

Praktyczna implementacja międzynarodowych zasad oceny zagrożeń zawodowych związanych z elektrodynamicznym oddziaływaniem pól magnetycznych małej częstotliwości na pracownika¹

dr inż. JOLANTA KARPOWICZ

e-mail: jokar@ciop.pl

dr inż. KRZYSZTOF GRYZ

e-mail: krgrzy@ciop.pl

Centralny Instytut Ochrony Pracy –

Państwowy Instytut Badawczy

00-701 Warszawa

ul. Czerniakowska 16

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, narażenie zawodowe, miary narażenia, kryteria oceny.

Keywords: electromagnetic fields, occupational exposure, exposure measures, assessment criteria.

Streszczenie

Pod wpływem oddziaływania pola magnetycznego małej częstotliwości w organizmie człowieka zachodzą procesy biofizyczne, które mogą prowadzić do wywołania odpowiedzi komórek nerwowych – zarówno centralnego układu nerwowego, jak i nerwów obwodowych, takich jak magnetofosfeny lub podrażnienie nerwów obwodowych. Zjawisko to determinuje strukturę wymagań dotyczących ochrony pracowników przed ostrymi skutkami oddziaływania pola magnetycznego o częstotliwości nieprzekraczającej kilkuset kiloherców.

Wykorzystując wyniki modelowania numerycznego zależności miar wewnętrznych (indukowanego w organizmie pola elektrycznego) i miar

zewnętrznych (indukcji magnetycznej pola oddziałującego na pracowników) narażenia na pole magnetyczne małej częstotliwości, opracowano zasady oceny zagrożeń związanych z oddziaływaniem elektrodynamicznym na organizm pracownika pól magnetycznych o częstotliwości z pasma $1 \div 10000$ Hz. Przy opracowaniu prezentowanych zasad wykorzystano opublikowane przez International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) zalecenia dotyczące oceny zagrożeń wynikających z oddziaływania pola magnetycznego sinusoidalnie zmiennego w czasie i jednorodnego w przestrzeni stanowiska pracy. Uwzględniono również charakterystyki warunków narażenia na pola magnetyczne, jakie

¹ Publikacja opracowana na podstawie wyników badań naukowych finansowanych w latach 2011–2012 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, prowadzonych w ramach działalności statutowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego – „Nowoczesne techniki oceny zagrożeń elektromagnetycznych przy źródłach pól elektromagnetycznych małej impedancji uwzględniające naturę oddziaływania magnetochemodynamicznego na organizm człowieka”.

występują na rzeczywistych stanowiskach pracy, gdzie pola są zarówno niejednorodne przestrzennie, jak i niesinusoidalnie zmienne w czasie, a także uwarunkowania techniczne takich badań.

Zaproponowane zasady oceny narażeń definiują m.in.: miary wewnętrzne narażenia na pole magnetyczne, miary zewnętrzne w dziedzinie przestrzeni stanowiska pracy dotyczące narażenia na jednorodne lub niejednorodne pole magnetyczne, miary zewnętrzne w dziedzinie czasu dotyczące narażenia na harmoniczne lub nieharmoniczne pole magnetyczne oraz kryteria oceny narażenia dotyczące poszczególnych części ciała – głowy, tułowia i kończyn. Prezentowane

zasady oceny narażeń nie stanowią wprowadzie projektu rozwiązań formalnoprawnych w tym zakresie, ale prezentując rezultaty rozważań naukowych, stanowią wkład do dyskusji merytorycznej dotyczącej potrzeby i ewentualnego zakresu zmian wymagań prawa pracy w Polsce, związanych ze zbliżającym się procesem formalnego wdrożenia wymagań nowej dyrektywy europejskiej 2013/35/UE stanowiącej minimalne wymagania w zakresie ochrony pracowników przed zagrożeniami wynikającymi z narażenia na pola elektromagnetyczne w miejscu pracy.

Summary

The influence of a low frequency magnetic field causes biophysical effects in the human body, which may trigger the response of nervous cells, in both the central and peripheral nervous systems, such as magneto-phosphores or peripheral nervous excitation. This phenomenon determines the structure of requirements regarding the protection of workers against acute effects of the influence of a magnetic field of a frequency not exceeding a few hundreds of kilohertz.

Based on the results of numerical simulations of the relation between internal measures (measures of the electric field induced in the human body) and external measures (measures of the magnetic flux density of the field affecting workers) of the exposure to a low frequency magnetic field, the rules were worked out regarding assessment of hazards linked with electrodynamic interaction between a worker's body and a magnetic field of a frequency from the range 1-10000 Hz. Guidelines on the assessment of hazards caused by the influence of sinusoidal time-varying and homogeneous in the work space magnetic field, which were published by International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), have been used in developing the rules. The characteristics of exposure to the magnetic field in a

real workplace, where fields are both spatially heterogeneous and non-sinusoidally time-varying, have been considered, as well technical conditions of performing such investigations. The proposal for rules on assessing exposure defines, among others, internal measures of exposure to a magnetic field, external measures applicable for exposure to a spatially homogeneous and/or heterogeneous magnetic field regarding the domain of workplace space, external measures regarding the time domain applicable for exposure to a harmonic or non-harmonic magnetic field, and exposure assessment criteria regarding individual sections of the human body (head, trunk and limbs). However, the rules for exposure assessment this article presents are not a legislative proposal in this field, but referring the outcome of research they are contributing to a discussion on the need and possible range of modifications of requirements of labour law in Poland, related to the coming process of formal implementation of the requirements of European Directive 2013/35/EU, which established the minimum requirements regarding the protection of workers against risks caused by the exposure to electromagnetic fields in the workplace.

WPROWADZENIE

Stosowane obecnie w Polsce zasady oceny narażenia pracowników na pola magnetyczne małych i średnich częstotliwości opracowano na przełomie XX i XXI w., odnosząc się do międzynarodowych zaleceń z 1998 r. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

(ICNIRP'98). Zalecenia te podają tzw. ograniczenia podstawowe (*basic restrictions*, BR), dotyczące dopuszczalnych skutków oddziaływania elektrodynamicznego wewnątrz ciała pracownika i są wyrażone jako gęstość prądu indukowanego – J_{ind} (wyrażanego w amperach

na metr kwadratowy, A/m^2) w głowie i tułowiu. Do wykorzystania przy rutynowej kontroli narażeń na stanowisku pracy, podano ponadto wartości tzw. poziomów odniesienia (*reference levels*, *RL*) wyrażonych jako indukcja magnetyczna (*B*) pola magnetycznego oddziałującego na pracownika. Przy wyznaczaniu zależności $J_{ind} = F(B)$ przyjęto reprezentujący ciało człowieka dwuwymiarowy model kołowy o przewodności $\sigma = 0,2$ S/m, znajdujący się w jednorodnym polu magnetycznym. Zalecenia ICNIRP w związku z tym bazują na założeniu, że przestrzeganie ograniczeń dotyczących *RL* powinno gwarantować w najbardziej niekorzystnych warunkach narażenia spełnienie wymagań dotyczących *BR*.

W polu niejednorodnym zależność J_{ind} od *B* jest inna niż w polu jednorodnym i przekroczenie dopuszczalnych *RL* nie oznacza w takim przypadku przekroczenia dopuszczalnych *BR*, a jedynie potrzebę wykonania bardziej dokładnej analizy ich wartości w określonych warunkach narażenia pracownika. Taka precyzyjna ocena może odwoływać się do wyników złożonych symulacji komputerowych modelujących warunki narażenia na stanowisku pracy bądź do wyników pomiarów rozkładu pola magnetycznego oddziałującego na pracownika. W zaleceniach ICNIRP'98 nie podano zasad takiej oceny pola niejednorodnego. Obie metody wymagają złożonego i co się z tym wiąże kosztownego procesu oceny warunków narażenia pracownika, a równocześnie postanowień normujących szczegółły procesu oceny narażeń dla zapewnienia miarodajności i powtarzalności jego wyników.

