

Jan Kolano, Krzysztof Kolano  
Politechnika Lubelska, Lublin

## PRAKTYCZNA REALIZACJA UKŁADÓW NAPĘDOWYCH PRĄDU STAŁEGO ZASILANYCH Z BATERII OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

### PRACTICAL IMPLEMENTATION OF DC DRIVE SYSTEMS SUPPLIED BY PV ARRAYS

**Abstract:** The possibility of autonomic PV low power generators constructing used for electric driving systems feeding has emerged within last few years. 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 feeding magnetoelectric DC-motor in stand-alone photovoltaic 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. The chosen results of laboratory are been presented in fig.

#### 1. Wprowadzenie

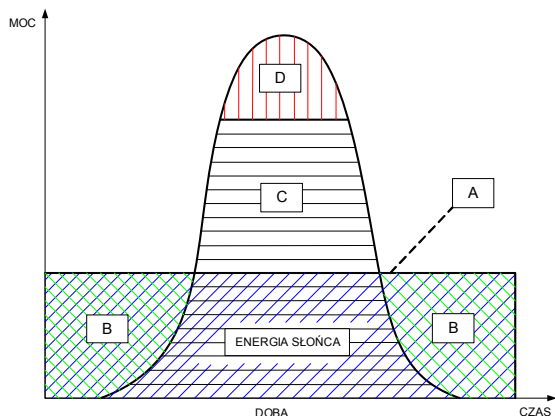
Perspektywy wyczerpania się zasobów paliw kopalnych oraz obawy o stan środowiska naturalnego w ostatnich latach zwiększyły zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii, co w konsekwencji doprowadziło do znacznego wzrostu ich zastosowania w wielu krajach świata. Obecnie główną rolę w zaopatrzeniu świata w energię odgrywają źródła nieodnawialne, zwłaszcza węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny, a ze źródeł odnawialnych energia wodna. Aktualnie w wielu krajach przyrost mocy wytwórczych ma miejsce w jednostkach tzw. generacji rozproszonej. Właśnie ta gałąź energetyki przeżywa aktualnie bardzo dynamiczny rozwój i zaczyna powoli odgrywać znaczącą rolę w zapewnieniu bezpieczeństwa energetycznego oraz na lokalnych rynkach energii elektrycznej. Generacja rozproszona wykorzystuje do produkcji energii elektrycznej zarówno paliwa konwencjonalne, jak też odnawialne źródła energii. Wpływ tego typu źródeł na pracę systemu wzrasta wraz ze wzrostem ich liczby i mocy. Praca jednostek energetyki rozproszonej ma wpływ na jakość energii w sieci, na stabilność pracy systemu elektroenergetycznego oraz na ekologiczne wytwarzanie energii elektrycznej. Praca niektórych źródeł energii, a w szczególności odnawialnych, jest uzależniona od siły wyższej. Zarówno zanik wiatru w elektrowniach wiatrowych, podobnie jak zachmurzenie

w elektrowniach słonecznych mają bezpośredni wpływ na wielkość wytwarzanej mocy.

Przetwarzanie energii słonecznej na energię elektryczną, dokonywane na drodze konwersji fotowoltaicznej, odbywa się bezpośrednio w ogniwie słonecznym. 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. W celu uzyskania stałych parametrów i maksymalnej wartości generowanej mocy stosuje się różnego rodzaju systemy fotowoltaiczne.

Charakterystyczne dla systemów fotowoltaicznych są nadwyżki i niedobory energii (rys.1). Zastosowanie takich systemów może mieć sens ekonomiczny w obszarach niezelektryfikowanych lub gdy istniejąca w danym miejscu linia elektroenergetyczna nie może dostarczyć wymaganej mocy w porównaniu z zapotrzebowaniem. Zamiast przebudowywać istniejącą linię lub budować nową, można wybudować system fotowoltaiczny z buforowym źródłem energii lub współpracujący z siecią elektroenergetyczną. Jest to szczególnie korzystne wtedy, gdy szczyt zapotrzebowania na moc pokrywa się z maksimum promieniowania słonecznego,

na przykład, jeżeli powszechnie stosowane są urządzenia klimatyzacyjne, czy też w przypadku zasilania napędów maszyn roboczych w rolnictwie, ogrodnictwie, gospodarstwie domowym w których całkowite zapewnienie ciągłości zasilania nie jest konieczne.

