

Pomiary emisji elektromagnetycznej na stanowisku cięcia plazmowego

Maciej Sadowski

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45D

Streszczenie: Urządzenia cięcia plazmowego są obecnie powszechnie wykorzystywane w wielu procesach technologicznych związanych z wytwarzaniem konstrukcji metalowych. Są one także źródłem zakłóceń elektromagnetycznych. Mogą wpływać na kompatybilność elektromagnetyczną sąsiadujących urządzeń, doprowadzając, w przypadku przekroczenia wartości granicznych, do zakłóceń ich pracy. Z punktu widzenia przepisów o bezpieczeństwie i higienie pracy, emisje promieniowania elektromagnetycznego są także czynnikiem środowiskowym powodującym narażenia personelu obsługującego urządzenia. Z tej przyczyny ważne jest prowadzenie pomiarów emisji promieniowanych od urządzeń przemysłowych. W artykule omówiono problematykę promieniowania elektromagnetycznego emitowanego podczas pracy urządzeń do cięcia plazmowego. Przedstawiona została budowa plazmotronu (palnika plazmowego) oraz jego zasada działania. Przeprowadzone zostały pomiary emisji pola elektromagnetycznego podczas pracy przecinarki plazmowej na jej stanowisku roboczym. Wyniki pomiarów zostały zaprezentowane i przeanalizowane. Pozwoliły one sformułować wniosek, że występujące w trakcie cięcia plazmowego emisje pola elektromagnetycznego nie przekraczają wartości granicznych i nie powodują zagrożenia dla personelu obsługującego urządzenie.

Słowa kluczowe: cięcie plazmowe, pole elektromagnetyczne, pomiary pól elektromagnetycznych, bezpieczeństwo i higiena pracy

1. Wprowadzenie

Podczas budowy konstrukcji metalowych powszechnie stosowane są procesy spawania oraz cięcia metali. Procesy spawania są dość często opisywane w literaturze technicznej, znacznie mniej publikacji dotyczy procesów cięcia metali. Obecnie na skalę przemysłową bardzo często stosowane są metody cięcia plazmowego. Palniki plazmowe (plazmotrony), podobnie jak wszystkie inne urządzenia elektryczne, powinny spełniać wymagania kompatybilności elektromagnetycznej, czyli nie wytwarzać szkodliwych pól elektromagnetycznych mogących zakłócić pracę innych urządzeń, oraz powinny być odporne na zakłócenia pochodzące od obcych pól elektromagnetycznych. Ważne jest, aby występujące pola elektromagnetyczne nie powodowały zagrożenia dla zdrowia obsługujących je pracowników. Jest to szczególnie istotne w środowiskach przemysłowych, gdzie pracownicy mogą być narażeni na promieniowanie od wielu źródeł.

2. Zasada działania palników plazmowych

Plazma, nazywana czasami czwartym stanem skupienia, jest silnie zjonizowaną materią przypominającym gaz. Szacuje się, że 99% wszechświata jest zbudowane z plazmy. Zewnętrzna warstwa atmosfery ziemskiej, zwana jonosferą ma postać plazmy. W warunkach ziemskich plazma występuje stosunkowo rzadko, np. podczas wyładowań burzowych. Może też być wytwarzana sztucznie przez człowieka. Rozróżnia się plazmę niskotemperaturową lub wyładowań elektrycznych (tak zwaną zimną) oraz plazmę wysokotemperaturową (gorącą) wytwarzaną podczas syntezy termojądrowej. W technice wykorzystuje się głównie plazmę zimną. Plazma jest elektrycznie obojętna, pomimo tego, że wewnątrz niej występują zarówno jony jak i obojętne elektrycznie atomy. Plazma przewodzi prąd elektryczny, ze względu na obecność dużej ilości jonów oraz swobodnych elektronów. Opór elektryczny plazmy maleje wraz ze wzrostem temperatury.

Można wyróżnić trzy różne rodzaje zjawisk świetlnych występujących podczas przepływu prądu w plazmie:

- tzw. prąd czarny, który nie emituje światła widzialnego, charakterystyczny dla prądów o małym natężeniu;
- świecenie jarzeniowe, spowodowane przepływem prądów o większym natężeniu;
- huk elektryczny, powstający podczas przepływu dużych prądów.

