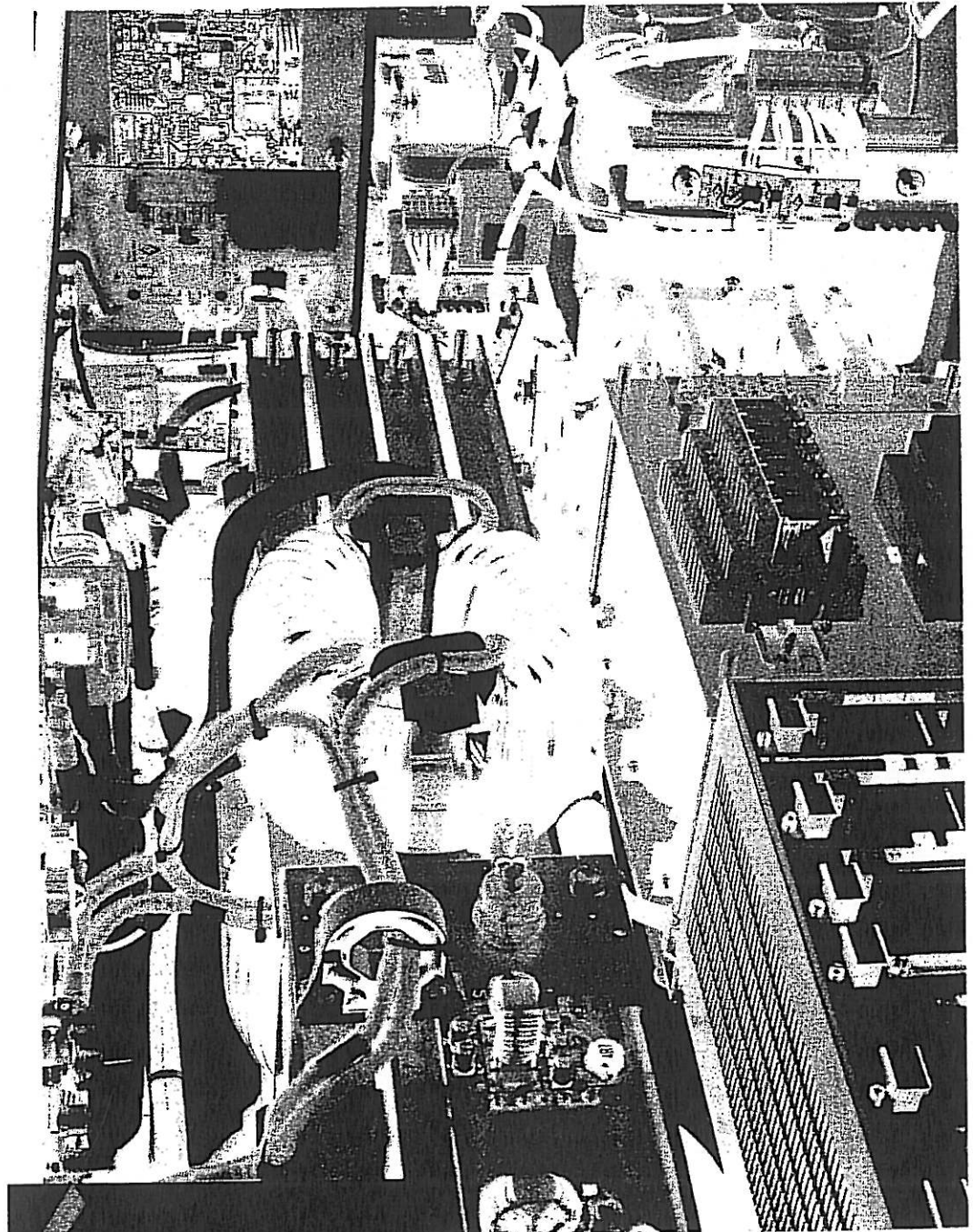


# PRZEGLĄD

ROK LXXXVII

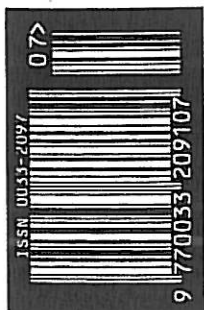
## ELECTRICAL REVIEW

Main topic – Temat numeru  
Electrical Heating



**SIGMA-NOT**  
Spółka z o.o.

cena 26,25 zł  
(w tym 5% VAT)



Zakład Elektroniki Przemysłowej  
ENIKA – str. 5

## Rozchodzenie się zaburzeń w systemach generacji plazmy łukowej

**Streszczenie.** Praca stanowi wprowadzenie do cyklu badań mających na celu analizę rozchodzenia się zaburzeń w systemach generacji plazmy łukowej. Przeanalizowano poszczególne elementy systemu wytwarzania plazmy nietermicznej pod kątem generacji zaburzeń, ich oddziaływania na pracę układu zasilającego oraz zmianę parametrów generowanej plazmy.

