

**Andrzej GOSPODARCZYK, Andrzej MAJCHER, Mirosław MROZEK,  
Jan PRZYBYLSKI, Mirosław NESKA**

Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom

## **UKŁAD DO PRECYZYJNEGO ZASILANIA MAGNETRONOWYCH ŹRÓDEŁ PLAZMY**

### **Słowa kluczowe**

Zasilacz magnetronowego źródła plazmy, zasilacz polaryzacji podłoża, zasilacz impulsowy, przetwornica mocy DC/DC.

### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono opracowany w ITeE – PIB układ do precyzyjnego zasilania magnetronowych źródeł plazmy z układem szybkiej reakcji na dynamiczne zmiany parametrów wyjściowych. Przeprowadzono badania opracowanego zasilacza. Wykorzystano w nich autorski symulator mikrozwarc, który umożliwia efektywne testowanie modułu blokowania mikrozwarc na wyjściu zasilacza. Opracowaną konstrukcję charakteryzuje szybka odpowiedź na dynamiczne zmiany obciążenia oraz duża rozdzielczość regulacji przebiegu wyjściowego, co zapewnia właściwą pracę w urządzeniach technologicznych przeznaczonych m.in. do konstytuowania powłok nanometrycznych oraz powłok kompozytowych o dokładnie określonym składzie.

### **Wprowadzenie**

Proces wyładowania magnetronowego cechuje stosunkowo wysoka dynamika zmian jego impedancji, co stwarza specjalne wymagania dla zasilaczy

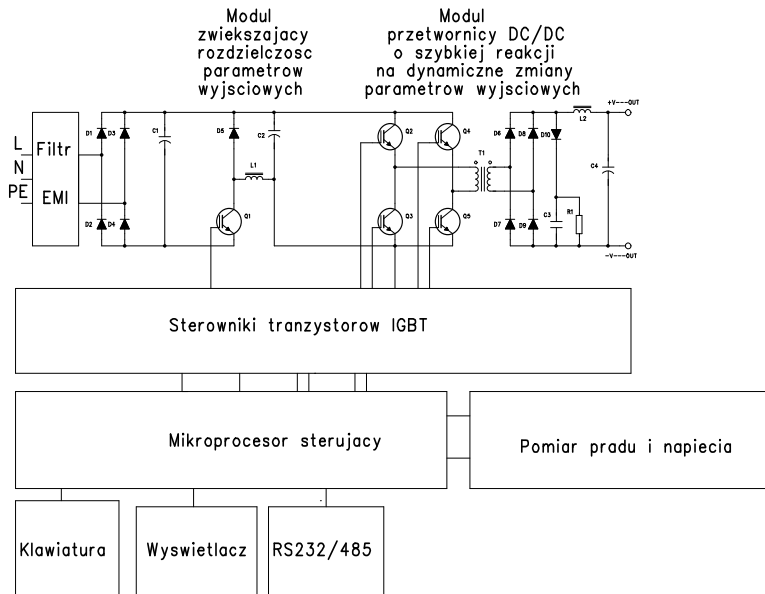
magnetronów. Niewielkie zmiany napięcia zasilania magnetronu skutkują relatywnie dużymi zmianami prądu [1], dlatego zasilacz magnetronu powinien cechować się wysoką rozdzielczością nastaw i wysoką dynamiką działania.

Źródło magnetronowe wymaga zasilania napięciem stałym o wartości do 800 V izolowanym od uziemienia, ponieważ polaryzacja magnetronowego źródła plazmy polega na połączeniu dodatniego bieguna wyjścia zasilacza z uziemioną komorą procesową i ujemnego bieguna z katodą źródła.

Podczas pracy magnetronu, zwłaszcza w początkowym okresie następuje proces wypalania zanieczyszczeń znajdujących się na powierzchni próbki i komory, dla zasilacza jest to zwarcie jego wyjścia i to z bardzo wysoką dynamiką rzędu mikrosekund. Niewyłączone w odpowiednim czasie mikrozwarcie zakłóca proces technologiczny i może spowodować uszkodzenie zasilacza.