Nowe zalecenia ICNIRP dotyczące ochrony przed oddziaływaniem pól o częstotliwości 1 Hz ÷ 10 MHz opublikowano w 2010 r. (ICNIRP 2010). Są one obecnie najczęściej dyskutowanym dokumentem odniesienia w przypadku analizy zagrożeń elektromagnetycznych małej częstotliwości. Zostały także uznane za dokument

naukowy, stanowiący podstawę do skonstruowania w latach 2011-2013 nowych wymagań dotyczących ochrony pracowników przed zagrożeniami elektromagnetycznymi, ustalonych dyrektywą 2013/35/WE (dyrektywa 2013), która w czerwcu 2013 r. zastąpiła dyrektywę europejską 2004/40/WE (dyrektywa 2004). Podobnie jak w zaleceniach z 1998 r. w najnowszych zaleceniach ICNIRP nie wyspecyfikowano zasad oceny narażenia na pola niejednorodne przestrzennie występujące np. w małych odległościach od źródła pola, kiedy narażenie różnych części ciała znacznie się różni. Zasady takie, dotyczące np. limitów narażenia kończyn, powinny być zgodnie z intencją ICNIRP przedmiotem prac organizacji normalizacyjnych – dotychczas nie opublikowanych. Jednakże ICNIRP sugeruje, że w przypadku odległości między źródłem pola a ciałem człowieka mniejszej od 20 cm, w ocenie narażeń powinno się uwzględniać analizę zgodności bezpośrednio z wymaganiami dotyczącymi *BR*. W sytuacji odległości od źródła pola przekraczających 20 cm, ocena spełnienia wymagań dotyczących *RL* powinna być wg ICNIRP wystarczająca.

Relacjonowane w niniejszym artykule badania dotyczyły wypracowania propozycji zasad oceny narażenia pracowników na pole magnetyczne. Poszukiwano zasad oceny zagrożeń związanych z elektrodynamicznym oddziaływaniem pól małej częstotliwości, zgodnych z zaleceniami międzynarodowymi ICNIRP opublikowanymi w 2010 r., dedykowanych dla działań inspekcyjnych w rzeczywistym środowisku pracy, to znaczy gdzie konieczne jest wykonanie oceny pól niejednorodnych przestrzennie, niesinusoidalnych w dziedzinie czasu, a także z użyciem dostępnej na rynku, jak najmniej złożonej aparatury pomiarowej i przy jak najdalej idącym ograniczeniu stosowania złożonych symulacji numerycznych.

POLA MAGNETYCZNE MAŁEJ CZĘSTOTLIWOŚCI W ŚRODOWISKU PRACY

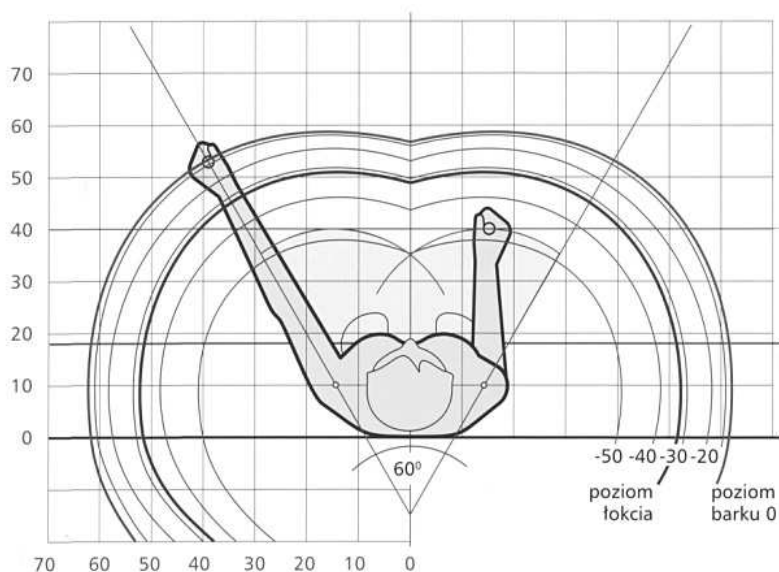
W otoczeniu źródeł silnoprądowych pole elektromagnetyczne jest polem małej impedancji, tzn. dominuje w nim składowa magnetyczna, i analizując zagrożenia dla ludzi można pominąć ocenę skutków oddziaływania składowej elek-

trycznej. Omawiany rodzaj zagrożeń elektromagnetycznych występuje w środowisku pracy z różnym natężeniem przy takich urządzeniach i instalacjach, jak: zgrzewarki rezystancyjne, spawarki łukowe, instalacje energetyczne, elek-

trolityczne, galwanizacyjne i zasilania silnoprądowego urządzeń, np. elektrotermicznych.

Podstawową cechą takich pól jest znaczna niejednorodność rozkładu przestrzennego pola magnetycznego w otoczeniu źródła pola, gdzie przebiega aktywność pracowników. Często przypadkiem jest również wykonywanie ręcznych prac w otoczeniu takich źródeł. Ze względu na wymiary antropometryczne dorosłej populacji Polaków, w takim przypadku np. dłoń znajduje

się w odległości od 30 do 90 cm od osi tułowia, zależnie od pozycji, w jakiej odbywa się aktywność pracownika: długość uchwytu, tj. odległość łokieć – oś uchwytu dłoni wynosi: dla mężczyzn min. 32 cm, maks. 43 cm, a dla kobiet min. 28 cm, maks. 40 cm, natomiast zasięg przedniej ręki wynosi: dla mężczyzn min. 81 cm, maks. 93 cm, a dla kobiet min. 75 cm, maks. 86 cm (*Gedliczka 2001*), (rys. 1).



Rys. 1. Dane antropometryczne dotyczące położenia tułowia i rąk przy różnych pozycjach ciała (*Gedliczka 2001*)

Może to skutkować znacznymi różnicami poziomu narażenia różnych części ciała pracownika. Problem ten można zilustrować na przykładzie rozkładu przestrzennego pola magnetycznego w otoczeniu modeli źródeł pola o wymiarach i kształcie zbliżonym do wspomnianych źródeł często eksploatowanych w środowisku pracy. Źródłami takimi mogą być: pojedyncze zwoje kołowe z przepływającym w nich prądem o ustalonym natężeniu i o różnych wymiarach:

- średnicy 200 cm (*DP*) – źródło pola reprezentujące narażenie, np. przy rozłożonych swobodnie kablach spawalniczych
- średnicy 20 cm (*MP*) – źródło pola reprezentujące narażenie, np. przy wzbudniku nagrzewnicy indukcyjnej lub małym zwoju kabli spawalniczych.

Modelem źródła pola magnetycznego może być również prostoliniowy, nieskończonej dłu-

gości przewód z prądem (*PP*), który może reprezentować zarówno kable instalacji zasilającej urządzeń, jak i swobodnie rozłożone długie przewody spawalnicze.

Odległość 30 ÷ 90 cm od źródła pola odpowiada narażeniu tułowia pracownika, kiedy znajduje się on w odległości „wyciągniętej ręki” lub chwytu w pozycji naturalnej, a odległość 5 ÷ 20 cm modeluje przypadek narażenia tułowia, kiedy pracownik znajduje się bezpośrednio przy źródle lub narażenie dłoni przy ręcznej obsłudze źródła pola.

Miarą charakteryzującą niejednorodność pola oddziałującego na pracownika może być iloraz największej wartości indukcji pola magnetycznego (B_1) do wartości najmniejszej (B_2) w obrębie oddziaływania na poszczególne części ciała lub na różne części ciała, np. przy porównaniu narażenia dłoni i tułowia: $RBP = B_1(5\text{ cm})/B_2(90\text{ cm})$. Wskaźnik tak zdefiniowa-

ny ma wartość jeden w przypadku narażenia na pole jednorodne. W analizowanych scenariuszach narażenia wskaźnik *RBP* przyjmuje wartości w zakresie od 1 do ponad 1000, (tab. 1). W związku z tak znacznym zróżnicowaniem wa-

runków narażenia w poszczególnych przypadkach, również skutki elektrodynamicznego oddziaływania pola magnetycznego znacznie się różnią.

Tablica 1.

Parametry charakteryzujące niejednorodność przestrzenną rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu źródeł pola o różnym kształcie i wymiarach, $RBP = B_1(x)/B_2(y)$; x, y – odległości od źródła pola reprezentujące różne położenia ciała pracownika

Odległości od źródła pola magnetycznego, cm	Parametr $RBP = B_1(x)/B_2(y)$ dla modeli źródła pola magnetycznego				
	<i>DP</i> (rozkład pola wzdłuż promienia)	<i>DP</i> (rozkład pola wzdłuż osi)	<i>PP</i> (rozkład pola wzdłuż promienia)	<i>MP</i> (rozkład pola wzdłuż promienia)	<i>MP</i> (rozkład pola wzdłuż osi)
5 ÷ 20	7,5	1,1	11,0	35,7	7,5
5 ÷ 30	12,7	1,1	16,5	87,4	21,2
5 ÷ 90	54,1	2,4	49,5	1130	497
20 ÷ 30	1,7	1,1	1,5	2,5	2,8
20 ÷ 90	7,2	2,3	4,5	32,0	66,4
30 ÷ 90	4,3	2,1	3,0	13,0	23,5

Objaśnienia:

DP – pętla o średnicy 200 cm.