**Abstract.** This paper presents an analysis of disturbances interactions inside the gliding arc plasma generation system. All parts of the nonthermal plasma system are described from the point of view of the disturbances generation, their influence on the power system operation and changes of the plasma parameters. (Disturbances propagation in the arc plasma reactor systems).

**Słowa kluczowe:** reaktor plazmowy, wyładowanie elektryczne, transformatory, przekształtnik energoelektroniczny.  
**Keywords:** plasma reactor, electric discharge, transformers, converter.

### Wstęp

Podczas prac badawczych reaktora plazmowego typu GlidArc wielokrotnie stwierdzano zakłócenia pracy aparatury pomiarowej zarówno włączonej bezpośrednio w tory prądowe systemu, jak i tej nieposiadającej połączeń galwanicznych. Obserwowano zakłócenia pracy komputera PC, służącego do archiwizacji danych pomiarowych, oddalonego od systemu plazmowego o kilka metrów. Zaburzenia elektromagnetyczne generowane w systemie generacji plazmy mogą wpływać na parametry wyładowania, zakłócać pracę aparatury pomiarowo-badawczej, urządzeń sterujących automatyką reaktora plazmowego oraz układu zasilania reaktora, a co za tym idzie – zakłócać prowadzony proces technologiczny.

### Reaktor plazmowy

Reaktor plazmowy o technologicznej nazwie GlidArc jest urządzeniem wyładowczym, w którym plazma nietermiczna generowana jest za pomocą łuku elektrycznego.

Wykorzystanie plazmy nietermicznej jest jedną z bardziej obiecujących technologii utylizacji zanieczyszczeń gazowych powstających w procesach przemysłowych.

Główną zaletą reaktora GlidArc jest możliwość generacji nietermicznej plazmy bezpośrednio w gazie poddawanym obróbce plazmowej, przy ciśnieniu atmosferycznym i w warunkach, w jakich gazy wylotowe są emitowane do atmosfery, bez konieczności ich wstępnej obróbki.

Tabela 1. Dane techniczne reaktora plazmowego

Wysokość komory wyładowczej	500 mm
Średnica komory wyładowczej	114 mm
Materiał elektrody zapłonowej	Wolfram $\varnothing$ 1 mm
Materiał elektrod roboczych	Stal kwasoodporna 0H18N
Ilość elektrod roboczych	2, 3, 6
Wysokość elektrod roboczych	100÷250 mm
Odstęp między elektrodami w strefie zapłonu	2÷5 mm
Odstęp między elektrodami w strefie gaszenia	30÷50 mm
Średnica dyszy wlotu gazu	3÷8 mm
Przepływ gazu	0,5÷17 m <sup>3</sup> /h
Gazy plazmotwórcze	argon, azot, powietrze

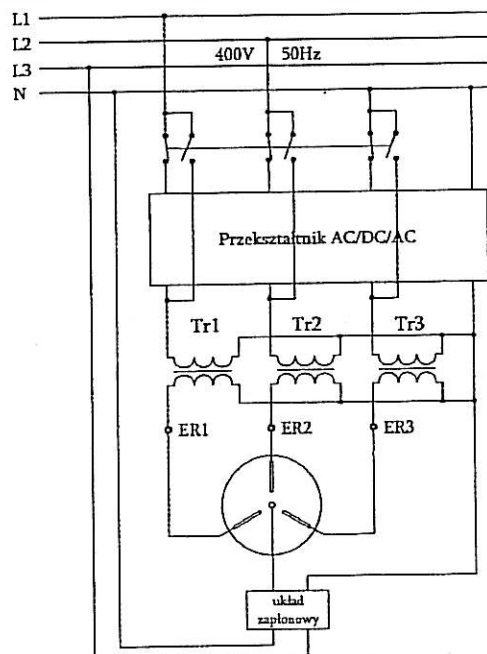
Zapłon wyładowania odbywa się w tzw. strefie zapłonu, i inicjowany jest wyładowaniem pomocniczym palącym się pomiędzy elektrodą zapłonową i elektrodami roboczymi. Elektroda zapłonowa umieszczona jest centralnie w osi komory wyładowczej, a wokół niej rozmieszczone są co 120° płaskie elektrody robocze kształtu nożowego.