## 1. Topologia zasilacza magnetronowego źródła plazmy

Schemat blokowy opracowanej topologii zasilacza magnetronu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy zasilacza magnetronowego źródła plazmy

Dla osiągnięcia zakładanych parametrów zasilacz składa się z dwóch modułów; modułu zwiększającego rozdzielczość parametrów wyjściowych i modułu przetwornicy DC/DC izolującej od potencjału ziemi oraz o szybkiej reakcji na dynamiczne zmiany parametrów wyjściowych.

Urządzenie zasilane jest z napięcia jednofazowego 230 VAC/50 Hz. Filtr EMI zabezpiecza sieć zasilającą przed zakłóceniami generowanymi przez przetwornicę, jak również przetwornicę przed zakłóceniami wprowadzanymi przez sieć zasilającą.

Mostek diodowy składający się z diod D1, D2, D3, D4 przetwarza napięcie zmienne AC na napięcie stałe DC, kondensator C1 stanowi filtr pojemnościowy. Z tego napięcia zasilany jest moduł zwiększający rozdzielczość parametrów wyjściowych zbudowany jako przetwornica DC/DC typu *Step-down (Buck)* [2, 4]. Przetwornica Buck zbudowana jest z tranzystora Q1 (typu IGBT) i diody zwrotnej D5. Filtr wyjściowy przetwornicy składa się z dławika L1 i kondensatora C2. Tranzystor sterowany jest poprzez sterownik tranzystorów typu IGBT z mikroprocesora sterującego. Pomierzone wartości prądów i napięć są podstawą dla mikroprocesora do stabilizacji nastawionych parametrów przetwornicy Buck.

Z napięcia wyjściowego przetwornicy Buck zasilany jest moduł drugiej przetwornicy DC/DC o szybkiej reakcji na dynamiczne zmiany parametrów wyjściowych. Przetwornica zbudowana została z wykorzystaniem topologii przetwornicy typu pełnego mostka z twardym przełączaniem (*Full Bridge Hard Swiching, FBHS*) [2,4]. Posiada ona mostkowy układ tranzystorów Q2, Q3, Q4, Q5 typu IGBT pracujących z częstotliwością modulacji 20kHz i zasilających transformator impulsowy T1, którego wyjście zasila mostek prostowniczy składający się z diod D6, D7, D8, D9. Na wyjściu mostka prostowniczego znajduje się sieć odciążająca złożona z diody D10, kondensatora C3 i rezystora R1. Filtr wyjściowy zasilacza składa się z dławika L2 i kondensatora C4. Wszystkie tranzystory sterowane są poprzez sterowniki tranzystorów typu IGBT z mikroprocesora sterującego. Obsługa kontaktuje się z mikroprocesorem za pomocą klawiatury lub poprzez moduł komunikacyjny RS232/485. Wizualizacja nastaw, odpowiedzi i ustawionych stanów pracy jest na wyświetlaczu. Mierzone wartości prądów i napięć są podstawą dla mikroprocesora do stabilizacji nastawionych parametrów przetwornicy.

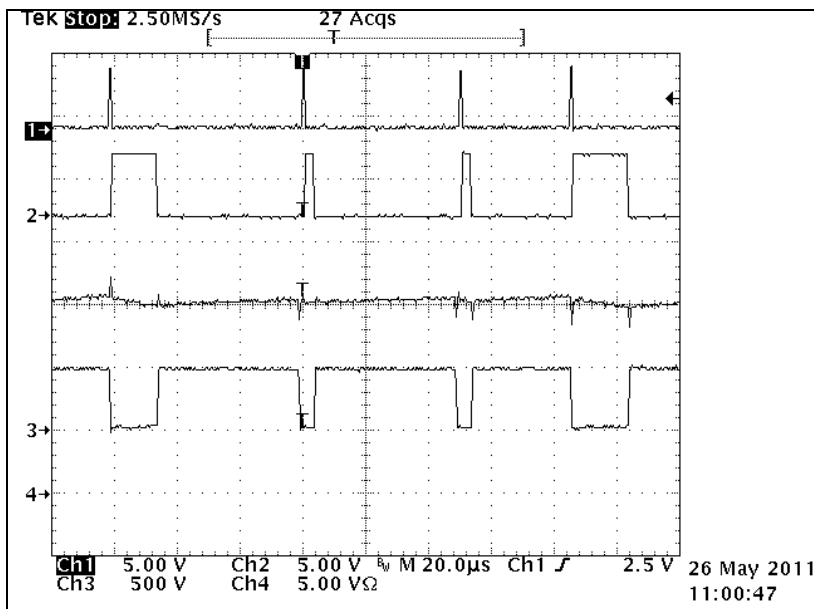
## 2. Badania weryfikacyjne opracowanego zasilacza

