

## Analiza konfiguracji elektrod w odniesieniu do zaburzeń przewodzonych w reaktorze plazmowym

**Streszczenie.** Reaktory plazmowe są urządzeniami technologicznymi odpowiedzialnymi za proces przekształcania gazu technologicznego w plazmę z wykorzystaniem energii elektrycznej. Źródłem plazmy jest wymuszony przepływ prądu elektrycznego w gazie w postaci łuku elektrycznego. Wyładowania elektryczne i plazma generowane przez reaktor plazmowy są źródłem silnych zakłóceń propagowanych zarówno przez promieniowanie, jak i przewodzenie. Artykuł zawiera charakterystykę poziomów zakłóceń elektromagnetycznych zidentyfikowanych w obwodzie zasilania reaktora i ich analizę w odniesieniu do zmiennej geometrii elektrod.

**Abstract.** Plasma reactors are technological devices responsible for the process of transforming process gas into plasma with the use of electric energy. The source of the plasma and the way it is supplied with energy is the forced flow of electric current in the gas in the form of an electric arc. The electrical discharges and plasma generated by the plasma reactor are a source of powerful interferences propagated by both radiation and conduction. The article contains the characteristics of electromagnetic interference levels identified in the power supply circuit of the reactor and their analysis in relation to the variable geometry of electrodes. (*Analysis of the configuration of electrodes in relation to conducted disturbances in a plasma reactor*).

**Słowa kluczowe:** reaktor plazmowy, zakłócenie przewodzone, kompatybilność elektromagnetyczna, elektroda robocza.

**Keywords:** plasma reactor conducted disturbances electromagnetic compatibility, electrode.

### Wstęp

Reaktory plazmowe, w których plazma wytwarzana jest za pomocą wyładowań elektrycznych w gazie są urządzeniami technologicznymi. A ponieważ plazmy nie można przechowywać ani transportować – bowiem trzeba wytwarzać ją w miejscu gdzie jest wykorzystywana, to jest to również przykład instalacji stacjonarnej, w rozumieniu wymagań kompatybilności elektromagnetycznej [1, 14].

Wszystkie typy urządzeń, wykorzystujące wyładowania elektryczne do wytwarzania plazmy, działają na tej samej zasadzie – energia elektryczna wyładowania jest wykorzystywana do wytworzenia wysokoenergetycznych elektronów. Przy ciśnieniu atmosferycznym elektrony rzadko kolidują z cząsteczkami zanieczyszczeń, natomiast zderzając się z cząsteczkami gazu podstawowego (zawierającego zanieczyszczenia) wytwarzają rodniki o znacznie dłuższym przeciętnym czasie życia. Rodniki te reagują z cząstkami zanieczyszczeń znajdującymi się w gazie podstawowym [14].

Plazmę do celów technologicznych wytwarza się przy użyciu różnych typów wyładowań elektrycznych, które wynikają z zastosowanych układów zasilania, geometrii elektrod czy składu gazu procesowego. W technologiach plazmowych wykorzystuje się zarówno wyładowania niezupełne, niezwierające elektrod reaktora plazmowego, np. wyładowania barierowe, czy wyładowania zupełne, do których zaliczamy wyładowanie łukowe [2,14]. Analiza przeprowadzanych badań w wielu ośrodkach wyraźnie wskazuje na duże możliwości stosowania plazmy w przemyśle i medycynie [3,9,10,11,13,14,17].

Niezależnie od rodzaju wyładowań wykorzystywanych do generacji plazmy, reaktory plazmy nietermicznej dla zastosowań przemysłowych łączy wiele cech wspólnych. Są to na ogół urządzenia o dużej mocy, wymagające zasilania energią elektryczną o wysokim napięciu od kilku do kilkunastu kilowoltów i częstotliwości sieciowej lub podwyższonej (układy RF) [12, 16]. Zasilanie reaktorów plazmowych, stanowi układ który jest nieodłączną częścią systemu generacji plazmy. Wymagania jakości, stabilności i bezpieczeństwa reaktorów jako nietypowych odbiorników energii elektrycznej stawia przed projektantami i wykonawcami wyzwania stosowania specjalnych metod projektowania i konstrukcji [4,5,6,7,8,16].

