

Halina Aniołczyk

Paweł Mamrot

Magda Mariańska

ANALIZA METOD POMIAROWYCH I OCENIAJĄCYCH EKSPOZYCJĘ ZAWODOWĄ NA POLA ELEKTROMAGNETYCZNE STOSOWANE W NAGRZEWNICTWIE POJEMNOŚCIOWYM

ANALYSIS OF METHODS FOR MEASUREMENT AND ASSESSMENT OF OCCUPATIONAL EXPOSURE
TO ELECTROMAGNETIC FIELDS IN DIELECTRIC HEATING

Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera / Nofer Institute of Occupational Medicine, Łódź, Poland

Zakład Ochrony Radiologicznej / Department of Radiation Protection

STRESZCZENIE

Wstęp: Najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami stosowanymi w nagrzewnictwie pojemnościowym są zgrzewarki dielektryczne wysokiej częstotliwości (w.cz.). Często są one źródłem silnych pól elektromagnetycznych (PEM) z powodu braku ekranowania elektrody zgrzewającej. Obsługa ręczna ww. zgrzewarek powoduje, że kończyny ekspozowane są na PEM o najwyższych wartościach, przekraczających dopuszczalne normy. Celem niniejszej pracy było uaktualnienie stanu wiedzy o realnej ekspozycji operatorów zgrzewarek w.cz. oraz optymalizacja postępowania metodycznego i oceniającego ekspozycję. **Materiał i metody:** Przeprowadzono pomiary natężenia PEM w otoczeniu 10 zgrzewarek dielektrycznych na stanowiskach 12 operatorów w dużym zakładzie produkcyjnym. Do pomiarów zastosowano nowoczesną aparaturę pomiarową. Badania i pomiary PEM wykonano metodą referencyjną i rozszerzoną o pomocnicze punkty pomiarowe i pomiar prądów indukowanych w kończynach I_L . Pomiary prądu indukowanego wykonano u 20 operatorów podczas obsługi tej samej zgrzewarki w.cz. **Wyniki:** Najwyższe zmierzone wartości natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H) na stanowisku pracy operatorów zgrzewarek wynosiły: dla całego ciała: E = do 350 V/m, H = do 1,00 A/m; dla kończyn: E = do 600 V/m, H = do 3,30 A/m. Wskaźnik ekspozycji W w podstawowym pionie pomiarowym dochodził do 60. Wartości I_L mierzone w nadgarstku operatora przekraczały 64 mA i wykazywały zależność indywidualną. **Wnioski:** Ekspozycja dla 25% operatorów zgrzewarek w.cz. na PEM była niedopuszczalna, a po uwzględnieniu dłoni operatora odsetek ten wzrósł do 50%. O dopuszczalności warunków pracy powinien decydować pomiar prądów indukowanych w kończynach I_L , którego pomiar jest miarą wewnętrzną ekspozycji na PEM. Med. Pr. 2012;63(3):329–344

Słowa kluczowe: ekspozycja zawodowa operatora, zgrzewarka dielektryczna wielkiej częstotliwości, natężenie pola elektrycznego, natężenie pola magnetycznego, prądy indukowane w kończynach

ABSTRACT

Background: High-frequency (HF) welders are the most common devices that make use of dielectric heating. They are a source of high-intensity electromagnetic fields (EMFs). Manual operation of those welders makes that the limbs are exposed to EMFs of extremely high intensity, far in excess of the currently admissible values. The aim of this study was to update knowledge of actual exposure of HF welder operators to EMF and to optimize the procedure of exposure assessment. **Material and Methods:** Measurements of the EMF intensity in the vicinity of 10 dielectric welders at work posts of 12 operators were performed. EMF measurements were made using the reference method, extended by auxiliary measurement points to measure induced currents I_L in the limbs. Induced current measurements were performed in 20 operators tending the same HF welder. **Results:** The highest values of the electric (E) and magnetic (H) fields measured at work posts were for whole body: E, up to 350 V/m, and H, up to 1.00 A/m; and for limbs: E, up to 600 V/m and H, up to 3.30 A/m. The W exposure indicator in the primary vertical measurement points was almost as high as 60. I_L values measured at the wrist exceeded 64 mA and were individual-operator-dependent. **Conclusions:** EMF exposure of 25% of HF welder operators exceeded the national admissible values and after taking into account the operators' hands, this figure rose to 50%. The measured value of I_L , representing a measure of internal exposure to EMF, should serve as the main criterion in deciding whether working conditions are admissible. Med Pr 2012;63(3):329–344

Key words: occupational exposure, high frequency dielectric welding, electric field strength, magnetic field strength, induced currents in limbs

Adres autorów: Zakład Ochrony Radiologicznej, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera,
ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź, e-mail: h_aniol@imp.lodz.pl
Nadesłano 10 kwietnia 2012, zatwierdzono 20 kwietnia 2012

WSTĘP

Widmo pola elektromagnetycznego (PEM) obejmuje bardzo szerokie spektrum częstotliwości – od 0 Hz do powyżej 10^{23} Hz. Jest ono dobrem globalnym, a jego ograniczone zasoby stwarzają konieczność regulacji wykorzystania go na szczeblu międzynarodowym. Za gospodarkę widmem elektromagnetycznym odpowiedzialny jest Międzynarodowy Związek Telekomunikacyjny (International Telecommunication Union – ITU).

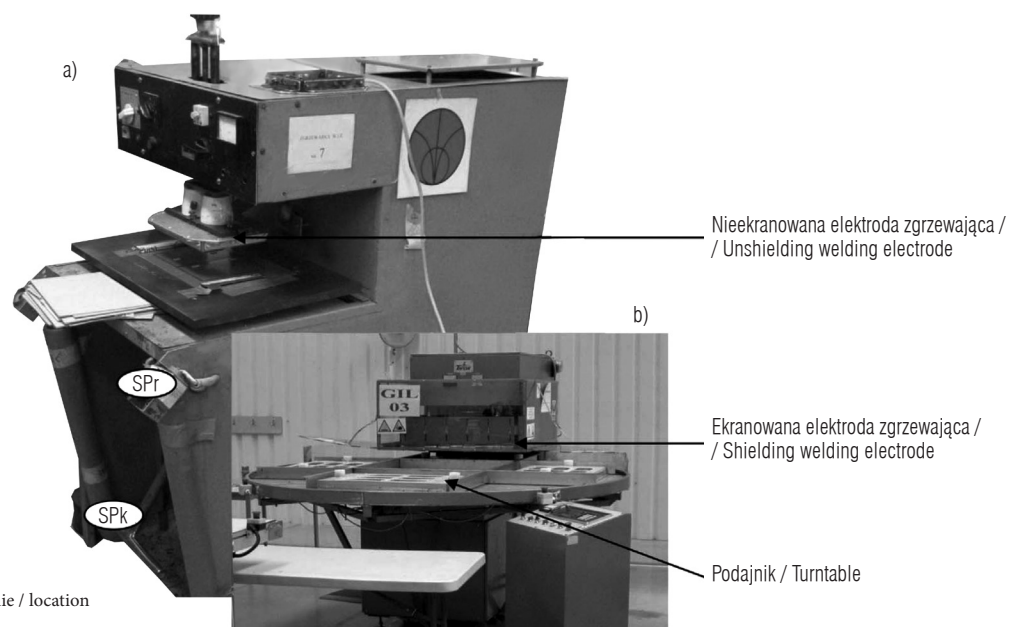
Niektóre częstotliwości z zakresu radiowego (Radio-Frequency – RF) zostały przeznaczone przez ITU do stosowania jako częstotliwości podstawowe do celów przemysłowych, naukowych i medycznych (Industrial, Scientific and Medical equipment – ISM) (1). W przemyśle, w nagrzewnictwie pojemnościowym wykorzystywane są 3 zakresy częstotliwości: 13,56 MHz; 27,12 MHz i 40,68 MHz. W zakresie ww. częstotliwości nie ogranicza się dopuszczalnych poziomów emisji dla celów ochrony służb radiowych (2).

Nagrzewanie pojemnościowe, nazywane często dielektrycznym, jest efektem różnych rodzajów polaryzacji i przewodnictwa w ośrodkach dielektrycznych o określonej przenikalności elektrycznej ϵ , które znajdują się w zewnętrznym polu elektrycznym (E). Moc grzejna p_v powstająca w objętości dielektryka jest proporcjonalna do kwadratu natężenia działającego pola E, tj. $p_v \sim E^2$, stąd urządzenia stosowane w nagrzewnictwie pojemnościowym wymagają dużych wartości E. Największe za-

stosowanie nagrzewnictwa pojemnościowego to zgrzewanie, suszenie, klejenie, podgrzewanie, a w przemyśle spożywczym – rozmrażanie, pieczenie czy konserwowanie żywności.

Do zgrzewania wyrobów z folii termoplastycznych stosowane są urządzenia pojemnościowe, znane jako zgrzewarki dielektryczne. Zgrzewarka wyposażona jest w generator wysokiej częstotliwości (w.cz.), układ dopasowujący, układ elektrod (elektroda zgrzewająca i elektroda uziemiona), prasę oraz układ zabezpieczający przed skutkami przebiegów elektrycznych i wyładowań łukowych. Na fotografii 1. przedstawiono przykładowe zgrzewarki dielektryczne w.cz. z obsługą ręczną oraz z podajnikiem automatycznym.

W przemyśle drzewnym, papierniczym czy tekstylnym stosuje się suszarki pojemnościowe do usunięcia lub zmniejszenia we wsadzie stałym płynów lub wody. Pojemnościowo suszy się także w tzw. piecach czy prasach w.cz. kleje na bazie wody, żywice wygłuszające do samochodów, produkty ogniotrwałe, beton i wiele innych wyrobów. Urządzenia ISM są sklasyfikowane – urządzenia do nagrzewania pojemnościowego należą do klasy A i są przeznaczone do stosowania we wszystkich pomieszczeniach z wyjątkiem mieszkalnych (1). Wytwórca, instalator i/lub użytkownik urządzeń ISM RF musi określić dla celów formalno-prawnych grupę, do której zalicza się określone urządzenie. Urządzenia do nagrzewania pojemnościowego z racji stosowania dużych mocy są źródłem silnych pól elektromagnetycz-



SPPr, SPK – miejsce usytuowania kończyn operatora zgrzewarki obsługiwanej ręcznie / location of operator's limbs during hands welder.