Opracowany zasilacz poddano badaniom weryfikacyjnym na stanowisku uruchomieniowym. Badania dotyczyły poszczególnych modułów zasilacza i obejmowały zagadnienia:

- regulacji przebiegu wyjściowego modułu zwiększającego rozdzielczość (przetwornica Buck) dla różnych współczynników wypełnienia sygnału sterującego PWM,
- dynamicznego ograniczenia prądu wyjściowego przetwornicy Buck,
- przeciwdziałania szkodliwemu zjawisku nasycania magnetycznego rdzenia transformatora impulsowego przetwornicy FBHS,
- dynamicznego ograniczenia prądu wyjściowego przetwornicy FBHS,
- reakcji zasilacza na dynamiczne zmiany impedancji obciążenia (mikrozwarcia),
- regulacji prądu, napięcia i mocy przebiegu wyjściowego zasilacza,
- czasów trwania stanów nieustalonych występujących podczas włączania i wyłączenia zasilacza.

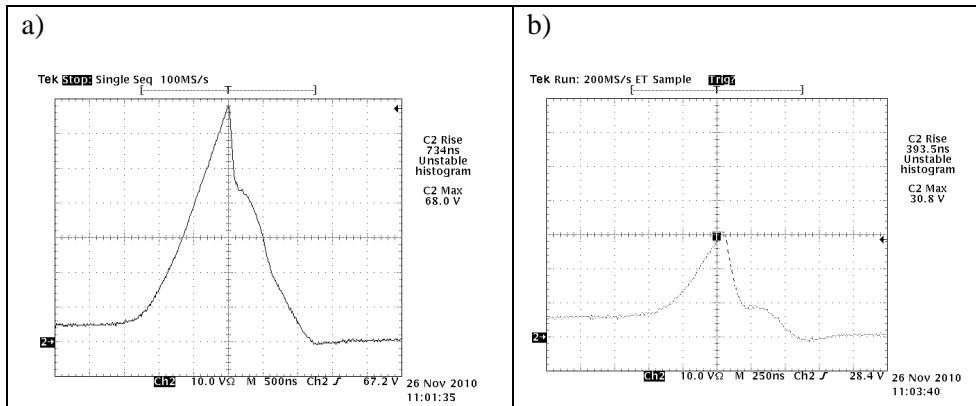
Uzyskano stabilną pracę przetwornicy Buck w całym zakresie regulacji wypełnienia PWM.

Dynamiczne ograniczenie prądu wyjściowego tej przetwornicy (rys. 2) polega na wyłączeniu klucza tranzystorowego w momencie stwierdzenia przekroczenia ustalonej programowo wartości prądu wyjściowego. Wymaga to szybkiego pomiaru prądu sygnału wyjściowego przetwornicy charakteryzującego się obecnością szumów oraz wypracowania dodatkowego sygnału *Reset*, odłączającego sygnał PWM do końca danego okresu