Wszystkie układy zasilania powinny zapewnić optymalną pracę reaktorów oraz dobrze współpracować z siecią zasilającą. Sprowadza się to do utrzymania jakości energii elektrycznej, poprzez nieodkształcanie napięcia, niewprowadzanie wahań i asymetrii oraz niegenerowanie harmonicznych. Ze względu na nieliniowość charakterystyk reaktorów plazmowych, trudno jest pogodzić ich optymalną pracę z poprawną współpracą z siecią zasilającą. Konieczność kompromisu tych przeciwstawnych wymagań prowadzi do różnorodnych rozwiązań, często bardzo złożonych układów, a przez to mniej sprawnych i bardziej zawodnych [2,3,9,10,12,14].

### Reaktor plazmowy

Jednym z typów reaktorów plazmowych jest reaktor glidarc z wyładowaniem łukowym ślizgającym się wzdłuż elektrod. Reaktory tego typu mają zastosowanie głównie w neutralizacji toksycznych gazów, unieszkodliwianiu SO<sub>x</sub> i NO<sub>x</sub>. Powstające w nich quasi-łukowe wyładowanie to źródło 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 [2,4,5,6,7,10,11,14,18].

Główną cechą tego typu reaktora jest możliwość generacji nietermicznej plazmy bezpośrednio w zanieczyszczonym gazie, przy ciśnieniu atmosferycznym i w warunkach, w jakich gazy wylotowe są emitowane do atmosfery, bez konieczności ich wstępnej obróbki.

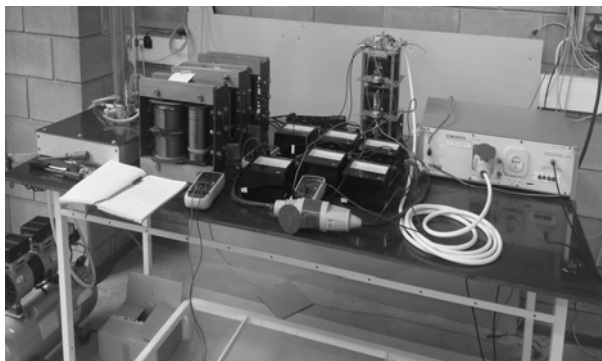
Plazmę ślizgającą się wyładowania łukowego, podobnie jak innych wyładowań łukowych, można generować przy napięciu stałym, przemiennym i impulsowym. Stosowane w przemyśle plazmotrony ze ślizgającym się wyładowaniem łukowym są budowane jako dwu-, trzy- i wieloelektrodowe i często posiadają dodatkową elektrodę zapłonową.

Rozwój wyładowania łukowego, czas jego trwania jest uzależniony od kilku czynników: składu chemicznego gazu, temperatury panującej w komorze wyładowczej, parametrów elektrycznych układu zasilania oraz wymiarów i geometrii elektrod. Ważnym elementem zasilania wydaje się więc układ elektrod roboczych.

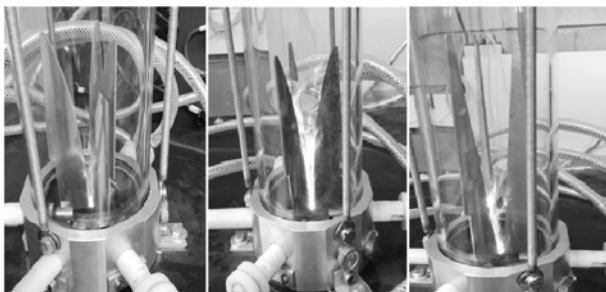
Podstawowym źródłem zasilania stosowanego w prezentowanych badaniach reaktora plazmowego 3-fazowego jest układ składający się z 3 jednofazowych

transformatorów widocznych na rys. 1. Transformatory pracują w trójfazowym układzie gwiazdy z przewodem neutralnym. Transformatory te zapewniają zasilanie sinusoidalne 1,6 kV po stronie wtórnej. Napięcie to zapewnia stabilną pracę i prawidłowe parametry plazmy, ale nie gwarantuje zapłonu łuku. Dlatego reaktor posiada elektrody zapłonowe zasilane obwodem wysokiego napięcia (około 12 kV z transformatora zapłonowego FART Resinblock 2000), niezbędne do zainicjowania zapłonu łuku elektrycznego. Zasilanie jest regulowane przez trójfazowy autotransformator Metrel HGT 400/8. Powietrze jest wprowadzane (przy stałym przepływie) do komory z bezolejowej sprężarki Magnum JWA-30.