MP – pętla o średnicy 20 cm.

PP – prosty przewód.

Omawiane źródła pola magnetycznego najpowszechniej są zasilane prądami przemiennymi o częstotliwości zbliżonej do 50 Hz lub prądami prostowanymi. Wskutek częstego wykorzystywania układów tyrystorowych do kształtowania prądu zasilania, profil narażenia w dziedzinie czasu może mieć zarówno sinusoidalną zmienność w czasie, jak i przebieg zniekształcony lub kluczowany.

Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych w warunkach terenowych na stanowiskach pracy powinny uwzględniać warunki narażenia, jakie tam występują, a więc zarówno charakterystykę rozkładu przestrzennego narażenia ciała pracownika, jak i zmienność w czasie oddziałujących na niego pól magnetycznych.

NATURA ODDZIAŁYWANIA ELEKTRODYNAMICZNEGO PÓL MAGNETYCZNYCH NA LUDZI

Zmienne w czasie pole magnetyczne zgodnie z prawem Faraday'a indukuje wewnątrz organizmu człowieka pole elektryczne (rys. 2):

$$\oint \mathbf{E}_{\text{ind}} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad [1]$$

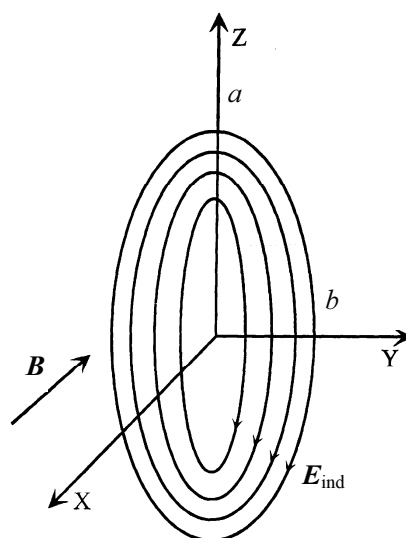
gdzie:

\mathbf{E}_{ind} – natężenie pola elektrycznego zaindukowanego w organizmie,

$d\mathbf{l}$ – element jednostkowy pętli przewodzącej, w której jest indukowane pole elektryczne,

\mathbf{B} – indukcja pola magnetycznego, w którym przebywa człowiek,

$d\mathbf{s}$ – element jednostkowy pola przekroju organizmu, prostopadłego do polaryzacji wektora \mathbf{B} .



Rys. 2. Pole elektryczne indukowane w eliptycznym modelu ciała człowieka eksponowanego na zewnętrzne, jednorodne, zmienne w czasie pole magnetyczne

Zgodnie z prawem Ohma zaindukowane pole elektryczne wywołuje w organizmie człowieka przepływ elektrycznych prądów wirowych o gęstości J :

$$J = \sigma(f) E_{\text{ind}} \quad [2]$$

gdzie:

$\sigma(f)$ – przewodność elektryczna tkanek organizmu człowieka przy częstotliwości f pola magnetycznego.

Natężenia pól indukowanych i gęstości prądu są proporcjonalne do promienia pętli, jaką tworzy eksponowana część ciała, przenikalności elektrycznej tkanek i szybkości zmian strumienia magnetycznego w czasie (ICNIRP 2010; 1998; *Reilly* 1998).

Ze względu na wirowy charakter prądów indukowanych przez pole magnetyczne nie są dostępne techniki pomiarowe do ich oceny w organizmie człowieka. Stosowane są obliczenia z modelami o wymiarach i przewodności elektrycznej reprezentujących organizm człowieka oraz z modelami o wymiarach i rozkładzie prądu w obwodach reprezentujących źródło pola magnetycznego znajdujące się w jego otoczeniu (ICNIRP 2010; PN-EN 50413:2009; PN-EN 50505:2008). W badaniach analitycznych można wykorzystać jedynie dwuwymiarowy model jednorodnej elipsy, bądź trójwymiarowy model walcowy lub elipsoidalny (ICNIRP 1998; *Reilly* 1998). Techniki symulacji numerycznych umożliwiają

takie badania z modelami o różnej złożoności i rozdzielczości przestrzennej – bryłowymi lub reprezentującymi budowę anatomiczną ciała (*Dimbylow* 2005; ICNIRP 2010; *Zradziński* 2013; PN-EN 50413:2009; PN-EN 50505:2008).

Wskutek wspomnianego oddziaływania elektrodynamicznego, w organizmie człowieka przebywającego w polu magnetycznym zachodzą procesy biofizyczne, które mogą prowadzić do odpowiedzi komórek nerwowych – zarówno centralnego układu nerwowego, jak i nerwów obwodowych, takich jak: odczucie drżenia mięśni szkieletowych, wrażenia wzrokowe, tzw. magnetofosfeny (WHO 2007), czy relacjonowane przez pracowników zaburzenia równowagi i zawroty głowy, zaburzenia koordynacji wzrokowo-ruchowej lub odczuwanie metalicznego posmaku (*Wilen, de Vocht* 2011; *de Vocht* i in. 2006), a nawet zaburzenia sercowo-naczyniowe (ICNIRP 2010). Odczucia takie mogą utrudnić, a nawet uniemożliwić, wykonanie aktywności zawodowej, wymagającej od pracownika zachowania precyzji, mogą też spowodować poważne wypadki przy pracy.

Wciąż nie rozstrzygnięto kontrowersji na temat takich skutków zdrowotnych przewlekłego oddziaływania pola magnetycznego, jak choroby nowotworowe (grupa 2B czynników możliwie kancerogennych dla ludzi wg Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem, IARC),

czy neurodegeneracyjne – zwłaszcza stwardnienie zanikowe boczne (ALS) i choroba Alzheimera (Ahlbom i in. 2001; Bortkiewicz 2008; IARC 2002; SCENIHR 2009; WHO 2007). Wyniki badań naukowych nie dają więc w chwili obecnej podstaw do przyjęcia, że nie ma za-

grożeń zdrowia dla pracowników podlegających przewlekłemu narażeniu zawodowemu na pola magnetyczne, słabsze od limitów ograniczających poziom narażenia ze względu na oddziaływanie elektrodynamiczne.

PODSTAWOWE ZASADY POMIARU POLA MAGNETYCZNEGO

Najwszechstronniejsze zastosowanie w ocenie warunków narażenia pracowników na pola magnetyczne mają przyrządy pomiarowe wyposażone w izotropowe sondy pomiarowe, które tworzą czujniki pomiarowe z 3 kołowymi antenami ramowymi (cewkami wielozwojowymi). Zgodnie z prawem Faraday'a w antenie ramowej umieszczonej w polu magnetycznym na skutek przenikania przez nią strumienia magnetycznego (φ) indukuje się siła elektromotoryczna (ε) równa:

$$\varepsilon = \frac{d\varphi}{dt} = s \cdot n \cdot \cos\theta \cdot \frac{dB}{dt} \quad [3]$$

gdzie:

- φ – strumień magnetyczny, $\varphi = B s$,
- n – liczba zwojów anteny,
- θ – kąt między wektorem indukcji a normalną do płaszczyzny anteny,
- s – powierzchnia anteny.

W przypadku pola harmonicznego o indukcji $B = B_0 \cos\omega t$:

$$\varepsilon = \omega \cdot s \cdot n \cdot B_0 \cdot \cos\theta \cdot \sin\omega t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot n \cdot B_0 \cdot \cos\theta \cdot \sin\omega t \quad [4]$$

gdzie:

- B_0 – amplituda indukcji magnetycznej,
- $\omega = 2 \pi f$,
- f – częstotliwość.

Wartość skuteczna indukcji magnetycznej jest parametrem najczęściej wykorzystywanym zarówno w kryteriach oceny, jak i jako miara narażenia oceniana na podstawie pomiarów. Wartość skuteczna jest definiowana jako:

$$B_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B^2(t) dt} \quad [5]$$

gdzie:

$B(t)$ – wartość chwilowa indukcji magnetycznej,

T – przedział czasu, w którym jest obliczana wartość skuteczna, np. w okresie zmienności pola harmonicznego.

