemu można ograniczyć do minimum straty tak cennej energii uzyskiwanej z generatora fotowoltaicznego. W przedstawionym układzie sterowanie włączaniem tranzystorów jest zrealizowane sygnałem logicznym o wartości stanu aktywnego 5V. Takie rozwiązanie upraszcza budowę całego układu i co się z tym wiąże, zmniejsza nakłady inwestycyjne. Jest to bardzo ważne przy dość

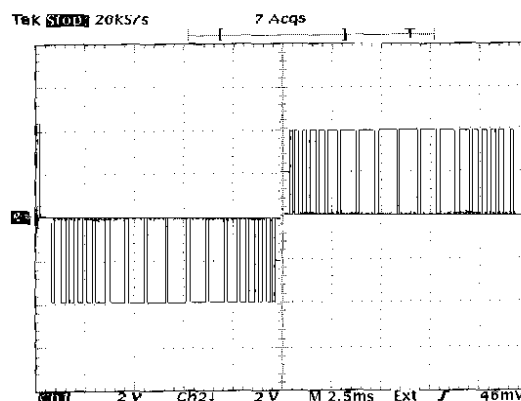
wysokiej, jak do tej pory, cenie modułów fotowoltaicznych. Ze względu na małe wartości prądu (podyktowane jak najmniejszymi stratami) potrzebne do wysterowania tranzystora, małe straty mocy w czasie przewodzenia i dużą szybkość przełączania, zdecydowano się na użycie tranzystorów typu MOSFET. Są to tranzystory unipolarne, w których bramka jest oddzielona od kanału cienką warstwą izolacyjną najczęściej utworzoną z dwutlenku krzemu. Dzięki odizolowaniu bramki, niezależnie od jej polaryzacji, w stanach ustalonych nie płynie przez nią żaden prąd (minimalne straty na wysterowanie). Niestety, aby w pełni wysterować standardowe tranzystory tego rodzaju, należy załączyć im na bramkę napięcie rzędu 10 – 15V. Sygnał 5V nie jest zdolny do pełnego wysterowania typowego tranzystora. Istnieją jednak tranzystory tego typu, przystosowane specjalnie do sterowania sygnałem logicznym. Zaproponowany układ napędowy zasilany jest z generatora fotowoltaicznego poprzez transformator, służący do podwyższania napięcia.

5. Czujnik natężenia oświetlenia

Ze względu na zaproponowany algorytm sterowania, było konieczne zastosowanie w układzie przetwornika poziomego natężenia promieniowania słonecznego na sygnał elektryczny (napięcie lub prąd) lub ciąg impulsów (częstotliwość), których wartość lub częstotliwość jest proporcjonalna do poziomu nasłonecznienia. Ponieważ do realizacji układu sterującego zastosowano mikroprocesor, korzystne było zastosowanie przetwornika natężenie oświetlenia – częstotliwość impulsów. Zawarty w strukturze wewnętrznej użytego mikrokontrolera timer (licznik) może zliczać impulsy pochodzące od tego przetwornika i porównywać je z wartością progową nasłonecznienia zapisaną w pamięci. Przetwornik ten powinien mieć także możliwość dostrojenia częstotliwości sygnału wyjściowego do mikrokontrolera, z którym będzie współpracował. Wymagania te spełnia wiele układów elektronicznych między innymi układ TSL 230 firmy Texas Instruments. Jest to układ przetwarzania natężenia oświetlenia na częstotliwość prostokątnego sygnału wyjściowego. Przetwornik ten posiada dodatkowo pewną zaletę, a mianowicie może być on programowany. Dzięki temu istnieje możliwość dostrojenia parametrów (częstotliwości na wyjściu) do potrzeb użytkownika i układu.