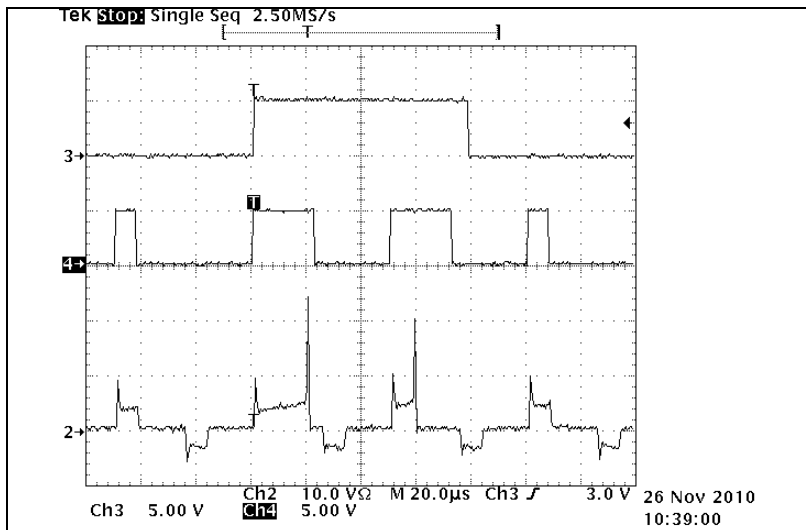


Rys. 2. Dynamiczne ograniczenie prądu wyjściowego przetwornicy Buck: Ch1 – sygnał przekroczenia ustalonej wartości prądu, Ch2 – sygnał resetu, Ch3 – impulsowe napięcie wyjściowe czopera, Ch4 – prąd wyjściowy DC przetwornicy Buck

Negatywnym zjawiskiem związanym z zastosowaniem mostkowego układu tranzystorów typu IGBT w przetwornicy FBHS, a tym samym przeładowaniem rdzenia transformatora impulsowego w kierunku dodatnim i ujemnym, (co pozwala uzyskać z rdzenia transformatora maksymalną moc) jest łatwość wchodzenia rdzenia transformatora impulsowego w nasycenie.



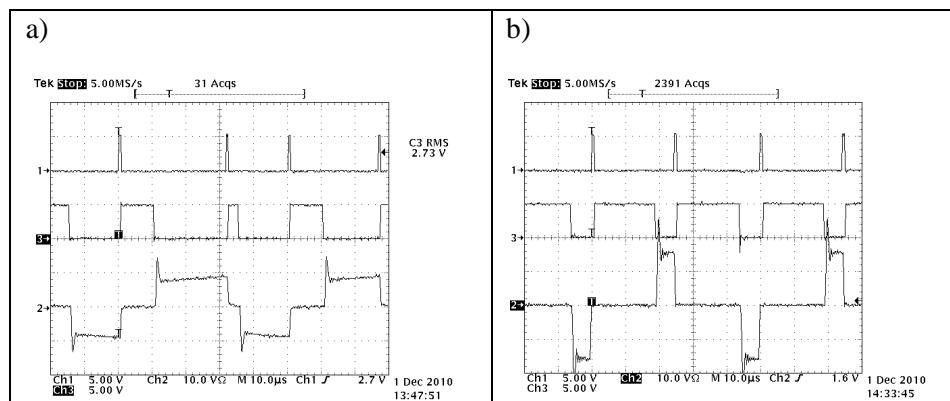
Rys. 3. Kształt prądu pierwotnego transformatora impulsowego bez układu antynasyceniowego przy maksymalnym możliwym do uzyskania napięciu zasilającym 440 VDC (a) oraz z układem antynasyceniowym przy napięciu zasilającym 560 VDC (b), Ch2 – prąd pierwotny transformatora impulsowego



Rys. 4. Zobrazowanie działania układu antynasyceniowego: napięcie zasilające 560VDC, Ch2 – prąd pierwotny transformatora impulsowego, Ch3 – pilot, sygnał z mikroprocesora sygnalizujący zaprogramowaną skokową zmianę wypełnienia sygnału PWM1 z 300 na 900 jednostek na 2 impulsy PWM1, Ch4 – sygnał PWM1 wypracowany przez mikroprocesor

Jest to związane z pojawieniem się składowej DC prądu pierwotnego transformatora impulsowego wynikającej z zamierzonego lub przypadkowego niesymetrycznego sterowania szerokościami impulsów PWM [5]. Na rys. 3a przedstawiono przebieg prądu pierwotnego transformatora impulsowego, gdzie celowo znacznie zróżnicowano szerokości PWM dla napięcia zasilania 440VDC. Na uwagę zasługuje zwłaszcza znaczna stromość narastania tego prądu. W celu ograniczenia tego zjawiska w przetwornicy zastosowano opracowany układ antynasyceniowy. Kształt prądu pierwotnego transformatora impulsowego, gdzie celowo znacznie zróżnicowano szerokości PWM przy pracy z układem antynasyceniowym przedstawiono na rys. 3b. Dodatkowo modyfikacja algorytmu sterowania mikroprocesora dla zachowania pełnej symetrii impulsów PWM zastosowana w tej aplikacji spowodowała całkowite wyeliminowanie zjawiska wchodzenia rdzenia transformatora impulsowego w nasycenie. W celu weryfikacji poprawności działania układu antynasyceniowego opracowano procedurę programową sterownika przetwornicy pozwalającą na ustawianie zróżnicowanych sygnałów PWM. Działanie układu antynasyceniowego przedstawiono na rys. 4.

