

doi:10.15199/48.2019.03.09

Wpływ przepływu gazu roboczego na zaburzenia przewodzone w torze zapłonu trójfazowego reaktora plazmowego typu GlidArc

Streszczenie. Reaktory plazmowe to zaawansowane urządzenia służące do oczyszczania m.in. gazów. Wyładowania reaktora są źródłem zaburzeń elektromagnetycznych generowanych do systemu zasilania. W pracy przedstawiono wyniki badań przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych w torze zapłonu trójfazowego reaktora GlidArc. Przeprowadzono analizę emisji zaburzeń (w odniesieniu do wymagań EMC) przy kilku prędkościach przepływu gazu roboczego podawanego do komory wyładowczej.

Abstract. Plasma reactors are advanced devices used to purify, among others gases. The reactor discharges are the source of electromagnetic interferences generated to the power system. The paper presents the results of investigations of conducted electromagnetic interferences in the ignition circuit of the three-phase GlidArc reactor. The analysis of interferences emission (in relation to EMC requirements) at several flow rates of the working gas fed into the discharge chamber. (Effect of working gas flow on conducted interferences in the ignition circuit of a three-phase GlidArc plasma reactor).

Słowa kluczowe: reaktor plazmowy, GlidArc, zaburzenia przewodzone, EMC.

Keywords: plasma reactor, GlidArc, electromagnetic interferences, EMC.

Wstęp

Ostatnie lata wskazują dynamiczne zainteresowanie przemysłu i nauki obszarem zastosowań technologii plazmowych. Plazmotrony (reaktory plazmowe) od lat stanowią komponenty zaawansowanych układów oczyszczania cieczy i gazów (w oczyszczaniu powietrza plazma spełnia rolę dezynfekcyjną i deodoryzującą). W ostatnich latach obserwuje się intensyfikację badań nad możliwościami zastosowania plazmy nierównowagowej generowanej pod ciśnieniem atmosferycznym w medycynie i biotechnologii oraz wykorzystanie technik plazmowych w procesach modyfikacji powierzchni a nawet do konserwacji żywności [1,2,3,4,5,12,13,14,16,17,18].

Sposób generowania plazmy zależy od tego, w jakim celu ma być ona wykorzystywana. Dotychczas naukowcy opracowali wiele metod jej generowania, a większość laboratoriów tworzy własne generatory o indywidualnych parametrach.

W odniesieniu do wymagań jakości i bezpieczeństwa jakie stawiane są wszystkim urządzeniom i instalacjom elektrycznym szczególnie ważne są zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej [6,7,8,9,11,15]. Określają one bowiem harmonijną współpracę aparatury sterującej i pomiarowej w przestrzeni instalacji reaktora plazmowego.

W ramach niniejszej pracy przedstawione zostaną wyniki badań przewodzonych zaburzeń tylko w torze zapłonu trójfazowego reaktora GlidArc.

Plazma niskotemperaturowa i reaktory plazmowe

Plazma niskotemperaturowa inaczej zwana plazmą nietermiczną to rodzaj plazmy najczęściej występujący w technice. W przypadku plazmy niskotemperaturowej dużą rolę odgrywają takie procesy jak: jonizacja, rekombinacja, wymiana ładunku, wzbudzenie [5,12,16,17]. Zakłada się, że plazma zimna występuje w zakresach energii od 0,2 eV do 3eV, co przekłada się na zakres temperatur od 2000 K do 30000 K. Ten rodzaj plazmy jest przeważnie gazem zjonizowanym w dość małym stopniu, o bardzo dużej lub dużej zawartości cząstek neutralnych. Znaczenie tych cząstek ma decydujące znaczenie dla tego jak ten rodzaj plazmy się zachowuje.

