



Badania natężeń pól elektrycznych i magnetycznych generowanych przez instalację reaktorów plazmowych

Paweł A. Mazurek, Joanna Pawłat
Politechnika Lubelska

1. Wstęp

Reaktory plazmowe służące do wytwarzania plazmy niskotemperaturowej, mają zastosowania m.in. w ochronie środowiska, w inżynierii biomedycznej do sterylizacji ran powierzchniowych i narzędzi nieodpornych na działanie wysokich temperatur oraz w technice materiałowej, gdzie służą do zmiany właściwości fizyko-chemicznych powierzchni materiałów (Ebihara i in. 2013, Kolacinski i in. 2013, Kovaľová i in. 2013, Pawłat 2012, Pawłat 2013, Stryczewska 2009). Z punktu widzenia użytkownika eksploatującego reaktor plazmowy pożądana jest ciągłość pracy i stabilność parametrów plazmy, a to przekłada się na odpowiednie zaprojektowanie i wykonanie instalacji i układu zasilania. W odniesieniu do wymagań jakości i bezpieczeństwa, jakie stawiane są reaktorom, kluczowym zagadnieniem okazuje się przeprowadzenie badań w zakresie ekspozycji natężeń pól elektrycznych i magnetycznych niskich częstotliwości generowanych przez reaktory i ich instalacje zasilania. W artykule zaprezentowano wartości zmierzonych poziomów natężeń pól elektrycznych i magnetycznych generowanych przez instalacje dwóch jednofazowych i trójfazowego reaktora plazmowego. W trakcie badań instalacji reaktorów analizie poddano zarówno główne obwody zasilania jak i obwody zapłonu łuku elektrycznego.

2. Reaktory plazmowe

Reaktory plazmowe to urządzenia odpowiedzialne za proces przemiany gazu procesowego w plazmę przy udziale energii elektrycznej (Ebihara i in. 2013, Kolacinski i in. 2013, Koval'ová i in. 2013, Pawłat 2012, Pawłat 2013, Stryczewska 2009). Ze względu na to, że plazmy nie można przechowywać ani transportować – konieczne jest jej wytwarzanie i wykorzystywanie w jednym miejscu, stąd też w aspekcie analiz kompatybilności elektromagnetycznej identyfikuje się instalacje reaktorów jako instalacje stacjonarne.

Przy konstruowaniu reaktorów plazmowych głównym zadaniem jest projekt i optymalizacja układu zasilania ze względu na to, że reaktory są nietypowymi odbiornikami energii o nieliniowej charakterystyce obciążenia, a do ich działania wymaga się wysokich napięć. 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 (Stryczewska 2009, Kwiatkowski i in. 2014, Mazurek 2010).

Jednym z typów reaktorów plazmowych jest reaktor z wyładowaniem łukowym ślizgającym się wzdłuż elektrod o technologicznej nazwie GlidArc. Powstające w nim quasi-łukowe wyładowanie jest źródłem plazmy nietermicznej wypełniającej część przestrzeni komory wyładowczej. Źródłem plazmy i sposobem dostarczania do niej energii jest wymuszony przepływ prądu elektrycznego w gazie w formie łuku elektrycznego. Plazma to zjonizowany gaz, który przewodzi prąd elektryczny, a podany do przestrzeni plazmy materiał podlega fizycznym i chemicznym przemianom (np. neutralizacja niebezpiecznych gazów). Pod wpływem wdmuchiwanej 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).

Ze względu na specyfikę zasilania do każdego reaktora należy dobierać indywidualnie układ zasilania. Plazmę ślizgającego się wyładowania łukowego, podobnie jak innych wyładowań łukowych, można generować przy zasilaniu napięciem stałym, przemiennym i impulsowym (Stryczewska 2009, Terebun i in. 2014).