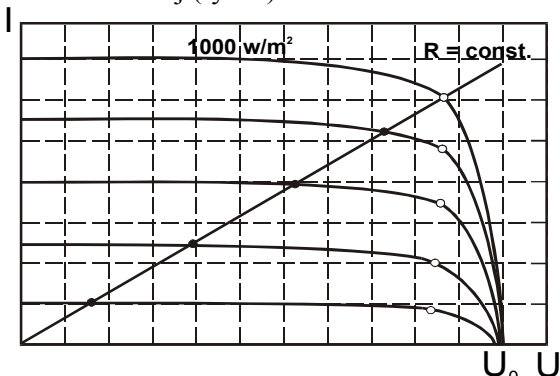


Rys.1. Typowy dobowy rozkład mocy wytwarzanej w elektrowni słonecznej PV oraz rozdział uzyskanej energii elektrycznej:

A – uśredniona energia pobierana przez odbiorniki w ciągu doby, B – energia czerpana z akumulatorów w ciągu nocy, C – energia gromadzona w akumulatorach uzupełniająca ubytki powstałe w nocy, D – nadwyżka energii do dyspozycji.

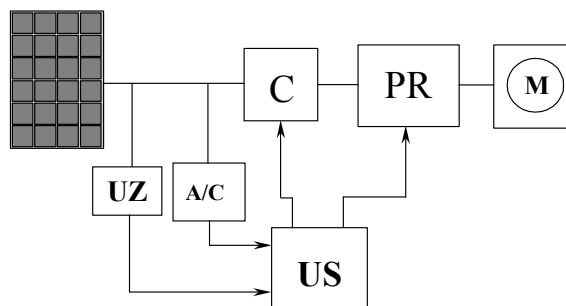
## 2. Układy napędowe prądu stałego zasilane z generatorów fotowoltaicznych, pracujące w punkcie mocy maksymalnej

Aby przybliżyć pojęcie pracy układu w punkcie mocy maksymalnej należy rozważyć jego pracę przy różnym nasłonecznieniu obciążonego np. rezystorem. Obciążenie dobrano tak, że przy znamionowych warunkach nasłonecznienia pobiera ono znamionową wartość mocy baterii fotowoltaicznej (rys. 2).



Rys.2. Położenie punktu pracy baterii PV obciążonej rezystorem dla różnych natężeń promieniowania słonecznego

Jak można zauważyć wraz ze zmniejszającym się nasłonecznieniem zmienia swe położenie zarówno punkt pracy układu, jak i punkt mocy maksymalnej MPP. Z analizy rysunku widać, że im dalej punkty te znajdują się od siebie, tym mniejszy jest stopień wykorzystywania energii z baterii ogniw fotowoltaicznych. Zauważyć można również, że im nasłonecznienie ma mniejszą wartość, tym wykorzystanie tej energii jest mniejsze. Powoduje to zmniejszenie mocy dostarczanej z baterii, a więc i pogorszenie sprawności układu. Aby zapobiec temu zjawisku można na przykład pomiędzy generatorem fotowoltaicznym a odbiornikiem umieścić przetwornicę DC-DC o regulowanym współczynniku wypełnienia [3]. Przetwornica ta sterowana według sposobu opisanego w niniejszym artykule będzie w stanie zapewnić pracę generatora fotowoltaicznego w punkcie MPP w bardzo szerokim zakresie zmian natężenia promieniowania słonecznego. Schemat blokowy takiego układu zaprojektowanego i uruchomionego w Katedrze Napędów Elektrycznych Politechniki Lubelskiej przedstawiony został na rysunku 3.