Fot. 1. Zgrzewarki dielektryczne w.cz.: a) jednostanowiskowa, b) wielostanowiskowa z podajnikiem
Photo 1. HF dielectric welders: a) single-stand, b) multiple-stand with turntable

nych (PEM). Często używane są zgrzewarki bez ekranów czy osłon przestrzeni zgrzewania, dlatego operatorzy takich urządzeń mogą podlegać ekspozycji na PEM o wysokich wartościach natężenia.

Występujące w środowisku pracy PEM należą do czynników fizycznych szkodliwych dla zdrowia (3). Zapobieganie skutkom szkodliwego działania PEM na pracowników, którzy są ekspozowani na ten czynnik, realizowane jest poprzez kontrolę poziomu natężenia PEM na stanowisku pracy oraz poprzez profilaktykę zdrowotną (badania lekarskie wstępne i okresowe) na podstawie Kodeksu pracy i przepisów wykonawczych do niego (4–6). Ekspozycję operatorów zgrzewarek w.cz. na PEM cechują:

- występowanie PEM na stałym stanowisku pracownika,
- występowanie PEM przez cały okres zmiany roboczej, w ustalony sposób cyklicznie przerywanego lub w przypadku zgrzewarek impulsowych występowanie PEM modulowanego impulsowo,
- przebywanie w bezpośrednim otoczeniu urządzenia – źródła PEM, w tzw. polu bliskim,
- bardzo często obsługa ręczna,
- wysokie wartości natężenia PEM.

Bezpośrednia bliskość ciała operatora do źródła PEM ma istotny wpływ na pomiary natężenia pola oraz ocenę ekspozycji. Wynika to przede wszystkim z tego, że jest to obszar pola bliskiego (długość fali elektromagnetycznej (λ) wytwarzana przez zgrzewarki w.cz. dla częstotliwości 27,12 MHz wynosi w próżni ponad 11 m). W obszarze pola bliskiego – charakteryzującego się szybko zmieniającymi się poziomami natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H), dodatkowo przerywanego cyklicznie w kilku-, kilkunastosekundowych odstępach czasu – bardzo trudno jest jednoznacznie ustalić maksymalną skuteczną wartość natężenia pola oddziałującego na operatora. Ponadto w ww. zakresie częstotliwości występuje zjawisko sprzężenia pojemnościowego wytwarzanego pola ze sprzętem metalowym otaczającym ww. urządzenia oraz zjawisko indukowania wtórnych źródeł PEM.

Polskie przepisy higieniczne regulujące najwyższe dopuszczalne wartości natężenia (NDN) w odniesieniu do PEM opierają się na koncepcji stref ochronnych (pośredniej, zagrożenia i niebezpiecznej), określających obszary, w których mogą przebywać jedynie pracownicy, którzy odbyli specjalistyczne przeszkolenie w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy i poddali się badaniom lekarskim, potwierdzającym brak przeciwwskazań zdrowotnych do pracy w PEM (6–9). Obszar

poza ww. strefami ochronnymi, w którym przebywanie nie podlega żadnym ograniczeniom, to tzw. strefa bezpieczna. Obszar strefy bezpiecznej jest dostępny dla pozostałych pracowników, w tym kobiet w ciąży i młodocianych (10–11).

Parametry, które należy określić przy ocenie warunków pracy w PEM o częstotliwości pracy urządzeń takich, jak zgrzewarki w.cz., suszarki w.cz. czy piece w.cz., to:

- natężenie pola E (V/m) i pola H (A/m) o ogólnym działaniu na organizm człowieka,
- wskaźnik ekspozycji W dla dozy rzeczywistej pola E i H w strefie zagrożenia (w praktyce, w strefie pośredniej i zagrożenia łącznie),
- zasięgi stref ochronnych.

Dopuszczalne wartości natężenia pola (NDN) E_1 i H_1 , ustalone jako wartości graniczne strefy zagrożenia i pośredniej, podano w tabeli 1. Wartości 3-krotnie niższe od E_1 i H_1 odpowiadają granicy strefy pośredniej i bezpiecznej (E_0 i H_0), a 10-krotnie wyższe ustalają granicę strefy niebezpiecznej i zagrożenia (E_2 i H_2). Ekspozycja pracowników na PEM oceniana jest na podstawie wyników pomiarów maksymalnej, chwilowej wartości skutecznej natężenia pola E i/lub H, wykonanych na stanowisku pracownika wzdłuż linii odpowiadającej osi ciała pracownika, tj. w podstawowym pionie pomiarowym, do wysokości 2 m od podłoża (12).

Stanowisko pracownika zdefiniowane w polskiej normie to przestrzeń w obrębie stanowiska pracy, w której znajduje się ciało pracownika, oraz którego położenie określa pionowa oś symetrii jego tułowia, natomiast podstawowy pion pomiarowy zdefiniowano jako pion pomiarowy zlokalizowany na stanowisku pracownika (9).

W 2004 roku została opublikowana Dyrektywa 2004/40/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane PEM (13). Kryteria do oceny ekspozycji pracownika na PEM oparte są na dwóch rodzajach wielkości: wartościach miar wewnętrznych ekspozycji (niemierzalnych na stanowiskach pracy) i wartościach miar zewnętrznych ekspozycji (mierzalnych na stanowiskach pracy). Miary wewnętrzne ekspozycji odnoszą się do maksymalnych skutków ekspozycji, które występują wewnątrz ciała pracownika i dotyczą ustalonych skutków zdrowotnych (14). Miarami wewnętrznymi ekspozycji są: gęstość prądu J (A/m²) i współczynnik SAR (W/kg), który określa szybkość pochłaniania właściwego energii (Specific Absorption Rate). Wartości miar wewnętrznych nie można zmierzyć

Tabela 1. Dopuszczalne wartości skuteczne natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, dozy dopuszczalnej oraz prądu kontaktowego I_C i prądu indukowanego I_L dla częstotliwości $f = 27,12$ MHz według przepisów polskich i europejskich
Table 1. Admissible RMS values of electric and magnetic field strength, admissible doses and contact current I_C and induced current I_L for frequency $f = 27.12$ MHz as specified by respective Polish and European regulations

Akt prawny Document	Natężenie pola elektrycznego Electric field strength E [V/m]			Natężenie pola magnetycznego Magnetic field strength H [A/m]			Doza dopuszczalna pola E Admissible dose of field E Dd_E [(V/m) ² h]	Doza dopuszczalna pola H Admissible dose of field H Dd_H (f) [(A/m) ² h]	Prąd kontaktowy Contact current I_C [mA]	Prąd indukowany w kończynach Limb induced current I_L [mA]
	E_0	E_1 NDN*	E_2	H_0	H_1 NDN*	H_2				
Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. (7) / Minister of Labor and Social Policy Ordinance of 29th November, 2002 (7)	6,67	20,00	200,00	0,10	0,29	2,95	3 200,00	0,70	-	-
Dyrektywa 2004/40/WE (13) / Directive 2004/40/EC (13)	-	61,00	-	-	0,16	-	do oceny ekspozycji wartości skuteczne natężenia pola E^2 i H^2 oraz I_C^2 i I_L^2 w kończynach powinny być uśrednione w dowolnym okresie 6-minutowym / for the purpose of exposure assessment, RMS values of fields E^2 , H^2 and I_C^2 , I_L^2 in the limbs should be averaged over any 6-min period			
Projekt nowelizacji harmonizującej wymagania Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. z Dyrektywą 2004/40/WE (15) / Draft of amendment intended to harmonize the requirements of Minister of Labor and Social Policy Ordinance of 29th November, 2002 with those of the Directive 2004/40/EC (15)	6,67	20,00	200,00**	0,01	0,05	0,50	3 200,00	0,02	40	100

* Poziom ekspozycji dopuszczalnej w ciągu 8-godzinnej zmiany roboczej / Exposure level admissible during 8-h work shift.

** Wskaznik ekspozycji pracownika dla $E > 100$ V/m daje ekspozycję nadmierną, według PN-T-06580 / Indicator of exposure for $E > 100$ V/m results in excessive exposure according to PN-T-06580.

E_0, H_0 - natężenie pola E, H, rozgraniczające strefę pośrednią od strefy bezpiecznej / strength of field E, H, separating the intermediate zone from the safe zone.

E_1, H_1 - natężenie pola E, H, rozgraniczające strefę zagrożenia od strefy pośredniej / strength of field E, H separating the dangerous zone from the intermediate zone.

E_2, H_2 - natężenie pola E, H, rozgraniczające strefę niebezpieczną od strefy zagrożenia / strength of field E, H, separating the hazardous zone from the dangerous zone.

Dd_E, Dd_H - doza dopuszczalna pola E, H / admissible dose of field E, H.

w rzeczywistych warunkach ekspozycji, można najwyżej ustalić je teoretycznie poprzez analizy i obliczenia. W żadnym wypadku wartości miar wewnętrznych nie można przekroczyć. Są one stabelaryzowane i zależą od częstotliwości PEM. W tabeli 2. podano wartości miar wewnętrznych dla ekspozycji zawodowej na PEM o częstotliwości 27,12 MHz.

Miary zewnętrzne ekspozycji stanowią wielkości mierzone bezpośrednio na stanowisku pracy i są to: natężenie pola E, natężenie pola H, a także prąd kontaktowy I_c i prąd indukowany I_L w kończynach pracownika. Dopuszczalne wartości miar zewnętrznych ekspozycji na PEM według Dyrektywy 2004/40/WE zestawiono w tabeli 2.