3. Przepisy prawne

Pola elektryczne E i magnetyczne H występujące w środowisku mogą powodować niepożądane skutki. Taka sytuacja (poparta odpowiednimi przepisami krajowymi i europejskimi) jest podstawą do prowadzenia kontroli natężeń pól E i H oraz ograniczenia poziomu ekspozycji, zarówno ogółu ludności, pracowników jak i infrastruktury elektrotechnicznej. Podstawowe parametry, które charakteryzują pola elektryczne i magnetyczne jako czynnik środowiska pracy to natężenie pól elektrycznych, natężenie pól magnetycznych (zamiennie indukcja magnetyczna, przy czym przelicznik indukcji $1 \mu\text{T} = 0,8 \text{ A/m}$) oraz częstotliwość pól sinusoidalnie zmiennych w czasie.

Dopuszczalne ekspozycje zawodowa i środowiskowa są ustalone w obowiązujących rozporządzeniach (Rozporządzenie 2003, 2007). Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 30 października 2003 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku dla częstotliwości przemysłowej 50 Hz – limit składowej elektrycznej wynosi 10 kV/m, a składowej magnetycznej 60 A/m. W odniesieniu do ekspozycji zawodowej (w zakresie ochrony pracowników przed niepożądanymi skutkami oddziaływania pola elektromagnetycznego) przepisy krajowe rozróżniają trzy strefy ochronne: strefę zagrożenia (tzw. niebezpieczną) z zakazem przebywania, pośrednią (w której w mogą przebywać jedynie pracownicy związani z obsługą źródeł pól elektromagnetycznych) i bezpieczną w której natężenia pól elektromagnetycznych są mniejsze od pól ekspozycji zawodowej i przy bezpośrednim oddziaływaniu na organizm ludzki nie powinny powodować zmian w stanie zdrowia – przebywanie w tej strefie, zarówno ludzi postronnych jak i pracowników, nie podlega ograniczeniom. Wartości natężeń pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz ustalone dla tych stref przez przepisy określone są na poziomie: $E_0 = 5 \text{ kV/m}$, $H_0 = 66,6 \text{ A/m}$ – wartości graniczne strefy bezpiecznej; $E_1 = 10 \text{ kV/m}$, $H_1 = 200 \text{ A/m}$ - wartości graniczne strefy pośredniej oraz $E_2 = 20 \text{ kV/m}$, $H_2 = 2000 \text{ A/m}$ wartości graniczne strefy zagrożenia. Doza ekspozycji pracownika oceniana jest na podstawie pomiarów czasu trwania narażenia oraz wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego.

4. Badania instalacji

Do badań instalacji reaktorów zbudowanych w Instytucie Elektrotechniki i Elektrotechnologii wykorzystano miernik Mashek ESM100 oraz komputer z oprogramowaniem Graph ESM100. Miernik ESM100 wyposażony jest w izotropowy czujnik pola elektromagnetycznego, który umożliwia wykonanie pomiarów zarówno składowej pola elektrycznego jak i składowej magnetycznej w zakresie częstotliwości od 5 Hz do 2000 Hz w trzech kierunkach przestrzennych E_x , E_y , E_z , H_x , H_y , H_z oraz E_{3D} , H_{3D} (Mazurek 2010).

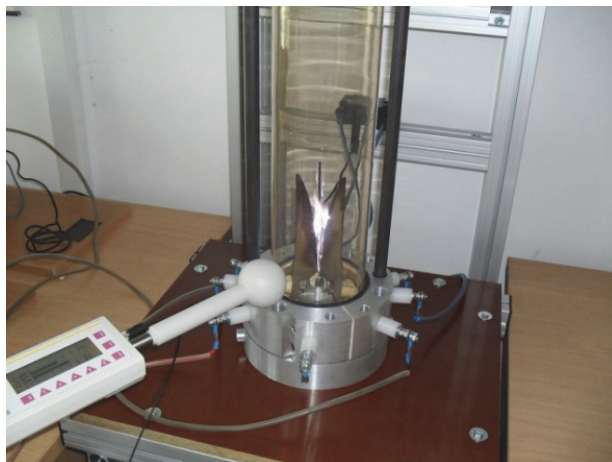
W Instytucie Elektrotechniki i Elektrotechnologii istnieje kilka konstrukcji reaktorów. Badaniom zostały poddane trzy instalacje:

- a) konstrukcja sześćoelektrodowa, z aktywnie podłączonymi do zasilania trzema elektrodami roboczymi i z dwoma elektrodami zapłonowymi (3-fazowy reaktor typu GlidArc),
- b) instalacja jednofazowa reaktora plazmowego ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym typu GlidArc,
- c) instalacja małogabarytowego reaktora plazmowego typu dysza plazmowa („plasma jet”) z wyładowaniem barierowym DBD.