Podczas pracy magnetronu występują gwałtowne fluktuacje prądu zasilacza związane z dużą niestabilnością zachodzących zmian w plazmie, które to zjawisko przekłada się na dynamiczne zmiany jej impedancji. Zasilacz posiada pętlę sprzężenia zwrotnego, w której zadawanym sygnałem jest wartość prądu, napięcia lub mocy przebiegu wyjściowego. W każdym przypadku wymaga ona ograniczenia nastawionej wartości prądu. Zwiększenie dynamiki tej pętli wiązałoby się z zastosowaniem kosztownych rozwiązań w postaci: szybszego mikroprocesora i przetworników

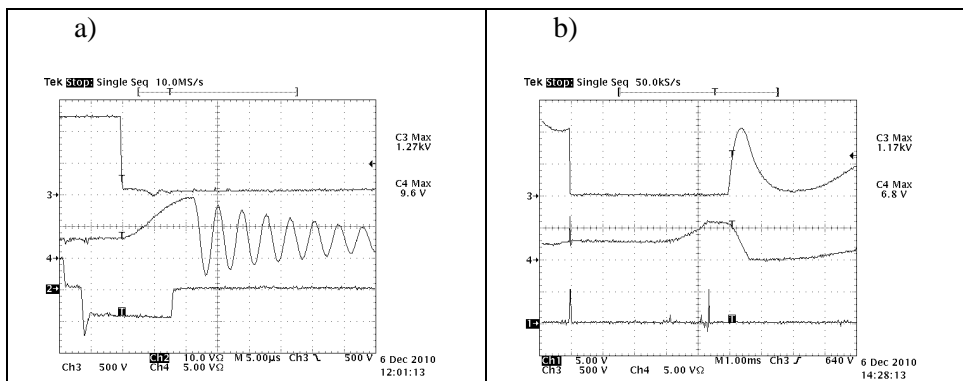


Rys. 5. Zobrazowanie działania układu szybkiej reakcji na dynamiczne zmiany parametrów wyjściowych: a) napięcie zasilające 550 VDC, ograniczony prąd wyjściowy 2,7 ADC,  $U_{wyDC} = 1200V$ , obciążenie 400  $\Omega$ ; b) napięcie zasilające 550 VDC, ograniczony prąd wyjściowy 5,2 ADC, obciążenie 50  $\Omega$ , Ch1 – sygnał przekroczenia nastawionej wartości prądu, Ch2 – prąd pierwotny transformatora impulsowego, Ch3 – sygnał Reset blokady prądu

analogowo-cyfrowych oraz koniecznością złożonej analizy związanej z zapewnieniem stabilności pętli [3]. Dla dynamicznego ograniczenia prądu pierwotnego transformatora impulsowego zastosowano więc układ sprzętowy zawierający: bezstykowy pomiar prądu, detekcję przekroczenia ustawionej wartości zadanej poprzez szybkie komparatory oraz układ zablokowania sygnału PWM.