Ekspozycja pracowników na PEM oceniana jest tu na podstawie wyników pomiarów uśrednionej przestrzennie (w objętości ciała pracownika podlegającego ekspozycji) wartości skutecznej natężenia pola E i/lub H oraz prądu kontaktowego I_c i/lub prądu indukowanego I_L w kończynach. Ponadto wartości E^2 , H^2 i I_L^2 powinny być także uśrednione w czasie, tu w dowolnym okresie 6 min. Grupa krajowych ekspertów ds. pól elektromagnetycznych zaproponowała zmodyfikowanie przepisów krajowych pod kątem ich harmonizacji z ww. dyrektywą, która aktualnie sama też jest modyfikowana (14–16). Projekt nowelizacji ww. przepisów wprowadza dopuszczalne wartości miar wewnętrznych przyjętych na podstawie ww. dyrektywy, zaliczając do nich dopuszczalne wartości natężenia prądu kontaktowego I_c i prądu indukowanego I_L w kończynach (15). Ponadto projekt ten wprowadza obniżenie wartości NDN dla pola magnetycznego o częstotliwości do 150 MHz, co przedstawia tabela 1. Wyniki pomiarów obowiązują tylko dla zastanej konfiguracji źródeł PEM, stanowisk pracy i rozmieszczenia sprzętu metalowego w ich otoczeniu. Tymczasem w przypadku zgrzewarek dielektrycznych główne źródło PEM, jakim jest elektroda „zgrzewająca”, podlega częstym zmianom – w zależności od potrzeb producenta i rodzaju wyrobów,

czasem okresowo, a często nawet w ciągu tego samego dnia pracy.

Z danych literaturowych, a także z dotychczasowych badań i pomiarów prowadzonych przez autorów niniejszego artykułu wynika, że operatorzy urządzeń do nagrzewania pojemnościowego są ekspozycyjni na stosunkowo wysokie wartości natężenia PEM. Dochodzą one do 2 kV/m i 1,5 A/m na stałym stanowisku pracownika (17–19), a w miejscu wykonywania czynności załączania w.cz. czy przygotowywania materiału do procesu zgrzewania ręce pracownika mogą znajdować się w PEM o najwyższych wartościach natężenia – dochodzących do ponad 3,7 kV/m (20–22). Zmierzone wartości wskazują na występowanie stref ochronnych zagrożenia, a nawet strefy niebezpiecznej.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami okresowa kontrola PEM o tak wysokich wartościach PEM powinna być prowadzona co najmniej raz w roku (5). Ze względu jednak na częste zmiany konfiguracji urządzenia w wyniku wymiany elektrody „zgrzewającej” (głównego źródła PEM) kontrola tego pola powinna być prowadzona po każdej zmianie ww. elektrody. Powstaje więc pytanie, jak powinno się postępować, żeby określić rzeczywistą ocenę ekspozycji pracownika (tu operatora) w celu jego właściwej ochrony. Czy coroczna kontrola wystarczająco wpływa na obniżenie ryzyka ekspozycji operatorów ww. urządzeń na PEM? I czy w przypadku występowania na stanowisku pracownika strefy niebezpiecznej należy zabronić wykonywania pracy, jeżeli taka ekspozycja dotyczy tylko kończyn? Przepisy krajowe wymagają wykonywania pomiarów kontrolnych na stanowisku pracownika, które z definicji określa pionowa oś symetrii tułowia tego pracownika, dlatego w zakresie częstotliwości stosowanych w nagrzewnictwie pojemnościowym pomiar jest realizowany tylko w podstawowym pionie pomiarowym z pominięciem kończyn (tu szczególnie dłoni). Czy takie postępowanie rzeczywiście chroni operatora przed nadmierną ekspozycją na PEM?

Tabela 2. Dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji na PEM według Dyrektywy 2004/40/WE (13)

Table 2. Limit values of exposure to EMF as specified by Directive 2004/40/WE (13)

Zakres częstotliwości Frequency range	Szybkość pochłaniania energii Specific absorption rate [W/kg]		
	uśredniona względem całego ciała whole body average SAR	miejscowa w głowie i tułowiu localized in head and trunk	miejscowa w kończynach localized in limbs
27,12 MHz	0,4	10	20

Ze względu na powyższe wątpliwości w Instytucie Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi podjęto badania, których celem było uaktualnienie stanu wiedzy o realnej ekspozycji operatorów urządzeń do nagrzewania pojemnościowego na PEM, szczególnie zgrzewarek w.cz., oraz optymalizacja postępowania metodycznego i decyzyjnego poprzez zastosowanie:

- nowoczesnej aparatury pomiarowej umożliwiającej identyfikację widma wytwarzanego PEM przez badane urządzenie, automatyczną rejestrację wyników pomiarów, w tym prądów indukowanych I_L w kończynach;
- zmodyfikowanych metod pomiarowych;
- zmodyfikowanych metod oceniających ekspozycję zawodową na PEM.

W Polsce dotychczas nie wykonywano badań i pomiarów prądów indukowanych w kończynach operatorów urządzeń do nagrzewania pojemnościowego, eksponowanych na PEM w realnych warunkach środowiska pracy.

MATERIAŁ I METODY

Badaniami i pomiarami PEM objęto środowisko pracy operatorów zgrzewarek dielektrycznych w.cz. w zakładzie z dużym parkiem maszynowym. Użyto nowoczesnej aparatury pomiarowej (serii Narda i Holaday) umożliwiającej:

- analizę widma wytwarzanego PEM przez badane źródło PEM,
- automatyczną rejestrację wyników pomiarów natężenia PEM,
- automatyczne przestrzenne uśrednianie wartości natężenia PEM,
- automatyczne uśrednianie wyników natężenia PEM w zadanym czasie (od 4 s do 30 min).

W celach porównawczych zastosowano również aparaturę serii MEH z pośrednim odczytem mierzonej wartości natężenia PEM.

Do badania i pomiarów PEM stosowano metodę referencyjną zgodną z PN-T-06580-3:2002 (12) oraz metodę zmodyfikowaną, opracowaną na podstawie analizy dostępnych metod referencyjnych krajowych, europejskich i międzynarodowych oraz badań własnych i danych literaturowych (12–14,17–19,22–24). Metoda zmodyfikowana uwzględniała: wartości skuteczne natężenia składowej elektrycznej (E) w podstawowym i pomocniczym pionie pomiarowym (ryc. 1), w tym uśrednione przestrzennie dla wybranych części ciała i dla całego ciała oraz wartości prądu indukowanego w kończynach (I_L).

Uśrednianie przestrzenne wyników pomiarów natężenia pola E przeprowadzono metodą energetyczną, opisaną m.in. w rekomendacji Electronic Communications Committee (ECC) (23) i w wymaganiach kanadyjskich przepisów higienicznych (24), według poniższego wzoru:

$$E_{\text{spatial_ave}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} E_i^2}{n}} \quad [1]$$

gdzie:

$E_{\text{spatial_ave}}$ – uśredniona przestrzennie wartość natężenia pola elektrycznego,

E_i – wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego w i -tym punkcie pomiarowym,

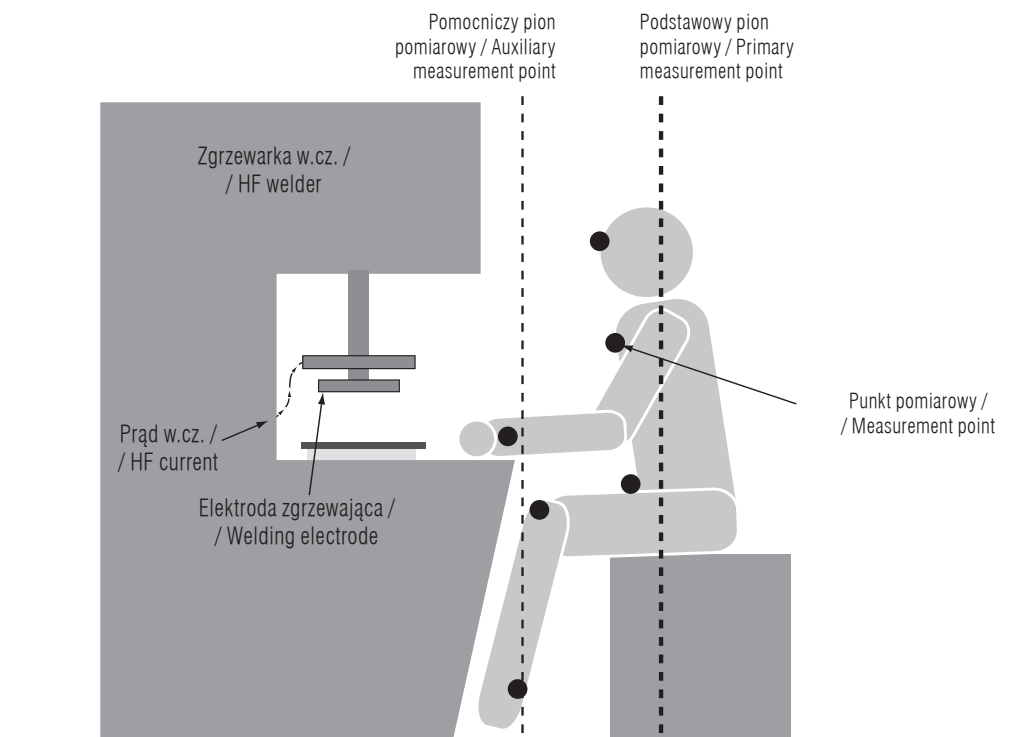
n – liczba punktów pomiarowych.

W celu przetestowania metody zmodyfikowanej, szczególnie w odniesieniu do pomiaru prądów indukowanych w kończynach, badania i pomiary w realnych warunkach środowiska pracy zostały poprzedzone badaniami w warunkach laboratoryjnych. Pomiary prądu indukowanego polegały na umieszczeniu elementu pomiarowego (cęgi pomiarowe) kolejno: w okolicy nadgarstka dla kończyny górnej oraz okolicy kostki dla kończyny dolnej osoby biorącej udział w badaniach. Wyniki pomiarów rejestrowano zdalnie na komputerze. Za wynik pomiaru przyjęto wartość skuteczną natężenia prądu indukowanego. Badania i pomiary prądów indukowanych w kończynach operatorów zgrzewarek w.cz. zostały przeprowadzone za zgodą Komisji Bioetycznej Instytutu Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera w Łodzi.