W przypadku pola harmonicznego wartość skuteczna wynosi:

$$B_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} B_0 \quad [6]$$

Wynika stąd, że w przypadku oceny pól harmonicznych pomiary wartości maksymalnej i wartości skutecznej są równoważne, ponieważ są to wielkości skorelowane. Mierniki często nie pozwalają zmierzyć fizycznie wartości skutecznej sygnału (np. mierniki z detektorem diodowym, który jest detektorem wartości szczytowej lub skutecznej, zależnie od amplitudy badanego sygnału), a jedynie są wzorcowane jako mierniki wartości skutecznej. Jest to jedna z przyczyn ograniczonej dokładności pomiaru wartości skutecznej pól nieharmonicznych.

W przypadku pola o przebiegu złożonym ze składowych harmonicznych o jednakowej fazie początkowej, o częstotliwościach f_n , wartość skuteczna może być obliczana na podstawie zależności:

$$B_{z_{RMS}} = \sqrt{\sum_n (B_n)^2} = \sqrt{\sum_n \frac{(B_{0n})^2}{2}} \quad [7]$$

gdzie:

B_{0n} – amplituda przebiegu zmienności wartości chwilowej indukcji magnetycznej o częstotliwości f_n ,

$B_{z_{RMS}}$ – wartość skuteczna indukcji magnetycznej pola złożonego,

B_n – wartość skuteczna indukcji magnetycznej pola harmonicznie zmiennego w czasie z częstotliwością f_n .

Zależność [7] oznacza, że pomiar wartości skutecznej – szerokopasmowy, obejmujący wszystkie składowe przebiegu i niezakłócony zmianami częstotliwościowymi czułości sondy pomiarowej – jest w przybliżeniu pomiarem wartości skutecznej składowej, której amplituda jest dominująca w widmie amplitudowo-częstotliwościowym przebiegu.

Identyfikując podstawowe parametry zmienności w czasie pola elektromagnetycznego, można wykorzystać cyfrowe techniki oscyloskopowe z kalibrowaną sondą pomiarową (np. wspomnianymi izotropowymi układami pomiarowymi z antenami ramowymi). Częstotliwość próbkowania (kwantyzacji) sygnału powinna umożliwiać otrzymanie ciągłego obrazu zmienności badanych pól, odzwierciedlającego wartości maksymalne i dynamikę zmian. Zgodnie z teorią próbkowania sygnałów analogowych i twierdzeniem Kotielnikowa-Shanona, jeżeli sygnał ciągły ma ograniczone od góry widmo częstotliwościowe, tzn. nie zawiera składowych harmonicznych o częstotliwości większej niż f_{\max} , to sygnał ten może być odtworzony bez zniekształceń z próbek, które są pobierane z częstotliwością próbkowania $f_s > 2f_{\max}$ (lub odnosząc się do okresu próbkowania i przebiegu: $T_s < T_{\max}/2$).

Próbkowanie sygnału ciągłego ze stałym okresem T_s może być źródłem aliasingu, czyli nakładania się na siebie powtórzeń jego widma, co prowadzi do błędów w odtwarzaniu sygnału. Aby uniknąć aliasingu, należy zapewnić, aby

sygnał próbkowany był ograniczony pasmowo do częstotliwości Nyquista, czyli połowy częstotliwości próbkowania: $f_s = 1/T_s$. Twierdzenie to dotyczy próbkowania sygnałów określonych w nieskończonym przedziale czasu. Rzeczywiste sygnały są próbkowane w określonym czasie T_w , tzw. oknie czasowym. Okno czasowe T_w określa liczba zebranych próbek N i częstotliwość próbkowania f_s lub okres próbkowania T_s :

$$T_w = N/f_s = N \cdot T_s \quad [8]$$

Okno czasowe powinno być wielokrotnością okresu sygnału badanego T_x , tzn. $T_w = n \cdot T_x$ (gdzie n jest liczbą całkowitą). Z powyższych warunków wynika, że np. w przypadku sygnału sinusoidalnego o częstotliwości f_x dla spełnienia warunku $f_s > 2f_x$:

$$N/T_w > n/(2 T_w), \text{ czyli } N/n > 2 \quad [9]$$

minimalna liczba próbek, pobierana w okresie sinusoidy, powinna wynosić co najmniej 3. Jednak dalsze zwiększenie liczby próbek i zmniejszenie odstępów czasowego między kolejnymi próbkami (okresu próbkowania T_s) pozwala na bardziej dokładną kwantyzację sygnału i jego późniejsze wierniejsze odtworzenie. W związku z tym, często przyjmuje się do praktycznego prowadzenia badań, że pasmo anten pomiarowych powinno obejmować co najmniej 10. harmoniczną badanego przebiegu niesinusoidalnego, a próbkowanie przy pomiarach cyfrowych powinno zapewniać co najmniej 10 próbek w okresie podstawowej harmonicznej tego przebiegu.

PODSTAWOWE ZASADY OCENY NARAŻENIA PRACOWNIKÓW NA ODDZIAŁYWANIE PÓL MAGNETYCZNYCH W ZALECENIACH ICNIRP'2010

W międzynarodowych zaleceniach dotyczących ochrony przed nadmiernym narażeniem na pola magnetyczne o częstotliwości nieprzekraczającej kilkuset kiloherców (tj. pól małych i średnich częstotliwości), przyjęto za minimalne wymagania, aby chwilowe narażenie nie przekraczało poziomu, przy którym pracownikowi zagraża pobudzenie tkanki nerwowej i mięśniowej wskutek omówionego oddziaływania elektrodynamicznego (ICNIRP 1998; 2010). Ochrona przed zagrożeniem zdrowia wskutek narażenia przewlekłego nie została zaimplementowana

w strukturze minimalnych wymagań, jednakże jest ona odzwierciedlona w uzupełniających je zaleceniach, aby były podejmowane niskokosztowe działania ograniczające narażenie niekonieczne, które zaproponowano w opracowaniach Światowej Organizacji Zdrowia, i w ślad za nimi wprowadzono w wielu państwach (WHO 2007).

Na podstawie analizy wyników badań biomedycznych wykorzystujących doskonalsze modele ciała człowieka niż dostępne przy opracowywaniu poprzednich zaleceń z 1998 r. w

nowych zaleceniach ICNIRP (ICNIRP 2010) zdefiniowano nowe wartości ograniczeń podstawowych (BR), dotyczące ochrony przed takimi ostrymi skutkami oddziaływania biofizycznego pola magnetycznego, jak:

- pobudzenie mielinowanych komórek centralnego i obwodowego układu nerwowego
- wywołanie magnetofosfenów (pobudzenie komórek nerwowych siatkówki)
- krótkotrwałe zakłócenia funkcjonowania mózgu.

Podstawowym ograniczeniem (BR) narażenia na pole magnetyczne małej częstotliwości jest maksymalna wartość skutków oddziaływania elektrodynamicznego wewnątrz ciała pracownika (wyrażona jako maksymalna wartość chwilowa, wartości skutecznej natężenia pola elektrycznego E_{ind} indukowanego w tkance antropomorficznego modelu numerycznego – bez uśredniania w czasie, ale uśredniona w objętości $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$), (ICNIRP 2010). Rozróznilo dwa poziomy BR dla E_{ind} , zależne od częstotliwości f wyrażonej w kilohercach (kHz). Poziom podstawowy ($BR - E_{ind}$), który dotyczy wszystkich tkanek głowy i całego ciała, wynosi w poszczególnych pasmach częstotliwości odpowiednio: 0,8 V/m (dla pól o częstotliwości z zakresu 1 Hz ÷ 3 kHz) i $(0,27/f)$ V/m (dla 3 kHz ÷ 10 MHz). Natomiast niższy od niego poziom, dotyczący centralnego układu nerwowego głowy, wynosi odpowiednio: $(0,0005/f)$ V/m (dla pól o częstotliwości z zakresu 1 ÷ 10 Hz); 0,05 V/m (dla 10 ÷ 25 Hz); $(2/f)$ V/m (dla 25 ÷ 400 Hz); 0,8 V/m (dla 400 ÷ 3 kHz) i $(0,27/f)$ V/m (dla 3 kHz ÷ 10 MHz).

W zaleceniach ICNIRP podano również, że poziom podstawowy odpowiada ochronie pracowników przed zagrożeniem zdrowia wynikającym z oddziaływania pola, natomiast niższy poziom reprezentuje ochronę przed występowaniem takich skutków ekspozycji, jak magnetofosfeny, które nie są traktowane przez ICNIRP jako zagrożenie zdrowia, a jedynie jako skutki oddziaływania czynnika środowiskowego utrudniające bezpieczne i precyzyjne wykonanie pracy.