Plazma ma bardzo wiele zastosowań w technice. Ich aktualny przegląd przedstawiono w pracach [1, 2]. Jednym z zastosowań plazmy jest technologia cięcia metali. Źródłem ciepła topiącym metal jest wysokotemperaturowy łuk plazmowy jarzący się między elektrodą a obrabianym metalem. Plazma wytwarzana jest w pla-

Autor korespondujący:

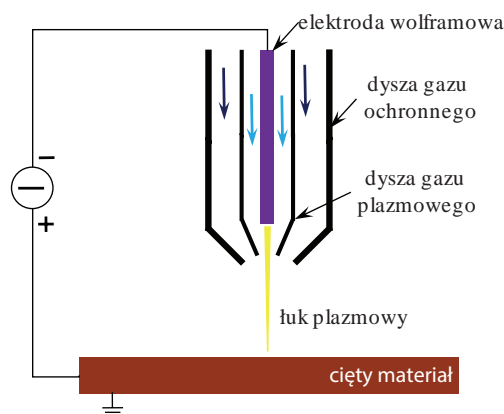
Maciej Sadowski, m.sadowski@pb.edu.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 21.10.2015 r., przyjęty do druku 2.12.2015 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Schemat konstrukcji palnika plazmowego
Fig. 1. Principle of operation of the plasma torch

zmotronie (palniku plazmowym). Plazmotrony mogą wytwarzać zimną plazmę o temperaturach rzędu 4–30 tysięcy kelwinów. Są one powszechnie stosowane w technice spawania i cięcia metali, w tym nietopliwych i trudnotopliwych. Budowane są dwa rodzaje plazmotronów – z łukiem wewnętrznym lub z łukiem zewnętrznym. W pierwszej konstrukcji łuk powstaje wewnątrz palnika między dwoma elektrodami. W drugim przypadku łuk powstaje między elektrodą wewnętrzną palnika i obrabianym materiałem, który stanowi drugą elektrodę – musi on być dobrym przewodnikiem elektrycznym. W taki sposób budowane są przecinarki plazmowe, wykorzystywane do cięcia metali. Są one określane jako urządzenia PAC (ang. *Plasma Arc Cutting*) [2, 3].

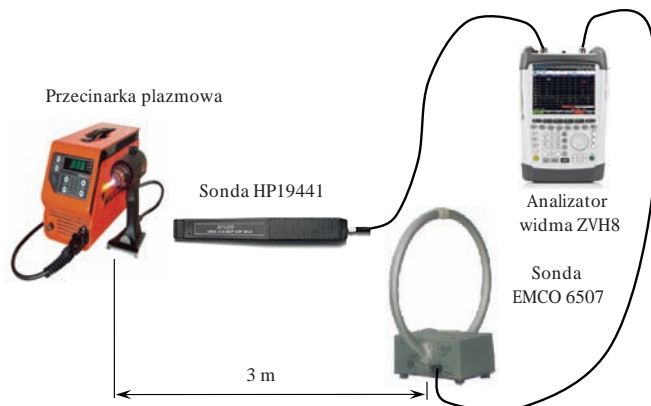
W palniku plazmowym (rys. 1) używane są dwa rodzaje gazów: gazy plazmowe i gazy osłonowe. Jako gazy plazmowe i osłonowe stosowane są z reguły tlen, azot, argon, mieszanka azot+tlen lub powietrze. Gaz osłonowy stosowany jest do schłodzenia dyszy palnika. Cięcie łukiem plazmowym wymaga zasilania z prostownikowych lub inwertorowych źródeł prądu stałego. Biegun ujemny podłączony jest do elektrody wewnętrznej (nietopliwej wykonanej z wolframu), zaś biegun dodatni do materiału obrabianego. Łuk plazmowy zawężany jest w czasie przechodzenia przez otwór dyszy plazmowej z elektrody w kierunku ciętego materiału. W efekcie gaz plazmowy, przepływając przez łuk elektryczny, nagrzewany jest gwałtownie do bardzo wysokiej temperatury i przyspieszany do prędkości naddźwiękowych tworząc plazmę. Strumień plazmy wyrzucany z dyszy zawężającej palnika topi metal i wyrzuca go z dużą prędkością na zewnątrz szczeliny. Przed utworzeniem głównego łuku plazmowego może być wytwarzany pomocniczy łuk pilotażowy jarzący się między elektrodą i dyszą [2–4].