Badania i pomiary I_L wykonano u 20 operatorów zgodnie z opracowaną procedurą badań podczas pracy jednej, wybranej zgrzewarki w.cz. Zgrzewarka jedno stanowiskowa typu ZD-3 pracowała z elektrodą prostokątną o wymiarach 25×33 cm i wytwarzała PEM o częstotliwości ok. 27,12 MHz±0,6%, przy nastawie mocy 3 kW. Czas pojedynczego cyklu zgrzewania wynosił 5 s i był wystarczający do zarejestrowania pojedynczego wyniku natężenia pola E i prądu indukowanego w kończynach I_L .

Warunki laboratoryjne

Testowanie zmodyfikowanej metody pomiarowej i oceniającej ekspozycję na PEM przeprowadzono w laboratorium Pracowni Zagrożeń Elektromagnetycznych IMP z wykorzystaniem urządzenia będącego źródłem PEM, które symulowało pracę zgrzewarki dielektrycznej w.cz. (ten sam zakres częstotliwości wytwarzanego PEM,



Ryc. 1. Lokalizacja punktów pomiarowych do badań i pomiarów PEM metodą zmodyfikowaną przy stosowaniu zgrzewarek dielektrycznych wysokiej częstotliwości (w.cz.)

Fig. 1. Location of measurement points for EMF testing and measuring by the modified method for high frequency (HF) welders

tj. 27,12 MHz, wysokie wartości natężenia PEM). Urządzeniem tym był aparat do diatermii KF typu pojemnościowego, przy poziomym ustawieniu elektrod i nastawie mocy dającej wartości natężenia PEM zbliżone do występujących na stanowisku pracy operatora zgrzewarki w rzeczywistych warunkach środowiska pracy.

Badania pilotażowe w zakresie pomiarów prądu indukowanego w kończynach I_L wykonano u 4 ochotników, którzy kolejno zajmowali miejsce operatora zgrzewarki w pozycji siedzącej – oś pionowa przechodząca przez głowę i tułów operatora znajdowała się w odległości 0,85 m od osi pionowej rozdzielającej elektrody. Punkty pomiarowe do badań szczegółowych zlokalizowano w miejscu:

- ręki trzymanej w odległości 0,15 m od osi pionowej rozdzielającej elektrody,
- stopy operatora w pozycji siedzącej w odległości 0,50–0,60 m od osi pionowej przechodzącej przez uchwyt elektrody.

Rejestrowano wyniki pomiarów maksymalnej, chwilowej wartości skutecznej natężenia pola E w ww. punktach oraz wyniki pomiarów wartości skutecznej natężenia prądu indukowanego I_L w nadgarstku i kostce osoby badanej.

Warunki środowiska pracy

Badaniami i pomiarami PEM objęto środowisko pracy operatorów zgrzewarek w.cz. w zakładzie z dużym parkiem maszynowym, w którym stosowane były 2 rodzaje zgrzewarek: jedno- i dwustanowiskowe różnych typów. Charakterystykę techniczną zbadanych zgrzewarek zestawiono w tabeli 3. Zarejestrowana charakterystyka widmowa PEM od ww. zgrzewarek w.cz. pracujących w Hali Zgrzewarek została przedstawiona na rycinie 2.

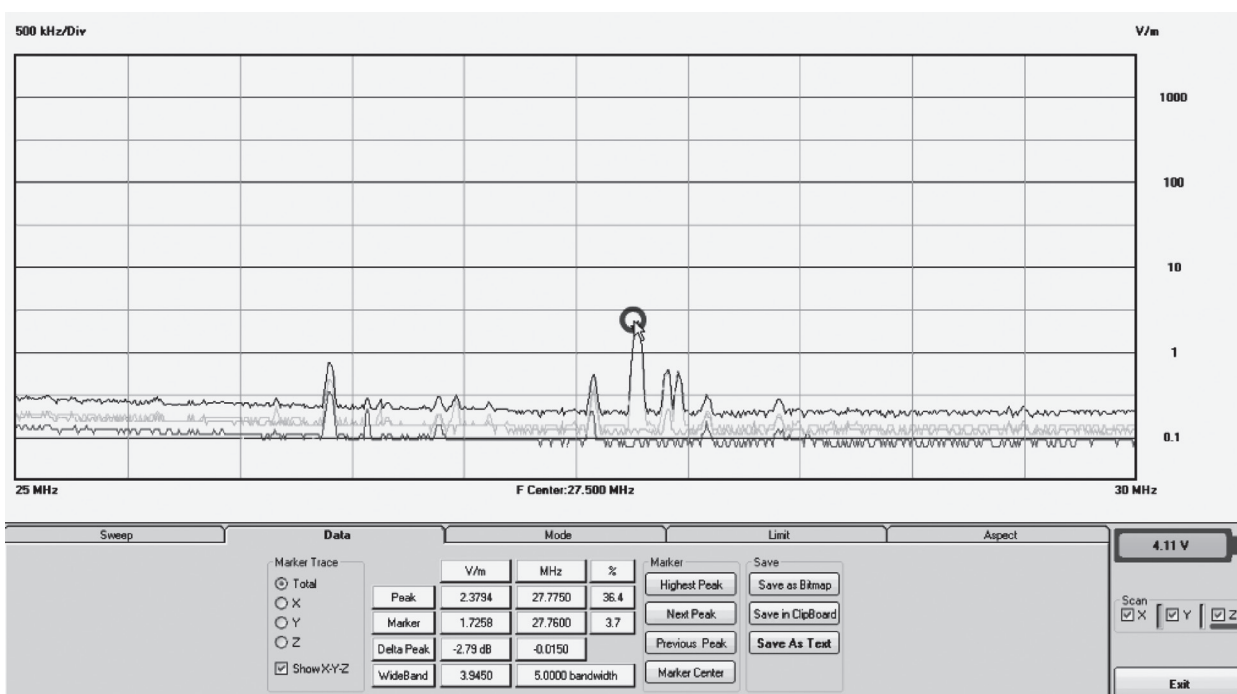
Zakres badań obejmował:

- pomiary natężenia PEM w otoczeniu 10 zgrzewarek metodą referencyjną zgodną z PN-T-06580-3:2002,
- pomiary natężenia PEM na stanowiskach pracy 12 operatorów metodą zmodyfikowaną,
- indywidualne pomiary prądu indukowanego I_L w kończynach 20 ochotników – operatorów ww. zgrzewarek w realnych warunkach czynności zgrzewania, dla wybranej zgrzewarki w.cz.

Niezależnie dla każdego z operatorów zgrzewarek rejestrowano maksymalne chwilowe wartości skuteczne natężenia pola E i H na stanowisku pracy operatora, z uwzględnieniem głowy, tułowia i kończyn. Punkty pomiarowe w podstawowym i pomocniczym pionie pomiarowym zlokalizowane były w odległościach od elektrody zgrzewającej:

Tabela 3. Charakterystyka techniczno-eksploatacyjna badanych zgrzewarek dielektrycznych wytwarzających PEM wysokiej częstotliwości
Table 3. Characteristics of tested dielectric welders producing high-frequency EMF

Charakterystyka Characteristics	Zgrzewarki jednostanowiskowe Single-stand welders						Zgrzewarki dwustanowiskowe Double-stand welders			
Częstotliwość znamionowa / / Operating frequency	27,12 MHz \pm 0,6%						27,12 MHz \pm 0,6%			
Model / Model	ZD3						ZD-15P		ZD65/2A	
Moc wyjściowa / / Output power [W]	3						15		3 6	
Wymiary elektrody / Electrode dimensions [mm×mm]	218×140	330×325	330×250	190×50	190×125	90×80	240×188	656×320	310×235	465×320
Czas zgrzewu / Welding time [s]	3	3	3	4	3	2	3	5	2	4
Zgrzewy na zmianie roboczej / / Welding operations per work shift [n]	2 500	1 800	1 800	1 000	1 500	2 500	1 500	500	1 000	800



Ryc. 2. Charakterystyka widmowa PEM od zgrzewarek w.cz. pracujących w hali zgrzewarek
Fig. 2. Frequency spectrum of EMF from HF welders operating in the welder room

- 0,45–0,65 m wzdłuż osi głowa–tułów,
- 0,25 m w miejscu trzymania kończyny górnej (SPr),
- 0,15 m nad podłogą, w miejscu trzymania stopy operatora (SPk) według oznaczeń na fotografii 1.

Podczas pomiarów operator zgrzewarki był odsunięty na odległość 0,5 m od stałego miejsca wykonywania pracy w celu ograniczenia wpływu jego obecności na wyniki pomiarów. Dla każdego operatora zgrzewarki określono zasięgi stref ochronnych i wskaźniki ekspozycji W.

Wyniki pomiarów I_L rejestrowano z elementu pomiarowego (cegi pomiarowe) umieszczonego w okolicy nadgarstka dla kończyny górnej oraz okolicy kostki dla kończyny dolnej każdego z operatorów. Wykonywali oni rutynowe czynności podczas pracy przy tej samej, wybranej do badań szczegółowych, zgrzewarce w.cz. Za wynik pomiaru przyjmowano wartość skuteczną natężenia I_L . Tego ostatniego pomiaru nie przewidują przepisy krajowe.