Rys.3. Uproszczony schemat blokowy fotowoltaicznego systemu napędowego prądu stałego z maksymalizacją mocy

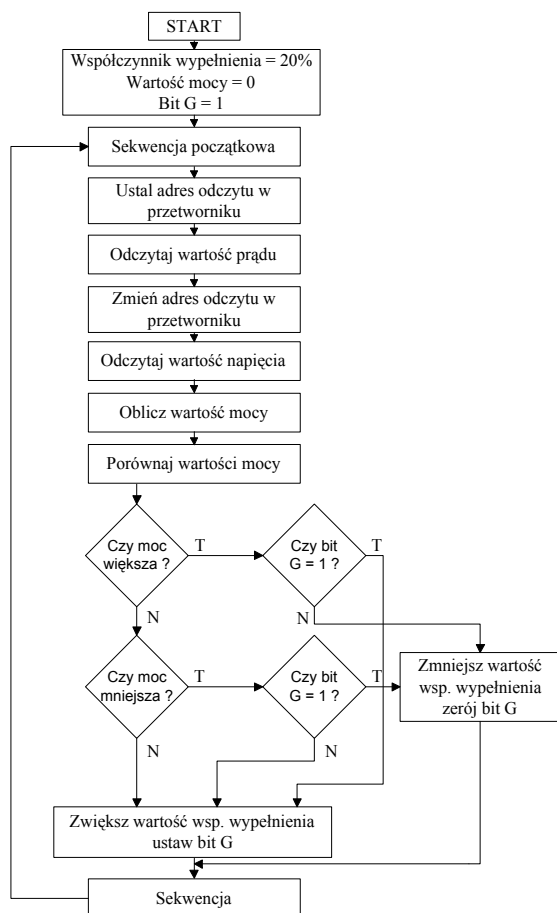
Powyższy układ składa się z generatora fotowoltaicznego PV, kondensatora C, przetwornicy napięcia stałego PR, silnika magnetoelektrycznego prądu stałego M obciążonego maszyną roboczą, układu sterującego US, układu zasilającego sterowanie UZ oraz przetwornika analogowo – cyfrowego A/C.

## 3. Algorytm sterowania układu napędowego prądu stałego

Z uwagi na niską cenę i łatwość modyfikacji zdecydowano się na zastosowanie mikroprocesora jako elementu sterującego w układzie z rys.3. Ze względu na dość prosty algorytm sterowania do budowy układu użyty został 8-bi-

towy mikrokontroler rodziny MCS-51<sup>TM</sup>, z programem działania zapisanym w jego wewnętrznej pamięci typu FLASH.

W pamięci mikrokontrolera zawarty został program generujący impulsy sterujące łącznikiem przetwornicy, których współczynnik wypełnienia zależy od chwilowej wartości mocy pobieranej z generatora fotowoltaicznego. Algorytm tego programu przedstawiony jest na rysunku 4.



Rys.4. Algorytm działania programu głównego mikrokontrolera sterującego pracą silnika napędowego

Program rozpoczyna się od ustawienia wartości początkowych zmiennych używanych do późniejszych porównań: współczynnika wypełnienia na 20%, wartości mocy na „0”, bitu G na „1”. Następnie rozpoczyna się sekwencja podczas której sprawdzane są wartości prądu i napięcia oraz obliczana jest wartość mocy oddawanej przez baterię. W pierwszym etapie inicjowany jest odczyt wartości analogowej z jednego z dostępnych wejść przetwornika. Posiada on ośmiokanałowy multiplexer, co umożliwia dokonywanie pomiarów zarówno

wartości napięcia, jak i (pośrednio) prądu. Z uwagi na to, że zastosowany przetwornik posiada funkcję przetrzymywania wyniku po upływie czasu przetwarzania, możliwe stało się zrezygnowanie z wykorzystywania przerwania generowanego przez przetwornik i niejako „wplecenia” wszystkich instrukcji w sekwencję sterowania przetwornicą. Zaowocowało to mniejszym wpływem czynności związanych z obsługą przetwornika na sygnał sterujący pracą układu. Przetworzone na postać cyfrową wartości napięcia i prądu generatora fotowoltaicznego są mnożone tak, że wynik tego działania jest liczbą szesnastobitową. Obliczona nowa wartość mocy jest porównywana z zapisaną poprzednio. W zależności od ich relacji odpowiednio regulowany jest współczynnik wypełnienia sygnału wyjściowego z mikrokontrolera.