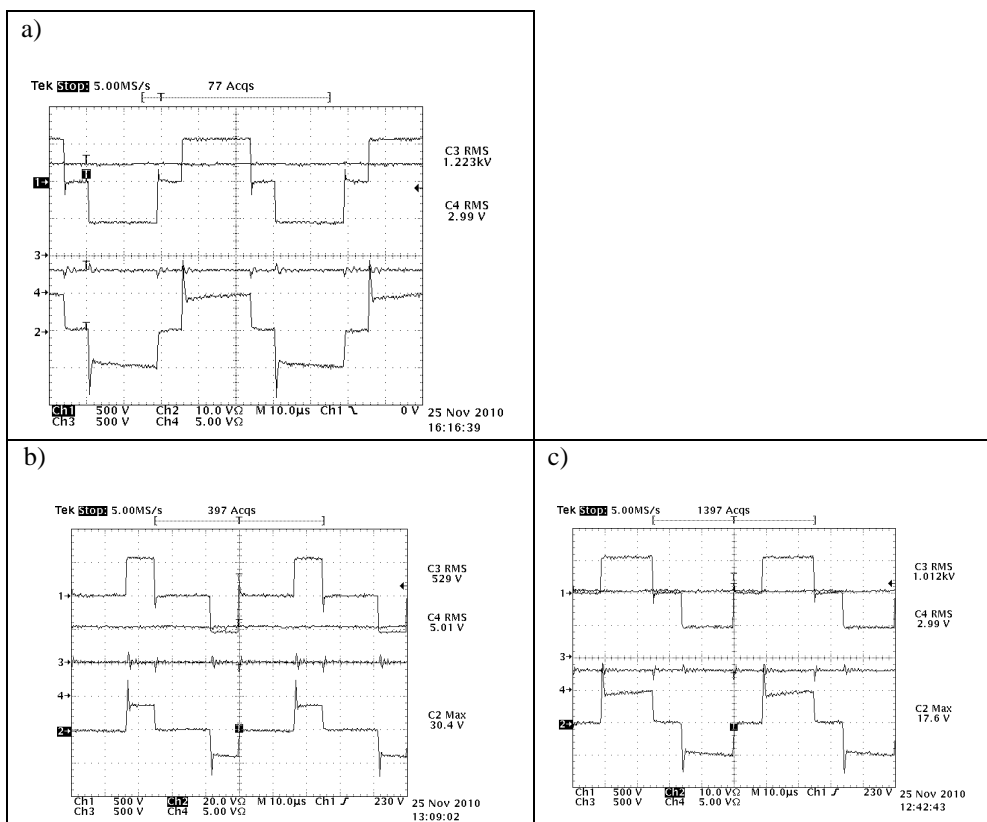
Sygnał blokady PWM jest podawany na wejście przerwań mikroprocesora, który wytwarza sygnał blokady *Reset*, oddziałujący bezpośrednio na sterujący sygnał PWM i powodujący jego wyłączenie do końca danego okresu. Działanie tego układu jest przedstawione na rys. 5 dla różnych wartości prądu ograniczenia. Wartość ograniczenia prądu pierwotnego transformatora impulsowego można ustawić na wartość maksymalną lub zmieniać dynamicznie w celu jego stabilizacji, w czasie o zakresie mikrosekundowym, a więc praktycznie on-line.

Specyfiką pracy zasilaczy magnetronowych źródeł plazmy czy podłoża w procesach plazmowych jest zjawisko tzw. mikrozwarc, a więc dynamicznych zwarc wyjścia zasilacza. Z punktu widzenia technologa zjawisko to powoduje powstawanie wad technologicznych często eliminujących uzyskane powłoki. Z punktu widzenia projektanta przetwornicy dynamiczne, nawet w czasie rzędu mikrosekund zwarcie wyjścia zasilacza może powodować uszkodzenie zasilacza i należy stosować odpowiednie szybkie detekcje tego stanu i zapewnić odpowiednio szybką blokadę zasilacza. Po zablokowaniu zasilacza i samoistnym zaniku mikrozwarcia należy zapewnić automatyczne, możliwie szybkie, z ustalonym czasem, przejście zasilacza do normalnej pracy, gdyż tylko to powoduje



Rys. 6. Zobrazowanie działania układu wyłączania mikrozwarc podczas zwierania wyjścia zasilacza przez układ symulatora mikrozwarc: a) napięcie zasilające 550 VDC, czas trwania zwarcia 10 µs, obciążenie 400 Ω, podczas zwarcia 0 Ω. Ch2 – prąd pierwotny transformatora impulsowego, Ch3 – napięcie wyjściowe zasilacza DC, Ch4 – prąd wyjściowy zasilacza DC; b) układ z automatycznym kasowaniem awarii. Napięcie zasilające 550 VDC, czas trwania zwarcia 5 ms, obciążenie 400 Ω, podczas zwarcia 0 Ω. Ch1 – sygnał awarii prądu wyjściowego DC, Ch3 – napięcie wyjściowe zasilacza DC, Ch4 – prąd wyjściowy zasilacza DC