Plazma niskotemperaturowa wymaga znacząco mniej ekstremalnych warunków do powstania. Do wytworzenia wymagane jest wytworzenie odpowiednio silnego pola

elektrycznego (elektromagnetycznego), doprowadzającego do jonizacji cząsteczek i utrzymywaniu gazu w takim stanie. W plazmie nietermicznej większość energii wykorzystywana jest na wytwarzanie wysoko-energetycznych elektronów, a nie podgrzewanie gazu, co pozwala na skierowanie energii na dysocjację i jonizację gazu, wytwarzającą rodniki, które rozkładają toksyczne cząsteczki gazu. W zastosowaniach takich jak usuwanie zanieczyszczeń rozcieńczonych w powietrzu, zastosowanie plazmy niskotemperaturowej jest najbardziej odpowiednie, ze względu na selektywność energii i możliwość usuwania wielu rodzajów zanieczyszczeń naraz. W przypadkach usuwania odpadów mieszanym stosuje się plazmę termiczną do spalania odpadów wraz z pojemnikiem, a następnie plazmę niskotemperaturową do oczyszczenia gazów powstałych w trakcie spalania. Potencjalne możliwości tego typu urządzeń zostały już potwierdzone przy usuwaniu tlenków azotu NO_x, dwutlenku siarki SO₂ z gazów spalinowych, metali ciężkich, lotnych substancji organicznych powstających przy malowaniu, lakierowaniu i procesach chemicznych. Wśród zastosowań środowiskowych najbardziej popularnym w praktyce i zaawansowanym technologicznie jest obróbka wody pitnej, gdzie chlor zastępuje się ozonem wytwarzanym w wyładowaniach barierowych. Biologiczne i medyczne zastosowania plazmy wykorzystują bakteriobójcze i grzybobójcze właściwości wyładowań elektrycznych – niska temperatura gazu i wysoka energia elektronów inicjuje reakcje chemiczne, wpływające na struktury i DNA bakterii, wirusów i grzybów nie niszcząc korzystnych składników czy komórek środowiska poddawanego obróbce. Szczególna uwaga jest tutaj poświęcona wyładowaniom impulsowym, których energia dostarczana w bardzo krótkim czasie (nanosekundy) nie podgrzewa otaczającego medium. Innymi technologicznymi zastosowaniami plazmy ze względu na jej właściwości są lampy wyładowcze, obróbka półprzewodników zakresie usuwania zanieczyszczeń organicznych, elektrofiltracja, osadzanie cienkich warstw materiałów przy pomocy zjonizowanego strumienia gazu, spektrometria masowa czy spektrofotometria [1,2,3,4,5,12,13,14,16,17,18].

Zainteresowanie wytwarzaniem i zastosowaniami plazmy nietermicznej wciąż rośnie, ze względu na możliwość swobodnego kontrolowania parametrów w szerokich granicach, dostosowanych do zastosowania, poprzez zmianę składu chemicznego gazu roboczego,

regulację ciśnienia, strukturę pola elektromagnetycznego, geometrię wyładowania czy parametry układu zasilającego. W przypadku plazmy wytwarzanej w wyładowaniach elektrycznych jej parametry uzależniane są od przykadanego napięcia, układu zasilania i geometrii elektrod.

Uproszczone i zweryfikowany pomiarowo mechanizm powstawania wyładowania w gazach może być opisany na podstawie charakterystyki prądowo-napięciowej zdjętej dla przestrzeni gazowej zawartej między dwoma elektrodami oddalonymi od siebie o określoną odległość, z przyłożonym stałym napięciem, wytwarzającym jednorodne pole elektryczne. W charakterystyce wyróżnia się trzy zakresy: pierwszy w którym prąd wzrasta proporcjonalnie od napięcia, drugi – nasycenia, gdzie prąd jest stały i trzeci w którym następuje skokowy wzrost gęstości prądu, spowodowany jonizacją zderzeniową i formowaniem się lawin elektronowych. Pole elektryczne wpływa tylko na naładowane już cząsteczki, więc w celu wytworzenia wyładowania elektrycznego jony muszą znajdować się wcześniej w przestrzeni między elektrodami. Dopiero już wytworzone jony są przyspieszane przez odpowiednio silne pole elektromagnetyczne, i w wyniku jonizacji zderzeniowej powodują wzbudzenie i jonizację większej ilości cząsteczek, które dalej podtrzymują wyładowanie elektryczne [16,17].