W zaleceniach ICNIRP do oceny narażeń środowiskowych, na podstawie wyników modelowania matematycznego, określono wartości poziomów odniesienia pola magnetycznego oddziałującego na pracowników (RL). Wartości

RL wyrażono jako wartości skuteczne indukcji magnetycznej ($RL-B$), zależne od częstotliwości f wyrażonej w kilohercach (kHz). Wartości RL odpowiadają ograniczeniom narażenia gwarantującym łącznie spełnienie wymagań dotyczących obu poziomów $BR-E_{ind}$ (ICNIRP 2010). Wartości $RL-B$, dotyczące narażenia pracowników na zmienne pole magnetyczne o jednorodnym rozkładzie przestrzennym, wynoszą w poszczególnych pasmach częstotliwości odpowiednio: $(0,2/f^2)$ μT (dla pól o częstotliwości z zakresu 1 ÷ 8 Hz); $(25/f)$ μT (dla 8 ÷ 25 Hz); 1000 μT (dla 25 ÷ 300 Hz); $(300/f)$ μT (dla 300 ÷ 3 kHz) i 100 μT (dla 3 kHz ÷ 10 MHz).

W zaleceniach ICNIRP podano, że zależności wiążące ($RL-B$) i ($BR-E_{ind}$) są zdefiniowane dla oddziaływania pola pierwotnego, niemal jednorodnego, w miejscu, gdzie znajduje się człowiek, z uwzględnieniem maksymalnego sprzężenia pola z ciałem człowieka, zależności częstotliwościowych tego sprzężenia i niepewności wyników obliczeń numerycznych tych zależności. W uzasadnieniu przyjętych wartości RL podano, że na podstawie obliczeń numerycznych symulujących skutki oddziaływania pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz, wartości współczynnika K wiążącego RL i BR są następujące:

- $K = 33 \text{ (V/m)/T}$ – dla centralnego układu nerwowego,
- $K = 60 \text{ (V/m)/T}$ – dla peryferyjnego układu nerwowego.

Uwzględniając ponadto niepewność wyników wspomnianych symulacji numerycznych, zastosowano uwzględniający ją współczynnik bezpieczeństwa i 3-krotne zmniejszenie wartości granicznych RL opublikowanych w zaleceniach ICNIRP, w stosunku do wyników bezpośredniego obliczenia zależności E_{in}/B na podstawie przyjętych wartości BR.

Wartości RL zostały zdefiniowane do celów rutynowej kontroli i oceny narażeń pracowników. Przestrzeganie ograniczeń dotyczących RL powinno gwarantować w najbardziej niekorzystnych warunkach spełnienie wymagań dotyczących BR. W wielu przypadkach, ze względu na warunki narażenia inne niż przyjęte do wyznaczenia zależności $RL-B$ od $BR-E_{ind}$, ograniczenia podstawowe nie są przekroczone, pomimo że pola magnetyczne na stanowisku pracy przekraczają wartości $RL-B$.

Ponadto zależność $RL-B$ podano w sposób, który nie precyzuje miar narażenia stosownych do oceny pól występujących na stanowiskach pracy. Zaproponowano również złożoną zależność $RL-B$ od częstotliwości, łączącą ochronę przed skutkami o zróżnicowanym znaczeniu dla bezpieczeństwa i higieny pracy, a także nie uwzględniając możliwości technicznych służb inspekcyjnych i dostępności aparatury do wykonania oceny narażenia w warunkach terenowych.

Według zaleceń ICNIRP ocenę ekspozycji na nieharmoniczne pola magnetyczne można prowadzić na podstawie szybkości narastania/opadania natężenia pola (np. pochodnej indukcji względem czasu dB/dt), (ICNIRP 2003). Wartość maksymalna dB/dt badanego przebiegu impulsowego powinna być mniejsza od maksymalnej szybkości narastania takiego przebiegu harmonicznego, którego częstotliwość wynosi $f_p = 1/(2t_p)$, a wartość skuteczna indukcji magnetycznej jest równa wartości podanej w zaleceniach ICNIRP jako dopuszczalna przy ekspozycji na pola harmoniczne o częstotliwości f_p . Wartość dopuszczalną szybkości narastania pola impulsowego można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$\frac{dB}{dt}(\max) = \sqrt{2}(2\pi f_p)B_L = \frac{2B_0}{0,5T_p} = \frac{B_{pp}}{0,5T_p} \quad [10]$$

gdzie:

- f_p – częstotliwość zmienności w czasie pola harmonicznego,
- B_L – dopuszczalna wartość skuteczna indukcji harmonicznego pola magnetycznego o częstotliwości f_p ,
- B_{pp} – wartość międzyszczytowa odpowiadająca dopuszczalnej wartości skutecznej indukcji pola magnetycznego o częstotliwości f_p ,
- T_p – okres odpowiadający zmienności w czasie harmonicznego pola magnetycznego o częstotliwości f_p .

Innym kryterium oceny ekspozycji na pola nieharmoniczne, proponowanym przez ICNIRP, jest użycie współczynnika ekspozycji W (ICNIRP 2010). Obliczany on jest na podstawie wartości skutecznych poszczególnych składowych harmonicznym występujących w badanym polu magnetycznym oraz wartości dopuszczalnych ustalonych dla pól o tych częstotliwościach, zgodnie z zależnością:

$$W = \sum_f \frac{B_f}{B_L(f)} \leq 1 \quad [11]$$

gdzie:

- B_f – zmierzona wartość skuteczna indukcji pola magnetycznego o częstotliwości f ,
- $B_L(f)$ – dopuszczalna wartość skuteczna indukcji pola magnetycznego o częstotliwości f .

Do skorzystania z podanych sposobów oceny ekspozycji niezbędna jest metoda oscyloskopowa z użyciem kalibrowanych, szerokopasmowych anten pomiarowych o płaskiej charakterystyce częstotliwościowej, tj. nieznieskształcających przebieg pola magnetycznego w paśmie obejmującym składowe badanego pola. Konstrukcja takiej sondy jest stosunkowo prosta, opiera się na wspomnianej antenie ramowej (która jest wrażliwa na wielkość pochodnej względem czasu badanego sygnału dB/dt) i układu całkującego sygnał z anteny ramowej (opartego na dwójniku RC – pojemności i rezystancji elektrycznej). W razie korzystania ze wskaźnika ekspozycji konieczne jest ponadto wykorzystanie narzędzi do analizy widmowej badanego przebiegu, najczęściej oprogramowania realizującego algorytm, tzw. szybkiej transformaty Fouriera (*fast fourier transform*, FFT).

Zaprezentowane zasady oceny pól niesinusoidalnych są najmniej złożone technicznie i możliwe do zastosowania niezależnie od przebiegu zmienności w czasie wartości granicznych narażenia, a więc są to metody uniwersalne i niewymagające zmian w razie modyfikacji wymagań prawa pracy. Jest to znaczną ich zaletą w porównaniu do proponowanych alternatywnie przez ICNIRP zasad oceny wykorzystujących pomiary przy użyciu sond o kształtowanej charakterystyce częstotliwościowej czułości, których konstrukcja jest bardziej złożona technicznie, co z zasady wnosi większy błąd pomiaru ze względu na niedoskonałość odtworzenia charakterystyki częstotliwościowej wartości granicznych. Ponadto taki zestaw pomiarowy odtwarza jeden wybrany przebieg wartości granicznych w funkcji częstotliwości i, w razie zmiany wymagań prawnych lub równoległego obowiązywania wymagań o różnych przebiegach częstotliwości, konieczne jest stosowanie różnych zestawów pomiarowych, co znajduje odzwierciedlenie w znacznie większych kosztach badań terenowych środowiska pracy.

ANALIZA KORELACJI RÓŻNYCH MIAR NARAŻENIA NA POLA MAGNETYCZNE Z WYMAGANIAMI ICNIRP

Wypracowanie zasad oceny narażenia pracowników na pola magnetyczne małej częstotliwości, zharmonizowanych z zaleceniami międzynarodowymi ICNIRP dotyczącymi ochrony przed oddziaływaniem pól magnetycznych i dostępnym w Polsce potencjałem technicznym, niezbędnym do wykonania takiej oceny, wymaga szczegółowej analizy struktury tych wymagań międzynarodowych w kontekście parametrów pól występujących w środowisku pracy i złożoności technicznej procesu oceny takich narażeń. Należy uwzględnić m.in., jakie wyniki oceny narażeń odpowiadających realnym warunkom na stanowiskach pracy uzyskuje się z zastosowaniem zdefiniowanych w tych wymaganiach miar.