Duża gęstość energii cieplnej cechująca łuk plazmowy umożliwia prowadzenie cięcia z prędkościami dochodzącymi do 10 m/min. Prędkość cięcia oraz przebijalność blach zależy głównie od parametrów łuku plazmowego oraz rodzaju ciętego metalu [3].

Procesy generowania plazmy są dość złożone. Zależne są nie tylko od układów elektrycznych, ale także od konstrukcji mechanicznej urządzenia, doboru gazów i innych czynników. Obecnie podejmuje się próby symulacji numerycznej samego procesu cięcia plazmowego a także przecinarek plazmowych, w celu usprawnienia pracy urządzeń, optymalizacji składu gazów i ich przepływu oraz metod kształtowania strumienia tnącego [5–7]. Ich wyniki pozwalają na produkcję coraz doskonalszych urządzeń, charakteryzujących się bardzo dużą szybkością i dokładnością cięcia metali [5].

3. Pomiary pól elektromagnetycznych od urządzeń plazmowych

Znajomość rozkładu pól elektromagnetycznych powstających podczas pracy urządzeń jest ważna z co najmniej dwóch względów: kompatybilności elektromagnetycznej oraz przepisów BHP.



Rys. 2. Konfiguracja stanowiska pomiarowego (PAC – przecinarka plazmowa)
Fig. 2. Sketch of the test stand of the plasma arc cutting device

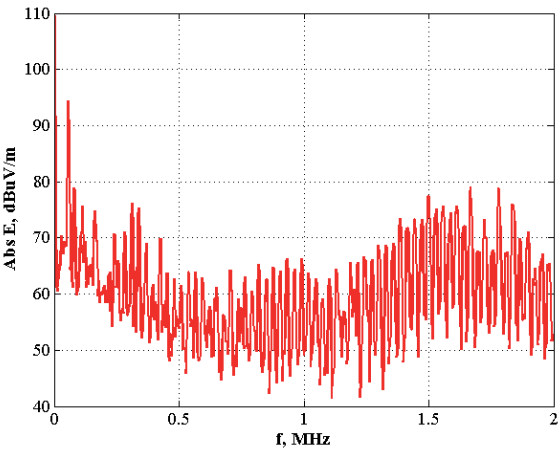
Zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej są uwzględniane w normach PN-EN 60974-10: *Arc Welding Equipment, Part 10: Electromagnetic compatibility requirements* oraz normie PN-EN 55011: *Urządzenia przemysłowe i medyczne – Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej*. Dokumenty te definiują dwa rodzaje zaburzeń: przewodzone i promieniowane. Zaburzenia promieniowane powinny być mierzone dla częstotliwości powyżej 30 MHz, zaś zaburzenia przewodzone poniżej 30 MHz. Ze względu na ochronę pracowników przed elektromagnetycznym promieniowaniem niejonizującym wydane zostało Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [8]. Dokument ten określa maksymalne dopuszczalne poziomy emisji promieniowanych na stanowisku pracy. Ich wartości są różne i zależne od wykorzystywanych częstotliwości.

Pomiary pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez przecinarkę plazmową zostały przeprowadzone podczas normalnej pracy urządzenia, na jego stanowisku roboczym. Do rejestracji widma częstotliwościowego został wykorzystany analizator widma Rohde Schwarz ZVH8 wraz z dwoma sondami pomiarowymi o znanych charakterystykach przetwarzania. Pomiary zostały przeprowadzone dla dwóch przypadków: w bezpośredniej bliskości palnika plazmowego oraz w odległości 3 m od urządzenia roboczego. W drugim przypadku jest to stosunkowo niewielka odległość. Nie można jej było zwiększyć ze względu na usytuowanie stanowiska pomiarowego – mała powierzchnia zakładu, bliskość sąsiednich budynków i ulicy. Konfigurację stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 2. Pierwszym etapem badań było wstępne określenie zakresu częstotliwości, za pomocą pomiaru anteną logarytmiczno-periodyczną, w którym pojawiają się zakłócenia pola podczas pracy przecinarki plazmowej. Okazało się, że znajdują się one głównie w paśmie częstotliwości poniżej 30 MHz. Na podstawie tego zostały dobrane sondy pomiarowe. Pierwsza z nich to sonda elektryczna pola bliskiego HP19441B o zakresie częstotliwości roboczych od 9 kHz do 30 MHz. Pomiary tą sondą zostały wykonane w bezpośredniej bliskości strumienia plazmy (ok. 10 cm od dyszy palnika). Druga sonda to antena pomiarowa EMCO 6507 – pokrywa zakres częstotliwości od 1 kHz do 30 MHz. Umożliwia ona pomiar zarówno natężenia pola elektrycznego jak i magnetycznego.