Jednym z typów reaktorów plazmowych jest reaktor z wyładowaniem łukowym ślizgającym się wzdłuż elektrod. Quasi-łukowe wyładowanie jest źródłem plazmy nietermicznej i wypełnia ono część przestrzeni komory wyładowczej. Źródłem plazmy i sposobem dostarczania do niej energii jest wymuszony przepływ prądu elektrycznego w gazie w formie łuku elektrycznego. Plazma nietermiczna, może być generowana przy zasilaniu układu napięciem stałym, przemiennym lub impulsowym. Zapłon wyładowania na elektrodach roboczych reaktora plazmowego inicjujący jest przeskokiem iskry elektrycznej z układu o napięciach rzędu kilku-kilkunastu kilowoltów. Pod wpływem wdmuchiwaną w komorę wyładowczą mieszaniny gazów wyładowanie unosi się wzdłuż elektrod. W chwili, gdy energia dostarczana ze źródła nie jest już w stanie zrównoważyć strat energetycznych rozwijającego się wyładowania elektrycznego następuje zgaszenie wyładowania. Po zgaszeniu wyładowania w strefie gaśnięcia, łuk odbudowuje się natychmiast w strefie zapłonu i rozpoczyna się kolejny cykl pracy reaktora. Charakter pracującego reaktora jest okresowy (efekt powtarzającego się, ślizgającego się wyładowania po elektrodach) [6,7,8,9,10,14,16].

Stanowisko badawcze i pomiary

Reaktory plazmowe to urządzenia technologiczne odpowiedzialne za proces przemiany gazu procesowego w plazmę przy udziale energii elektrycznej [16]. Ze względu na fizyczne skupienie plazmy niemożliwe jest jej przechowywanie lub transport. Dlatego wytwarzanie i wykorzystywanie plazmy jest realizowane w miejscu instalacji reaktora. W związku z wyładowaniami łukowymi stanowiącymi dla układu zasilania nieliniowe i niesymetryczne obciążenie oraz dynamicznie zmieniającymi się zjawiskami przejściowymi i zwarciovymi wyładowań wytwarzających plazmę - reaktor jest źródłem zaburzeń elektromagnetycznych [6,7,8,9,10].

Z punktu widzenia użytkownika eksploatującego urządzenie pożądana jest ciągłość pracy i stabilność parametrów plazmy, a to przekłada się na odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie instalacji i układu zasilania. Do zasilania reaktorów plazmowych stosuje się w praktyce różne źródła zasilania, które można podzielić na dwie zasadnicze grupy: układy transformatorowe oraz układy z

elementami energoelektronicznymi. W prezentowanej w pracy analizie wykorzystano instalację trójfazowego reaktora plazmowego z elektrodami zapłonowymi zbudowanego w laboratorium Instytutu Elektrotechniki i Elektrotechnologii (rys. 1.).



Rys.1. Widok stanowiska z trójfazowym reaktorem GlidArc

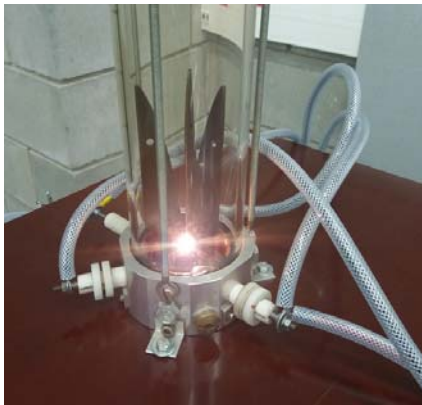
Układ zasilania stanowiska ze względu na stosunkowo dużą moc i prostotę oparto na trzech transformatorach, zasilanych poprzez autotransformator trójfazowy Metrel HGT 400/8, który służy do regulacji napięcia roboczego reaktora. Tor roboczy układu zasilania składa się z trzech transformatorów jednofazowych połączonych w układ trójfazowy gwiazda-gwiazda z przewodem neutralnym. Transformatory te dostarczają napięcie o wartości około 1,7 kV i częstotliwości 50 Hz. Taka wartość napięcia pozwala osiągnąć właściwe dla procesów plazmochemicznych parametry plazmy, natomiast nie gwarantuje zapłonu łuku elektrycznego. Dlatego do elektrod zapłonowych dodawany jest dodatkowo moduł zapłonowy, dostarczający napięcie ok. 10 kV, niezbędne do zainicjowania zapłonu łuku elektrycznego. W testowanej instalacji wykorzystano do tego celu transformator zapłonowy (do neonów) FART Resinblock 2000 o napięciu wyjściowym 10 kV, i natężeniu 50 mA. Ze względu na badawczy charakter pracy czynnikiem roboczym w czasie jego działania była mieszanina powietrza podawana i odpowiednio kierowana w przestrzeń wyładowczą z kompresora bezolejowego Magnum JWA-30. Przy wymuszeniu przepływu powietrza z kompresora zastosowano stałe ciśnienie wylotowe.

Do prowadzenia analiz w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej dostosowano stanowisko reaktora plazmowego do wymagań pomiarowych. Zastosowano między innymi uziemione płaszczyzny odniesienia. Do określenia poziomu przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych wykorzystano odbiornik ESCI3 firmy Rohde & Schwarz oraz sieci szluczne (jednofazową Schaffner NNB 41C zasilającą transformator zapłonowy, oraz trójfazową TYP SMZ-6/50 do toru roboczego). Badania przeprowadzone zostały zgodnie z procedurą norm technicznych wynikających z CISPR16 w zakresie częstotliwości 150kHz-30MHz.

Analiza obejmuje wyniki z zakresu 150kHz-30MHz zbadane przy kilku prędkościach przepływu gazu roboczego podawanego do komory wyładowczej.

Analizę przeprowadzono tylko w torze zapłonowym, dla przewodu fazowego L1 i neutralnego N transformatora zapłonowego. Wykonano trzy próby. Pierwsza została zrealizowana przy braku nadmuchu, druga dla przepływu powietrza o prędkości 4 l/min i trzecia o przepływie 6l/min. W trakcie pracy reaktora przy stosowaniu różnej prędkości nadmuchu mieszaniny powietrza, podawanej do

komory wyładowczej, można zaobserwować różne zachowania się wyładowania.



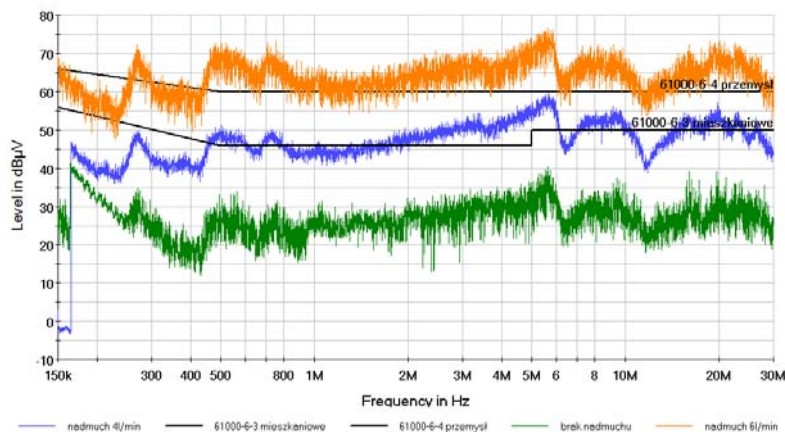
Rys.2. Widok na wyładowanie w komorze reaktora, w obszarze elektrod zapłonowych, brak nadmuchu

W przypadku braku lub znikomego przepływu, przestrzeń wyładowcza łuku jest jednolita, i bardziej stabilna w zakresie przepływu prądu, niestety lokalnie przegrzewa elektrody (rys. 2). Przy włączeniu większych prędkości

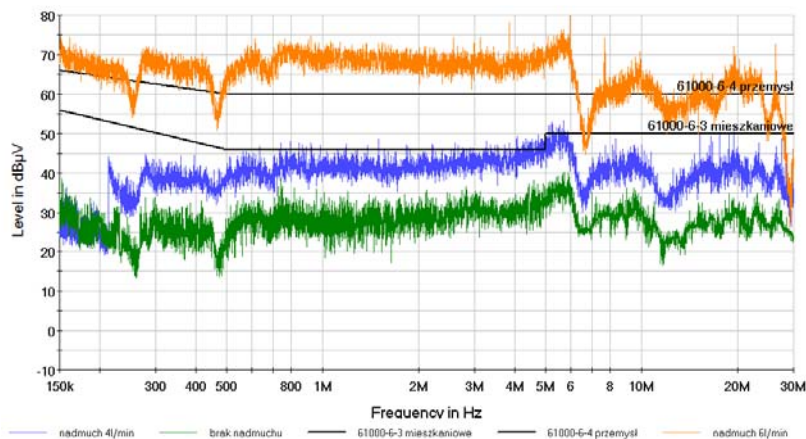
przepływu mieszaniny powietrza, wyładowanie łukowe zostaje wyrzucone w dalszą przestrzeń międzyelektrodową, jest gwałtownie przerywane, a strimery wyładowań i jonizacja przebiega wzdłuż elektrod – co nie zapewnia w pełni dogodnej objętościowo przestrzeni do utrzymania stabilnej parametrami plazmy (rys. 3).



Rys.3. Widok na wyładowanie w komorze reaktora, w obszarze elektrod zapłonowych, nadmuch 6l/min



Rys.4. Zaburzenia w torze przewodu N dla różnych prędkości nadmuchu



Rys.5. Zaburzenia w torze przewodu L1 dla różnych prędkości nadmuchu

Ta dynamika ma swoje odzwierciedlenie także w poziomach mierzonych zaburzeń (rys. 4 i 5). Z pomiarów zaburzeń w torze transformatora zapłonowego łatwo wywnioskować, że wzrost przepływu gazu w komorze reaktora przyczynia się do zwiększenia mocy zakłóceń przenikających do sieci zasilającej. Największy wzrost

poziomu zakłóceń występuje przy przepływie powietrza na tyle wysokim, żeby przerwać stabilny łuk elektryczny. Wzrost zaburzeń jest spowodowany dynamicznymi zmianami punktu pracy reaktora (charakterystyki U-I) ze względu na wypychanie zjonizowanego gazu w dalszą przestrzeń komory wyładowczej.

Wnioski

Reaktory plazmowe są wykorzystywane w technologiach przyjaznych dla środowiska takich jak oczyszczanie powietrza, wody, ścieków, gleby, dla poprawy parametrów organoleptycznych i inaktywacji trudno usuwalnych związków chemicznych. Jest to prężnie rozwijająca dziedzina i wciąż obserwuje się zastosowanie plazmotronów w nowych gałęziach nauki.

Identyfikacja pól elektromagnetycznych i ich zagrożeń wymaga stosowania specjalnych narzędzi pomiarowych i jest potrzebna wszędzie tam gdzie potencjalnie mogą pojawić się niebezpieczeństwa niekompatybilnej pracy urządzeń i instalacji elektrycznych czy ekspozycji ludzi [6,7,8,9,10,11,15].

Prowadzone badania i obserwacje wskazują na potrzebę prowadzenia analiz EMC oraz stosowania ochronnych technik (filtry, ekrany). Prowadzone analizy wpływu czynników fizycznych na stabilność wyładowań plazmowych wykazują również relacje w zakresie poziomów zaburzeń, a ich identyfikacja przyczyni się do prawidłowego zaprojektowania układu filtrującego.

Autor: dr inż. Paweł A. Mazurek, Politechnika Lubelska, Instytut Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: p.mazurek@pollub.pl.