Jak wspomniano wcześniej, do rzeczywistych instalacji reaktorów podawane są różne mieszaniny gazów (nawet niebezpieczne), które przechodzą proces obróbki plazmowej. Ze względów bezpieczeństwa oraz możliwości uzyskiwania powtarzalności prowadzonych analiz, gazami roboczymi wprowadzanymi do instalacji reaktorów w Instytucie Elektrotechniki i Elektrotechnologii są azot, argon, tlen i mieszanina powietrza. Wszystkie gazy są sprężone w butlach, a poprzez układ podawania i regulacji były odpowiednio kierowane w przestrzeń wyładowczą.

Podstawowym układem zasilania wielofazowego reaktora plazmowego, wykorzystywanego w testach, jest układ, składający się z trzech transformatorów jednofazowych odpowiednio ze sobą połączonych i przyłączonych do sieci trójfazowej czteroprzewodowej. Trzy jednakowe transformatory jednofazowe, zwane roboczymi, połączone są w układ trójfazowy gwiazda-gwiazda z przewodem neutralnym. Transformatory te zapewniają zasilanie elektrod napięciem sinusoidalnym o częstotliwości 50 Hz i napięciu sięgającym 1,7 kV. Taka wartość napięcia pozwala osiągnąć właściwe dla przeprowadzanych procesów plazmo-chemicznych parametry plazmy powietrzno-azotowej, natomiast nie

gwarantuje zapłonu łuku elektrycznego. Dlatego do elektrod zapłonowych dodawany jest moduł zapłonowy, dostarczający wyższe napięcie (ok. 10 kV), niezbędne do zainicjowania zapłonu łuku elektrycznego.



Rys. 1. Komora wyładowcza trójfazowego reaktora plazmowego GlidArc oraz miernik Mashek ESM100

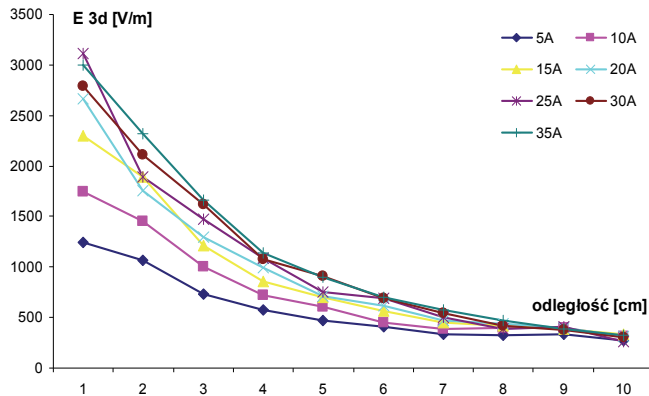
Fig. 1. Discharge chamber of three-phase GlidArc plasma reactor and Mashek ESM100 meter

Pomiary natężeń pól elektrycznych i magnetycznych dotyczyły przestrzeni wokół komory wyładowczej i układów zasilania. Pomiary realizowano tylko dla częstotliwości 50 Hz, na wysokości 115 cm od podłogi. Analiza dotyczyła określenia wartości natężeń pola elektrycznego i magnetycznego w funkcji odległości od reaktora (Mazurek 2010). Dodatkowo przeprowadzono analizę rozkładów natężenia pola elektrycznego E i indukcji magnetycznej B przy różnych wartościach natężenia prądu roboczego reaktora (prądu elektrycznego płynącego pomiędzy elektrodami roboczymi). Podawaną do komory wyładowczej mieszaniną gazów było powietrze.

Analizując uzyskane wartości natężenia pola elektrycznego zaprezentowane graficznie na rysunku 2, można zauważyć zmniejszające się wartości wraz z oddalaniem się od komory wyładowczej. Taki sam charakter funkcji mają wszystkie krzywe wyznaczone dla różnych wartości prądów. Analogicznie, na rysunku 3, przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej B w funkcji odległości od komory wyładowczej reaktora.