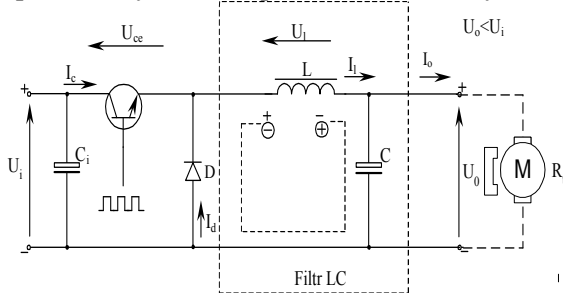
#### 4. Przetwornik A/C

Ponieważ prąd i napięcie baterii fotowoltaicznej są wielkościami analogowymi, należy je przetworzyć na wielkości cyfrowe tak aby ich wartości można było poddać dalszej analizie w mikroprocesorze. Do tego celu służą przetworniki analogowo – cyfrowe. Z uwagi na to, że w omawianym układzie nie jest wymagana duża szybkość przetwarzania, zdecydowano się na wybór układu wyprodukowanego przez National Semiconductor o symbolu ADC0808. Jest on urządzeniem zbudowanym w oparciu o technologię CMOS, z 8-bitowym konwerterem analogowo-cyfrowym, 8-kanałowym multiplexerem i logiką kontrolną zgodną z mikroprocesorami. 8-bitowy konwerter A/C używa metody kolejnych przybliżeń jako techniki konwersji. Konwerter cechuje odporność na zakłócenia komparator o wysokiej impedancji, 256R dzielnik napięcia z drzewem analogowych przełączników i rejestrem dla kolejnych przybliżeń. Ośmiokanałowy multiplexer ma bezpośredni dostęp do dowolnego z 8 niesymetrycznych sygnałów analogowych. Urządzenie eliminuje potrzebę dodatkowego zera oraz regulacji zakresu. Łatwe podłączanie do mikroprocesorów jest zapewniane przez zatraskiwane i dekodowane multiplexerem wejścia adresowe i zatraskiwane wyjścia trójstanowe TTL. ADC0808 oferuje wystarczającą dokładność, minimalną zależność od temperatury, powtarzalność oraz mały pobór mocy. Ponadto fakt posiadania przez przetwornik własnego multiplexera ułatwia przetwarzanie dwóch wielko-

ści analogowych (napięcia generatora i jego prądu).

## 5. Przetwornica DC-DC

Przetwornice DC-DC o wyjściu niez izolowanym od wejścia można podzielić na: obniżające, podwyższające lub zmieniające biegunowość napięcia stałego [2]. Spośród układów obniżających napięcie stałe podstawowym układem jest układ konwertera współbieżnego z filtrem LC typu gamma. Taki właśnie rodzaj układu wybrano do projektowanego systemu, a jego uproszczony schemat przedstawiono na rys.5.



Rys.5. Układ współbieżnej przetwornicy DC-DC zasilającej silnik prądu stałego

W układzie tym tranzystor pracuje jako łącznik. Kondensator C, podłączony równolegle do wyjścia, jest ładowany okresowo poprzez dławik L ograniczający prąd. W czasie włączenia tranzystora, dławik ogranicza prąd do wartości odpowiedniej dla obciążalności tranzystora. Gdy tranzystor przewodzi, pojemność C ładuje się poprzez dławik, w którym gromadzi się energia magnetyczna. W czasie włączenia klucza  $t_{on}$  przyrost prądu w dławiku można wyrazić zależnością [2]:

$$\Delta I_{Lon} = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot t_{on} = \frac{U_i - U_o}{L} \cdot \gamma \cdot T \quad (1)$$

gdzie:

- L – indukcyjność dławika,
- T – okres repetycji łączeń łącznika,
- $\gamma = t_{on}/T$  – współczynnik wypełnienia impulsów.

