

**ŹRÓDŁA PLAZMY NIETERMICZNEJ DLA TECHNOLOGII OCHRONY ŚRODOWISKA****Marcin HOŁUB, Stanisław KALISIAK, Tomasz JAKUBOWSKI**Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny  
tel: 091 449 48 05 fax: 091 449 43 17 e-mail: mholub@zut.edu.pl

**Streszczenie:** W większości instalacji wykorzystujących technicznie plazmę nietermiczną używa się wzbudzenia poprzez pole elektryczne. Szczególnie dynamicznie rozwijającym się polem zastosowań są układy przeznaczone do generacji plazmy nietermicznej na potrzeby technologii ochrony środowiska. Artykuł prezentuje krótki przegląd typowych źródeł, podając jednocześnie podstawowe, wykorzystywane w poszczególnych przypadkach układy zasilające ze szczególnym uwzględnieniem zasilaczy energoelektronicznych. Jako ilustrację wpływu doboru układu zasilającego do konkretnej aplikacji zaprezentowano wyniki pomiarów elektrycznych oraz kamerą iCCD pojedynczego układu rozładowego dla różnych kształtów i typów napięcia.

**Słowa kluczowe:** plazma nietermiczna, energoelektroniczne układy zasilające

**1. WSTĘP**

Źródła plazmy nietermicznej wykorzystywane są w wielu technikach redukcji i usuwania związków, mikroorganizmów i materiałów szkodliwych. Aplikacje obejmują przede wszystkim redukcję ilości zanieczyszczeń w gazach powstających podczas procesów spalania (najczęściej komponentami kluczowymi są tlenki siarki, azotu oraz rtęć), zanieczyszczeń organicznych (w tym redukcję ilości emitowanych lotnych związków organicznych oraz odorów, a także redukcję ilości bakterii/wirusów), aerozoli, oraz poprawę jakości wody. Do podstawowych zalet instalacji tego typu należą: niski koszt eksploatacyjny oraz w wielu przypadkach bezodpadowy sposób pracy systemu. Z racji pola zastosowania wymagane są źródła plazmy pracujące w ciśnieniu atmosferycznym – AP-NTP (atmospheric pressure – non thermal plasma).

**1.1. Podstawowe rodzaje źródeł plazmy nietermicznej**

W praktyce wydaje się, iż do podstawowych i najczęściej wykorzystywanych w aplikacjach związanych z ochroną środowiska rodzajów źródeł plazmy AP-NTP należą:

- źródła oparte o wyładowania koronowe,
- źródła oparte o wyładowania z barierą dielektryczną DBD (dielectric barrier discharge),
- źródła plazmy mikrofalowej,
- źródła electron beam.

Tablica 1 podsumowuje najważniejsze parametry układów zasilających dla czterech wymienionych powyżej układów źródeł.

Tablica 1. Podstawowe parametry układów zasilających typowe źródła plazmy nietermicznej

Typ źródła	Zakres napięć zasilających [kV]	Typowy zakres częstotliwości [kHz]	Typowy zakres mocy [kW]
Wyładowanie koronowe	20 - 150	0,01 – 1	10 - 120
DBD	1 – 30	0,05 – 100	0,01 – 40
Mikrofalowe	-	2 450 000	0,1 – 10
E-beam	20 – 200	-	50 – 250

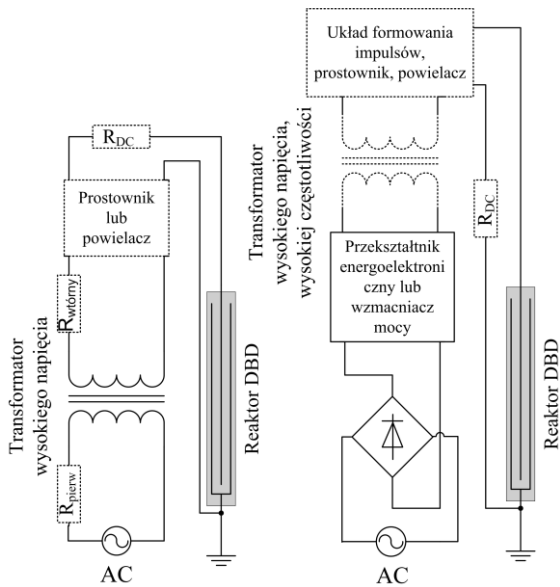
Każda z wymienionych możliwości generacji plazmy będzie się charakteryzowała inną konstrukcją reaktora. W dużym uproszczeniu powiedzieć można, iż konstrukcje reaktorów do oczyszczania gazów bazujące na wyładowaniu koronowym oraz na generacji przez działa elektronowe umożliwiają budowę instalacji dla znacznych wartości przepływów (do 150 000 Nm<sup>3</sup>/h). Konstrukcje oparte o DBD najczęściej stosuje się w średnim zakresie przepływów (do ok. 50 000 Nm<sup>3</sup>/h), źródła mikrofalowe najczęściej używane są do konstrukcji niewielkich układów, w tym układów „pochodni” plazmowych (plasma torch) do zastosowań usuwających toksyczne komponenty gazu roboczego [1].