Pod wpływem napływającego do komory wyładowczej gazu procesowego wyładowanie ślizga się wzdłuż elektrod zwiększając wielokrotnie swoją długość i objętość. Jednocześnie wyładowanie podlega silnemu schładzaniu i z chwilą, gdy energia dostarczana z układu zasilania nie jest w stanie pokryć strat energii w łuku, następuje jego zgaszenie. Wyładowanie ponownie zapala się w strefie zapłonu i cykl pracy reaktora powtarza się.

Aby zapewnić odpowiednie, nierównowagowe i nietermiczne warunki generowanej plazmy, napięcie zasilające elektrody robocze powinno mieć wartość od 1-2 kV, podczas gdy prąd pary elektrod nie powinien przekraczać 5 A. Takie wartości prądu i napięcia nie są typowe dla wyładowania łukowego, charakterystyczne są dla wyładowania jarzeniowego, generowanego zwykle przy ciśnieniach znacznie niższych od atmosferycznego.

### Układ zasilania w energię elektryczną

Reaktory plazmowe są odbiornikami o szczególnych cechach i właściwą ich pracą mogą zapewnić tylko specjalne układy zasilania. Układy te muszą zapewniać cykliczną pracę reaktora poprzez pewny zapłon wyładowania i jego podtrzymanie przy zachowaniu właściwych parametrów generowanej plazmy.



Rys.1. Układ zasilania reaktora plazmowego

Układ zasilania reaktora plazmowego przedstawia rysunek 1. Podstawowym elementem są odpowiednio zaprojektowane transformatory jednofazowe zasilające elektrody robocze reaktora. Transformatory podwyższają napięcie fazowe do 1,5 kV, mają powiększoną reaktancję rozproszenia, a ich rdzenie wykonane są z Metglasu. Po stronie pierwotnej transformatorów istnieje możliwość załączenia w tor prądowy przekształtnika AC/DC/AC [1]. Przekształtnik ten może pracować jako źródło napięcia lub prądu o regulowanej częstotliwości. Układ zapłonowy jest modułem elektronicznym zasilającym elektrodę zapłonową napięciem 15 kV, 20 kHz.

Tabela 2. Parametry układu zasilania

Parametry	Przekształtnik AC/DC/AC	Transformatory	Układ zapłonowy
Moc wejściowa	10,4 kVA	13,8 kVA	60 VA
Napięcie zasilania	230 V	230 V	230 V
Prąd zasilania	15 A	20 A	0,25 A
Częstotliwość wejściowa	50 Hz	10÷20 kHz	50 Hz
Napięcie wyjściowe	300 V	1,5 kV	15 kV
Prąd wyjściowy	0÷10 A	3 A	40 mA
Częstotliwość wyjściowa	10÷200 Hz	50 Hz	20 kHz

### Źródła zaburzeń

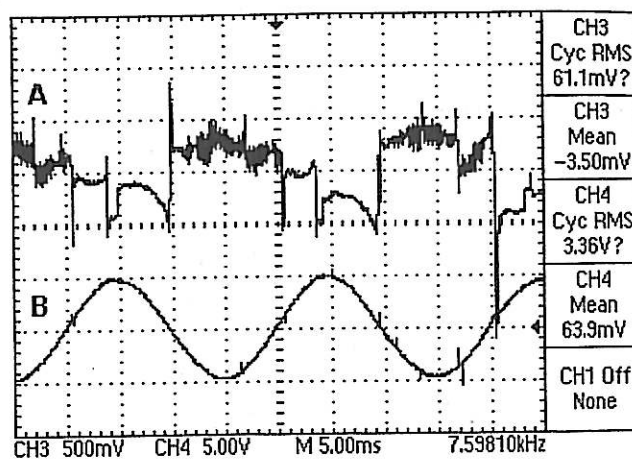
W systemie generacji plazmy występują cztery główne źródła zakłóceń: (1) reaktor plazmowy, (2) transformatory, (3) przekształtnik AC/DC/AC, (4) układ zapłonowy. Generowane zaburzenia w układzie reaktor plazmowy-zasilacz mogą rozchodzić się wewnątrz i na zewnątrz systemu, a propagacja może przebiegać drogą przewodzoną lub drogą radiacji. Zaburzenia mogą być transportowane drogą radiacji w postaci fal do innych urządzeń będących w sąsiedztwie systemu generacji plazmy.