LITERATURA

- [1] Ebihara K., Mitsugi F., Ikegami T., Nakamura N., Hashimoto Y., Yamashita Y., Baba S., Stryczewska H., Pawlat J., Teii S., Sung T., (2013), Ozone-mist spray sterilization for pest control in agricultural management, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 61(02), 201324318
- [2] Kolacinski Z., Szymanski L., Raniszewski G., (2013), LTE plasma reactors for materials conversion, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 61(02), 24314
- [3] Kovačová Z., Tarabová K., Hensel K., Machala Z., Decontamination of Streptococci biofilms and Bacillus cereus spores on plastic surfaces with DC and pulsed corona discharges, *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2013, 61(2), 24306
- [4] Kwiatkowski Michał, Terebun Piotr, Mazurek Paweł, Pawlat Joanna, Wettability of polymeric materials after dielectric barrier discharge atmospheric-pressure plasma jet treatment, *SENSORS AND MATERIALS*, 2018, nr 5, vol. 30, s. 1207-1212
- [5] Kwiatkowski M., Terebun P., Krupski P., Samoń R., Diatczyk J., Pawlat J., Stryczewska H., Właściwości i zastosowania reaktorów plazmowych typu dysza plazmowa, *IAPGOŚ*, 3, 2014, 31-35
- [6] Mazurek P. A., Wprowadzenie do badań zaburzeń przewodzonych w instalacji reaktora plazmowego, *Elektro.info*, ISSN 1642-8722, 12/2010, str. 32-34
- [7] Mazurek P. A., Zaburzenia promieniowane reaktora plazmowego typu GlidArc, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, nr 12b, vol. 87, pp. 121-124
- [8] Mazurek P. A., Zagrożenia elektromagnetyczne reaktorów GlidArc, *Inżynieria Ekologiczna*, ISSN 2081-139X, Polish Society of Ecologi, Nr 30/2012, 85-96
- [9] Mazurek P. A., Selected methods to improve the electromagnetic compatibility of the plasma reactor, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, 2012, nr 7a, 158-160
- [10] Mazurek P. A., Pawlat J., Badania natężeń pól elektrycznych i magnetycznych generowanych przez instalację reaktorów plazmowych, *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2016, nr 2, vol. 18, pp. 567-578
- [11] Mazurek P. A., Wdowiak A., Anusiewicz A., Electromagnetic interactions of metal detectors, *European Journal of Medical Technologies*, 2017, 1(14), pp. 33-40
- [12] Pawlat J., Kwiatkowski M., Terebun P., and Murakami T., RF-Powered Atmospheric-Pressure Plasma Jet in Surface Treatment of High-Impact Polystyrene, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 44, no. 3, pp. 314–320, Mar. 2016.
- [13] Pawlat J., Terebun P., Kwiatkowski M., and Diatczyk J., RF atmospheric plasma jet surface treatment of paper, *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 37, p. 1, Sep. 2016
- [14] Pawlat J., Starek A., Sujak A., Kwiatkowski M., Terebun P., and Budzeń M., Effects of atmospheric pressure plasma generated in GlidArc reactor on *Lavatera thuringiaca* L. seeds' germination, *Plasma Process. Polym.*, 2017
- [15] T. Prauzner, Zakłócenia elektromagnetyczne w elektronicznych systemach alarmowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, nr.12b, pp. 205-208
- [16] Stryczewska H. D., Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009
- [17] Terebun P., Kwiatkowski M., Krupski P., Diatczyk J., Pawlat J., Wpływ parametrów pracy reaktora typu plasmajet z wyładowaniem barierowym na temperaturę gazu poddanego obróbce plazmowej, *European Journal of Medical Technologies*, 3, 2014, 38-45
- [18] Terebun P., Kwiatkowski M., Mazurek P. A., Pawlat J., Impact of radio-frequency atmospheric-pressure plasma on water contact angles of high-impact polystyrene // *SENSORS AND MATERIALS* - 2018, nr 5, vol. 30, s. 1213-1220