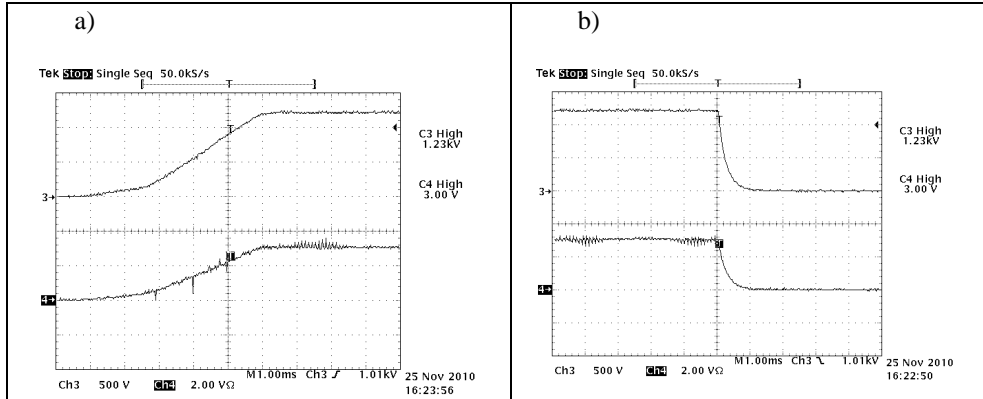
zachowanie ciągłości procesu technologicznego. Ponieważ zjawisko mikrozwarcień występuje tylko przy pracy w komorze próżniowej i jest zjawiskiem przypadkowym i nieprzewidywalnym, dla uruchamiania układu wygaszania mikrozwarcień zaprojektowano i wykonano energoelektroniczny symulator mikrozwarcień, który pozwala w sposób zamierzony w ustalonym czasie, od 1  $\mu$ s do 10 ms, dynamicznie zwierać wyjście zasilacza DC. Czas inicjacji zwarcia wynosi poniżej 1  $\mu$ s. Wyłączanie mikrozwarcień przez zasilacz podczas zwierania jego wyjścia układem symulatora mikrozwarcień przedstawiono na rys. 6a (czas zwarcia 10  $\mu$ s) i na rys. 6b (czas zwarcia 5ms) z automatycznym kasowaniem awarii o czasie trwania 1 ms.



Rys. 7. Oscylogramy obrazujące pracę zasilacza przy regulacji napięcia przy ogr. 1200 VDC (a), prądu przy ogr. 5 ADC(b) i mocy przy ogr. 3 kWDC (c). Napięcie zasilające 550VDC. Ch1 – napięcie zasilające transformator impulsowy, Ch2 – prąd uzwojenia pierwotnego transformatora impulsowego, Ch3 – napięcie wyjściowe zasilacza DC, Ch4 – prąd wyjściowy zasilacza DC



Opracowana przetwornica może stabilizować napięcie wyjściowe do 1200 V (rys. 7a), prąd do 5 A (rys. 7b) lub moc do 3 kW (rys. 7c).



Rys. 8. Oscylogramy obrazujące stany przy włączaniu (a) i wyłączeniu (b) zasilacza. Ograniczenie napięcia wyjściowego 1200 VDC, napięcie zasilające 550 VDC, obciążenie 400  $\Omega$ , Ch3 – napięcie wyjściowe zasilacza DC, Ch4 – prąd wyjściowy zasilacza DC

Na rys. 8a przedstawiono załączenie zasilacza do pracy z nastawionym napięciem wyjściowym 1200 V, uzyskany całkowity czas dojścia do nastawy około 5 ms świadczy o uzyskanej wysokiej dynamice zasilacza. Na rys. 8b przedstawiono wyłączenie zasilacza, z uzyskanym czasem około 1 ms.