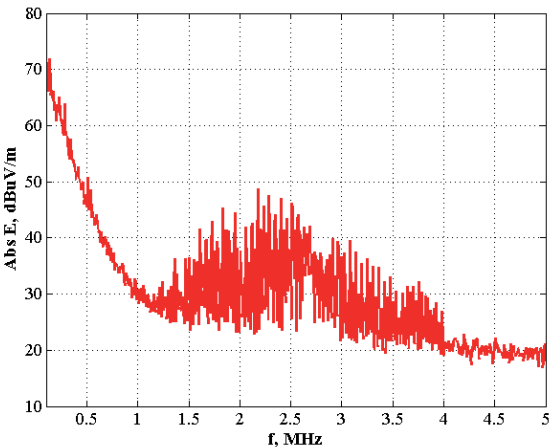
W pierwszej kolejności zmierzona została składowa elektryczna pola elektromagnetycznego za pomocą sondy umieszczonej w pobliżu łuku plazmowego. Pomiar wykonano sondą pola bliskiego HP19441B – wyniki przedstawiono na rys. 3. Widać, że pole ma charakter pola wieloczęstotliwościowego o dużej liczbie harmonicznych z zakresu częstotliwości 1–4 MHz. Natężenie pola osiąga wartości do 50 dB · μV/m (co odpowiada 316 μV/m).

Kolejne pomiary przeprowadzone zostały za pomocą anteny pętlowej EMCO 6507, usytuowanej w odległości 3 m od stanowiska z palnikiem plazmowym. Zmierzone zostały składowe elektryczna i magnetyczna pola, a konkretnie widmo częstotliwościowe natężenie pola elektrycznego i magnetycznego. Procedura pomiaru składała się z dwóch kroków. W pierwszym zmierzono promieniowanie tła (kolor niebieski), w celu określenia poziomów promieniowania bez pracującego palnika. W kroku drugim mierzono pole promieniowane podczas operacji przecinania metalu. Wyniki pomiaru pola elektrycznego przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Pole elektryczne daje widmo multiharmoniczne, z wyraźnymi maksymalnymi wartościami dla harmonicznymi w paśmie 1–4 MHz oraz częstotliwości 13,56 MHz i 27 MHz. Składowe promieniowania powyżej 30 MHz w zasadzie pokrywają się z promieniowaniem tła. Składowe o częstotliwościach poniżej 5 MHz związane są z inwerterowym układem zasilania palnika. Częstotliwość 13,56 MHz jest częstotliwością przeznaczoną do pracy urządzeń przemysłowych (tzw. częstotliwości ISM) i wykorzystywana jest w palnikach jako źródło sygnału w.cz. modulującego przepływ gazu. Maksimum w okolicach 27 MHz jest drugą harmoniczną tego sygnału. Widoczne jest, że włączenie urządzenia bez uruchomienia palnika wytwarza już znaczne pole, zaś po włączeniu palnika, pola zmienia się w nieznacznym stopniu. Jednakże natężenie pola elektrycznego jest znaczne i wynosi ok. 70 dB · μV/m (3,16 mV). Widoczne jest także, że włączenie palnika powoduje wzrost poziomu promieniowania o około

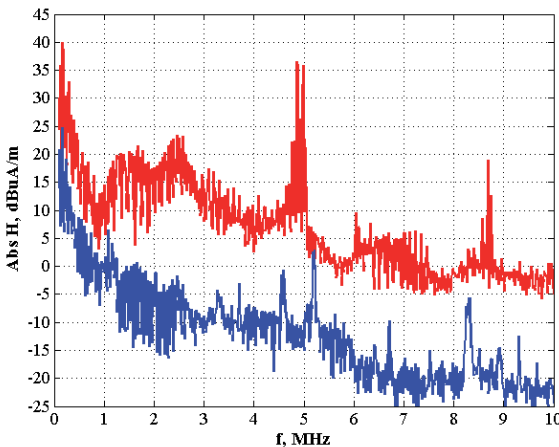
20 dB · μV/m. Na rys. 5 przedstawiono fragment powiększonego widma w zakresie częstotliwości do 2 MHz. Wyraźnie widoczna jest na nim wieloharmoniczna struktura pola. Zarejestrowane natężenie pola elektrycznego osiąga maksymalne wartości około 80 dB · μV/m (10 mV/m).