W przypadku pola magnetycznego wykazano mniejsze zmiany wartości indukcji w tych samych przedziałach odległości (nie ma tu tak wyraźnego trendu zmniejszania się wartości pola magnetycznego).

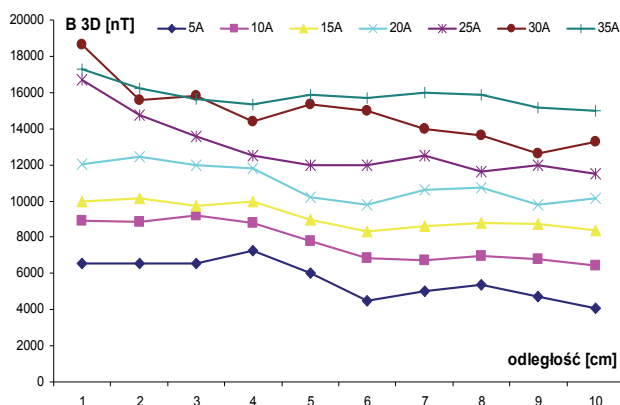
Pomiary wykazały, że w otoczeniu instalacji reaktora (w pobliżu komory wyładowczej i układu zasilania), występują znaczne wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Najwyższe wartości natężenia pola elektrycznego zmierzono przy szklanej osłonie komory wyładowczej, maksymalne wartości sięgały 3 kV/m.



Rys. 2. Wartość natężenia pola elektrycznego E w funkcji odległości od komory reaktora dla różnych wartości prądu roboczego reaktora (Mazurek 2010)

Fig. 2. Electric field as a function of distance from the reactor chamber for different operating current of the reactor (Mazurek 2010)

Natomiast najwyższe wartości indukcji magnetycznej zaobserwowano nie przy komorze, choć tu też były wysokie (kilka mikrotesli), ale w otoczeniu układu zasilania reaktora ($\sim 14 \mu\text{T}$). Odnosząc się do zmierzonych wartości natężeń pól przy wyłączonym reaktorze – czyli do wartości tła elektromagnetycznego zawierającego się na poziomach 0,7-6,7 V/m oraz 59-128 nT stanowi to tysiąckrotne zwiększenie się natężeń. (Mazurek 2010).



Rys. 3. Wartość indukcji magnetycznej B w funkcji odległości od komory reaktora dla różnych wartości prądu roboczego reaktora (Mazurek 2010)

Fig. 3. The values of the magnetic induction as a function of distance from the reactor chamber for different operating current of the reactor (Mazurek 2010)

Kolejny etap badań dotyczył testów jednofazowych reaktorów plazmowych o odmiennej konstrukcji: reaktora ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym typu GlidArc oraz małogabarytowego reaktora plazmowego typu dysza plazmowa z wyładowaniem barierowym.

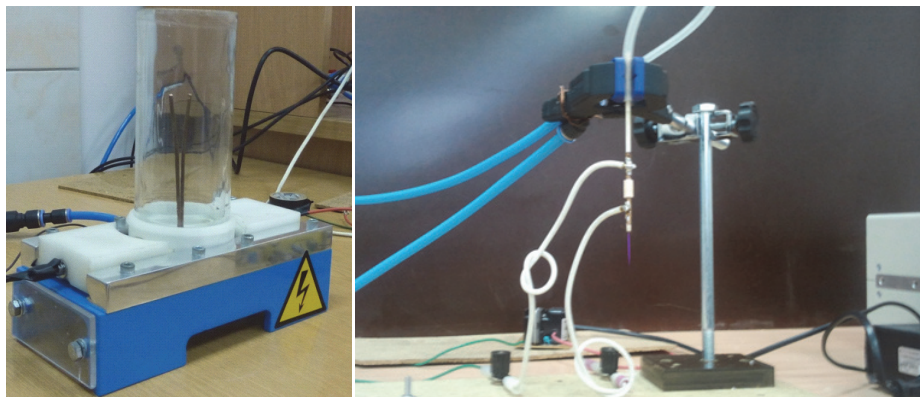
Do zasilania reaktora typu dysza plazmowa z wyładowaniem barierowym stosowane są w Instytucie Elektrotechniki i Elektrotechnologii dwa typy zasilaczy wysokiego napięcia. Jeden typ zasilacza wykorzystuje zwykły transformator toroidalny o mocy znamionowej 200 W. Drugi typ zasilacza wykorzystuje transformator elektroniczny zaprojektowany do zasilania urządzeń małej mocy, którego moc znamionowa wynosi 45 W. W tym drugim układzie podstawową sekcją zasilacza jest przetwornica Mazilliego. Przetwornica ta ma możliwość przełączania w punkcie zerowym. Znaczący to tyle, że pracujące w zasilaczu tranzystory przełączane są w momencie, gdy napięcie na nich wynosi zero woltów (a przynajmniej zbliża się do tej wartości). Ten rodzaj budowy przetwornic pozwala na zmniejszenie strat mocy na tranzystorach, oraz eliminuje konieczność stosowania układów chroniących tranzystory przed przepięciami. Cały układ cechuje się stosunkowo dużą sprawnością i możliwością osiągnięcia znacznych mocy przy bardzo prostej konstrukcji i niewielkich kosztach wykonania. Układ jest zasilany z zasilacza napięcia