Gdy tranzystor zostanie zablokowany, zmienia się biegunowość napięcia na dławiku, a zgromadzona w nim energia jest doprowadzona do obciążenia poprzez diodę usprawniającą D. W czasie wyłączenia  $t_{off}$  prąd w dławiku maleje w sposób następujący:

$$\Delta I_{Loff} = \frac{U_o}{L} \cdot T \cdot (1 - \gamma) \quad (2)$$

Równowaga zachodzi wówczas, gdy przyrost i spadek prądu dławika podczas czasu włączania i wyłączenia są sobie równe czyli:

$$\frac{U_i - U_o}{L} \cdot \gamma \cdot T = \frac{U_o}{L} \cdot T \cdot (1 - \gamma) \quad (3)$$

stąd

$$U_o = \gamma \cdot U_i$$

Jak widać napięcie wyjściowe może być stabilizowane przez zmianę współczynnika wypełnienia. Ponieważ współczynnik wypełnienia  $\gamma < 1$ , więc napięcie wyjściowe jest zawsze niższe od napięcia wejściowego.

Dla wyjścia indukcyjność L tworzy razem z kondensatorem C filtr dolnoprzepustowy, czyli układ całkujący. Jednocześnie dławik jest elementem ograniczającym prąd. Dzięki zastosowaniu dławika jest możliwe zarówno gromadzenie, jak i odzyskiwanie energii. Gdy tylko tranzystor zostanie zablokowany zaczyna przewodzić dioda D, przekazując energię, zgromadzoną w dławiku L do kondensatora i obciążenia.

Dla wyjścia indukcyjność L tworzy razem z kondensatorem C filtr dolnoprzepustowy, czyli układ całkujący. Jednocześnie dławik jest elementem ograniczającym prąd. Dzięki zastosowaniu dławika jest możliwe zarówno gromadzenie, jak i odzyskiwanie energii. Gdy tylko tranzystor zostanie zablokowany zaczyna przewodzić dioda D, przekazując energię, zgromadzoną w dławiku L do kondensatora i obciążenia.

Dioda usprawniająca, zwana również diodą rozładowującą, przewodzi prąd tylko przy zablokowanym tranzystorze. Wobec tego energia zgromadzona w dławiku w czasie włączenia może powrócić do wyjścia. Gdyby usunąć diodę z układu, to przepięcie pojawiające się na indukcyjności podczas wyłączenia tranzystora mogłoby doprowadzić do jego uszkodzenia.

Krytyczna wartość indukcyjności  $L_{min}$  dławika (przy której wartość chwilowa prądu dławika maleje dokładnie do zera) jest równa indukcyjności ograniczającej amplitudę wahań prądu do podwójnej wartości średniej minimalnego prądu obciążenia  $I_{oav}$  czyli:

$$\frac{U_o \cdot T}{L} \cdot (1 - \gamma) = 2 \cdot I_{oav} \quad (4)$$

Jeśli za  $\gamma$  podstawić wyrażenie  $U_o/U_i$ , a na miejsce  $I_{oav}$  – wyrażenie  $P_o/U_o$

to:

$$L_{\min} = \frac{U_o^2 \cdot T}{2 \cdot P_{\min}} \cdot \left(1 - \frac{U_o}{U_i}\right) \quad (5)$$

gdzie:

$P_{\min}$  jest minimalną mocą wyjściową.

Przy zadanej indukcyjności  $L$  można obliczyć wartość krytyczną (tzn. wartość graniczną)  $I_{\lim}$  prądu obciążenia, przy której chwilowy prąd dławika osiąga dokładnie wartość równą zero:

$$I_{\lim} = \frac{(1 - \gamma) \cdot T \cdot U_i}{2 \cdot L} \quad (6)$$

Przy prądzie obciążenia wyższym od tej wartości prąd dławika nie maleje do zera.