## Podsumowanie

Wykorzystane w czasie prac weryfikacyjnych stanowisko badawcze umożliwiło wszechstronną ocenę funkcjonalności i wydajności zasilacza. Wykonane dostrojenie programowych i sprzętowych układów regulacji przyniosło w efekcie zasilacz magnetronowych źródeł plazmy o bardzo dużej dynamice, odporny na zjawisko wchodzenia rdzenia transformatora impulsowego w nasycenie, szybkiej reakcji na dynamiczne zmiany parametrów wyjściowych oraz stosunkowo wysokiej rozdzielczości. Zbudowany dodatkowo symulator mikrozwarcć pozwolił na badanie i weryfikację działania zasilacza w przypadku zwarcia wyjścia przetwornicy w czasie od mikrosekund do milisekund.

Aby zwiększyć konkurencyjność opracowanego zasilacza, opracowano go na napięcie wyjściowe do 1200 VDC typowe dla zasilaczy podłoża, chociaż można go również stosować jako zasilacz do magnetronu na napięcie wyjściowe do 800 VDC. Przy modyfikacji przekładni transformatorów impulsowych i prostowników wyjściowych można zbudować przetwornicę na inne wartości napięć i prądów wyjściowych.

Niektóre problemy wynikały z niedoskonałości dostępnych obecnie półprzewodników dużej mocy. Rozwój technologiczny w tej dziedzinie, jaki się obserwuje na świecie, a zwłaszcza pierwsze półprzewodniki wykonane w technologii z użyciem węgla krzemu mogą znacznie polepszyć parametry tego typu zasilaczy. Planuje się opracowanie zasilacza wykorzystującego takie elementy półprzewodnikowe i w ten sposób uzyskanie wzrostu częstotliwości modulacji, przy redukcji gabarytów i ciężaru zasilacza (dławiki, transformatory impulsowe, radiatory) na jednostkę uzyskanej mocy wyjściowej.

*Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.*

## Bibliografia

1. Miernik K.: Działanie i budowa magnetronowych urządzeń rozpylających. Biblioteka Problemów Eksploatacji, Radom 1997.
2. Tunia H., Barlik R.: Teoria przekształtników, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
3. Kulka Z., Nadachowski M.: Liniowe układy scalone i ich zastosowanie, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1997.
4. Piróg St.: Energoelektronika, Układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej, Wydawnictwo AGH 2006.
5. Citko T.: Energoelektronika. Układy wysokiej częstotliwości, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2007.
6. Kazimierczuk K.M., Czarkowski D.: Resonant power converter. Willey, 1995.
7. Kazimierczuk K.M.: RF power amplifiers. Wiley, 2008.

Recenzent:

**Andrzej MICHAŁSKI**

## Dodatek 1

Parametry techniczne zasilacza magnetronowych źródeł plazmy

Tryby pracy	stabilizacja napięcia
stabilizacja prądu	
stabilizacja mocy	
Napięcie wyjściowe	regulowane do 1200V
Prąd wyjściowy	regulowany do 5 A
Moc wyjściowa	regulowana do 3 kW
Rozdzielczość regulacji napięcia	1 V

---

Rozdzielczość regulacji prądu	0,01 A
Rozdzielczość regulacji mocy	1 W
Interfejs komunikacyjny	RS485/ Modbus, RS232, wejścia/wyjścia cyfrowe.
Chłodzenie	powietrzne – grawitacyjne (bez wentylatorów)
Zabezpieczenia	prądowe, temperaturowe, napięciowe, mikrozwarciowe, przed brakiem przepływu wody chłodzącej źródło.
Zasilanie	AC 230 V, 50 Hz

### **Precision power supply for magnetron plasma source**

#### **Key words**

Power supply for magnetron plasma source, bias power supply, switched power supply, high power DC/DC converter.

#### **Summary**

The paper presents, developed in ITeE – PIB, precision power supply with fast response to dynamic change in output parameters for magnetron plasma source. Investigation of this power supply are described. Used in them original micro short circuit simulator, which allows efficient testing of the short circuit block output module of the power supply. The designed device is characterized by fast dynamic response to load changes and high resolution output. It allows proper operation of technological equipment for such processes as the constitution of the nano-scale coatings and composite coatings with a well defined composition.