Specyfikacja zastosowanej aparatury pomiarowej

Do pomiarów została zastosowana aparatura serii MEH oraz nowoczesne przyrządy pomiarowe firmy Narda i Holaday, które umożliwiają automatyczną, bieżącą analizę widmową PEM oraz bieżącą rejestrację wyników pomiarów PEM:

- Do analizy widmowej PEM zastosowano Sondę – analizator pola elektrycznego i magnetycznego typ EHP-200, która umożliwia analizę widmową z minimalną rozdzielczością 1 kHz przy szczególnych pomiarach natężenia pola E i H w zakresie częstotliwości od 9 kHz do 30 MHz z minimalną rozdzielczością 0,01 V/m i 0,1 A/m.
- Do pomiarów natężenia pola E zastosowano:
 - szerokopasmowy miernik pola elektromagnetycznego typu MEH-25 (prod. Politechniki Wrocławskiej) z sondą izotropową typ 3 AE-1, który umożliwia pomiar natężenia tego pola od 0,6 V/m do 1000 V/m w zakresie częstotliwości od 0,1 MHz do 300 MHz;
 - szerokopasmowy miernik typu NBM-550 (nr ser. B-0233, prod. Narda) z izotropową sondą pomiarową typu EF-1891 (nr ser. A-0196), który umożliwia pomiar natężenia pola E o wartościach od 0,6 V/m do 1000 V/m w zakresie częstotliwości od 3 MHz do 18 GHz.
- Do pomiaru natężenia pola H zastosowano szerokopasmowy miernik typu NBM-550 (nr ser. B-0233, prod. Narda) z izotropową sondą pomiarową typu HF-0191 (nr ser. A-0196) umożliwiający pomiar natężenia tego pola o wartościach od 0,018 A/m do 13 A/m w zakresie częstotliwości od 27 MHz do 1 GHz.
- Do pomiaru prądu indukowanego w kończynach zastosowano miernik cęgowy (typu Clamp-On) prądu indukowanego typu HI-3702 (prod. Holaday)

umożliwiający pomiar natężenia prądu indukowanego o wartościach od 3 mA do 1000 mA w zakresie częstotliwości od 3 kHz do 100 MHz.

WYNIKI

Wyniki badań i pomiarów PEM w warunkach laboratoryjnych

Źródłem PEM do testowania zmodyfikowanej metody badań w warunkach laboratoryjnych (pomiar natężenia pola E w miejscu lokalizacji kończyn operatora oraz prądów indukowanych I_L w kończynach) był aparat do diatermii KF typu pojemnościowego, model Diamat G110. W celu określenia wartości natężenia wytwarzanego pola E wykonano pomiary punktowe metodą zmodyfikowaną. Najwyższa zmierzona chwilowa wartość skuteczna natężenia pola E wynosiła 520 V/m w miejscu lokalizacji rąk (nadgarstek) oraz od 60 V/m do 75 V/m w miejscu lokalizacji kończyn dolnych (kostka).

Wyniki pomiarów prądu indukowanego w kończynach

Badania pilotażowe nowego parametru wprowadzonego Dyrektywą 2004/40/WE (13) do oceny ekspozycji pracowników na PEM, którym jest prąd indukowany w kończynach I_L , wykonano podczas symulacji czynności operatora zgrzewarki w.c.z. z wykorzystaniem ww. aparatu do diatermii KF. Pomiary zostały wykonane za pomocą miernika prądu indukowanego typu Clamp-On u 4 osób (eksperymentatorów – pomiarowców) poprzez umieszczenie cęgów pomiarowych w okolicy nadgarstka (kończyna górna) i kostki (kończyna dolna). Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 4.

Uzyskane wartości prądu indukowanego podczas symulacji czynności rutynowych wynosiły: dla nadgarstka od 70,4 mA do 77,2 mA (SPr), a dla kostki od 34,4 mA do 68,0 mA (SPk).

Tabela 4. Wyniki pomiarów prądu indukowanego I_L w kończynach osób badanych podczas symulacji pracy zgrzewarki w warunkach laboratoryjnych

Table 4. Results of measurements of current I_L induced in the limbs of the examined person during simulation of the welder operation in laboratory conditions

Miejsce pomiaru Measurement location	Prąd indukowany Induced current I_L [mA]			
	osoba 1 / person 1	osoba 2 / person 2	osoba 3 / person 3	osoba 4 / person 4
SPr	70,4	72,0	74,1	77,2
SPk	34,4	63,7	59,4	68,0

SPr, SPk – miejsce usytuowania ręki, kostki / location of operator's hand and ankle.

WYNIKI BADAŃ I POMIARÓW PEM W ŚRODOWISKU PRACY

Wyniki rutynowych badań i pomiarów PEM zgrzewarek dielektrycznych w.cz.

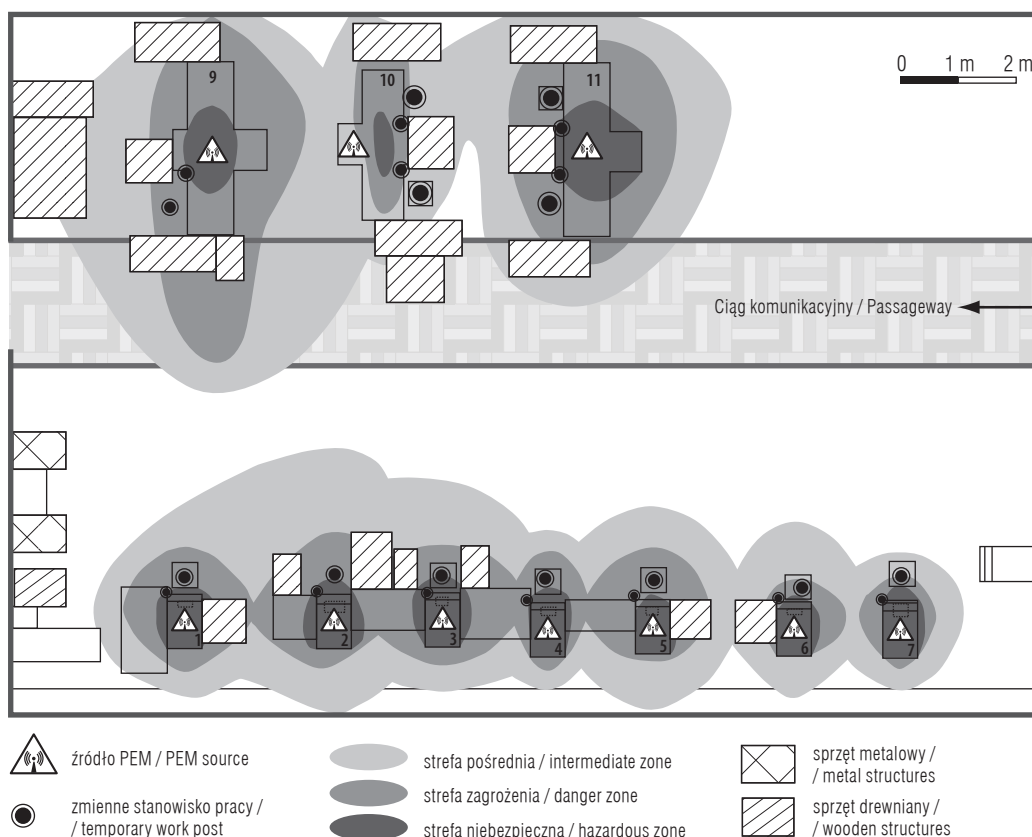
Metoda referencyjna badań i pomiarów PEM zastosowana do badań 10 zgrzewarek dielektrycznych w.cz. dla realnych warunków ich pracy podczas czynności zgrze-

wania (przerywana cyklicznie, kilkusekundowa emisja PEM) pozwoliła określić wartości chwilowe maksymalnego skutecznego natężenia pola E i H w podstawowym pionie pomiarowym, zlokalizowanym w miejscu wykonywania czynności przez operatora, oraz określić zasięgi występowania stref ochronnych. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki pomiarów PEM oraz wskaźników ekspozycji W na stanowiskach operatorów zgrzewarek w.cz., uzyskane metodą referencyjną według PN-T-06580-3

Table 5. Results of EMF measurements and indicators of exposure W at the work posts of HF welder operators, obtained by the reference method, according to PN-T-06580-3

Rodzaj zgrzewarki Welder type	Zbadane urządzenia (stanowiska pracy operatorów) Tested units (operators' work posts) [n]	Maksymalne chwilowe wartości skuteczne (RMS) natężenia PEM E [V/m], H [A/m] oraz wskaźniki ekspozycji W Maximum momentary RMS values of EMF strengths, E [V/m], H [A/m], and indicator of exposure W
Jednostanowiskowa / Single-stand	7 (7)	E: 68,00–350,00 H: 0,05–1,00 W: 1,81–59,65
Dwustanowiskowa / Double-stand	3 (5)	E: 16,00–90,00 H: 0,12–0,60 W: 0,11–2,73



Ryc. 3. Rozkład stref ochronnych według składowej E w otoczeniu zgrzewarek dielektrycznych w.cz. w hali zgrzewarek
Fig. 3. Distribution of protective zones by E field around HF welders in the welder room

Najwyższe zmierzone wartości natężenia PEM dla całego ciała wynosiły: dla pola E – od 16 V/m do 350 V/m, a dla pola H – od 0,05 A/m do 1,00 A/m. Wskaźnik ekspozycji W określony dla podstawowego pionu pomiarowego wynosił od 0,11 do 59,65 i wskazywał na ekspozycję nadmierną, a nawet niedopuszczalną. Najwyższe zmierzone wartości natężenia PEM w otoczeniu elektrody zgrzewającej wynosiły: dla pola E – od 200 V/m do 850 V/m, dla pola H – od 0,07 A/m do 5,50 A/m. Odpowiadały one strefom ochronnym: niebezpiecznej, zagrożenia i pośredniej. Rozkład stref ochronnych dla składowej E przedstawiono na rycinie 3.

Maksymalne zasięgi stref ochronnych wynosiły odpowiednio:

- niebezpieczna – dla pola E: do 0,60 m, dla pola H: do 0,40 m,
- zagrożenia – dla pola E: do 2,00 m, dla pola H: do 1,40 m,
- pośrednia – dla pola E: do 4,20 m, dla pola H: do 1,80 m.

Wyniki badań i pomiarów PEM metodą zmodyfikowaną dla zgrzewarek dielektrycznych w.cz.

W metodzie zmodyfikowanej zastosowanej do badania 10 zgrzewarek dielektrycznych w.cz. dla realnych warunków ich pracy podczas czynności zgrzewania określono wartości chwilowe maksymalnego skutecznego natężenia pola E i H w miejscu wykonywania czynności przez operatora w punktach pomiarowych, które odpowiadały lokalizacji głównych części anatomicznych ciała (głowie, sercu, gonadom i szczególnie nadgarstkowi kończyny górnej i kostce kończyny dolnej), tj. w podstawowym i pomocniczych pionach pomiarowych (ryc. 1). Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 6.

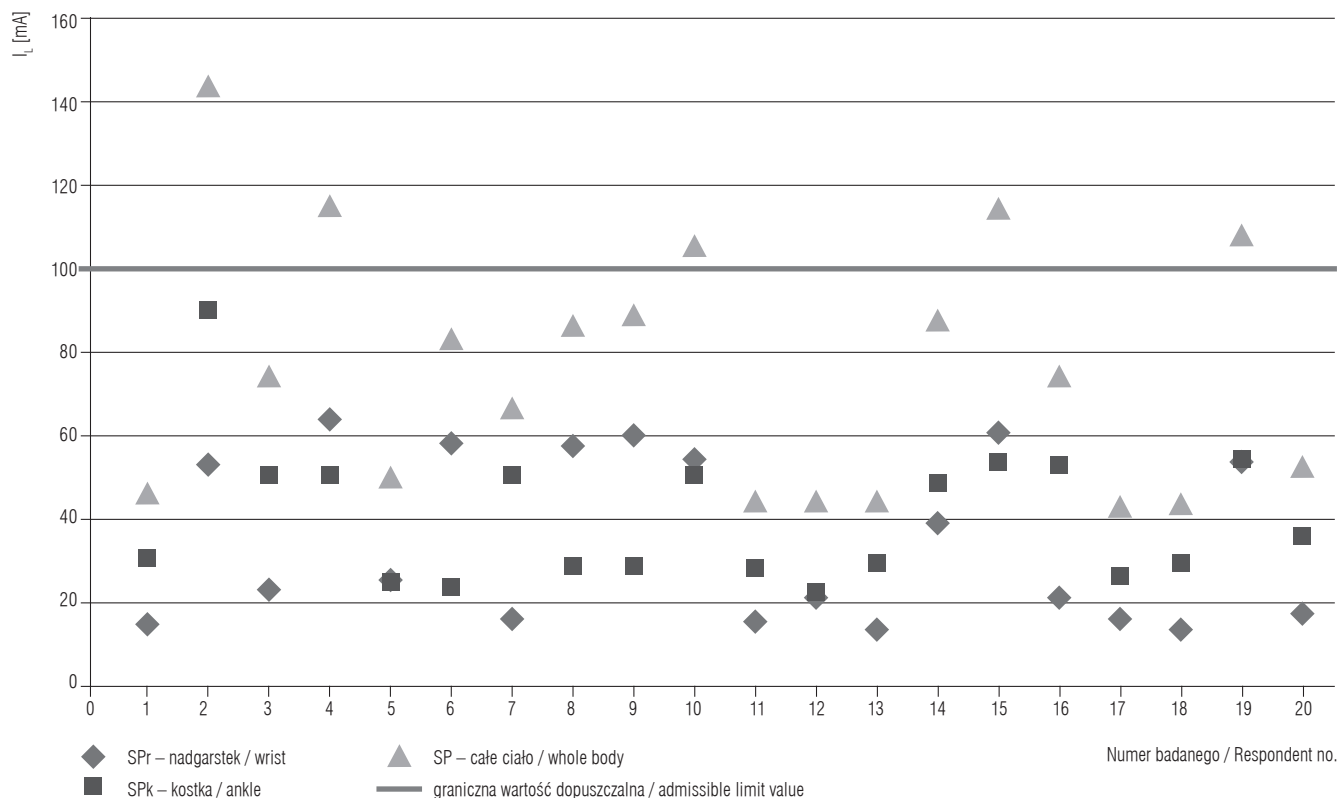
Najwyższe zmierzone wartości natężenia PEM dla wybranych punktów pomiarowych, uśrednione przestrzennie, wynosiły dla pola E do 261,5 V/m, a dla pola H – do 0,80 A/m dla głowy i tułowia. Wartości uśrednione przestrzennie do oceny ekspozycji są przyjęte przez International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), natomiast w przepisach krajowych do oceny ekspozycji przyjmowane są wartości chwilowe maksymalne, a miarą ekspozycji jest wskaźnik ekspozycji W. Wartości chwilowe maksymalne natężenia pola E dla kończyn górnych wynosiły 60–600 V/m i były wyższe przy zgrzewarkach 2-stanowiskowych w porównaniu z 1-stanowiskowymi, a wskaźnik ekspozycji W wynosił 1,42–77,63.

Wyniki pomiarów natężenia pola E i prądów indukowanych w kończynach metodą zmodyfikowaną dla zgrzewarki dielektrycznej w.cz.

W badaniach i pomiarach PEM w środowisku pracy zakres metody zmodyfikowanej zawężono do rejestrowania maksymalnych chwilowych wartości skutecznego natężenia pola E w miejscu lokalizacji kończyn operatora zgrzewarki w.cz. oraz prądów indukowanych I_L w nadgarstku i kostce. Wyniki badań natężenia I_L zmierzono w nadgarstku i kostce u badanych operatorów przedstawiono na rycinie 4. Wartości natężenia prądów indukowanych w nadgarstku operatorów podczas wykonywania czynności zgrzewania wynosiły 13,6–64,2 mA przy maksymalnych chwilowych wartościach natężenia pola E = 190 V/m. Wartości natężenia prądów indukowanych w kostkach (kończyny dolne) były wyższe i wynosiły 22,2–89,8 mA. Należy tu podkreślić, że wartość natężenia pola E = 190 V/m uzyskana na poziomie kończyny górnej operatora stanowiła 95%

Tabela 6. Wyniki pomiarów PEM na stanowiskach pracy operatorów zgrzewarek w.cz. uzyskanych metodą zmodyfikowaną
Table 6. Results of EMF measurements at the work posts of HF welder operators, obtained by the modified method

Ekspozowana część ciała Exposed portion of the body	Natężenie pola elektrycznego Electric field strength [V/m]	Natężenie pola magnetycznego Magnetic field strength [A/m]
Głowa / Head	23,00–350,00	0,05–1,00
Tułów / Trunk	17,03–119,41	0,06–0,52
Wartość uśredniona przestrzennie dla głowy i tułowia / Value spatially averaged for head and trunk	20,24–261,50	0,05–0,80
Kończyny górne / Upper limbs	60,00–600,00	0,09–3,30
Kończyny dolne / Lower limbs	5,00–110,00	0,06–0,60
Wartość chwilowa maksymalna dla całego ciała / Maximum momentary values for whole body	60,00–600,00	0,09–3,30
Wartość uśredniona przestrzennie dla całego ciała / Value spatially averaged for whole body	33,33–356,67	0,25–1,16



Ryc. 4. Wyniki pomiarów prądu indukowanego I_L w kończynach (nadgarstek, kostka) operatorów ekspozowanych na PEM podczas czynności zgrzewania zgrzewarką w.c.z. typ ZD-3 w hali zgrzewarek
 Fig. 4. Results of measurements of induced current I_L in the limbs (wrist, ankle) of operators exposed to EMF during operation of type ZD-3 welder in welder room

dopuszczalnej maksymalnej chwilowej wartości skutecznej natężenia pola E według przepisów krajowych. Wartości natężeń prądu indukowanego I_L będą więc wyższe w realnych warunkach środowiska pracy operatorów z uwagi na stwierdzone poziomy natężenia pola E dochodzące do 600 V/m (tab. 5).

OMÓWIENIE

Nagrzewnictwo pojemnościowe, nazywane często dielektrycznym, jest powszechnie stosowane np. w przemyśle drzewnym i konfekcyjnym do zgrzewania, suszenia, klejenia, podgrzewania cienkich materiałów termoplastycznych, a w przemyśle spożywczym do rozmrażania, pieczenia czy konserwowania żywności. Urządzenia do nagrzewania pojemnościowego z racji stosowania dużych mocy, dochodzących nawet do 100 kW (22), są źródłem silnych PEM. Najbardziej rozpowszechnione są zgrzewarki dielektryczne w.c.z. Często używane zgrzewarki, szczególnie starszego typu, nie mają ekranów czy osłon przestrzeni zgrzewania.

Operatorzy takich urządzeń mogą podlegać ekspozycji na PEM o wysokich wartościach.

Warunki ekspozycji operatora zgrzewarki w.c.z. trudno precyzyjnie określić z uwagi na zmienność detali, takich jak kształt i wymiar elektrody, wpływ innych aktywnych zgrzewarek, często sąsiadujących ze sobą w tym samym pomieszczeniu. Utrudnione są też same pomiary natężenia PEM ze względu na bardzo krótkie czasy pojedynczego zgrzewania, trwające zwykle kilka do kilkadziesiąt sekund. Po nich następuje przerwa w pracy generatora w.c.z., czyli nie ma ekspozycji na PEM, a później proces powtarza się cyklicznie od początku. Ponadto na cykl samego zgrzewania składają się dwie fazy: tzw. przedzgrzewcza z narastającą mocą i tzw. zgrzewcza z pełną mocą generatora. Z tego powodu ocena ekspozycji na PEM może być zawyżona, co w przypadku działań prewencyjnych jest korzystne dla pracownika.

Bez względu jednak na ww. trudności pomiarowe ekspozycja operatorów zgrzewarek w.c.z. zaliczana jest do wysokich również z powodu efektywnego czasu

ekspozycji – w naszych badaniach dochodził on nawet do 3 godzin, co stanowi ok. 40% czasu zmiany roboczej. Podobne ustalenia podają Bini i wsp. (22). Obsługa ręczna zgrzewarek (czynność załączania w.cz. czy podtrzymywanie materiału zgrzewanego) z jednoczesnym nożnym uruchamianiem prasy powoduje, że kończyny ekspozowane są na PEM o najwyższych wartościach natężenia, przekraczających dopuszczalne normatywy. Zgrzewarki dielektryczne w.cz. są jednymi z nielicznych urządzeń IMS pracujących w zakresie częstotliwości radiowych, dla których długość fali wynosi ok. 11 m, w wyniku czego stałe stanowisko pracy znajduje się bezpośrednio przy źródle silnych PEM.

Podobnie silnym źródłem PEM w tym samym zakresie częstotliwości (27,12 MHz) są diatermie krótkofalowe. Tu jednak ekspozycja na PEM nie dotyczy stałego stanowiska pracy, a ogranicza się do czynności rutynowych, które wykonuje fizjoterapeuta, zgodnych z procedurą zabiegu diatermicznego. Efektywny czas ekspozycji w czasie zmiany roboczej wynosi najwyżej do 0,5 godz. podczas czynności rutynowych i sporadycznie ok. 1 min podczas czynności interwencyjnych (25).

Wiele zmieniło się w rozwiązaniach konstrukcyjnych zgrzewarek w.cz. w wyniku wprowadzenia obsługi półautomatycznej czy ekranowania przestrzeni zgrzewania. Częściowo wyeliminowało to występowanie strefy niebezpiecznej. Zwiększenie mocy urządzeń i rozwiązania karuzelowe podajników materiału zgrzewanego w celu zwiększenia wydajności produkcji oraz bardziej efektywne wykorzystanie urządzeń powoduje jednak, że problem nadmiernej ekspozycji operatorów na PEM istnieje nadal.

Obserwuje się znaczący postęp w doskonaleniu aparatury pomiarowej do celów kontrolnych poziomu PEM na stanowiskach pracy. Jednym z najpowszechniej stosowanych zestawów pomiarowych w Europie i na świecie są mierniki firmy NARDA. Ich zastosowanie umożliwia m.in. identyfikację widma PEM wytwarzanego przez badane urządzenie, cyfrowy odczyt z rejestracją wyników pomiarów natężenia PEM, możliwość ich przeglądania i zarządzania nimi. W przededniu konieczności wdrożenia wymogów Dyrektywy 2004/40/EC do przepisów krajowych interesujące było również porównanie przez nas stosowanych metod pomiarowych i oceniających ekspozycję zawodową na PEM.

W wyniku porównania metody referencyjnej stosowanej do pomiarów natężenia PEM w Polsce ze stosowaną w krajach, które przyjęły rekomendacje ICNIRP (14), stwierdziliśmy, że te ostatnie są znacznie łagodniejsze niż bardziej rygorystyczne normy stosowane

w ocenie ekspozycji metodą krajową. Ustalono, że ocena ekspozycji operatorów zgrzewarek w.cz. na PEM według kryteriów ICNIRP jest zaniżona o 25% dla całego ciała, a w przypadku kończyn o 40% (tab. 6). Podobne porównanie przeprowadzone dla fizjoterapeutów wykazało, że ocena ekspozycji według kryteriów ICNIRP jest niższa o 36–42% (25). Współczynnik ekspozycji W jako miara ekspozycji pracownika (obowiązująca w przepisach krajowych) pozwala ją sklasyfikować jako niebezpieczną, nadmierną, dopuszczalną czy pomijalną. Ma to duże znaczenie praktyczne np. w ostrzeganiu pracownika i pracodawcy o ograniczonym czasie przebywania w otoczeniu źródeł PEM.

Z uwagi na nierozstrzygnięte jednoznacznie ustalenia ekspertów odnośnie do negatywnych skutków długotrwałego oddziaływania PEM na zdrowie pracowników, w tym operatorów urządzeń do nagrzewania pojemnościowego, nie jest uzasadnione przyjęcie innych metod pomiarowych, niż dotychczas stosowane w Polsce.

W literaturze opisywane są badania skutków zdrowotnych takiej ekspozycji, najczęściej wymienia się podrażnienie oczu czy zaburzenia ciała szklistego w różnym stopniu oraz parestezje (zaburzenia czucia w opuszkach palców) z istotną statystycznie korelacją z ekspozycją na PEM (17,22). Stwierdzono również istotnie niższe tętno (w 24-godzinnym zapisie) i więcej epizodów bradykardii w porównaniu z grupą porównawczą (19). Sińczuk (26) na podstawie badań 57 operatorów zgrzewarek w.cz. wskazuje na możliwość zmian czynności bioelektrycznej mózgu jako wskaźnik skutków przewlekłej ekspozycji na PEM.

Natężenie PEM zmierzone na stanowisku pracownika (operatora zgrzewarki) wskazuje na występowanie stref ochronnych zagrożenia, a nawet strefy niebezpiecznej. Zgodnie z obowiązującymi przepisami okresowa kontrola tego pola powinna być prowadzona co najmniej raz w roku (5). Ze względu jednak na częste zmiany konfiguracji urządzenia – polegającej na wymianie elektrody „zgrzewającej”, głównego źródła PEM – kontrola tego pola powinna być prowadzona po każdej takiej zmianie. Powstaje więc pytanie, jak należy postępować, aby właściwie chronić pracownika (operatora). Czy coroczna kontrola wystarczająco wpływa na obniżenie ryzyka ekspozycji operatorów ww. urządzeń na PEM? I czy w przypadku występowania na stanowisku pracownika strefy niebezpiecznej należy zabronić wykonywania pracy, jeżeli taka ekspozycja dotyczy tylko kończyn?

Przepisy krajowe wymagają wykonywania pomiarów kontrolnych na stanowisku pracownika, które z defi-

nicji określa pionowa oś symetrii jego tułowia. W zakresie częstotliwości stosowanych w nagrzewnictwie pojemnościowym pomiar realizowany jest więc, jak już omówiono w niniejszym artykule, w podstawowym pionie pomiarowym z pominięciem kończyn (tu: dłoni). Przeprowadzona ocena porównawcza takiego podejścia do badania i pomiarów PEM po uwzględnieniu ekspozycji kończyn wykazała, że w przypadku zgrzewarek dwustanowiskowych może być ona zaniżona nawet 6–7-krotnie (tab. 5, 6).

Mając na uwadze powyższe ustalenia, podjęto badania i pomiary prądów indukowanych I_L w kończynach operatorów zgrzewarek w.cz. W Polsce dotychczas nie wykonywano takich badań w środowisku pracy operatorów zgrzewarek w.cz. Prądy indukowane w kończynach I_L są nowym parametrem, proponowanym w Dyrektywie 2004/40/EC do oceny ekspozycji na PEM z zakresu częstotliwości 10–110 MHz. Prąd indukowany I_L to prąd przepływający wewnątrz ciała osoby ekspozowanej bezpośrednio na zewnętrzne PEM. W ww. zakresie mieszczą się częstotliwości przydzielone dla urządzeń przemysłowych stosowanych w nagrzewnictwie pojemnościowym.

Wykonano indywidualne pomiary prądów indukowanych w kończynach 20 operatorów zgrzewarek dielektrycznych w.cz. w realnych warunkach środowiska pracy. Najwyższe wartości natężenia PEM znajdują się w miejscu położenia kończyn (zarówno górnych, jak i dolnych) z uwagi na pozycję ciała operatora (fot. 1, ryc. 1). Z tego powodu możliwość pomiaru prądów indukowanych może być bardzo ważna jako argument w dyskusji dotyczącej z jednej strony metod pomiarowych, a z drugiej oceny ekspozycji operatora na PEM. Sprowadza się to do decyzji ekspertów ustalających wartości NDN, czy należy wykonywać pomiary natężenia PEM tylko w podstawowym pionie pomiarowym (wzdłuż osi tułowia i głowy pracownika), czy również w pomocniczym pionie pomiarowym (zlokalizowanym wokół źródła pola w celu wyznaczenia ekspozycji kończyn), zgodnie z zapisami PN 06580-1 (pkt 3.6.2 i 3.6.4) (9).

Wartości natężenia prądów indukowanych zmierzonych w kończynach operatora w przeprowadzonych przez nas badaniach wynosiły od ponad 64 mA w nadgarstku do blisko 90 mA w kostce przy natężeniu pola E wynoszącym 190 V/m (tj. 95% wartości odpowiadającej poziomowi dopuszczalnemu przepisami krajowymi dla efektywnego czasu ekspozycji, nieprzekraczającego 5,5 min na zmianę roboczą). Pomiary natężenia prądów indukowanych w kończynach operatorów zgrze-

warek w.cz. w realnych warunkach środowiska pracy nie były dotąd prowadzone w Polsce. Pomiary prądów indukowanych w kończynach są działaniem poszerzającym informację o rzeczywistym narażeniu pracownika, szczególnie kiedy wymagana jest ręczna obsługa urządzeń będących źródłem PEM.

Podsumowując zaktualizowany stan wiedzy, na podstawie przeprowadzonych przez nas badań o rzeczywistej ekspozycji operatorów zgrzewarek w.cz. na PEM ustaliliśmy, że:

- najwyższe zmierzone wartości natężenia pola elektrycznego (E) i magnetycznego (H) wynosiły – dla całego ciała: E = do 350 V/m, H = do 1,00 A/m, a po uwzględnieniu ekspozycji kończyn: E = do 600 V/, H = do 3,30 A/m;
- wskaźnik ekspozycji W dochodził do 60, a po uwzględnieniu ekspozycji kończyn – do 78;
- dla ponad 58% stanowisk pracy ekspozycja była nadmierna;
- dla 25% stanowisk pracy ekspozycja była niebezpieczna, a po uwzględnieniu ekspozycji kończyn odsetek ten wzrósł do 50.

Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. o badaniach i pomiarach w odniesieniu do PEM jako kryterium częstotliwości badań i pomiarów wprowadza wystąpienie stref ochronnych w miejscach wykonywania pracy (5). W przypadku badanych zgrzewarek dielektrycznych w.cz. dla realnych mocy wyjściowych generatora, a nie maksymalnie możliwych, występowanie strefy ochronnej zagrożenia stwierdzono w 100% przypadków, co narzuca obowiązek pomiarów kontrolnych co najmniej raz w roku. Takie postępowanie jest prawnie obowiązujące, ale i kosztowne, jednak naszym zdaniem nie poprawia warunków pracy operatorów. Wyniki przeprowadzonych przez nas badań i pomiarów PEM oraz pogłębiona ocena ekspozycji operatorów zgrzewarek w.cz. o pomiarach natężenia prądów indukowanych w kończynach są wystarczającym powodem do zaproponowania zmian postępowania metodycznego i decyzyjnego w celu poprawy stopnia ochrony operatorów przed nadmierną ekspozycją na PEM.

Przede wszystkim, zgodnie z wymogami Dyrektywy 2004/40/WE, należy podjąć działania prowadzące do eliminowania ekspozycji pracowników na PEM, a w przypadku braku takich możliwości do jej ograniczenia. Można to osiągnąć już na etapie produkcji urządzeń poprzez wprowadzenie ekranowania elektrod i zautomatyzowania ich obsługi. Pracodawca może poprzez działania organizacyjne wyeliminować dostęp

pracowników do strefy niebezpiecznej oraz wprowadzić ograniczenia czasu ekspozycji w strefie zagrożenia. Wskazane jest więc rozważenie możliwości stopniowania kontroli ekspozycji pracowników na PEM poprzez wprowadzenie kontroli przeprowadzanych bezpośrednio przez pracodawcę, czyli zwiększenie zaangażowania służb bezpieczeństwa i higieny pracy w danej firmie.

Proponujemy wprowadzenie 2-stopniowych pomiarów kontrolnych PEM:

- Pomiar obowiązkowe/obligatoryjne – po zainstalowaniu urządzenia do nagrzewania pojemnościowego, dla wszystkich zadeklarowanych rodzajów produkcji przypisanych danej elektrodzie zgrzewczej, oraz każdorazowo, po wprowadzeniu nowych procesów produkcji. Ten etap obejmowałby pełny zakres badań i pomiarów PEM, tj. określenie zasięgu występowania stref ochronnych, określenie wskaźnika ekspozycji W na podstawie pomiarów pola E i H dla czynności rutynowych, z uwzględnieniem ekspozycji całego ciała i kończyn.
- Pomiar decyzyjne/okresowe – na żądanie użytkownika, ograniczone do kontroli wskaźnika ekspozycji W . Z definicji wskaźnika ekspozycji wynika, że kontrola poziomu natężenia pola E i H ograniczona jest wówczas tylko do miejsc przebywania operatora podczas wykonywania czynności rutynowych z uwzględnieniem ekspozycji całego ciała i kończyn. Okresowość pomiarów kontrolnych PEM powinna zależeć od wartości wskaźnika ekspozycji W , a decyzję podejmuje użytkownik urządzeń do nagrzewania pojemnościowego – po konsultacji z zakładowymi służbami do spraw bezpieczeństwa i higieny pracy oraz z lekarzem sprawującym profilaktyczną opiekę zdrowotną nad pracownikami.

WNIOSKI

1. Badania i pomiary natężenia PEM dla zgrzewarek dielektrycznych w.cz. przeprowadzone przez autorów niniejszej publikacji dostarczyły aktualnych danych o realnej ekspozycji operatorów na te pola, wykazując, że podlegają oni ekspozycji chronicznej o wysokich wartościach wskaźnika ekspozycji W .
2. Pomiary składowej magnetycznej PEM, dotychczas nie wykonywane z braku odpowiedniej aparatury pomiarowej, wykazały dla 73% urządzeń występowanie strefy zagrożenia. Po ujednoczeniu przepisów krajowych z Dyrektywą 2004/40/EC (13) odsetek ten wzrośnie do 91.
3. Ograniczanie pomiarów natężenia PEM w miejscach przebywania pracowników tylko do podstawowego pionu pomiarowego, podczas gdy najwyższe wartości natężenia występują dla kończyn, zaniża ocenę ekspozycji 2,5–6,7-krotnie.
4. Pomiary prądów indukowanych w kończynach operatorów zgrzewarek w.cz. wykazały, że wartość tego parametru ma charakter osobniczy i może być miarą ekspozycji indywidualnej na PEM.
5. Wysokie wartości natężenia PEM w miejscach przebywania operatorów podczas czynności rutynowych wymagają pomiarów co roku. Pomiary te są pracochłonne i kosztowne, a jednocześnie mają niewielki wpływ na poprawę warunków pracy w aktualnym systemie kontroli ekspozycji. Zaproponowana została, przez autorów przeprowadzonych badań, optymalizacja działań decyzyjnych poprzez wprowadzenie 2-stopniowych pomiarów kontrolnych.

PIŚMIENNICTWO

1. PN-EN 55011:2010/A1:2010. Urządzenia przemysłowe, naukowe i medyczne – Charakterystyki zaburzeń o częstotliwości radiowej – Dopuszczalne poziomy i metody pomiaru. Polski Komitet Normalizacyjny, Miar i Jakości, Warszawa 2010
2. PN-80/Z-08052:1980. Niebezpieczne i szkodliwe czynniki występujące w procesie pracy. Klasyfikacja. Polski Komitet Normalizacyjny, Miar i Jakości, Warszawa 1980
3. Rozporządzenie Ministra Transportu z dnia 3 lipca 2007 r. w sprawie urządzeń radiowych nadawczych lub nadawczo-odbiorczych, które mogą być używane bez pozwolenia radiowego. DzU z 2007 r. nr 138, poz. 972
4. Ustawa z 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy [cytowany 3 kwietnia 2012]. Adres: <http://kodeks-pracy.com.pl>
5. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU z 2011 r. nr 33, poz. 166
6. Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzenia badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy. DzU z 1996 r. nr 69, poz. 332
7. 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. Załącznik 2. Część E: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz–300 GHz. DzU z 2002 r. nr 217, poz. 1833

8. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 27 lipca 2004 r. w sprawie szkolenia w dziedzinie bezpieczeństwa i higieny pracy. DzU z 2004 r. nr 180, poz. 1860
9. PN-T-06580-1:2002. Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Część 1: Terminologia. Polski Komitet Normalizacyjny, Miary i Jakości, Warszawa 2002
10. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym. DzU z 2002 r. nr 127, poz. 1091
11. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 30 lipca 2002 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wykazu prac wzbronionych kobietom. DzU z 2002 r. nr 127, poz. 1092
12. PN-T-06580-3:2002. Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Część 3: Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy. Polski Komitet Normalizacyjny, Miary i Jakości, Warszawa 2002
13. Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). DzUUE L 159 z dnia 30 kwietnia 2004 r.
14. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 1998;74(4):494–522
15. Karpowicz J., Bortkiewicz A., Gryz K., Kubacki R., Wierdkiewicz R.: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości z zakresu 0 Hz–300 GHz – Dokumentacja nowelizacji harmonizującej dopuszczalny poziom ekspozycji pracowników z wymaganiem dyrektywy 2004/40/WE. *Podst. Metody Oceny Środ.* Pr. 2008;4:7–14
16. European Commission. Consultation of social partners, second stage of consultation of the social partners on the protection of workers from the risk related to exposure to electromagnetic fields at work. C(2010)3250 final. European Commission, Brussels 2010
17. Kolmodin-Hedman B., Mild K.H., Hagberg M., Jönsson E., Andersson M.C., Eriksson A.: Health problems among operators of plastic welding machines and exposure to radio frequency electromagnetic fields. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 1988;60:243–247
18. Conover D.L., Moss C.E., Murray W.E., Edwards R., Cox C., Grajewski B. i wsp.: Foot Currents and Ankle SARs Induced by Dielectric Heaters. *Bioelectromagnetics* 1992;13:104–110
19. Wilén J., Hörnsten R., Sandström M., Berle P., Wiklund U., Stensson O. i wsp.: Electromagnetic Field Exposure and Health Among RF Plastik Sealer Operators. *Bioelectromagnetics* 2004;25:5–15
20. Aniołczyk H.: Pomiar i ocena higieniczna pól elektromagnetycznych w otoczeniu diatermii, zgrzewarek i nagrzewnic indukcyjnych. *Med. Pr.* 1989;32(2):120–128
21. Aniołczyk H.: Pola elektromagnetyczne: źródła – oddziaływanie – ochrona. Instytut Medycyny Pracy, Łódź 2000, ss. 191–201
22. Bini M., Checcucci A., Ignesti A., Millanta L., Olmi R., Rubino N. i wsp.: Exposure of Workers to Intense RF Electric Fields that Leak from Plastic Sealers. *J. Microw. Power* 1986;21(1):33–40
23. ECC, CEPT: ECC/REC/(02)04. Revised ECC recommendation (02)04. Measuring Non-Ionizing Electromagnetic Radiation (9 kHz–300 GHz). Electronic Communications Committee. European Conference of Postal and Telecommunications Administrations. Wydanie: październik 2003 [cytowany 3 kwietnia 2012]. Adres: <http://www.ero-docdb.dk/docs/doc98/official/pdf/ECCRec0204.pdf>
24. Minister of Public Works and Government Services. Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz. Minister, Canada 1999
25. Aniołczyk H., Mariańska M., Mamrot P.: Optymalizacja metod pomiarowych i oceniających ekspozycję zawodową na pola elektromagnetyczne stosowane w fizykoterapii krótkofalowej. *Med. Pr.* 2011;62(5):499–515
26. Sińczuk-Walczak H., Iżycki J.: Ocena stanu neurologicznego i badań EEG u pracowników zatrudnionych w narażeniu na działanie pola elektromagnetycznego o częstotliwości 27–30 MHz. *Med. Pr.* 1981;32(3):227–231