Wykorzystując symulacje numeryczne, dokonano analizy stopnia skorelowania elektrodynamicznych skutków oddziaływania pola magnetycznego małej częstotliwości o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym, z różnymi miarami charakteryzującymi warunki takiego narażenia (Karpowicz i in. 2012). Wykorzystano jednorodne modele odpowiadające wymiarom antropometrycznym poszczególnych segmentów ciała człowieka: dłoni (D), głowy (G) lub tułowia (T), umieszczone w odległości 5 lub 50 cm od jednego z modeli źródła pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz (DP – pętla o średnicy 200 cm lub MP – pętla o średnicy 20 cm), przy położeniu modeli w płaszczyźnie źródła pola osiowo równoległe do promienia źródła, tj. kiedy pole magnetyczne jest spolaryzowane niemal prostopadle do największego przekroju modeli ciała człowieka.

Analizowanymi miarami narażenia były następujące parametry indukcji magnetycznej (B_i) pola oddziałującego na modele:

- pole magnetyczne wyznaczone w punktach na głównej osi modeli: na powierzchni najbliższej źródła pola (B_{P1}), w środku (B_{P2}) i na powierzchni najdalej od źródła pola (B_{P3}) oraz pole magnetyczne uśrednione w osi modeli (średnia arytmetyczna B_{P1} i B_{P3} oznaczona B_{P1-3})
- pole magnetyczne uśrednione na powierzchni pomiarowej anteny ramowej o średnicy 10 cm, odpowiadające położeniom sondy wewnątrz lokalizacji modeli,

w punktach na głównej osi modeli: przy powierzchni najbliższej źródła pola (B_{A1}), w środku (B_{A2}) i przy powierzchni najdalej od źródła pola (B_{A3}) oraz pole magnetyczne uśrednione w osi modeli (średnia arytmetyczna B_{A1} i B_{A3} oznaczona B_{A1-3})

- pole magnetyczne obliczone jako średnia arytmetyczna z rozkładu indukcji magnetycznej w osi modeli (B_S).

Do oceny elektrodynamicznych skutków oddziaływania pola magnetycznego wyznaczono natężenie pola elektrycznego indukowanego w modelach ciała (E_{in}). Ze względu na liniową zależność współczynnika E_{in}/B_i od częstotliwości pola magnetycznego, wyniki symulacji dotyczących oddziaływania pola o częstotliwości 50 Hz można liniowo skalować do wykorzystania przy ocenie narażeń na pola o innych częstotliwościach z pasma do 5 MHz (Barchański 2005).

Miary pola magnetycznego B_{Pi} można oszacować na podstawie wyników symulacji numerycznych lub pomiarów pola pierwotnego sondą hallotronową, stosowaną w przypadku pola magnetycznego małych częstotliwości lub magnetostatycznego. Miary B_{Ai} można oszacować na podstawie wyników symulacji numerycznych lub pomiarów pola pierwotnego, wykonanych sondą z anteną ramową, stosowaną w przypadku pola magnetycznego małych lub średnich częstotliwości. Wartość B_S można wyznaczyć dokładnie jedynie na podstawie wyników symulacji numerycznych, jednakże może być ona stosunkowo łatwo oszacowana jako średnia arytmetyczna z wyników serii pomiarów wykonanych w osi modeli, co zdecydowało o uwzględnieniu tego parametru w badaniach.

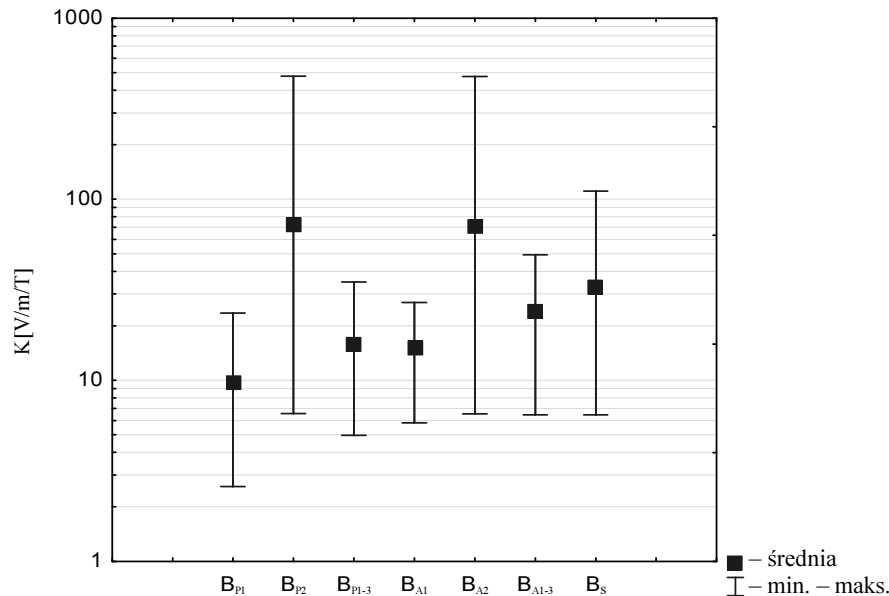
Do oceny elektrodynamicznych skutków oddziaływania pola magnetycznego wyznaczono natężenie pola elektrycznego indukowanego w modelach poszczególnych segmentów ciała (E_{in}), występujące w punktach zlokalizowanych w płaszczyźnie przewodników w odległości 10 mm od najbliższej źródła pola magnetycznego krawędzi modeli (w modelu tułowia jest to wartość 98-centyla, zbliżona do wartości 99-centyla zalecanej przez Dimbylowa), (Dimbylow 2005).

Wyniki symulacji zostały zwalidowane przez porównanie z wynikami wspomnianych symulacji Dimbyłowa, dotyczących narażenia anatomicznego modelu ciała kobiety NAOMI na jednorodne pole magnetyczne o częstotliwości 50 Hz i polaryzacji bok-bok dla tkani mięśniowej (o przewodności elektrycznej 0,35 S/m). Wartość 99-centylowa natężenia indukowanego pola elektrycznego uzyskana w jego badaniach wynosiła 23,0 V/m/T. W omawianych symulacjach (Karpowicz i in. 2012) dla przypadku najbardziej jednorodnego pola magnetycznego (pole magnetyczne źródła DP znajdującego się w odległości 50 cm od modeli segmentów ciała ludzkiego) w walcowym modelu tułowia (o przewodności elektrycznej 0,2 S/m) uzyskano zbliżoną do wyników Dimbyłowa 99. centylową wartość natężenia indukowanego pola elektrycznego równą 23,7 V/m/T. Na rysunku 3. i w tabeli 2. zaprezentowano wartości wskaźnika $K = E_{in}/B_i$ dla poszczególnych scenariuszy narażenia oraz poszczególnych miar narażenia.

Na podstawie analizy wyników omawianych symulacji numerycznych, można ustalić takie kluczowe zagadnienia metodyki oceny narażeń na pola magnetyczne występujące na stanowisku pracy, jak dobranie miar narażenia na pole magnetyczne najsilniej skorelowanych ze skutkami elektrodynamicznymi występującymi w organizmie

(E_m). Z rozpatrywanych miar narażenia (tj. parametrów: B_i , B_{P1} , B_{A1} , B_S) najsilniejsza korelacja ze skutkami elektrodynamicznymi oddziaływania pola magnetycznego ($p < 0,001$) występuje dla parametrów charakteryzujących pola magnetyczne przy powierzchni modeli segmentów ciała (B_{P1} i B_{A1}). Zaproponowane w zaleceniach ICNIRP do oceny narażenia na pole niejednorodne (ICNIRP 2010), parametry charakteryzujące wartość średnią pola oddziałującego na modele (B_{P1-3} , B_{A1-3} , B_S) są słabiej skorelowane ze skutkami oddziaływania pola ($p < 0,005$). Parametry odnoszące się do pola magnetycznego w środku modeli są najsłabiej skorelowane ze skutkami narażenia ($p < 0,01$).

Prezentowane dane odnoszą się do warunków narażenia, przy których wektor pola magnetycznego jest prostopadły do największego przekroju modeli ułożonych w płaszczyźnie źródeł pola magnetycznego, przy ułożeniu dłuższej osi modeli segmentów ciała wzdłuż promienia źródeł pola, tj. kiedy rozkład pola jest najbardziej niejednorodny. Przy innych konfiguracjach geometrycznych natężenia pola elektrycznego indukowanego w obiektach jest mniejsze, a ponadto narażenie jest bardziej jednorodne i różnice w wartości współczynnika K odpowiadającego różnym miarom narażenia będą mniejsze od występujących w omawianych danych.