Zapłon wyładowania na elektrodach roboczych reaktora plazmowego, analizowanego w tym artykule, inicjowany jest przeskokiem iskry elektrycznej pomiędzy elektrodą zapłonową a jedną z trzech elektrod roboczych (L1). Wyładowania iskrowe zachodzą w powietrzu przy napięciu 10-15 kV i prądzie nie przekraczającym 40 mA. W trójfazowym reaktorze plazmowym, z dodatkową elektrodą zapłonową, odległość przerw międzyelektrodowych w strefie zapłonu wyładowania ustalono symetrycznie, na 0,5 cm. Rozwój wyładowania iskrowego na elektrodzie zapłonowej może być opisany mechanizmem Townsenda [5,14]. Przy dostatecznie dużej wartości natężenia pola elektrycznego następuje przebicie warstwy dielektrycznej w postaci niewielkich kanałów sięgających do powierzchni elektrody roboczej. Powstałe wyładowanie iskry elektrycznej jest rozdmuchane gazem napływającym z dołu, z dyszy do środka komory wyładowczej reaktora. Dzięki temu przebicie iskrowe składa się z wielu rozgałęziających się kanałów, które wstępnie jonizują znaczny obszar przestrzeni między elektrodami.



Rys. 1. Stanowisko z reaktorem plazmowym glidarc



elektrody K4- mosiądz 1,5 mm, elektrody K4- stal czarna 1,5mm, elektrody K3- długa, wypukła

Rys.2. Wyładowania plazmowe w komorze reaktora z różnymi elektrodami roboczymi

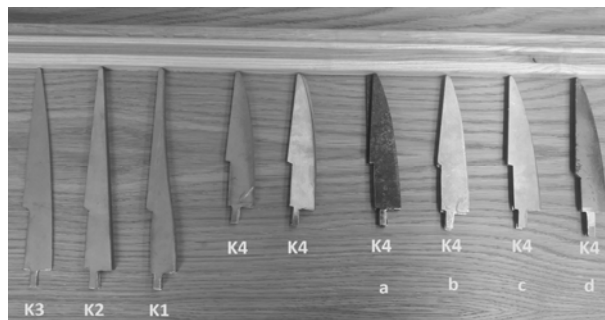
Po przebiciu przerwy międzyelektrodowej, kiedy jej rezystancja staje się bardzo mała, napięcie w obszarze wyładowania spada poniżej wartości napięcia gaśnięcia, co pociąga za sobą przerwanie wyładowania iskrowego. W

tym samym momencie napięcie międzyelektrodowe ponownie wzrasta i proces cyklicznie powtarza się. Wyładowanie między elektrodami prezentuje seria zdjęć na rys. 2. Charakter pracującego reaktora jest częściowo okresowy - efekt powtarzającego się, ślizgającego się wyładowania po elektrodach, niemniej niejednorodność zjonizowanej przestrzeni, zawirowania gazu, wahania napięcia przekładają się na nieliniowość obciążenia. Analiza punktu pracy jest więc trudna i pozwala często na wyciąganie wniosków tylko jakościowych a nie ilościowych.

### Analiza zaburzeń przewodzonych

W odniesieniu do wymagań jakości i bezpieczeństwa stawianym wszystkim urządzeniom i instalacjom elektrycznym, szczególnie znaczenie w przypadku pracy reaktora, mają aspekty jego kompatybilności elektromagnetycznej (EMC). EMC zapewnia harmonijną pracę obiektów elektrycznych w określonym środowisku i jest podstawą do uzyskania certyfikatu dopuszczenia obiektu do pracy i sprzedaży. Pełna analiza kompatybilności każdego urządzenia obejmuje testy odporności i emisyjności. Prezentowana praca zawiera tylko analizę emisji zaburzeń propagowanych przewodowo w torze obwodu roboczego.