Charakterystyka dynamiczna wyładowania ślizgającego się po elektrodach reaktora zmienia się wraz ze zmianami warunków, w jakich zachodzą procesy jonizacji i dejonizacji, a te zależą od: (1) składu chemicznego gazu procesowego, (2) intensywności chłodzenia wyładowania, (3) parametrów elektrycznych układu zasilającego, (4) budowy reaktora. Skomplikowane procesy fizyczne, zachodzące w plazmie łukowej, silnie nieliniowe, niejednoznaczne, niestacjonarne i stochastyczne charakterystyki prądowo-napięciowe uniemożliwiają opracowanie kompleksowego modelu wyładowania w reaktorze GlidArc. Brak modelu uniemożliwia analityczne określenie charakteru i poziomu zaburzeń generowanych przez reaktor, a w konsekwencji utrudnia skuteczne przeciwdziałanie im. Przeważająca część zaburzeń generowanych przez reaktor plazmowy ma źródło w zjawiskach fizycznych zachodzących w obszarze wyładowania i przeciwdziałanie im może prowadzić do pogorszenia warunków generacji plazmy.

W instalacjach przemysłowych, wykonana ze stali i uziemiona obudowa reaktora plazmowego stanowi dobry ekran dla zaburzeń emitowanych drogą radiacji. Większy wpływ na pracę systemu wywierają zakłócenia przewodzone.

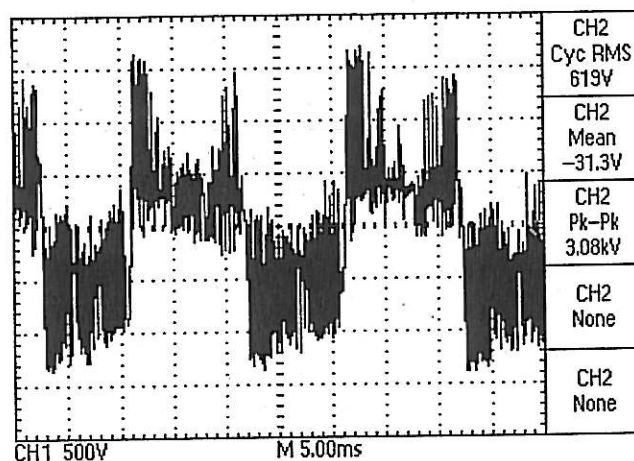
Z obserwacji oscylograficznych (rys. 2) wynika, że napięcie zasilające reaktor ulega silnemu odkształceniu, podczas gdy prąd zachowuje przebieg sinusoidalny.

W dolnej i górnej połowie napięcie ma przebieg charakterystyczny dla wyładowania palącego się układzie trzech elektrod z wyraźnymi przepięciami zapłonowymi. Obserwowane, w górnej połowie napięcia, szumy pochodzą od układu zapłonowego.



Rys.2. Przebieg napięcia (A) i prądu (B) jednej fazy reaktora plazmowego przy zasilaniu z transformatorów

Układ zapłonowy jest elementem wprowadzającym do systemu generacji plazmy zakłócenia wysokiej częstotliwości. Pod wpływem przepływającego przez komorę wyładowczą gazu wyładowanie zapłonowe jest rozdmuchiwane i przybiera charakter wielu iskier elektrycznych palących się między elektrodą zapłonową a elektrodami roboczymi reaktora. Iskry te na przemian zapalają się i gasnąc powodują silne i losowe odkształcenie napięcia zapłonowego (rys. 3).