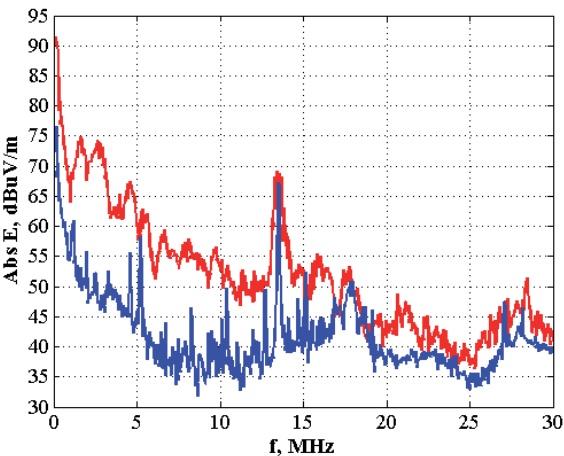
Rys. 5. Widmo częstotliwościowe natężenia pola elektrycznego w odległości 3 m od palnika – pomiar w paśmie 0–2 MHz
Fig. 5. Spectrum of the electric component in the distance 3 m from plasma arc cutting stand, measurement in the 0–2 MHz frequency band



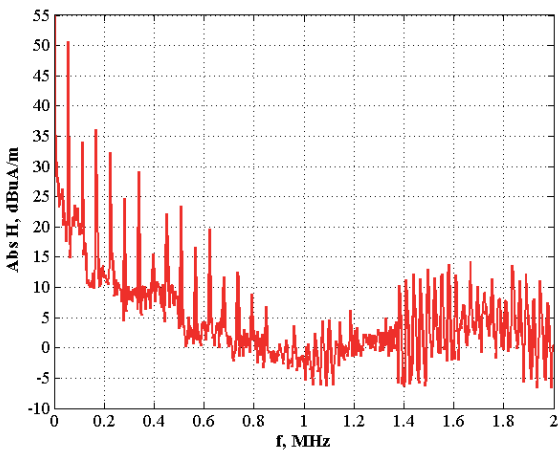
Rys. 3. Widmo częstotliwościowe natężenia pola elektrycznego w strefie bliskiej, pomiar sondą pola bliskiego
Fig. 3. Spectrum of the electric component in the near field, measurement of the near field probe



Rys. 6. Widmo częstotliwościowe natężenia pola magnetycznego w odległości 3 m od palnika – pomiar w paśmie 0–10 MHz
Fig. 6. Spectrum of the magnetic component in the distance 3 m from plasma arc cutting stand, measurement in the 0–10 MHz frequency band



Rys. 4. Widmo częstotliwościowe natężenia pola elektrycznego w odległości 3 m od palnika – pomiar w paśmie 0–30 MHz
Fig. 4. Spectrum of the electric component in the distance 3 m from plasma arc cutting stand, measurement in the 0–30 MHz frequency band



Rys. 7. Widmo częstotliwościowe natężenia pola magnetycznego w odległości 3 m od palnika – powiększenie dla pasma 0–2 MHz
Fig. 7. Spectrum of the magnetic component in the distance 3 m from plasma arc cutting stand, measurement in the 0–2 MHz frequency band

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki pomiarów widma częstotliwościowego natężenia pola magnetycznego w wybranych oknach częstotliwości. Podobnie jak składowa elektryczna ma ono charakter wieloharmoniczny, o harmonicznych dość szybko zanikających – powyżej 10 MHz promieniowanie zbliża się do poziomu tła, zaś dla częstotliwości około 30 MHz jest już z nim identyczne. Maksymalne wartości natężenia pola magnetycznego zarejestrowano dla składowych niskoczęstotliwościowych – około $55 \text{ dB} \cdot \mu\text{A/m}$ ($560 \mu\text{A/m}$). Widoczne są też wyraźne maksima w okolicach częstotliwości 5 MHz (około $37 \text{ dB} \cdot \mu\text{A/m}$) i 8,7 MHz (około $20 \text{ dB} \cdot \mu\text{A/m}$).

4. Podsumowanie

Po analizie uzyskanych danych stwierdzono, że występujące poziomy emisji promieniowanych podczas cięcia palnikiem plazmowym znajdują się w zakresie częstotliwości poniżej 30 MHz. Maksymalne zmierzone poziomy wynoszą odpowiednio $80 \text{ dB} \cdot \mu\text{V/m}$ (10 mV/m) dla składowej elektrycznej i $55 \text{ dB} \cdot \mu\text{A/m}$ ($570 \mu\text{A/m}$) dla składowej magnetycznej. W rozporządzeniach dotyczących maksymalnych poziomów pól dla tych zakresów częstotliwości [8] dopuszczalne poziomy promieniowania na miejscu pracy wynoszą odpowiednio: 20 V/m dla pól elektrycznych i 267 mA/m . Są one wielokrotnie wyższe od zmierzonych wartości. Oznacza to, że praca na stanowisku z zastosowaną przecinarką plazmową jest bezpieczna i nie wprowadza zagrożenia dla zdrowia obsługi w kontekście obowiązujących przepisów prawnych. Należy jednak pamiętać, że w wielu przypadkach, przecinarki plazmowe są tylko jednym z kilku urządzeń mogąym emitować pole elektromagnetyczne. W takich przypadkach należy brać pod uwagę sumę pól od wszystkich źródeł znajdujących się w pobliżu danego stanowiska.

Podziękowania

Publikacja została sfinansowana z pracy S/WE/1/2015, Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej.

Bibliografia

1. Szałatkiewicz J., *Zastosowanie plazmy w technice – aktualne tendencje*. „Pomiary Automatyka Robotyka” 2/2010, 17–20.
2. Stryczewska H. D., *Technologie plazmowe w energetyce i inżynierii środowiska*, Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 2009.
3. Kimpel A., *Podręcznik spawalnictwa*. T.1. *Technologia spawania i cięcia*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2013.
4. Ramakrishnan S., Gershenzon M., Polivka F., Kearney T.N., *Plasma generation for the plasma cutting process*, “IEEE Trans. on Plasma Science” Vol. 25, Issue 5, October 1997, 937–946.
5. Jiayou Wang, Conghui He, Yunhua Yu, Feng Yang, *Development of a novel pulsed arc system for precision plasma cutting*, Int. Conf. on Mechatronics and Automation, ICMA 2009, 3426–3430.
6. Deli Jia, Jinsong He, *Research on intelligent control strategy of plasma cutting process*, 2010 Chinese Control and Decision Conference, CD-ROM Conference Proceedings, 3409–3413, DOI: 10.1109/CCDC.2010.5498585.
7. Kumar M.S., Dhanaseker B., Janardhana G.R., Paramasivam S., *Numerical simulations of plasma behavior for different swirl angles of cut gas in plasma cutting torch*, Proc. 2011 2nd Int. Conf. on Engineering and Industries, 167–172.
8. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Dz.U. nr 217 z 2002r., poz.1833 z późn. zmianami.

Measurements of electromagnetic emission on the Plasma Arc Cutting stand's

Abstract: Plasma cutting machines are now widely used in many technological processes involved in the manufacture of metal structures. They are also a source of electromagnetic interferences. It may influence the electromagnetic compatibility of nearby devices, leading, in the case of exceeding limits, to disruption of their work. From the point of view of the occupational health and safety regulations, emissions of electromagnetic fields are also factor causing exposure of operating personnel. For this reason, it is important to conduct measurements of radiated emissions from industrial equipment. The article discusses the issues of electromagnetic radiation emitted during operation of the plasma cutting machine. The construction of plasma torch and its principle of operation are presented. The measurement results of the emitted electromagnetic fields are presented and analyzed. The results lead to the conclusion that electromagnetic field emissions from plasma arc cutter are safe for technical personnel.

Keywords: plasma arc cutting, electromagnetic field, measurements of electromagnetic fields, occupational safety and health

dr inż. Maciej Sadowski

m.sadowski@pb.edu.pl

Adiunkt w Katedrze Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej, Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej. Jego zainteresowania zawodowe obejmują radioelektronikę i radiokomunikację, a także zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej.