Przy pominięciu strat do określania parametrów układu stosowane są następujące zależności:

$$U_o = \begin{cases} \gamma \cdot U_i & \text{gdy } I_o > I_{\lim} \\ \frac{U_i}{1 + \frac{2 \cdot L \cdot I_o}{2 \cdot U_i \cdot T}} & \text{gdy } 0 \leq I_o \leq I_{\lim} \end{cases} \quad (7)$$

## 6. Dobór łącznika szeregowego konwertera DC-DC

Przy doborze łącznika pamiętać należy, że w układzie wielkość prądu obciążenia jest dość znaczna i niemal równa prądowi zwarcia baterii dla danych warunków nasłonecznienia. Ponadto element kluczujący powinien charakteryzować się małym spadkiem napięcia w stanie załączenia, a co za tym idzie małymi stratami mocy. Ze względu na małe wartości prądu potrzebne doysterowania, małe straty mocy w stanie przewodzenia i dużą szybkość przełączania zdecydowano się na użycie tranzystora typu MOSFET.

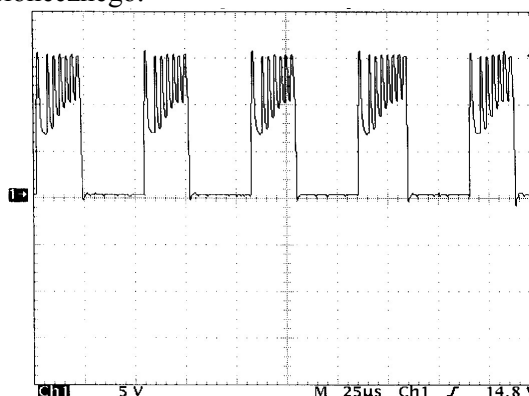
Z uwagi na poziom napięć układów cyfrowych sygnał sterujący z mikrokontrolera (5V) nie spowoduje pełnegoysterowania tranzystora. Dlatego niezbędne jest zastosowanie specjalnego układu (sterownika), który odpowiednio wzmocni ten sygnał tak, abyysterował on w pełni tranzystor. Zadania takie pełni układ scalony o symbolu IR 2121. Ma on wiele funkcji użytecznych przy konstruowaniu przetwornic DC-DC np. możliwość pomiaru wartości prądu obciążenia i wyłączania układu, gdyby prąd ten okazał się zbyt duży. W omawianym zastosowaniu problem skutków zwarcia odbiornika niemal nie istnieje ze względu na skończoną wydajność prądową generatora fotowol-

taicznego. Ponadto gdy prąd osiągnie dużą wartość obniży się moc pobierana z generatora fotowoltaicznego i układ sterujący zareaguje natychmiast zmniejszeniem współczynnika wypełnienia.

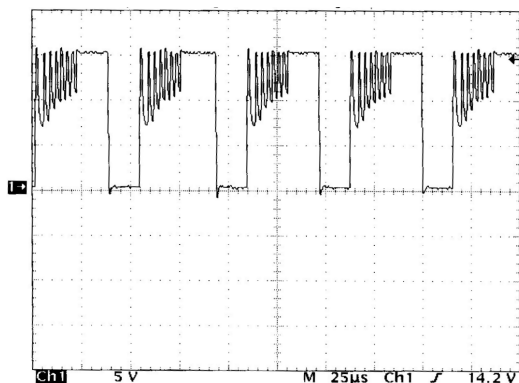
## 7. Przebiegi uzyskane w wyniku pomiarów laboratoryjnych

Zaprojektowany układ z rys. 3 został wykonany i uruchomiony. Następnie poddano go badaniom laboratoryjnym, mającym na celu zbadanie jego zachowania w rzeczywistych warunkach pracy, a także sprawdzenia czy spełnia on założenia projektowe. Badania prowadzone były w różnych warunkach nasłonecznienia w celu oceny działania układu przy różnych warunkach pogodowych. Obciążenie dobrano tak, aby dla danej baterii PV przy oświetleniu maksymalnym realizowana była praca układu w punkcie MPP. Stwierdzono, że przy niższych wartościach nasłonecznienia ilość energii dostarczanej do silnika z generatora fotowoltaicznego dla układu wyposażonego w badane urządzenie była nawet pięciokrotnie wyższa, niż dla układu silnika połączonego bezpośrednio z baterią PV.

W czasie badań laboratoryjnych dokonano rejestracji przebiegu impulsów sterujących pracą łącznika silnika zarówno na wyjściu z procesora, jak i bezpośrednio na bramce łącznika (po przejściu przez sterownik tranzystora). Zarejestrowano również przebiegi prądu i napięcia na wejściu przetwornika analogowo-cyfrowego. Porównywano też moc uzyskiwaną na odborniku bez układu maksymalizującego i z tymże układem dla różnych natężeń promieniowania słonecznego.



Rys. 6. Przebieg czasowy impulsów napięcia bramka - źródło tranzystora przy nasłonecznieniu równym  $400 \text{ W/m}^2$



Rys.7. Przebieg czasowy impulsów napięcia bramka - źródło tranzystora przy nasłonecznieniu równym  $750 \text{ W/m}^2$

Na rysunkach 6 i 7 przedstawione są przebiegi napięć na zaciskach bramka-źródło. Ich amplituda wynosi około 15V co wystarcza na pełne wysterowanie tranzystora. Widać również wyraźne wahania tego napięcia.

Sprawdzono także czy układ spełnia założenia projektowe odnośnie maksymalizacji mocy uzyskiwanej z baterii fotowoltaicznej. W wyniku badań laboratoryjnych stwierdzono, że moc pozyskiwana z baterii na odbiorniku bezpośrednio podłączonym jest wyraźnie niższa niż po zastosowaniu wykonanego układu. Różnica ta zależy również od poziomu nasłonecznienia. Im jest ono niższe tym różnica ta jest większa. Moc tracona w układzie sterującym nie jest zbyt duża i waha się w granicach 1-2W. W zaprojektowanym układzie sterowania zastosowano mikrokontroler do generowania impulsów sterujących pracą przekształtnika. Dzięki takiemu rozwiązaniu (mały pobór mocy przez układy cyfrowe) sprawność badanego przekształtnika a tym samym i sprawność całego układu była dość duża, czego nie dałoby się uzyskać w rozwiązaniu analogowym (większy pobór mocy). Dodatkową zaletą stosowania mikroprocesorowego 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 fotowoltaicznych.

## 8. Podsumowanie

Wykonany i przetestowany układ jest przeznaczony do zasilania maszyn prądu stałego z magnesami trwałymi, napędzających maszyny robocze, takie jak pompy lub wentylatory.

Biorąc pod uwagę wysokie koszty inwestycyjne zakupu generatora fotowoltaicznego ważne jest ograniczenie jego mocy do niezbędnego minimum, co wiąże się z mniejszymi nakładami finansowymi. Dodatkowe korzyści można osiągnąć dzięki zastosowaniu w przedstawionym układzie kondensatorowego źródła buforowego. Takie rozwiązanie przyczynia się do obniżenia mocy generatora niezbędnej do dokonania rozruchu maszyny roboczej, ponieważ część energii potrzebnej do pokonania początkowego momentu oporowego będzie czerpana ze źródła buforowego. Poprawia to także własności ruchowe całego układu. Kondensator, oprócz gromadzenia energii, zapewnia dodatkowo dużą moc rozruchową przez oddanie zgromadzonego ładunku w bardzo krótkim czasie. Ze względu na bardzo małą rezystancję wewnętrzną naładowanego kondensatora, warunki rozruchu w takim układzie są znacznie ułatwione.

## 9. Literatura

- [1]. J. Kolano, K. Kolano: „Problemy doboru parametrów systemów fotowoltaicznych zasilających wybrane układy napędowe”. Mat. Konf. „ Nowe kierunki wytwarzania i wykorzystania energii” Zakopane 12-14 października 2005 r., s. 158-167.
- [2]. Ferenczi O.: Zasilanie układów elektronicznych. WNT Warszawa 1989.
- [3]. Kolano J.:Sposób i układ sterowania silnika prądu stałego zasilanego z generatora fotowoltaicznego. Biuletyn Urzędu Patentowego 2003 Vol. 758,1, s. 39