**1.2. Rodzaje układów zasilających źródła plazmy nietermicznej**

Integralną częścią źródła jest system zasilający. Jak prezentujemy w dalszej części opracowania typ i parametry napięcia zasilającego, a więc w konsekwencji rodzaj i właściwości zasilacza mogą wywierać olbrzymi wpływ na sposób pracy źródła. Najbardziej oczywistym efektem będzie różnica w ilości mocy dostarczonej do układu reaktora, ale układ zasilania ma również wpływ na fundamentalne procesy zachodzące w przestrzeni międzyelektrodowej.

Podstawowym podziałem układów zasilających jest podział ze względu na typ generowanego napięcia. Do najważniejszych grup zaliczyć należy układy wysokiego napięcia DC, układy AC (nisko- oraz

wysokoczęstotliwościowe), układy impulsowe unipolarne w tym z polaryzacją DC jak i bipolarne.

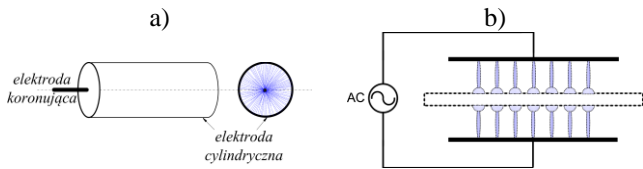


Rys. 1. Podstawowe schematy ideowe układów zasilania dla źródeł plazmowych

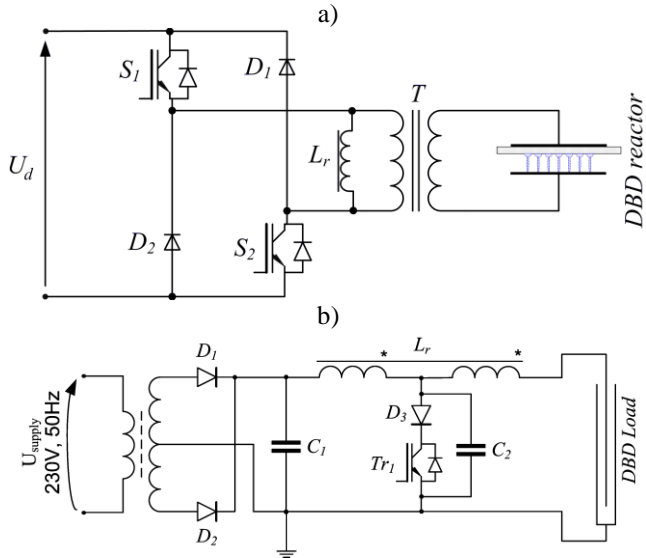
## 2. WYBRANE PRZYKŁADY ŹRÓDEŁ PLAZMY NIETERMICZNEJ

Reaktory plazmy nietermicznej stosowane do usuwania zanieczyszczeń z gazów odlotowych wykonywane są najczęściej w oparciu o barierę dielektryczną (DBD - z ang. Dielectric Barrier Discharge). W zależności od konstrukcji reaktora generowana plazma może mieć charakter wyładowań powierzchniowych, objętościowy [2] lub powierzchniowo - objętościowy [3]. Każda konstrukcja reaktora jak i rodzaj generowanej plazmy wymagać będzie zasilania ze źródła elektrycznego [4], którego kształt fali napięcia i prądu oraz parametry ilościowe zapewnią optymalną sprawność procesu oczyszczania. W literaturze spotkać można wiele propozycji rozwiązań generatorów napięć i prądów służących do zasilania reaktorów plazmy nietermicznej [4]. Ponieważ podstawowym zadaniem układu reaktor - zasilacz jest generowanie bezpośrednio w gazie elektronów o energii nieprzekraczającej 10eV (do zainicjowania większości pożądanych reakcji chemicznych), stąd niezbędne dla uzyskania pożądanego natężenia pola elektrycznego w gazie jest napięcieo wartościach od kilku do kilkudziesięciu kilowoltów [5]. Generowanie elektronów o zbyt niskiej energii prowadzi będzie do powiększania strat cieplnych w gazie. Innym czynnikiem, jaki koniecznie należy uwzględnić jest różnica czasu pomiędzy jonizacją i dysocjacją gazu a dyfuzją. Zbyt częste dostarczanie energii prowadzi do pogorszenia sprawności procesu pomimo dostarczenia większej ilości energii do reaktora [6]. Stąd widać, że zarówno czas trwania wzbudzenia środowiska gazowego jak i czas przerwy w każdym przypadku powinny podlegać optymalizacji. Innym rozwiązaniem, które znalazło zastosowania w technologii usuwania zanieczyszczeń z gazów jest impulsowe wyładowanie koronowe (PCD). Generację elektronów bezpośrednio w środowisku gazowym uzyskuje się najczęściej w wyniku podania na układ elektrod (często pręt – cylinder jak na rys. 2a) krótkotrwałych impulsów napięcia o dużej stromości narastania (rzędu kilkuset woltówna nanosekundę) i amplitudzie od kilkunastu

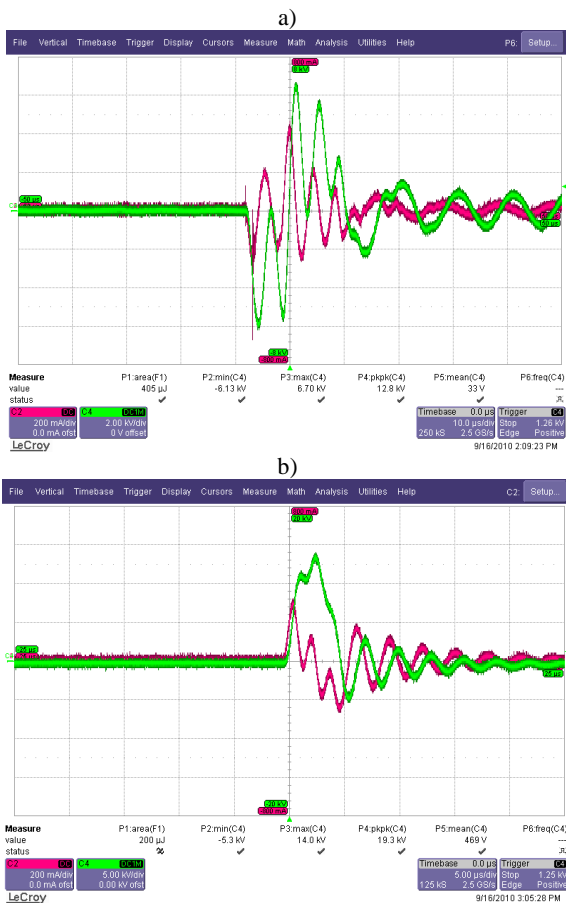
do powyżej stu kilowoltów. Następnym bardzo ważnym warunkiem optymalnej pracy reaktora jest zapewnienie równomiernego rozkładu plazmy w całej objętości reaktora. Jest to jedno z najtrudniejszych zadań, gdyż na równomierność generowanej plazmy mają wpływ zarówno parametry konstrukcyjne reaktora, rodzaj i parametry elektryczne układu zasilania jak również szereg właściwości fizykochemicznych gazu. Generatory wysokiego napięcia (HV) napięć typu AC i częstotliwości pracy od kilkuset nawet do 100 kHz o działaniu ciągłym stosowane w technologii NTP mają klasyczną topologię przekształtników rezonansowych (typu pełnego mostka lub półmostka tranzystorowego). Praktyka stosowania wysokich napięć fali sinusoidalnej do wytwarzania plazmy nietermicznej ma ponad stuletnią historię (pierwszy ozonator z barierą dielektryczną zbudował von Siemens w 1858r.), stąd opis zjawisk zachodzących w reaktorze typu DBD był przedmiotem licznych badań i doczekał obfitej literatury [7]. Niekorzystnym zjawiskiem, jakie daje się zaobserwować w powietrzu dla sinusoidalnego zasilania jest fakt powstawania wyładowań filamentarnych, zwłaszcza w przypadku gdy wymagana jest wyższa moc jednostkowa układu. Wyładowanie filamentarne jest zjawiskiem niepożądanym z wielu powodów, najważniejszym jest generowanie niekorzystnych związków NOx [7], natomiast intensywne punktowe oddziaływanie na dielektryk powoduje degradację jego struktury powierzchniowej, co w konsekwencji prowadzi do znacznego ograniczenia czasu pracy reaktora. Uzyskanie plazmy jednorodnej w przypadku gdy układ zasilania generuje wysokie napięcie o stromości kilkuset woltów na nanosekundę jest praktykowane lecz wykonanie takiego generatora w technice półprzewodnikowej jest obecnie bardzo trudne. Stąd zaczęto poszukiwać rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów jak i kształtu fali napięcia zasilającego tak aby uzyskać wyładowani jednorodne – dyfuzyjne przy niższych szybkościach narastania napięcia. W Laboratorium Energoelektronicznych Przekształtników Technologii Zimnej Plazmy opracowano i przebadano topologie generatorów wysokonapięciowych generujących krótkotrwałe impulsy unipolarnych lub bipolarnych [8,9]. Na rys. 3 przedstawiono dwie topologie generatorów impulsowych HV - a) bipolarnego i b) unipolarnego, które posłużyły do zasilania celki wyładowczej zaprezentowanej na rys. 5. Elektrody celki wykonane są z brązu w formie walca o powierzchni kontaktowej z dielektrykiem w postaci koła o średnicy 1 cm. Odpowiednie wyprofilowania pozwoliło na uzyskanie jednorodnego pola elektrycznego strefie wyładowań. Wyniki przeprowadzonych badań w postaci przebiegów napięć i prądów reaktora jak i obraz plazmy wygenerowanej w reaktorze zaprezentowano na rys. 4a, 4b i 6a, 6b. Można zaobserwować, iż w przypadku impulsu unipolarnego da się zauważyć większą jednorodność wyładowania w szczelinie wyładowczej, co jest potwierdzone faktem, iż w prądzie reaktora brak jest charakterystycznych impulsów o czasie trwania w przedziale nanosekund, typowego dla wyładowania filamentarnego. Przebiegi prądu i napięcia reaktora zarejestrowano oscyloskopem LeCroy WaveRunner 6100A z sondą napięciową PP005A i prądową CP031. Zdjęcia wykonano kamerą iCCD z czasem naświetlania wynoszącym 600μs, co przy częstotliwości fali zasilającej wynoszącej około 16 kHz pozwalało na zarejestrowanie 10 okresów napięcia zasilającego.



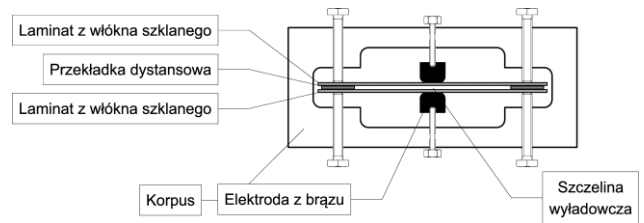
Rys. 2. Typowe źródła plazmy APNTP: a) reaktor z wyładowaniem koronowym w układzie cylinder – przewod; b) typowy reaktor DBD



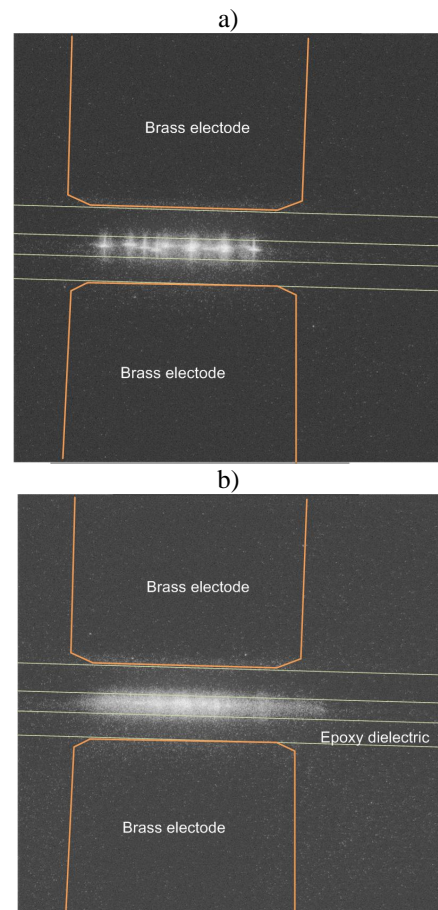
Rys. 3. Przykładowe schematy energoelektronicznych źródeł zasilających: a) rezonansowe źródło AC; b) źródło impulsowe. Oznaczenia:  $S_1, S_2, Tr_1$  – tranzystory IGBT;  $D$  – diody impulsowe;  $L_r$  – dławik rezonansowy;  $C$  – kondensator;  $T$  – transformator wysokiego napięcia



Rys. 4. Przykładowe oscylogramy napięć i prądów zasilających: a) rezonansowe źródło AC; b) źródło impulsowe



Rys. 5. Schemat konstrukcyjny pojedynczej celi wyładowczej typu DBD



Rys. 6. Analiza źródła plazmy przy użyciu kamery iCCD: a) źródło rezonansowe AC; b) źródło impulsowe

### 3. WNIOSKI

Przeprowadzone badanie pozwalają jednoznacznie stwierdzić że kształt fali napięcia zasilającego ma istotny wpływ na jednorodność wyładowania w szczelinie powietrznej, a co za tym idzie na przebieg reakcji fizykochemicznych. Celem pracy było przebadanie możliwości generowania plazmy nietermicznej jednorodnej w przypadku wykonania generatora wysokonapięciowego wykonanego z tranzystorów IGBT. Obraz z kamery iCCD pokazuje dużą jednorodność uzyskanej plazmy w przypadku użycia przekształtnika o topologii przedstawionej na rys. 3. Dodatkowym potwierdzeniem, że uzyskana plazma w reaktorze DBD jest jednorodna jest brak krótkotrwałego impulsu prądu o czasie trwania od kilku do kilkudziesięciu nanosekund płynącego przez reaktor. Natomiast w badanym przypadku czas trwania impulsu był rzędu kilku mikrosekund. Powyższy czas rozładowania uzyskano bez

potrzeby stosowania rezystancji o wartości oporności od kilkudziesięciu do kilkuset kiloomów.

#### 4. BIBLIOGRAFIA

1. Cho M.H., KO K.B., Byun Y.C.: Environmental Applications of Plasma 8 APCPST at Carins, Aistralia July 3, 2006.
2. Pietsch G.J., Gibalov V. I.: Dielectric barrier discharge and ozone synthesis. *Pure & Appl. Chem.*, 1998. Vol. 70, No. 6, pp. 1169-1174.
3. Muller S., Zahn R.J., Grundmann J.: Extraction of Ions from Dielectric Barrier Discharge Configurations. *Plasma Processes and Polymers*. 2007. Vol. 4, pp. 1004-1008.
4. Hołub M., Kalisiak S.: Przekształtniki energoelektroniczne dla technologii atmosferycznej plazmy nietermicznej (AP-NTP). *Przegląd Elektrotechniczny* nr 1/2010, str. 199-206.
5. Wichaidit C., Hitchon W. N. G.: Simulation of breakdown in dielectric barrier discharge at atmospheric pressure. 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 37, pp. 2545-2556.
6. Gon-Ho Kim, Sang-Heon Song: Optimum Operating frequency of Atmospheric-Pressure Dielectric-Barrier Discharge for the Photo-Resistor Ashing Process. *Journal of the Korean Physical Society*, August 2006, Vol. 49, No. 2, , pp. 558-562.
7. Kogelschatz U., Eliasson B., Hirth M.: Ozone Generation From Oxygen And Air: Discharge Physics And Reaction Mechanisms. *Science & Engineering* (1988), Vol. 10, pp. 367-377.
8. Kalisiak S., Jakubowski T., Hołub M.: Single-period AC source with energy transfer control for dielectric barrier discharge plasma applications. 14th International Power Electronics and Motion Control Conference. Ohrid, Macedonia 6-8 września 2010.
9. Kalisiak S., Hołub M.: Modified Fitch generator topology for non-thermal plasma applications, *Polish Electrical Review*, R. 85, nr 7 (2009), 134 – 137.

### NON-THERMAL PLASMA SOURCES FOR ENVIRONMENT PROTECTION APPLICATIONS

**Key-words:** non-thermal plasma systems, power electronic supply systems

Proposed article describes basic properties of different supply systems for non-thermal, atmospheric pressure plasma devices. Different approaches are given ranging from AC supply, pulsed supplies, microwave beams and electron-beam sources with their basic electric properties. Main supply system configurations are given and typical reactor constructions are discussed with their basic properties. As an example a laboratory discharge cell investigations are presented having different supply voltage and current waveforms. ICCD camera imaging gives a clear evidence on supply voltage shape importance. Pulsed supply with large leakage inductance on the secondary side of a high-voltage transformer yields a more diffuse character. AC supply results in a well-known filamentary discharge with typical streamer channels.