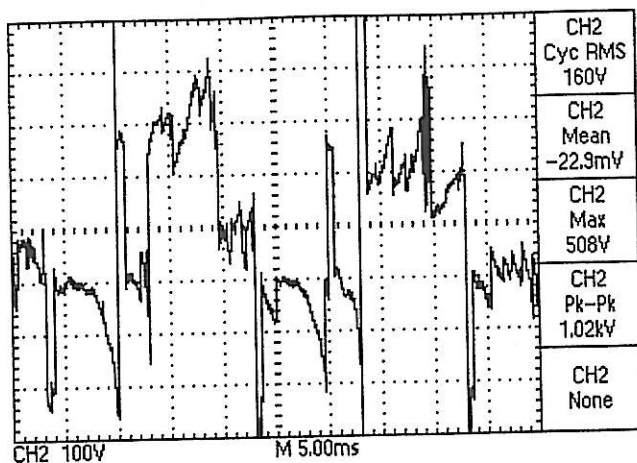


Rys.3. Przebieg napięcia na elektrodzie zapłonowej

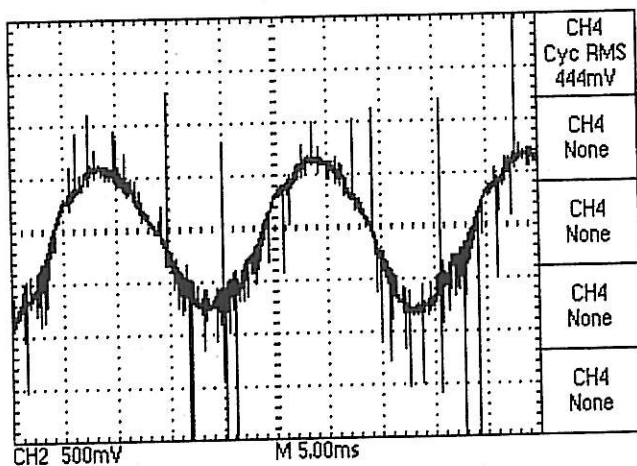
O ile dla gazów o wysokich potencjałach jonizacji układ zapłonowy musi pracować bez przerwy, o tyle dla gazów o niskim potencjale jonizacji możliwe jest odłączenie obwodu zapłonowego po rozruchu reaktora. Odłączenie obwodu zapłonowego skutkuje wyraźnym zmniejszeniem udziału zakłóceń wysokiej częstotliwości w przebiegu napięcia fazowego reaktora (rys. 4). Brak zapłonu inicjującego powoduje natomiast niekorzystny wzrost niestabilności wyładowania objawiającego się wyraźnymi przerwami bezprądowymi.

Obwód zapłonowy zamyka się przez fazy zasilające reaktor plazmowy, dlatego też zakłócenia od wyładowania zapłonowego przenoszą się torami prądowymi na stronę wtórną transformatorów zasilających. Włączając w tory aparaturę pomiarową należy mieć na uwadze, że krótkotrwałe przepięcia od układu zapłonowego mogą sięgać 15 kV. Przepięcia te pomniejszone o przekładnię transformatora mogą przenosić się na jego stronę pierwotną. W obwodzie zapłonowym obserwuje się też występowanie prądu sinusoidalnego 50 Hz (rys. 5), którego nie można powiązać z charakterem wyładowania iskrowego na elektrodzie zapłonowej.





Rys.4. Przebieg napięcia fazowego reaktora przy odłączonym obwodzie zapłonowym



Rys.5. Przebieg prądu w obwodzie zasilania elektrody zapłonowej

Obserwowany przebieg prądu 50 Hz w obwodzie wtórnym układu zapłonowego można interpretować występowaniem prądu asymetrii w przewodzie neutralnym strony wtórnej transformatorów. Elektroda zapłonowa, umieszczona centralnie w komorze reaktora, jest punktem neutralnym dla obciążenia niesymetrycznego, jakim są trójfazowe łuki w reaktorze GlidArc.