Rys. 3. Zależność indukowanego pola elektrycznego od miar narażenia na pole magnetyczne, $K = E_{in}/B_i$ – dla wszystkich 12 analizowanych scenariuszy narażenia modelowanych numerycznie (Karpowicz i in. 2012)

Tablica 2.

Współczynnik $K = E_{in}/B_i$ dla różnych miar B_i charakteryzujących warunki narażenia na pole magnetyczne w analizowanych scenariuszach narażenia (Karpowicz i in 2012).

Miary B_i	Współczynnik $K = E_{in}/B_i$			
	wszystkie scenariusze		min. – maks.	
	min. – maks.(śr.)	współczynnik korelacji ρ -Spearmana	MP/DP	5 cm/50 cm
B_{P1}	2,59 ÷ 23,5 (9,70)	0,958 ^a	2,59 ÷ 19,9/ 3,43 ÷ 23,5	2,59 ÷ 13,8/ 4,85 ÷ 23,5
B_{P2}	6,56 ÷ 479 (72,3)	0,805 ^c	7,21 ÷ 479/ 6,56 ÷ 131	11,1 ÷ 479/ 6,56 ÷ 63,3
B_{P1-3}	4,96 ÷ 34,9 (15,7)	0,905 ^b	4,96 ÷ 34,1/ 5,88 ÷ 34,9	4,96 ÷ 26,4/ 6,27 ÷ 34,9
B_{A1}	5,82 ÷ 26,9 (15,2)	0,935 ^a	5,92 ÷ 26,8/ 5,82 ÷ 26,9	6,44 ÷ 26,4/ 5,82 ÷ 26,9
B_{A2}	6,53 ÷ 476 (70,5)	0,806 ^c	7,15 ÷ 461/ 6,53 ÷ 130	10,7 ÷ 467/ 6,53 ÷ 62,9
B_{A1-3}	6,46 ÷ 49,3 (23,8)	0,912 ^a	6,96 ÷ 49,3/ 6,46 ÷ 48,1	9,04 ÷ 49,3/ 6,46 ÷ 43,0
B_S	6,46 ÷ 111 (32,7)	0,879 ^b	6,96 ÷ 110/ 6,46 ÷ 76,8	9,04 ÷ 111/ 6,46 ÷ 22,9

Objaśnienia:

Istotność statystyczna: ^a $p < 0,001$; ^b $p < 0,005$; ^c $p < 0,01$; źródło pola: MP – \varnothing 20 cm, DP – \varnothing 200 cm; odległość między źródłem pola i modelami segmentów ciała 5 lub 50 cm.

W związku z tym, że również w nowej dyrektywie europejskiej 2013/35/EU przyjęto maksymalną indukcję pola oddziałującego na pracownika jako miarę narażenia, do dalszych rozważań przyjęto, że miarą narażenia pracownika będzie wielkość odpowiadająca wynikowi pomiaru miernikiem z sondą o średnicy około – 10 cm, tj. B_{A1} .

Druga miara narażenia o najsilniejszej korelacji ze skutkami narażenia B_{P1} jest parametrem o znacznie mniejszej wartości praktycznej z powodu braku aparatury pomiarowej o punktowych antenach pomiarowych do oceny narażenia na pola zmienne w czasie. Sondy takie, z czujnikami hallotronowymi, są dostępne do pomiarów pól magnetostaticznych. Przy pomiarach środowiskowych pól zmiennych występują liczne problemy techniczne, związane m.in. z oddziaływaniem pola na monitor przyrządów pomiarowych. W związku z tym, możliwości praktycznego stosowania tej miary narażenia są obecnie ograniczone.

Na podstawie wyników wykonanych symulacji numerycznych można również wyznaczyć istotną dla praktycznego stosowania zależność współczynnika K od wymiarów poszczególnych części ciała. Wyniki omawianych badań wskazują, że należy przyjąć różnej wielkości współczynnik $K = E_{in}/B_{A1}$ przy ocenie narażenia poszczególnych części ciała:

- dłoni – $K = 5,9 \div 6,9$ (V/m)/T
- głowy – $K = 12,6 \div 13,4$ (V/m)/T
- tułowia – $K = 25,2 \div 26,9$ (V/m)/T.

Podobnie jak w zaleceniach ICNIRP i przy realizacji wymagań dyrektywy 2013/35/EU, konieczne jest uwzględnienie niepewności danych pochodzących z modelowania numerycznego i wprowadzenia współczynnika bezpieczeństwa obniżającego wartości graniczne oszacowane na podstawie powyższych wartości współczynnika K . Proponuje się przyjęcie współczynnika bezpieczeństwa o wartości większej niż przyjęto w zaleceniach ICNIRP, o wartości 10. Uwzględniono w nim mniejszą rozdzielczość analizowanych obliczeń niż wykorzystane przez ICNIRP, a także znaczną niejednorodność przestrzenną pól występujących na rzeczywistych stanowiskach pracy i związaną z tym wrażliwość wyników oceny narażenia na lokalizację punktów pomiarowych.

Przy zaproponowanym współczynniku bezpieczeństwa o wartości 10 występuje znaczna zgodność wyników oszacowania na podstawie prezentowanej analizy wartości RL dla tułowia ($B_T = 0,8$ V/m/250 (V/m)/T = 3,2 mT) i wartości RL dla peryferyjnego układu nerwowego wg ICNIRP ($B_{PNS} = 0,8$ V/m/180 (V/m)/T = 4,4 mT).

Wprawdzie wartości zależności $RL-E$ i $RL-B$ podano w zaleceniach ICNIRP'2010 jako wartości skuteczne, ale cytowane wyniki badań, na których podstawie sformułowano zalecenia, wskazują, że do oceny zagrożeń wynikających ze skutków elektrodynamicznego oddziaływania pola niesinusoidalnego mają zastosowanie wartości szczytowe w dziedzinie czasu, oceniane

przy niesinusoidalnej zmienności pola w czasie metodą sumowania składowych harmonicznym takiego przebiegu (ICNIRP 2010). Podobne uzasadnienie ma wykorzystywana w polskich przepisach wartość równoważna (rozporządzenie 2002; PN-T-06580:2002).

Wyniki zaprezentowanej analizy możliwości technicznych praktycznej implementacji takich

zasad oceny narażenia pracowników na pola magnetyczne, które umożliwiają ocenę zgodności warunków narażenia z wymaganiami ICNIRP 2010, prowadzą do zaprezentowanych w Załączniku wymagań dotyczących zasad oceny omawianych zagrożeń w badaniach terenowych na stanowisku pracy.

PODSUMOWANIE

Pomimo że w ostatnim czasie opublikowano nowe dane dotyczące oddziaływania pola elektromagnetycznego na ludzi i są dostępne lepsze modele ciała człowieka, dające większe możliwości analizowania zagrożeń, nie wypracowano jednak wciąż pełnego konsensusu międzynarodowego w kwestii zasad oceny narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne małej częstotliwości. W dalszym ciągu w strukturze minimalnych wymagań ograniczających narażenie nie została zaimplementowana ochrona przed zagrożeniem zdrowia wskutek narażenia przewlekłego. Na tle uregulowań międzynarodowych godnym podkreślenia jest jednoznaczne uwzględnienie w przepisach krajowych koncepcji ograniczenia zarówno czasu, jak i poziomu narażenia pracowników w polach stref ochronnych, a szczególnie zakazu przebywania w nich pracowników młodocianych i kobiet w ciąży. Zapewnia to między innymi dodatkową ochronę przed niepożądanymi skutkami narażenia wieloletniego, zgodnie z filozofią zaleceń Światowej Organizacji Zdrowia, aby podejmować działania ograniczające narażenie niekonieczne (WHO 2007). Do zasad takich dyrektywa 2013/35/UE nawiązuje jedynie ogólnie, wskazując na konieczność indywidualnej oceny ryzyka dla pracowników szczególnie zagrożonych i podkreślając, że zarówno ograniczanie poziomu narażenia, jak i jego czasu trwania są metodami ograniczania zagrożeń.