Generowane przez reaktor plazmowy elektryczne wyładowania oraz plazma są źródłem silnych zakłóceń propagowanych zarówno poprzez promieniowanie jako przewodzenie [4,5,6,7,18]. Instalacja reaktora nie posiada dodatkowych obwodów sterujących dlatego badanie przewodzonych zakłóceń elektromagnetycznych sprowadza się tylko do analizy obwodu zasilania. Do celów identyfikacji elektromagnetycznych zaburzeń przewodzonych w torze roboczym (L1,L2,L3,N) reaktora wykorzystano odbiornik pomiarowy ESCI3 Rohde Schwarz i trójfazową sieć sztuczną SMZ-6/50. Pomiary przeprowadzono na stanowisku z uziemionymi płaszczyznami ekwipotencjalnymi widocznymi w tle na rys. 1. Pomiary realizowano detektorem wartości średniej, w ustawieniach zgodnych z wymaganiami norm CISPR – bandwidth 120kHz, step size 40kHz, measurement time 10ms.

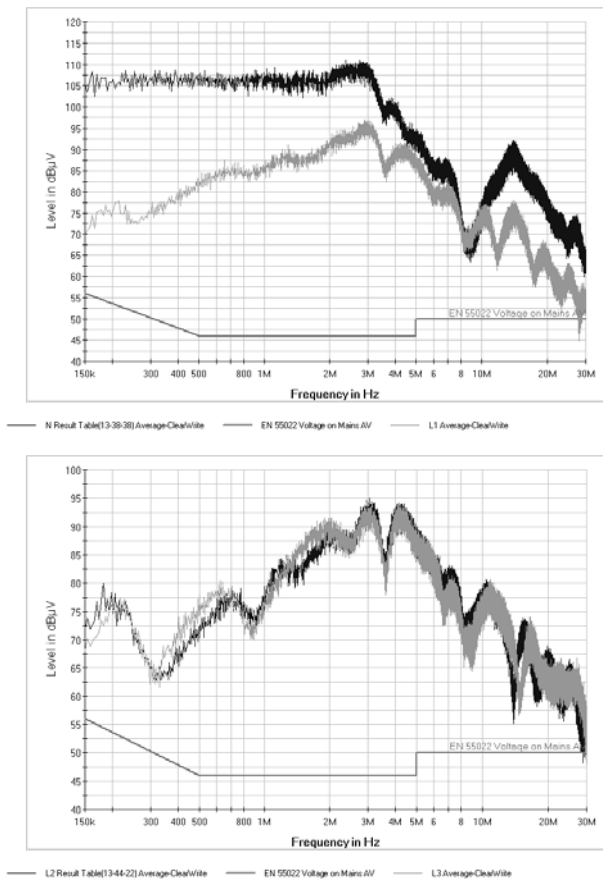


Rys. 3. Elektrody poddane testom (a- stal czarna S235, b- aluminium H24 1050A, c- mosiądz M63, d- stal kwasoodporna 0H18N9)

Zaprojektowany w komorze wyładowczej układ elektrod umożliwia ich wymianę i niewielką regulację przestrzeni międzyelektrodowej. Na Rys. 3 przedstawiono elektrody które poddano testom – cztery typy elektrod stalowych o różnych kształtach (K1- długa wypukła, K2 – długa prosta, K3- długa wypukła, K4 – krótka wypukła). Elektrody K1, K2, K3, K4 zostały wykonane ze stali nierdzewnej, kwasoodpornej 0H18N9 o grubości 2 mm. Dodatkowo wykonano w technologii „waterjet” komplet elektrod w kształcie K4 ze stali 0H18N9, stali czarnej S235, mosiądzu M63 i aluminium H24 1050A o grubościach 1,5 mm.

W pierwszej części, analizie poddano trzy układy długich elektrod z tego samego materiału (stal nierdzewna)

ale o różnych kształtach (Rys.3. - K1, K2, K3). Przykładowe wartości zaburzeń uzyskane w trakcie badań odniesione do dopuszczalnego limitu określonego przez zharmonizowaną normę EN55022 do dyrektywy EMC 2014/30/EU zaprezentowano dla układu elektrody na rysunku 4.

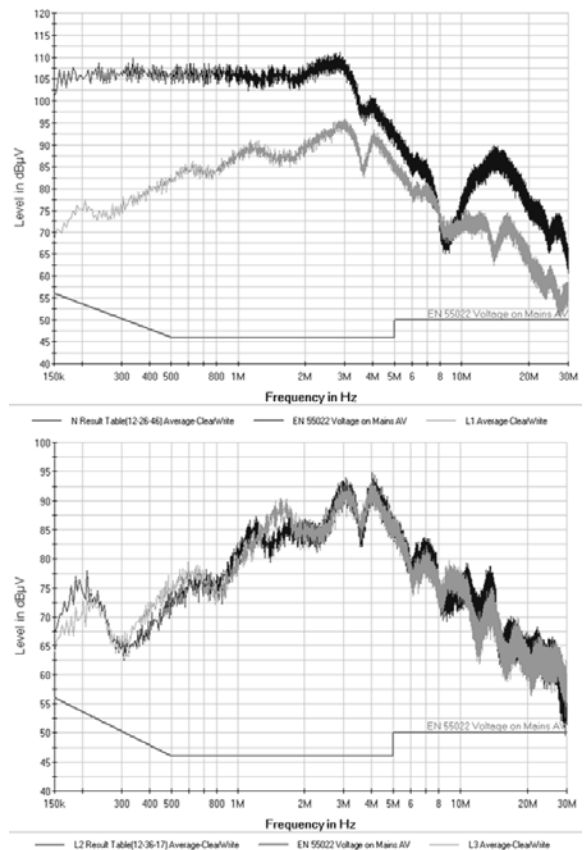


Rys.4. Zakłócenia mierzone w przewodach N, L1, L2, L3 w układzie reaktora z elektrodami stalowymi o kształcie K3 (ciemniejszym kolorem N i L2, jaśniejszym L1 oraz L3)

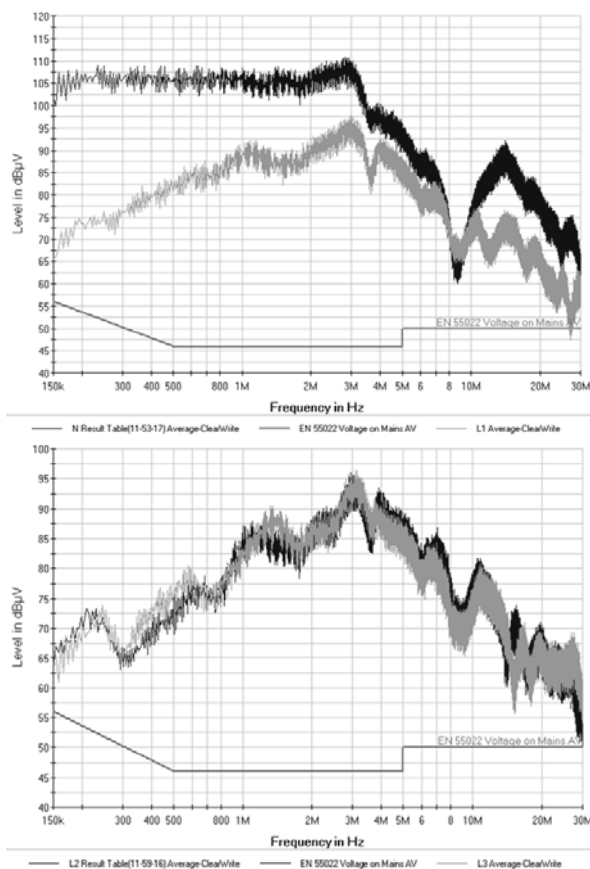
Kolejny etap testów dotyczył elektrod o tym samym kształcie, ale wykonanych z różnych materiałów (Rys.3 – b, d). Do artykułu wybrano wyniki z testów dla stali 0H18N9 oraz dla aluminium. Uzyskane wartości prezentują wykresy na Rys. 5 oraz Rys. 6.

Praca wyładowcza reaktora generuje silne, dynamiczne i szerokopasmowe zakłócenia, które są trudne do analizy. Analizując poszczególne układy elektrod widać niewielkie różnice w poziomach mierzonych zakłóceń. Charakter szerokopasmowy zakłóceń jest tu zauważalny w całym zakresie pomiarowym. Niewielkie rozbieżności są widoczne zarówno w niskim paśmie częstotliwości (kiloherce) jak i w zakresie kilkudziesięciu megaherców. Nie widać tu jednoznacznych relacji wpływu wielkości i kształtu elektrod na charakter zakłóceń – choć dokładna analiza wskazuje np. że w wielu układach ekstremum zakłóceń identyfikowane jest w okolicach 3 MHz, ale w kilku przypadkach ekstremum jest w okolicach wartości 4MHz. To wskazuje, że jednak pewne zmiany są. Uzyskane wstępnie wyniki wymagają dalszych badań, powtórzonych w określonych jednoznacznie warunkach przepływu mieszaniny gazowej i w określonej konfiguracji przestrzennej elektrod.

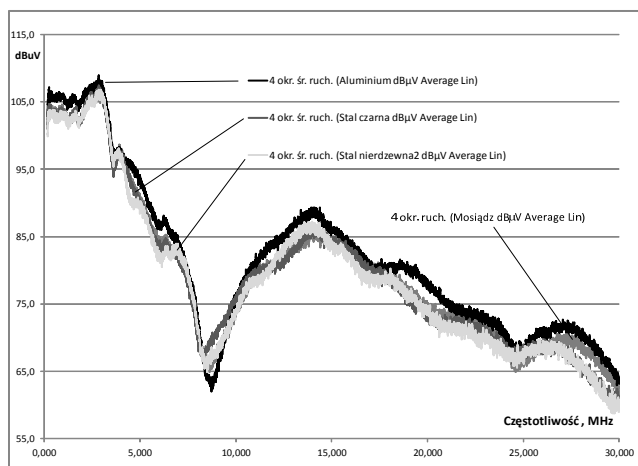
Próbą tych badań jest przeprowadzenie wstępnej analizy idącej w kierunku statystycznego wyłonienia trendu zmian. Do tego celu wykorzystano metodę opartą na średnich ruchomych 4-okresowych wyłonionych z serii charakterystyk pomiarowych (Rys.7).



Rys.5. Zakłócenia mierzone w przewodach N, L1, L2, L3 w układzie reaktora z elektrodami stalowymi o kształcie K4 (ciemniejszym kolorem N i L2, jaśniejszym L1 oraz L3)



Rys.6. Wartości zakłóceń elektromagnetycznych mierzone w przewodach N, L1, L2, L3 w układzie reaktora z elektrodami aluminiowymi o kształcie K4



Rys. 7. Średnie ruchome 4-okresowe z charakterystyk zaburzeń elektromagnetycznych zmierzonych w obwodzie reaktora dla pięciu rodzajów materiałów elektrod, faza N

### Podsumowanie

Z przeprowadzanych badań dotyczących emisji zaburzeń (w aspekcie analizy kompatybilności elektromagnetycznej) wynika, że instalacje reaktorów plazmowych są źródłem silnych zakłóceń elektromagnetycznych [4,5,6,7,17]. Zaprezentowane również i w tym artykule wyniki wskazują na silne przekroczenia dopuszczalnych poziomów przewodzonych zaburzeń elektromagnetycznych.

Parametry pracy reaktora są uzyskiwane m.in. poprzez dobór kształtów i materiałów elektrod. Konieczne są więc analizy, które określą stopień oddziaływania tych czynników na poziom zaburzeń, a to jest jednym z punktów wyjściowych do doboru odpowiednich układów przeciwwzakłóceńowych.

Do zaobserwowania tendencji rozwojowej badanych zakłóceń, w celu wygładzenia krzywej, wstępnie zastosowano metodę średniej ruchomej nieparzystej o  $k=4$ . Analizę zastosowano do przewodu N. Charakter jakościowy czterech materiałów jest zachowany, niemniej pomiędzy uzyskanymi krzywymi widać pewne rozbieżności, a to jest dowodem na istnienie zależności pomiędzy stosowanymi materiałami elektrod a istniejącymi poziomami zaburzeń. Kolejne, planowane kroki pozwolą ustalić ilościową relację pomiędzy stosowanymi materiałami elektrod a linią trendu poziomu zaburzeń.

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

### LITERATURA

- [1] Dasan B. G., Onal-Ulusoy B., Pawłat J., Diatczyk J., Sen Y., Mutlu M., A new and simple approach for decontamination of food contact surfaces with gliding arc discharge atmospheric non-thermal plasma, *Food and Bioprocess Technology*, vol. 10, nr 79, 2016, 1-12.
- [2] Krupski P., Kwiatkowski M., Terebun P., Diatczyk J., Stryczewska H.D., Pawłat J., Machala Z., Hensel K., Zastosowanie reaktora plazmowego „Miniaturized GlidArc” w

- usuwaniu kontaminatu bakteryjnego z powierzchni teflonu, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 6, doi:10.15199/48.2016.06.25
- [3] Kwiatkowski M., Terebun P., Mazurek P. A., Pawłat J., Wettability of polymeric materials after dielectric barrier discharge atmospheric-pressure plasma jet treatment, *Sensors and Materials*, vol. 30, 2018, nr 5, 1207-1212.
  - [4] Mazurek P. A., Wprowadzenie do badań zaburzeń przewodzonych w instalacji reaktora plazmowego, *Elektro.info*, 2010, nr 12, 32-34
  - [5] Mazurek P. A., Identyfikacja zaburzeń elektromagnetycznych w torze zasilania reaktora plazmowego przy różnych mieszaninach gazowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90(2014), nr 7, 203-206
  - [6] Mazurek P. A., Pawłat J., Kwiatkowski M., Badanie zaburzeń przewodzących w torze zasilania reaktorów BDB i GlidArc, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2015, nr 11, 50-53
  - [7] Mazurek P. A., Wpływ przepływu gazu roboczego na zaburzenia przewodzone w torze zapłonu trójfazowego reaktora plazmowego typu GlidArc, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95(2019), nr 3, 37-40
  - [8] Mitsugi F., Nakamiya T., Sonoda Y., Pawłat J., Aouki S., Ikegami T., Kawasaki H., Stryczewska H. D., Analysis of discharge dound and I-V characteristic on gliding arc discharge, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92(2016), nr 6, 119-122
  - [9] Pawłat J., Atmospheric pressure plasma jet for decontamination purposes, *EEPJ The European Physical Journal. Applied Physics*, vol. 61, 2013, nr 2, 1-11.
  - [10] Pawłat J., Diatczyk J., Gunaydin-Dasan B., Onal-Ulusoy B., Mok Y. S., Mini glide-arc plasma reactor for biological decontamination, *European Journal of Medical Technologies*, vol. 14, 2017, nr 1, 29-32
  - [11] Pawłat J., Starek A., Sujak A., Kwiatkowski M., Terebun P., Budzeń M., “Effects of atmospheric pressure plasma generated in GlidArc reactor on *Lavatera thuringiaca* L. seeds’ germination”, *Plasma Processes and Polymer*, vol. 15, nr 2, 2017
  - [12] Pawłat J., Samoń R., Stryczewska H. D., Diatczyk J., Giżewski T., RF-powered atmospheric pressure plasma jet for surface treatment, *EEPJ The European Physical Journal. Applied Physics*, vol. 61, nr 2, 2016.
  - [13] Pawłat J., Terebun P., Kwiatkowski M., Tarabová B., Kovaľová Z., Kučerová K., Machala Z., Janda M., Hensel K., Evaluation of oxidative species in gaseous and liquid phase generated by mini-gliding arc discharge, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 39(2019), nr 3, 627-642
  - [14] Stryczewska H. D., Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009
  - [15] Stryczewska H. D., Pawłat J., Ebihara K., Non-thermal plasma aided soil decontamination, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, vol. 16, 2013, nr 1, 23-30
  - [16] Stryczewska H. D., Jakubowski T., Kalisiak S., Giżewski T., Pawłat J., Power systems of plasma reactors for non-thermal plasma generation, *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, vol. 16, nr 1, 2013, 52-62.
  - [17] Terebun P., Kwiatkowski M., Mazurek P., Pawłat J., Impact of radio-frequency atmospheric-pressure plasma on water contact angles of high-impact polystyrene, *Sensors and Materials*, vol. 30, nr 5, 2018, 1213-1220.
  - [18] Wac-Włodarczyk A., Kaczor A., Wpływ podstawowych parametrów pracy reaktora plazmowego typu GlidArc na wartości zaburzeń przewodzonych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87(2011), nr 12a, 198-200.