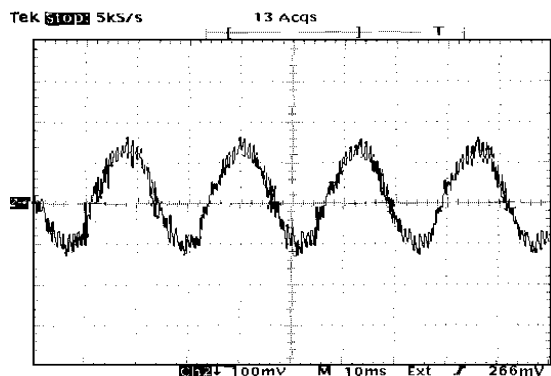
6. Badania laboratoryjne

Opisany powyżej układ został zmontowany i uruchomiony. Następnie poddany został badaniom laboratoryjnym, mającym na celu zbadanie jego zachowań w rzeczywistych warunkach oraz w celu weryfikacji pracy układu z założeniami projektowymi. Przeprowadzone badania były wykonane w dość sprzyjających warunkach pogodowych, a mianowicie przy dobrym nasłonecznieniu z chwilowymi przesłonięciami słońca przez chmury. Podczas takiej pogody można było zaobserwować zachowanie się układu w stanach przejściowych (obniżanie się mocy nasłonecznienia), co dało możliwość rzetelnej jego oceny. W czasie badań laboratoryjnych dokonano rejestracji przebiegu impulsów sterujących pracą zaworów falownika i uzyskiwanych przy takim sterowaniu przebiegów prądu silnika, obciążonego pompą wirową oraz wentylatorem. Jak już wcześniej wspomniano, pompy wirowe charakteryzują się „wentylatorową” charakterystyką zależności momentu oporowego w funkcji prędkości obrotowej, dlatego wyniki uzyskane w wyniku obciążenia układu wentylatorem i pompą były prawie identyczne. W czasie badań laboratoryjnych występowały momenty chwilowego zachmurzenia. W chwilach tych natężenie promieniowania słonecznego spadało znacznie poniżej wartości znamionowej, tak więc można było sprawdzić poprawność realizacji zaproponowanego algorytmu sterowania. Zgodnie z przyjętą zasadą regulacji, w takich momentach układ powinien, dostosowując się do istniejących warunków nasłonecznienia, zmniejszyć częstotliwość pracy falownika. Jak zaobserwowano układ działał poprawnie, co potwierdzają poniższe przebiegi:



Rys.5. Przebiegi impulsów sterujących łącznikami falownika przy mniejszym nasłonecznieniu (ok. 800W/m^2)

Jak wynika z zarejestrowanych przebiegów na wyjściu falownika uzyskiwano przebiegi o kształcie sinusoidalnym, których częstotliwość dostosowywała się do panujących warunków natężenia oświetlenia.



Rys.6. Przebieg prądu obciążenia dla zmniejszonego natężenia nasłonecznienia do 500 W/m^2

Dla nasłonecznienia znamionowego 1000 W/m^2 wartość częstotliwości pracy falownika wynosi 50 Hz , w miarę obniżania się natężenia promieniowania częstotliwość ta zmieniała się, co jest widoczne również na przedstawionych powyżej rysunkach (oscylogramach). Dla innych warunków nasłonecznienia (gorszych) zarejestrowana częstotliwość była odpowiednio mniejsza.

Wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają prawidłowe zachowanie się zaprojektowanego układu sterującego. Widać wyraźnie z załączonych oscylogramów, że układ sterowania dostosowywał wartość częstotliwości na wyjściu falownika do panujących warunków nasłonecznienia. Dzięki temu możliwa była praca układu z małym poślizgiem, czyli z największą możliwą do uzyskania sprawnością.

7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych zaprojektowanego mikroprocesorowego układu sterowania pracą 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 ta-

kiemu rozwiązaniu (mały pobór mocy przez układy cyfrowe) sprawność opisywanego falownika, a tym samym i sprawność całego układu jest dość duża, czego nie dałoby się uzyskać w rozwiązaniu analogowym (większy pobór mocy). Dodatkową zaletą stosowania mikroprocesorowego układu sterowania jest jego reprogramowalność (możliwość udoskonalenia, unowocześnień). Zalet takich nie wykazują układy analogowe, w których to w celu udoskonalenia 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 fotowoltaicznych.

Wykonane i przetestowane układy są przeznaczone do zasilania maszyn indukcyjnych prądu przemiennego, napędzających maszyny robocze, takie jak pompy lub wentylatory czy też stosowane w gospodarstwach domowych miksery, młynki, roboty kuchenne itp. Silniki indukcyjne jednofazowe charakteryzują się niezbyt wysoką sprawnością. Tak więc, w celu lepszego wykorzystania przetworzonej w bateriach PV energii należy dążyć, gdzie jest to tylko możliwe do stosowania napędów trójfazowych. Rozwiązanie takie, zwłaszcza w napędach fotowoltaicznych, jest bardzo praktyczne i korzystne ze względu na dużo większą sprawność indukcyjnych silników trójfazowych w porównaniu z silnikami jednofazowymi.

8. Literatura

- [1]. Kolano J.: Sposób i układ sterowania silnika indukcyjnego zasilanego z generatora fotowoltaicznego. Biuletyn Urzędu Patentowego 2003 vol. 758, 1. s.39.
- [2]. Kolano J.: Sposób i układ maksymalizacji mocy silnika indukcyjnego zasilanego z generatora fotowoltaicznego. Biuletyn Urzędu Patentowego 2003 vol. 758, 1. s.39.
- [3]. Jan Kolano, K. Kolano: „Elektryczne układy napędowe zasilane z baterii ogniw fotowoltaicznych”. Mat. Konferencyjne BSE/2003 Istebna Zaolzie. s. 22-27.
- [4]. J. Kolano, K. Kolano: „Praktyczna realizacja wybranych układów napędowych zasilanych z generatorów fotowoltaicznych.” Mat. XVII Szkoły Ognia Słoneczne i Detektory Podczzerwieni Kazimierz Dolny 2003r.