Przeprowadzono analizę zasad oceny narażenia zawodowego na zmienne pola magnetyczne małej częstotliwości o zróżnicowanym stopniu niejednorodności rozkładu przestrzennego, z uwzględnieniem natury oddziaływania tego pola na organizm człowieka i zachodzące w nim procesy biofizyczne. Uwzględniono narażenie na pole jednorodne, odpowiadające modelowi

referencyjnemu zaleceń ICNIRP (ICNIRP 2010) oraz narażenia na pola niejednorodne, odpowiadające warunkom częściej spotykanym na stanowiskach pracy. Przeanalizowano warunki narażenia na pole magnetyczne i jego skutki elektrodynamiczne dotyczące głowy, tułowia i dłoni, reprezentowane różnymi parametrami B_i możliwymi do zmierzenia lub jedynie obliczenia oraz wartościami natężenia pola elektrycznego indukowanego w poszczególnych segmentach ciała. Wyniki symulacji numerycznych wskazują, że w przypadku oceny pól niejednorodnych, należy liczyć się ze stosunkowo dużą niepewnością oceny narażenia, wynikającą z silnej zależności współczynnika K , reprezentującego dla różnych warunków narażenia zależność indukowanego pola elektrycznego od miar pola magnetycznego E_{in}/B_i , od warunków narażenia i jego miar wykorzystanych do oceny zagrożeń elektromagnetycznych na stanowisku pracy. Wymaga to szczególnej uwagi przy definiowaniu dopuszczalnych poziomów pól magnetycznych i zasad oceny narażenia w środowisku pracy.

Celem przeciwdziałania skutkom niepożądanego oddziaływania pól elektromagnetycznych postanowieniami dyrektywy 2013/35/EU ustanowiono, tak zwane: minimalne wymagania ochrony pracowników, które w przypadku pól małych i średnich częstotliwości dotyczą ochrony przed niepożądanymi skutkami oddziaływania elektrodynamicznego. W razie rozbieżności polegających na dopuszczeniu dotychczas obowiązującymi w Polsce wymaganiami prawa pracy narażeń przekraczających poziom zalecony przez wymagania zawarte w dyrektywie, w procesie jej transpozycji konieczne byłoby wprowadzenie modyfikacji harmonizujących polskie przepisy z wymaganiami europejskimi.

Natomiast w związku z tym, że dyrektywa stanowi jedynie minimalne wymagania ochrony pracowników, państwa członkowskie UE mają prawo, a nawet obowiązek zachowania przyjętych wcześniej bardziej rygorystycznych wymagań.

Nowa dyrektywa UE, ogłoszona w 2013 r. nawiązuje do nowych zaleceń ICNIRP (ICNIRP 2010), dotyczących narażeń na pola małych i średnich częstotliwości. Ze względu na ustanowienie nowej dyrektywy europejskiej w omawianym obszarze konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy potrzeby ewentualnej weryfikacji wartości granicznych ekspozycji zabronionej dla pola magnetycznego. W procesie tym konieczne będzie zarówno odwołanie się do wyników analizy porównawczej rezultatów oceny narażenia na stanowisku pracy, zgodnie z aktualnymi przepisami prawa pracy w Polsce i zgodnie z wymaganiami nowej dyrektywy, jak i do technicznych możliwości alternatywnych metod oceny narażeń w środowisku pracy oraz wymagań dotyczących warunków stosowania administracyjnych lub technicznych środków

profilaktycznych na stanowiskach pracy, gdzie występują silne narażenia na pola magnetyczne.

W procesie takiej analizy będą użyteczne wyniki analizy wymagań zaleceń ICNIRP, zaprezentowane w niniejszym opracowaniu, jak również zaprezentowane zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy, związanych z oddziaływaniem elektrodynamicznym pól magnetycznych małej częstotliwości na organizm pracownika, wypracowanych na podstawie analizy zasad oceny narażenia opublikowanymi przez ICNIRP i charakterystyki warunków narażenia, jakie występują na rzeczywistych stanowiskach pracy oraz uwarunkowań technicznych takich badań w środowisku pracy. Zaproponowane zasady nie stanowią projektu rozwiązań formalno-prawnych w tym zakresie, a jedynie rezultaty rozważań naukowych, jednakże są wkładem do dyskusji merytorycznej dotyczącej potrzeby i ewentualnego zakresu wspomnianych zmian prawa pracy w Polsce związanych z procesem formalnej transpozycji wymagań nowej dyrektywy europejskiej.

PIŚMIENNICTWO

- Ahlbom C., Cardis E., Green A., Linet M., Savitz D., Swerdlow A., i in. (2001) Review of the epidemiologic literature on EMF and health. *Environ Health Perspect.*, 109 (suppl. 6), 911–933.
- Barchanski A. (2005) Impact of the displacement current on low-frequency electromagnetic fields computed using high-resolution anatomy models. *Phys. Med. Bio.* 50, 243–249.
- Bortkiewicz A. (2008) Skutki zdrowotne działania pól elektromagnetycznych – przegląd badań. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy*, 4(58), 67–87.
- CST, Computer Simulation Technology. CST EM Studio. Workflow & Solver Overview (2010) [materiały firmowe].
- Dimbylow P.J. (2005) Development of the female voxel phantom, NAOMI and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields. *Phys. Med. Biol.* 50, 1047–1070.
- Gedliczka A. (2001) Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej. Warszawa, CIOP.
- Grabarczyk Z., Kurczewska A. (2008) Zagrożenia elektrostyczne w strefach zagrożonych wybuchem. Warszawa, CIOP-PIB.
- Gryz K., Karpowicz J. (2008) Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy*, 4(58), 137–151.
- IARC, International Agency for Research on Cancer (2002) World Health Organization. Non-Ionizing radiation. Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC Monographs 80, IARC Press: Lyon, 429.
- ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (1998) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74 (4), 494–522.
- ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2003) Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal wave below 100 kHz with ICNIRP Guidelines. *Health Physics*, vol. 84, 3 (March), 383–387.
- ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (2010) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics* 99(6) 6, 818–836.
- Karpowicz J., Zradziński P., Gryz K. (2012) Miary narażenia zawodowego na zmienne pole magnetyczne małej częstotliwości o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym uwzględniające naturę elektrodynamicznego oddziaływania pola na organizm człowieka i zalecenia międzynarodowe. *Medycyna Pracy* 63(3), 317–328

- Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P. (2008) Zasady wykorzystania symulacji komputerowych do oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE dotyczącej bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 4(58), 103–135.
- Korniewicz H., Karpowicz J., Gryz K., Aniołczyk H., Zmysłony M., Kubacki R., Ciołek Z. (2001) Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz. Dokumentacja proponowanych znowelizowanych wartości dopuszczalnych ekspozycji zawodowej. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2(28), 97–238.
- Reilly P.J. (1998) *Applied bioelectricity. From electrical stimulation to electropathology*. New York, Springer-Verlag.
- SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (2009) Health effects of exposure to EMF. Opinion adopted at the 28th plenary on 19 January [Brussels http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_022.pdf].
- Wilen J., de Vocht F. (2011) Health complaints among nurses working near MRI scanners – a descriptive pilot study. *Eur. J. Radiol.* 80(2), 510–513.
- World Health Organization (2007) Environmental Health Criteria 238, Extremely Low Frequency Fields (ELF). WHO, Geneva [http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html].
- de Vocht F., Stevens T., van Wendel-de-Joode B., Engels H., Kromhout H. (2006) Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations. *J. Magn. Reson. Imaging.* 23(3), 291–297.
- Zeńczak M. (1998) Analiza technicznych problemów związanych z dozymetrią pól elektromagnetycznych o częstotliwości przemysłowej. *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej* nr 26, 543. Szczecin, Instytut Elektrotechniki.
- Zmysłony M. (2008) Efekty biologiczne i ryzyko zdrowotne sieciowych pól elektromagnetycznych (z wyłączeniem nowotworów). *Medycyna Pracy* 59(5), 421–428.
- Zradziński P. Applicability of human body numerical phantoms in assessment of electromagnetic hazards at the workplace, *IJOMEH* [w druku].
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26.06.2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy Rady 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE. Dz. Urz. Unii Europejskiej L 179/1, 2013.
- PN-T-06580: 2002 Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Arkusze 01. Terminologia. Arkusze 03. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002.
- PN-EN 50505:2008 Norma podstawowa dla oceny ekspozycji człowieka na pola elektromagnetyczne pochodzące od sprzętu do zgrzewania rezystancyjnego i procesów pokrewnych. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2008.
- PN-EN 50413:2009. Metody pomiaru i obliczeń ekspozycji ludzi w polach elektrycznych, magnetycznych i elektromagnetycznych (0 Hz – 300 GHz) – norma podstawowa. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2009.
- Rozporządzenie ministra pracy i polityki społecznej z dnia 29.11.2002 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 2002, nr 217, poz. 1833.