stałego, co pozwala płynnie zmieniać napięcia na elektrodach reaktora plazmowego.

Reaktor plazmowy typu GlidArc składał się z dwóch wymiennych elektrod o profilowanym kształcie, grubości i długości, wykonanych z miedzi lub stali nierdzewnej. Cechą charakterystyczną zaprojektowanego reaktora jest możliwość regulacji odstępów między elektrodami w strefie zapłonu. Takie rozwiązanie pozwala dostosowywać reaktor do rodzaju stosowanego gazu procesowego, jego wilgotności, prędkości przepływu oraz składu chemicznego. W prezentowanych badaniach zastosowany odstęp międzyelektrowy wynosił 3 mm.

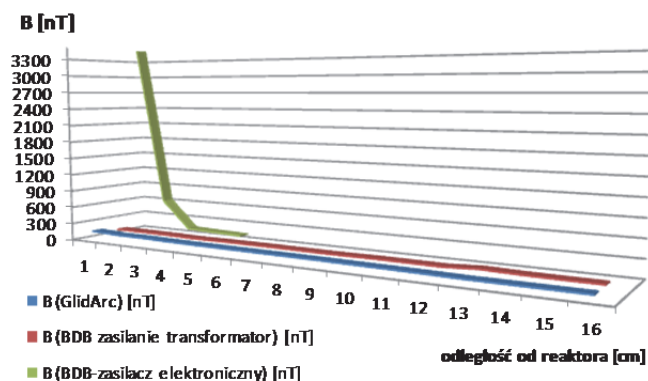
Funkcję zapłonu wyładowania i stabilną pracę reaktora plazmowego zapewniał odpowiednio zaprojektowany układ zasilania typu „fly-back” (Dixon 2001). Parametry elektryczne wyjścia układu zapłonu (sygnału podawanego na elektrody) wynosiły 15 kV, 40 mA, 16 kHz.

Warunki środowiskowe w pomieszczeniu z reaktorem były następujące: temperatura 23°C, wilgotność: 20%, ciśnienie: 1000 hPa. Podawanym do komory wyładowczej reaktora gazem był hel o przepływie 0,08 m³/h.



Rys. 4. Jednofazowy reaktor plazmowy typu „GlidArc” (po lewej), reaktor plazmowy typu plasma jet z wyładowaniem barierowym (po prawej)

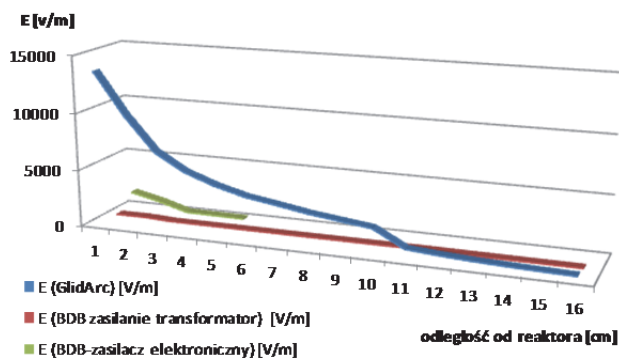
Fig. 4. Single-phase GlidArc plasma reactor type (left), single-phase plasma reactor type plasma jet with discharge barrier (right)



Rys. 5. Poziomy indukcji magnetycznej jednofazowych reaktorów plazmowych (GlidArc i DBD)

Fig. 5. The levels of magnetic induction of plasma reactors (GlidArc and DBD)

Kolejnym badaniom poddano instalację reaktora plazmowego typu „plasma jet” z wyładowaniem barierowym. Średnica wewnętrzna dyszy reaktora wynosiła 1,5 mm przy średnicy zewnętrznej 2,4 mm, dysza została wykonana z materiału dielektrycznego. Tor roboczy elektrod reaktora był zasilany napięciem sinusoidalnym o parametrach: $U = 3,7$ kV oraz $f = 17$ kHz, a także z układu zawierającego transformator toroidalny.



Rys. 6. Poziomy natężenia pola elektrycznego jednofazowych reaktorów plazmowych (GlidArc i DBD)

Fig. 6. Values of the electric field strength of plasma reactors (GlidArc, DBD)

Zaprezentowane wykresy na rysunkach 5 i 6 przedstawiają zmierzone wartości natężenia pola elektrycznego oraz indukcji magnetycznej w funkcji odległości od reaktorów jednofazowych. Największe wartości tu również zaobserwowano w miejscach najbliższych elektrodom i wyładowaniu. Charakter uzyskanych krzywych jest analogiczny do reaktora trójfazowego, wartości natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej maleją wraz ze zwiększeniem odległości od reaktora. Maksymalne uzyskane wartości wynosiły odpowiednio $E = 13643 \text{ V/m}$ oraz $B = 3497 \text{ nT}$.

5. Podsumowanie

Reaktory plazmowe są wykorzystywane w technologiach przyjaznych dla środowiska takich jak oczyszczanie powietrza, wody, ścieków i gleby m.in. dla poprawy parametrów organoleptycznych i inaktywacji trudno usuwalnych związków chemicznych. Technologie plazmowe są rozwijającą się dziedziną i wciąż obserwuje się zastosowanie reaktorów w nowych gałęziach nauki (Ebihara i in. 2013, Kolacinski i in. 2013, Kovařová i in. 2013, Pawłat 2012, Pawłat 2013, Stryczewska 2009, Kwiatkowski i in. 2014, Terebun i in. 2014).

Identyfikacja występujących natężeń pól elektrycznych i magnetycznych celem ustalenia zagrożeń wynikających z przekroczenia dopuszczalnych poziomów wymaga stosowania dedykowanych narzędzi pomiarowych i jest potrzebna wszędzie tam gdzie potencjalnie mogą pojawić się niebezpieczeństwa niekompatybilnej pracy urządzeń elektrycznych czy niebezpiecznej ekspozycji ludzi (Mazurek 2010, 2011, 2012). Przeprowadzona analiza wyników wykazuje, że *ekspozycja nie wykazuje niebezpiecznych stref* dla pracowników (największym zagrożeniem jest 13 kV/m , ale zmierzone wartości uzyskano w miejscu niedostępnym bezpośrednio dla ludzi kontrolujących i eksploatującym reaktor). Największy obszarowo zasięg dużych wartości natężeń pola elektrycznego i magnetycznego ma instalacja reaktora wieloelektrodowego. Po zasileniu reaktora prądem 20 A , w odległości $2\text{-}3 \text{ m}$ od reaktora wartości wynosiły ok. $3 \mu\text{T}$ i 30 V/m . Im bliżej reaktora tym mierzone wartości były większe (jest to zgodnie z teorią elektromagnetyzmu), a przy największych, dopuszczalnych prądach roboczych rzędu 40 A poziomy natężeń pól E i H osiągają tuż przy komorze wyładowczej ponad $20 \mu\text{T}$ i 3 kV/m .

Z realizowanych badań własnych w aspekcie kompatybilności elektromagnetycznej reaktorów (Mazurek 2010, 2011, 2012) wynika, że instalacje reaktorów plazmowych są źródłem zakłóceń elektromagnetycznych zarówno promieniowanych jak i przewodzonych - generowanych do systemu elektroenergetycznego. Stwierdzono zarówno przekroczenie dopuszczalnych poziomów zaburzeń elektromagnetycznych jak i bezpośrednio zaobserwowano negatywne oddziaływanie na sąsiednie urządzenia (zakłócona została praca monitora, myszki komputerowej, miernika). W przypadku analizy kompatybilności elektromagnetycznej dyskwalifikuje to instalacje w zakresie ich wprowadzenia na rynek, a także wymusza kierunek dalszych działań – prace w zakresie projektowania systemów zabezpieczeń (filtry, ekrany).

Literatura

- Ebihara, K., Mitsugi, F., Ikegami, T., Nakamura, N., Hashimoto, Y., Yamashita, Y., Baba, S., Stryczewska, H., Pawłat, J., Teii, S., Sung, T., (2013). Ozone-mist spray sterilization for pest control in agricultural management. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 61(02), 24318.
- Kolacinski, Z., Szymanski, L., Raniszewski G., (2013). LTE plasma reactors for materials conversion. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 61(02), 24314.
- Kovaľová, Z., Tarabová, K., Hensel, K., Machala, Z. (2013). Decontamination of Streptococci biofilms and Bacillus cereus spores on plastic surfaces with DC and pulsed corona discharges. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 61(2), 24306.
- Kwiatkowski, M., Terebun, P., Krupski, P., Samoń, R., Diatczyk, J., Pawłat, J., Stryczewska, H. (2014). Właściwości i zastosowania reaktorów plazmowych typu dysza plazmowa. *IAPGOŚ*, 3, 31-35.
- Mazurek, P. A. (2010). Rozkład emisji pola elektrycznego i magnetycznego wokół reaktora plazmowego typu GlidArc. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12, 95-99.
- Mazurek, P. A. (2011). Zaburzenia promieniowane reaktora plazmowego typu GlidArc. *Przegląd Elektrotechniczny*, 12b, 121-124.
- Mazurek, P. A. (2012). Zagrożenia elektromagnetyczne reaktorów GlidArc. *Inżynieria Ekologiczna*, 30, 85-96.
- Pawłat, J. (2012). Atmospheric pressure plasma jet for sterilization of heat sensitive surfaces. *Przegląd Elektrotechniczny*, 10b, 139-140.
- Pawłat, J. (2013). Possibility of Atmospheric Pressure Plasma Jet Application in Decontamination of Heat Sensitive Surfaces. *Transactions of the Materials Research Society of Japan*, 38(4), 625-628.

- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Część E: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne 0-300 GHz, Dz.U, nr 217, poz. 1833.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 12 listopada 2007r. w sprawie zakresu i sposobu prowadzenia okresowych badań poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, Dz. U. Nr 221, poz. 1645.
- Stryczevska, H. (2009). *Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska*. Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej.
- Terebun, P., Kwiatkowski, M., Krupski, P., Diatczyk, J., Pawłat, J., (2014). Wpływ parametrów pracy reaktora typu plasmajet z wyładowaniem barierowym na temperaturę gazu poddanego obróbce plazmowe. *European Journal of Medical Technologies*, 3, 38-45.
- Dixon, L. H. (2001). *Magnetics Design Handbook*, Section 5, Inductor and Flyback Transformer Design, Texas Instruments.

The Electromagnetic Interaction of the Plasma Reactor Installations

Abstract

The 'GlidArc' plasma reactors and 'DBD' reactors are used for the production of non-thermal plasma. Reactors generate electric discharges. They are the source of plasma and electromagnetic emission too. Institute of Electrical Engineering and Electrotechnologies has several installations of plasma reactors. The article presents the values of measured E and B in the range of very low frequencies. Values were compared with valid national norms. As a result of the analysis, operation of the reactors does not cause danger to the personnel.

Słowa kluczowe:

reaktor plazmowy, natężenia pól elektrycznych i magnetycznych, plazma

Keywords:

plasma reactor, electric and magnetic field strength, plasma