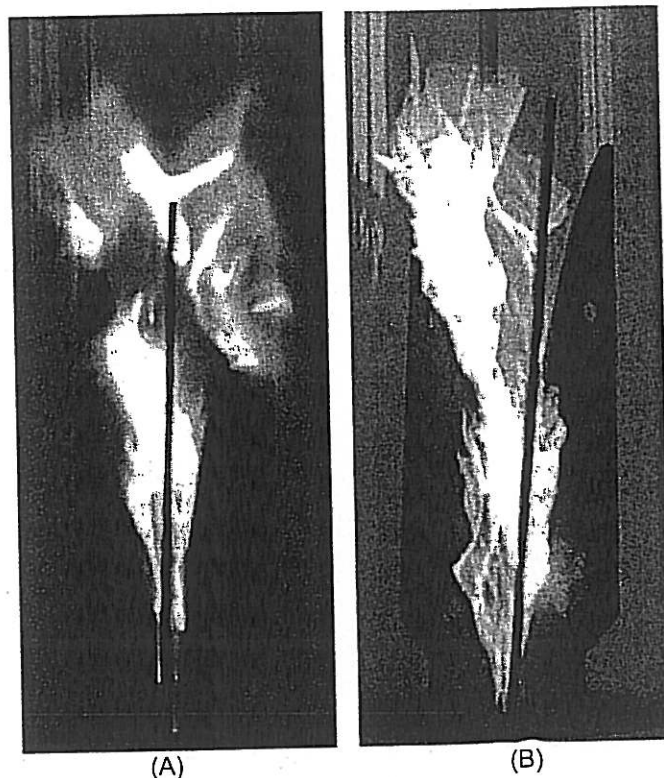
Włączone w tory prądowe transformatory mają nie tylko za zadanie zapewnienie właściwych parametrów zasilania reaktora plazmowego, ale również separują go od przekształtnika AC/DC/AC i sieci zasilającej. Zdolność separacji zależy w dużej mierze od pasma przenoszenia transformatora, ale przede wszystkim od materiału, z jakiego wykonano rdzeń, jak również od sposobu nawinięcia uzwojeń i grupy połączeń. Transformatory mogą głównie separować zakłócenia, które rozłożyć można na wyższe harmoniczne, a przede wszystkim na ich składowe symetryczne. Zakłócenia, których nie można opisać przebiegami sinusoidalnymi, mogą przenosić się bezstratnie na obie strony transformatorów.

Transformatory, ze względu na powiększoną reaktancję rozproszenia, są także źródłem zakłóceń. Strumienie rozproszenia, zamykając się przez powietrze i elementy otoczenia, sprzegają się z aparaturą pomiarową i mogą zakłócać prawidłowe jej funkcjonowanie.

W przekształtnikach energetycznych AC/DC/AC występuje szerokie spektrum zaburzeń. Wszystkie te zaburzenia są dobrze rozpoznane i uwzględniane na etapie projektowania przekształtników. W systemach, w których przekształtniki współpracują z łukowymi reaktorami plazmowymi pojawiają się jednak dotychczas

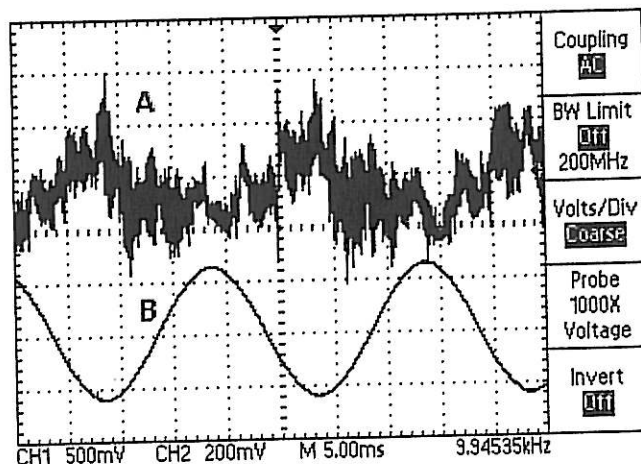
nierozpoznane problemy oddziaływań zakłócających: (1) zakłócenia generowane przez reaktor i wpływające na pracę przekształtnika, (2) zakłócenia generowane przez przekształtnik i oddziałujące na pracę reaktora.

Włączenie przekształtnika AC/DC/AC w obwód zasilania reaktora plazmowego zmienia charakter wyładowania [2, 3]. Obserwuje się wyraźny wpływ częstotliwości kluczowania napięcia o częstotliwości 10 kHz. Wyładowanie odbywa się w postaci „serpentyn”, składających się z isker elektrycznych o białym zabarwieniu (rys. 6B), natomiast obszar plazmo-chemicznego oddziaływania wyładowania jest znacznie ograniczony.



Rys.6. Wyładowanie w reaktorze GlidArc przy zasilaniu: A – z samych transformatorów, B – z przekształtnika AC/DC/AC i transformatorów

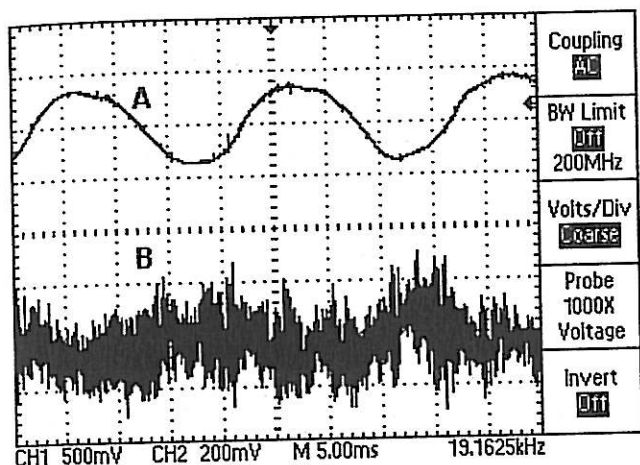
Zamiana materiału rdzenia transformatorów zasilających z Metglasu na blachę elektrotechniczną powstrzymuje niekorzystny rozwój wyładowania, ale ogranicza jego moc, prowadząc do nieefektywnego wykorzystania przekształtnika AC/DC/AC.



Rys.7. Oscylogram napięcia (A) i prądu (B) dla pracy falownika jako źródła prądu

Podczas pracy falownika jako źródła prądu obserwuje się silne odkształcenie napięcia wyładowania łukowego (rys. 7). Po przeprowadzeniu analizy FFT stwierdzono wysoką zawartość wyższych harmonicznych, spośród których najbardziej uwidacznia się napięcie o częstotliwości 10 kHz. Prąd zachowuje przebieg sinusoidalny zgodnie z programowo zadany wymuszeniem.

Przy pracy przekształtnika jako źródła napięcia obserwuje się silne odkształcenie prądu łuku przy równoczesnym niewielkim odkształceniu przebiegu napięcia od sinusoidy (rys. 8). Odkształcenia prądu i napięcia wyładowania zakłócają pracę przekształtnika AC/DC/AC i, w konsekwencji, mogą prowadzić do uszkodzenia elementów elektronicznych.



Rys. 8. Oscylogram napięcia (A) i prądu (B) dla pracy falownika jako źródła napięcia

#### Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań doświadczalnych wynika, że wyładowanie w reaktorze plazmowym typu GlidArc generuje dodatkowe prądy i napięcia o częstotliwości

będącej wielokrotnością częstotliwości sieciowej. Pracujący reaktor plazmowy generuje nie tylko harmoniczne o częstotliwości sieciowej, tj. z zakresu 50 Hz-2,5 kHz, ale również może generować harmoniczne w zakresie częstotliwości radiowych, tj. powyżej 9 kHz, zarówno jako przewodzone, jak i promieniowane.

Włączenie przekształtnika w układ zasilania reaktora plazmowego pociąga za sobą wyraźne zwiększenie udziału wyższych harmonicznych w napięciu wyładowania łukowego.

Przeprowadzona analiza ujawniła dużą zawartość zakłóceń wysokiej częstotliwości pochodzących od wyładowania palącego się na elektrodzie zapłonowej reaktora.

#### LITERATURA

- [1] Stryczewska H.D., Sikorski A., Ruszczyk A., Komarzyniec G., Gliding arc plasma reactor supplied from AC/DC/AC inverter, *18th International Symposium on Plasma Chemistry*, Kyoto, Japa, August 26-31 (2007)
- [2] Komarzyniec G., Stryczewska H.D., Diatczyk J., Wpływ parametrów źródła zasilającego na chakaterystyki reaktora plazmowego ze ślizgającym się łukiem elektrycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 71(2008), 60-63
- [3] Stryczewska H.D., Komarzyniec G., Janowski T., Comparison of the Features of Arc Plasma Reactor Powered from Transformer and Inverter Type Supplied, *11th International Symposium on High Pressure, Low Temperatura Plasma Chemistry HAKONE*, Oleron Island, France, 7-12 September (2008), 555-559

**Autorzy:** dr inż. Grzegorz Komarzyniec, E-mail: [g.komarzyniec@pollub.pl](mailto:g.komarzyniec@pollub.pl); mgr inż. Włodzimierz Janowski, E-mail: [w.janowski@pollub.pl](mailto:w.janowski@pollub.pl); prof. dr hab. inż. Henryka Danuta Stryczewska, E-mail: [h.stryczewska@pollub.pl](mailto:h.stryczewska@pollub.pl); dr inż. Joanna Pawła, E-mail: [askmik@hotmail.com](mailto:askmik@hotmail.com); dr inż. Jarosław Diatczyk, E-mail: [j.diatczyk@pollub.pl](mailto:j.diatczyk@pollub.pl); Politechnika Lubelska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin