

*dr inż. JOLANTA KARPOWICZ
dr inż. KRZYSZTOF GRYZ
mgr inż. PATRYK ZRADZIŃSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
Czerwiakowska 16
00-701 Warszawa*

Zasady wykorzystania symulacji komputerowych do oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE odnośnie do bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, ekspozycja zawodowa, ocena ryzyka, symulacje numeryczne, miary wewnętrzne.

Key words: electromagnetic field, occupational exposure, risk assessment, numerical simulations, internal measures.

Pole elektromagnetyczne jest czynnikiem, który podlega zgodnie z wymaganiami przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy, obowiązkowej ocenie w środowisku pracy, ze względu na zagrożenie jakie może powodować dla pracowników. Poziom narażenia pracowników jest oceniany klasycznymi metodami pomiarowymi (tj. przez pomiary różnych parametrów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego) lub z wykorzystaniem wyników symulacji komputerowych. Rola tych różnych metod oceny warunków ekspozycji pracowników jest odmienna.

Do przeprowadzenia symulacji komputerowych wymagane jest specjalistyczne oprogramowanie i komputer o dużej mocy obliczeniowej oraz ich użytkownik dobrze zapoznany z zagadnieniami zagrożeń elektromagnetycznych i metodami dozymetrii komputerowej, a także numeryczne modele ciała pracownika, źródła pola elektromagnetycznego i materialnych obiektów znajdujących się na stanowisku pracy. W związku z tym są to badania wymagające bardzo dobrego warsztatu naukowego, a ich duża pracochłonność i wysoki koszt powodują, że ich wykonanie jest szczególnie uzasadnione przy badaniach naukowych, analizie poziomu narażenia jaki, może być dopuszczony przez wymagania przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy oraz przy ocenie poziomu emisji pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez urządzenia produkowane seryjnie (w ramach badań produktu wykonywanych przez producentów). Zastosowanie symulacji komputerowych do oceny warunków ekspozycji na rzeczywistych stanowiskach pracy może być jedynie wykonane w odniesieniu do wybranych modeli, odpowiadających typowemu sposobowi wykonywania określonej pracy lub modelowi odpowiadającemu najgorszemu przypadkowi narażenia przy takiej pracy.

Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego można wykonać na każdym stanowisku pracy. Umożliwiają więc wykonanie indywidualnej oceny poziomu narażenia każdego pracownika. Mogą też być one wykorzystane przy opracowywaniu danych do tworzenia modeli numerycznych stanowisk pracy, weryfikacji wybranych wyników obliczeń oraz w laboratoryjnych badaniach emisyjności poszczególnych urządzeń.

W niniejszej publikacji zaprezentowano zasady wykorzystania wyników symulacji komputerowych do oceny poziomu narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne, ze szczególnym uwzględnieniem oceny spełnienia wymagań zawartych w dyrektywie 2004/40/WE i polskich przepisach bezpieczeństwa i higieny pracy.

Opracowanie jest przeznaczone dla specjalistów dokonujących oceny ryzyka zawodowego pracowników obsługujących urządzenia wytwarzające pola elektromagnetyczne oraz prowadzących nadzór warunków pracy w przedsiębiorstwach. Zaprezentowane zasady wykorzystania wyników symulacji komputerowych na potrzeby oceny poziomu narażenia pracowników oraz przegląd badań naukowych odnoszących się do oceny zagrożeń elektromagnetycznych mogą być również pomocne dla zespołów badawczych podejmujących się wykonania symulacji numerycznych. Metodyka wykorzystania metod numerycznych do rozwiązywania zadań polowych, omówiona w licznych specjalistycznych opracowaniach naukowych oraz w poradnikach wykorzystania poszczególnych pakietów oprogramowania, nie jest przedmiotem niniejszego opracowania.

WPROWADZENIE

Krajowe przepisy bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP) wymagają od pracodawców okresowego wykonania oceny ryzyka zawodowego odnośnie do występujących w środowisku pracy czynników szkodliwych i uciążliwych (Bezpieczeństwo... 1997; Rozporządzenie... 2002; Rozporządzenie... 2005). Pola elektromagnetyczne są jednym z takich czynników. Do źródeł pól elektromagnetycznych występujących w środowisku pracy należą m.in. (Gryz, Karpowicz 2000; 2007; Serwis ...):

- elektroenergetyczne urządzenia przesyłowo-rozdzielcze
- diagnostyczny i terapeutyczny sprzęt medyczny
- przemysłowe urządzenia elektrotermiczne
- urządzenia telekomunikacji bezprzewodowej
- radiowe i telewizyjne stacje nadawcze oraz systemy radarowe.

Poziom narażenia pracowników jest oceniany klasycznymi metodami pomiarowymi (tj. przez pomiary różnych parametrów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego) lub z wykorzystaniem wyników symulacji komputerowych. Rola tych metod oceny warunków ekspozycji pracowników jest odmienna.

Do przeprowadzenia symulacji komputerowych wymagane jest specjalistyczne oprogramowanie i komputer o dużej mocy obliczeniowej oraz ich użytkownik dobrze zapoznany z zagadnieniami zagrożeń elektromagnetycznych i metodami dozymetrii komputerowej, a także numeryczne modele ciała pracownika, źródła pola elektromagnetycznego i materialnych obiektów znajdujących się na stanowisku pracy. W związku z tym, są to badania wymagające bardzo dobrego warsztatu naukowego, a ich duża pracochłonność i duży koszt powodują, że ich wykonanie jest szczególnie uzasadnione przy badaniach naukowych i analizie poziomu narażenia, jaki może być dopuszczony przez wymagania określone w przepisach BHP oraz podczas oceniania poziomu emisji pól elektromagnetycznych wytwarzanych przez urządzenia produkowane seryjnie (w ramach badań produktu wykonywanych przez producentów). Ocena warunków ekspozycji na rzeczywistych stanowiskach pracy z wykorzystaniem symulacji komputerowych może być wykonana jedynie w odniesieniu do wybranych modeli, odpowiadających typowemu sposobowi wykonywania określonej pracy lub modelowi odpowiadającemu najgorszemu przypadkowi narażenia podczas tej pracy.

Pomiary natężenia pola elektrycznego i magnetycznego można wykonać na każdym stanowisku pracy. Ich wyniki umożliwiają więc wykonanie indywidualnej oceny poziomu narażenia każdego pracownika, a także mogą być wykorzystane przy opraco-

wywaniu danych do budowy modeli numerycznych stanowisk pracy, weryfikacji wybranych wyników obliczeń oraz w laboratoryjnych badaniach emisyjności poszczególnych urządzeń.

Wartości dopuszczalne natężeń pól elektrycznych (E) i magnetycznych (H) oddziałujących w różnych warunkach na pracowników (tj. NDN pól elektromagnetycznych (Rozporządzenie... 2002)) należą do kluczowych elementów systemu, definiującego zasady wykonywania oceny ryzyka zawodowego, odnośnie do pracowników ekspozowanych na pola elektromagnetyczne. Trwają prace nad transpozycją wymagań dyrektywy 2004/40/WE do polskich przepisów BHP. Jednym z kluczowych elementów tego procesu jest wprowadzenie zmian umożliwiających wykorzystanie tzw. miar wewnętrznych ekspozycji do oceny poziomu narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne. Miary te są najczęściej oceniane na podstawie wyników obliczeń numerycznych (symulacji komputerowych), nazywanych również dozymetrią komputerową. W wielu przypadkach obliczenia numeryczne mogą być również użyte do oceny natężeń pól elektrycznych i magnetycznych występujących w otoczeniu źródła pola.

Skutki ekspozycji na pola elektromagnetyczne, jakie występują wewnątrz organizmu zależą od częstotliwości i natężenia pola oddziałującego na człowieka oraz warunków, w jakich odbywa się ekspozycja. Tak zwane miary wewnętrzne ekspozycji, są parametrami, których ocena umożliwia uwzględnienie przy ocenie ryzyka zawodowego tych złożonych parametrów opisujących warunki ekspozycji.

W przypadku pól wielkiej częstotliwości dominują skutki termiczne ekspozycji, a przy małych częstotliwościach decydującą rolę odgrywają skutki stymulacji tkanki pobudliwej (nerwowej i mięśniowej) (Durney 1980; ICNIRP 1998; Polk, Postow 1996; Reilly 1998; WHO 1993). Badania naukowe nie wykluczyły dotychczas możliwości występowania różnych, niespecyficznych skutków zdrowotnych ekspozycji wieloletniej, jak np. zaburzenia funkcjonowania układów: nerwowego, sercowo-naczyniowego i odpornościowego oraz promocja procesu nowotworowego.

Od 2004 Polska jest krajem członkowskim Unii Europejskiej i z tego powodu obowiązujące w kraju przepisy BHP są sukcesywnie harmonizowane z wymaganiami dyrektyw europejskich. Transpozycja wymagań dyrektywy 2004/40/WE do prawa w krajach członkowskich jest wymagana do kwietnia 2012 roku (Dyrektywa 2008/46/WE). W Polsce został już opracowany i przyjęty przez Międzyresortową Komisję ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych w Środowisku Pracy projekt harmonizacji NDN pól elektromagnetycznych z wymaganiami dyrektywy (Karpowicz i in. 2008). Jednym z elementów tej nowelizacji jest ustanowienie wartości dopuszczalnych miar wewnętrznych ekspozycji, które są niezbędne jako kryterium oceny wyników symulacji komputerowych, przeprowadzonych do oceny poziomu narażenia pracowników (Czynniki... 2007; Karpowicz i in. 2008, Skowroń 2007).

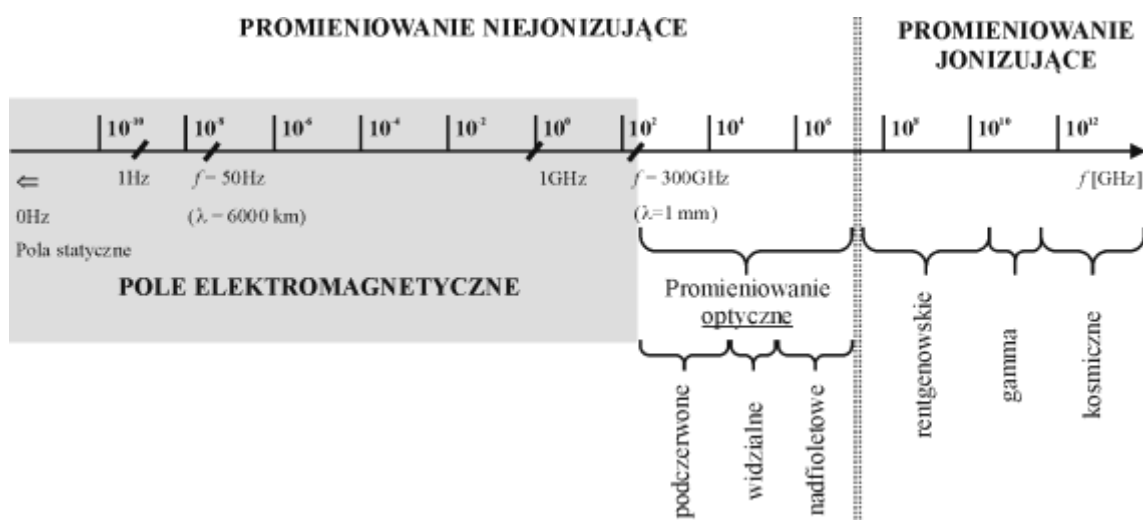
Niniejsze opracowanie prezentuje zasady oceny ryzyka zawodowego, wynikającego z ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne, określone krajowymi przepisami BHP i zawartymi w dyrektywie 2004/40/WE oraz opracowane na podstawie wyników badań naukowych zasady wykorzystania symulacji komputerowych do jej przeprowadzenia. Wprowadzenie takiego postępowania w przedsiębiorstwach będzie ostatnim etapem transpozycji wymagań dyrektywy do ich praktycznego stosowania.

POLA ELEKTROMAGNETYCZNE W ŚRODOWISKU PRACY

Zmienne w czasie pole elektromagnetyczne może charakteryzować dowolna częstotliwość jego zmian (f). Odnośnie do pól o częstotliwościach większych od kilku megaherców (MHz) jest używany również termin promieniowanie elektromagnetyczne. Widmo elektromagnetyczne obejmuje umownie wydzielone zakresy promieniowania o różnych właściwościach biofizycznych: pole elektromagnetyczne i promieniowanie optyczne, które są promieniowaniem niejonizującym oraz promieniowanie rentgenowskie, gamma i kosmiczne, które są promieniowaniem jonizującym (rys. 1.). Obecnie, na potrzeby bezpieczeństwa i higieny pracy terminem pole elektromagnetyczne określa się zwykle pola statyczne (niezmienne w czasie) i zmienne w czasie, o częstotliwościach mniejszych niż 300 GHz. Są to pola występujące przy źródłach promieniowania elektromagnetycznego, emitujących fale o długości większej od 1 mm.

Do prezentacji właściwości pola elektromagnetycznego są najczęściej wykorzystywane jego dwie składowe: pole elektryczne i pole magnetyczne. Pole magnetyczne występuje wokół ładunków poruszających się (tzn. tworzących prąd elektryczny) lub magnesów trwałych. Pole elektryczne występuje zarówno przy ładunkach poruszających się, jak i nieruchomych. Poziom ekspozycji charakteryzuje się zwykle przez podanie wartości natężenia pola elektrycznego (E) i natężenia pola magnetycznego (H), alternatywnie indukcji magnetycznej (B).

Energia pól elektrycznych oddziałuje zarówno na ładunki ruchome, jak i nieruchome, a pól magnetycznych – jedynie na ładunki ruchome. Pole elektrostatyczne występuje wokół ładunków nieruchomych, a pole magnetostatyczne przy przewodach z prądem stałym lub magnesach trwałych.



Rys. 1. Widmo częstotliwości pól i promieniowania elektromagnetycznego

Mechanizm oddziaływania pola elektromagnetycznego na organizm człowieka

Pole elektromagnetyczne może wpływać na ludzi bezpośrednio, oddziałując na organizm ekspozowanego człowieka oraz pośrednio na skutek oddziaływania na organizm energii pól zaabsorbowanej przez ekspozowane obiekty (Bezpieczeństwo... 1997; Karpowicz i in. 2008; ICNIRP 1998; Korniewicz i in. 2001; Polk, Postow 1996; Reilly 1998; WHO 1993; 2006; 2007). Długotrwała ekspozycja zawodowa na pola o zwiększonych natężeniach może wpływać na zdrowie i zdolność do pracy, badania naukowe w tym zakresie są kontynuowane (Raport... 2005; SCENIHR 2007; Bortkiewicz 2008, Wiaderkiewicz 2008).

Pośrednie oddziaływanie przejawia się głównie jako prądy kontaktowe przepływające przez ciało człowieka, przy kontakcie galwanicznym z obiektem przewodzącym (najczęściej metalowym) o innym potencjale elektrycznym niż jego ciało. Zjawisko to ma znaczenie przy częstotliwościach pól mniejszych od 100 MHz; przy częstotliwościach mniejszych od 100 kHz może wywoływać stymulację tkanek elektrycznie pobudliwych (mięśniowej i nerwowej) i spowodować odczucie bólu. Natężenie i rozkład przestrzenny prądów kontaktowych przepływających w ciele pracownika zależy od częstotliwości pola elektromagnetycznego, rozmiaru ekspozowanego obiektu przewodzącego, wymiarów ciała człowieka i wielkości powierzchni jaką się stykają.

Pola elektromagnetyczne najczęściej nie są rejestrowane zmysłami człowieka. W pewnych sytuacjach możliwe jest jednak bezpośrednie odczuwanie pól elektromagnetycznych, np. w silnych polach magnetycznych lub elektrycznych małych częstotliwości (kilkanaście do kilkudziesięciu herców, Hz) mogą wystąpić wrażenia wzrokowe, tzw. magneto- lub elektrofosfery, a w impulsowych polach mikrofalowych wrażenia słuchowe, tzw. zjawisko Frey'a (Korniewicz 1996).

Bezpośrednie skutki oddziaływania pola elektromagnetycznego, jakie mogą wystąpić w czasie trwania ekspozycji to stymulacja tkanki pobudliwej przez przepływające w niej prądy indukowane bezpośrednio w ciele (dominująca jako mechanizm oddziaływania przy częstotliwościach mniejszych od kilkuset kiloherców, kHz) i ogrzewanie tkanek przez pochłoniętą w nich energię pól (tzw. skutki termiczne) - największe znaczenie tego mechanizmu oddziaływania występuje dla częstotliwości powyżej 1 MHz).

Do scharakteryzowania dynamiki pochłaniania energii pola elektromagnetycznego w organizmie, powodującego skutki termiczne, wykorzystywany jest tzw. współczynnik SAR (ang. *specific absorption rate*). W opisie matematycznym współczynnik SAR jest wyrażany jako pochodna po czasie energii (dW) absorbowanej (rozpraszanej) w elemencie o masie (dm) lub w elemencie o objętości (dV) i gęstości masy (ρ) (Gryz, Karpowicz 2000; IEEE 2002a; 2006; Reilly 1998):

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \quad [1]$$

i jest wyrażany w (W/kg).

Współczynnik SAR może być wyznaczany również na podstawie gęstości prądu przepływającego (indukowanego) w tkankach, J , natężenia pola elektrycznego zaindukowanego wewnątrz organizmu, E , lub przyrostu temperatury, T :

$$SAR = \frac{J^2}{\sigma\rho} \quad [2]$$

$$SAR = \frac{\sigma E_i^2}{\rho} \quad [3]$$

$$SAR = c_i \left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad [4]$$

gdzie:

- J – wartość skuteczna gęstości prądu przepływającego w rozpatrywanej tkance organizmu, w A/m^2
- E_i – wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego zaindukowanego w rozpatrywanej tkance organizmu, w V/m
- σ – konduktywność właściwa rozpatrywanej tkanki, w S/m
- ρ – gęstość właściwa rozpatrywanej tkanki, w kg/m^3
- c_i – ciepło właściwe rozpatrywanej tkanki, w $J/(kgK)$
- $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0}$ – wartość pochodnej temperatury względem czasu, występująca w rozpatrywanej tkance w chwili $t = 0$, w K/s .

Wartość współczynnika SAR , wyrażona zależnościami na gęstość prądu lub natężenia pola elektrycznego jest uzależniona od częstotliwości pola elektromagnetycznego, w którym znajduje się rozpatrywany obiekt (pracownik), ponieważ natężenie zaindukowanego w obiekcie pola elektromagnetycznego oraz gęstość przepływającego w nim prądu są proporcjonalne do częstotliwości zewnętrznego pola oraz zarówno przewodność tkanek, jak i sprzężenia między ciałem człowieka i źródłem pola, zależne od przenikalności elektrycznej tkanek, zmieniają się również wraz z częstotliwością.

Gęstość prądu (J), ocenianego ze względu na możliwość pobudzenia tkanek, zdefiniowano jako prąd przepływający przez jednostkowe pole przekroju, prostopadłe do kierunku przepływu prądu w przewodniku objętościowym, jakim jest ciało pracownika. Wielkość ta jest wyrażana w amperach na metr kwadratowy (A/m^2). Z uwagi na niejednorodność elektryczną ciała, gęstość prądu należy obliczać jako uśrednioną w przekroju poprzecznym o powierzchni 1 cm^2 , prostopadłym do kierunku przepływu prądu. Dla impulsowych pól magnetycznych maksymalną gęstość prądu związanego z impulsami można obliczyć na podstawie czasów narastania/opadania impulsu i maksymalnej prędkości zmian indukcji magnetycznej.

Do scharakteryzowania poziomu zagrożenia wynikającego z ekspozycji na pola elektromagnetyczne są stosowane parametry pola występującego w środowisku pracy pod nieobecność ludzi (tzw. pola pierwotnego), nazywane: miarami zewnętrznymi ekspozycji oraz parametry odnoszące się do wielkości skutków ekspozycji występujących w ciele eksponowanych ludzi, tj. gęstość prądów indukowanych (J) i skutki termiczne (SAR), nazywane: miarami wewnętrznymi ekspozycji (Czynniki... 2007; Karpowicz i in. 2008; Dyrektywa 2004/40/WE; Karpowicz, Gryz 2004).

Oprócz natężenia pola i jego częstotliwości, dla oceny poziomu zagrożeń elektromagnetycznych istotne są również:

- polaryzacja pola występującego na stanowisku pracy w stosunku do ciała człowieka

- rozkład przestrzenny natężenia pola, w którym znajduje się ciało pracownika
- stosunek wielkości natężenia pola elektrycznego do natężenia pola magnetycznego (impedancja pola)
- czas ekspozycji
- warunki, w jakich odbywa się ekspozycja, takie jak np: rodzaj i rozmieszczenia elementów izolacyjnych na stanowisku pracy, wielkość i lokalizacja konstrukcji przewodzących na stanowisku pracy, rodzaj podłoża, rodzaj ubioru pracownika.

Najczęściej ekspozycja zawodowa na pola o wysokim poziomie odbywa się bezpośrednio przy źródłach tych pól, w miejscach, gdzie rozkład pola jest niejednorodny w przestrzeni, a dodatkowo poziom ekspozycji zmienia się z powodu niestabilnej pracy źródła pola lub aktywności pracownika (poruszania się w otoczeniu urządzenia). Jest to pole bliskie, o impedancji E/H znacznie różniącej się od impedancji wolnej przestrzeni, wynoszącej 377 omów (Ω). Dotykane różnych części urządzenia (izolowanych lub metalowych) może powodować również zagrożenie prądami kontaktowymi i indukowanymi.

METODY I KRYTERIA OCENY PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Metody oceny pola elektromagnetycznego

Badania pola elektromagnetycznego w środowisku pracy są prowadzone w celu zidentyfikowania źródeł pól stanowiących potencjalne zagrożenie dla pracowników. Badania prowadzi się wykonując pomiary lub obliczenia parametrów pola charakteryzujących jego oddziaływanie na pracowników i obiekty techniczne znajdujące się w ocenianym środowisku pracy.

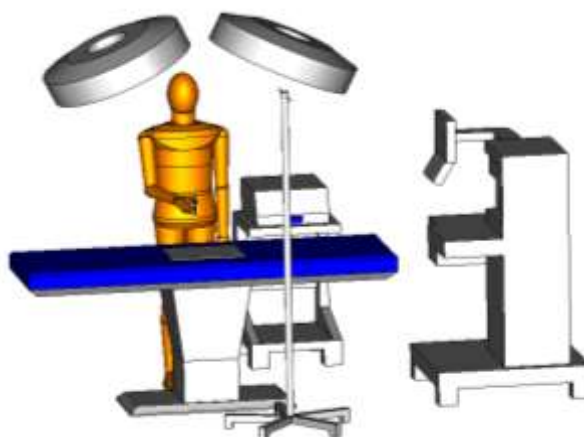
W celu uzyskania jednoznacznych i powtarzalnych wyników oceny, poziom narażenia organizmu ludzkiego i środowiska na pole elektromagnetyczne są oceniane na podstawie wielkości charakteryzujących pole niezakłócone obecnością człowieka. Pomiary wykonuje się w miejscach przebywania pracowników, ale pod ich nieobecność, a także innych osób w obszarze pomiarowym w czasie wykonywania pomiarów. Mierniki składają się z wymiennych sond pomiarowych z czujnikiem pola magnetycznego lub elektrycznego i zasilanego bateryjnie monitora zawierającego: układy elektroniczne przetwarzania sygnału pomiarowego, zapamiętywania danych, wskaźnik itp. Pomiary pól elektromagnetycznych są pomiarami pośrednimi, tzn. czujniki pomiarowe przetwarzają oddziaływanie pola na natężenie prądu / napięcie indukowane przez pole w strukturze czujnika. Jako czujniki pola elektrycznego lub magnetycznego różnych zakresów częstotliwości zwykle są wykorzystywane cewki wielozwojowe, dipole elektryczne lub czujniki Halla. Wymiary geometryczne sond pomiarowych dostosowuje się z reguły do charakterystyki przestrzennego rozkładu narażenia, np. średnica nie większa niż ok. 10 cm, tak aby ograniczyć błędy pomiarowe związane z uśrednianiem przestrzennym mierzonego pola przez sondę. Dostępne są również mierniki o charakterystyce częstotliwościowej czułości zharmonizowanej z wrażliwością organizmu człowieka. W takim przypadku są to więc pomiary quasi-fantomowe. Na stanowisku pracy możliwe jest również wykonanie pomiarów natężenia prądów indukowanych i kontaktowych prze-

plywających w ciele pracowników pod wpływem oddziaływania pola elektromagnetycznego na pracownika oraz obiekty znajdujące się w środowisku pracy. Na potrzeby rutynowych badań środowiska pracy jest zalecane stosowanie fantomów pomiarowych, tj. układów modelujących właściwości bioelektryczne ciała eksponowanego pracownika i jego sprzężenie z polem, występujące na stanowisku pracy (Gryz, Karpowicz 2008).

Obliczenia prowadzone na potrzeby oceny zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy dotyczą najczęściej miar wewnętrznych ekspozycji (gęstości prądu indukowanego J i współczynnika SAR w modelu ciała pracownika). Mogą być one prowadzone również w celu wyznaczenia rozkładu miar zewnętrznych ekspozycji w sytuacjach, kiedy niemożliwe jest wykonanie miarodajnych pomiarów (np. kiedy nie można zmierzyć pola pierwotnego w miejscu przebywania pracownika). Symulacje komputerowe prowadzi się przy wykorzystaniu następujących modeli numerycznych:

- odwzorowujących warunki ekspozycji w rzeczywistym środowisku pracy (geometrię rozpatrywanego stanowiska pracy, wyposażenie materialne i jego elektryczne właściwości materiałowe, parametry źródła pola i wytwarzanego przez nie pola oddziałującego na pracowników)
- ciała pracownika
- ubioru pracownika (np. izolacji wnoszonej przez obuwie)
- czynności zawodowych pracownika (np. determinujących pozycję ciała w czasie ekspozycji) (rys. 2).

W przypadku konieczności precyzyjnego wyznaczenia rozkładów przestrzennych miar wewnętrznych w ciele eksponowanego pracownika, model jego ciała (fantom numeryczny) powinien reprezentować szczegóły anatomiczne. Uprozczone modele jednorodne o prostych kształtach geometrycznych, takich jak: walec, elipsoida czy kula, są używane głównie przy obliczeniach parametrów całkowitych charakteryzujących miary wewnętrzne ekspozycji.



Rys. 2. Przykładowy model numeryczny stanowiska pracy i pracownika
– model chirurga wykonującego zabieg przy użyciu urządzenia elektrochirurgicznego

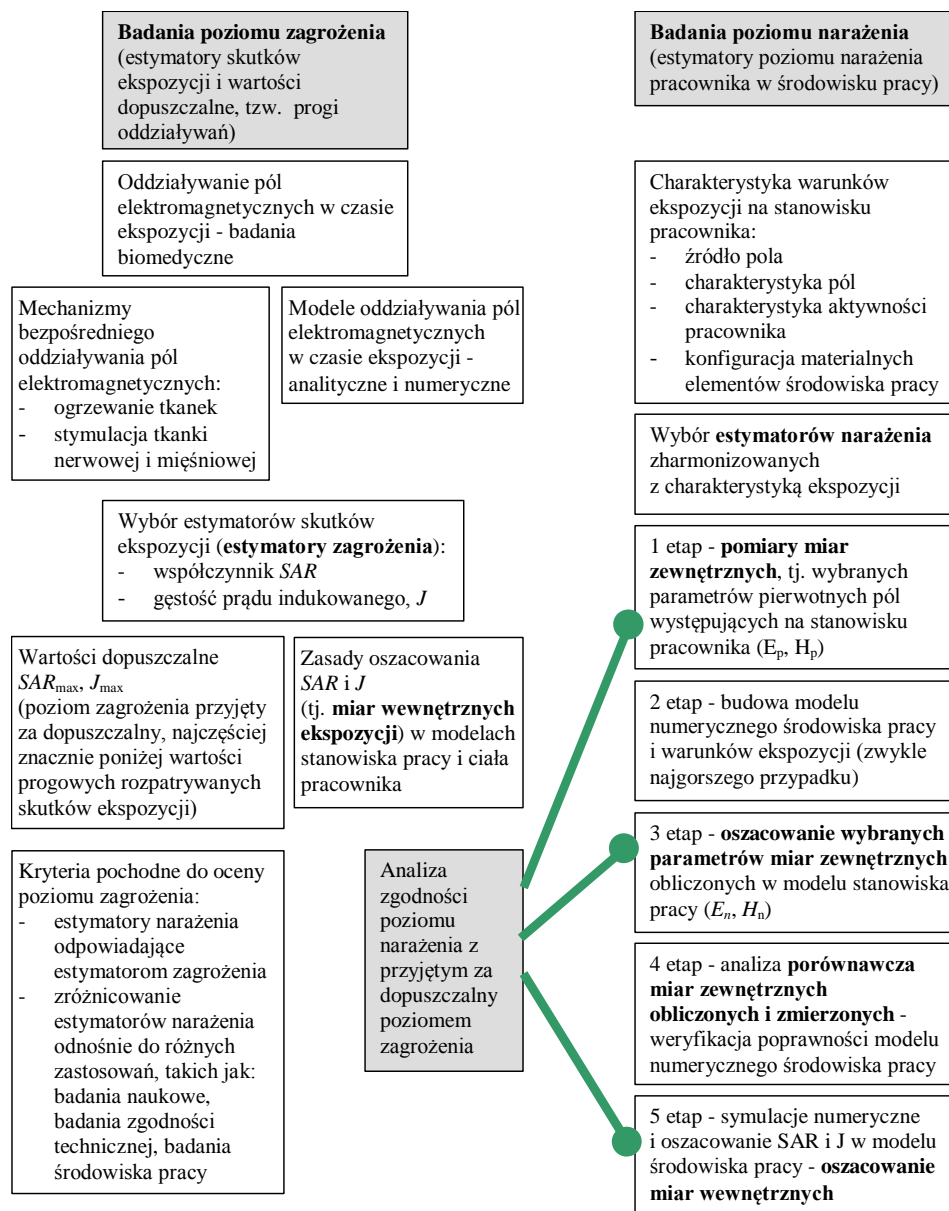
Narażenie pracowników należy oceniać w warunkach najbardziej krytycznych, dlatego pomiary lub obliczenia powinny być wykonywane w takich warunkach eksploatacyjnych źródła pola, w których w obszarze stanowiska pracownika występują maksy-

malne natężenia pól lub w czasie analizy rezultatów badań należy uwzględnić możliwość występowania większych ekspozycji niż zbadane.

W procedurze badania poziomu narażenia należy uwzględniać rzeczywistą charakterystykę warunków ekspozycji na pole elektromagnetyczne występujących na ocenianym stanowisku pracy aby umożliwić oszacowanie na tej podstawie wartości estymatorów narażenia, zharmonizowanych z estymatorami zagrożenia, ustalonymi dla ocenianej charakterystyki ekspozycji. Przykładowo, estymatorem zagrożenia nadmiernymi skutkami termicznymi ekspozycji na pole o częstotliwości większej od 100 kHz jest współczynnik szybkości pochłaniania właściwego energii, *SAR* - uśredniony w całym ciele lub lokalny w poszczególnych częściach ciała (przy ekspozycji na pole o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym). Natomiast estymatorem narażenia w takim przypadku jest wartość skuteczna natężenia pola, zmierzonego na stanowisku pracy (maksymalne lub uśrednione, w czasie lub przestrzeni stanowiska pracownika), pole obliczone w modelu numerycznym stanowiska pracy lub wartość współczynnika *SAR*, obliczonego w numerycznym fantomie ciała pracownika. W przypadku niesinusoidalnych pól elektromagnetycznych małych częstotliwości, estymatorem narażenia jest wartość maksymalna przebiegu, która może znacznie różnić się od wartości skutecznej. W takim przypadku z reguły nie stosuje się uśredniania poziomu ekspozycji w czasie.

➡ W związku z powyższym, przekroczenie dopuszczalnych wartości miar zewnętrznych nie w każdej sytuacji oznacza przekroczenie dopuszczalnych wartości miar wewnętrznych, ponieważ zostały one ustalone na podstawie badań modelowych odnoszących się do pola sinusoidalnie zmiennego, o jednorodnym rozkładzie przestrzennym na stanowisku pracownika.

Schemat na rysunku 3. prezentuje zależności między estymatorami zagrożenia i narażenia pracowników ekspozowanych na pola elektromagnetyczne, co jest istotne przy ustalaniu zasad wykorzystania różnych metod oceny warunków ekspozycji w środowisku pracy. Na schemacie zaprezentowano relacje między miarami zewnętrznymi i wewnętrznymi ekspozycji, opracowane na podstawie analizy wymagań formalnoprawnych dyrektywy oraz opracowań naukowych, przywołanych jako jej uzasadnienie. Na szczególną uwagę zasługuje konieczność stosowania w działaniach praktycznych różnie definiowanych parametrów zagrożenia i narażenia, zależnie od poziomu ocenianej ekspozycji (np. typowa ekspozycja ludności wymaga innych procedur oceny niż ekspozycja pracowników obsługujących źródła silnych pól elektromagnetycznych) oraz różnych zastosowań wyników oceny (np.: badania naukowe, badania zgodności technicznej, rutynowe badania środowiska pracy). Badania poziomu narażenia, opisane na schemacie w podstawowych etapach, mogą w praktyce wymagać bardziej rozbudowanych działań. Jednakże, w każdym przypadku postępowanie można przerwać na etapie, na którym wykazano zgodność poziomu narażenia z przyjętym za dopuszczalny poziomem zagrożenia.



Rys. 3. Zależności między dopuszczalnym poziomem zagrożenia (estymatorami zagrożenia) i poziomem narażenia wynikającym z ekspozycji na pola elektromagnetyczne (estymatory narażenia), determinujące zasady wykonywania oceny ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne przy wykorzystaniu miar wewnętrznych i zewnętrznych ekspozycji

Dyrektywa 2004/40/WE

Dyrektywa 2004/40/WE w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia powodowane czynnikami fizycznymi (pola elektromagnetyczne) została ustanowiona w 2004 r. jako 18. dyrektywa szczegółowa w rozumieniu artykułu 16(1) dyrektywy ramowej 89/391/EWG. W dyrektywie ustanowiono minimalne wymagania, a zatem państwa członkowskie mają możliwość utrzymania lub przyjmowania bardziej zaostrzonych wymagań dotyczących ochrony pracowników. Wykonanie dyrektywy nie powinno

spowodować regresji w stosunku do stanu, jaki był wcześniej w danym państwie członkowskim. Państwa członkowskie powinny transponować jej postanowienia do prawa krajowego do kwietnia 2012 r.

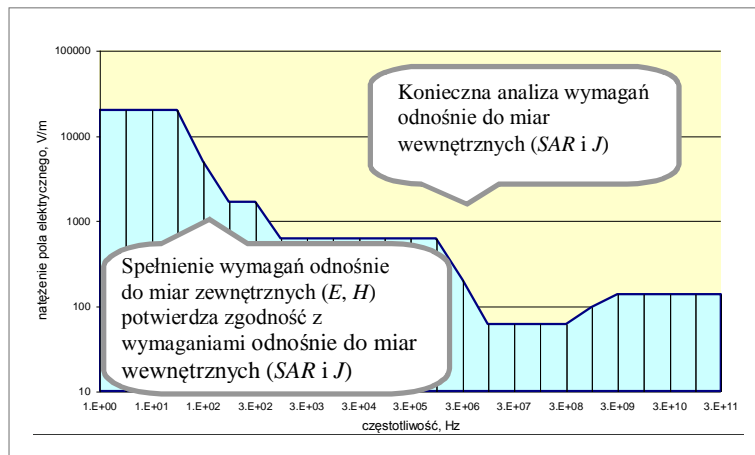
Wymagania dyrektywy 2004/40/WE zawierają nakaz odnoszący się do dokonania przez pracodawcę oceny zagrożeń i ryzyka zawodowego ekspozowanych pracowników oraz następujące parametry ustanowione w tym celu:

- miary wewnętrzne ekspozycji, których nie można zmierzyć na stanowisku pracy – gęstość prądu J i współczynnik SAR – ustalające maksymalny dopuszczalny poziom narażenia na pola elektromagnetyczne
- miary zewnętrzne ekspozycji, których pomiary można wykonać na stanowisku pracy – E , H , B , S – ustalające poziom ekspozycji wymagającej podjęcia kontroli na stanowisku pracy i ewentualnie działań prewencyjnych, za które odpowiedzialny jest pracodawca
- prąd kontaktowy I_C i indukowany w kończynie I_L – których pomiary można wykonać na stanowisku pracy – przeznaczone do oceny poziomu zagrożeń wtórnych i SAR lokalnego.

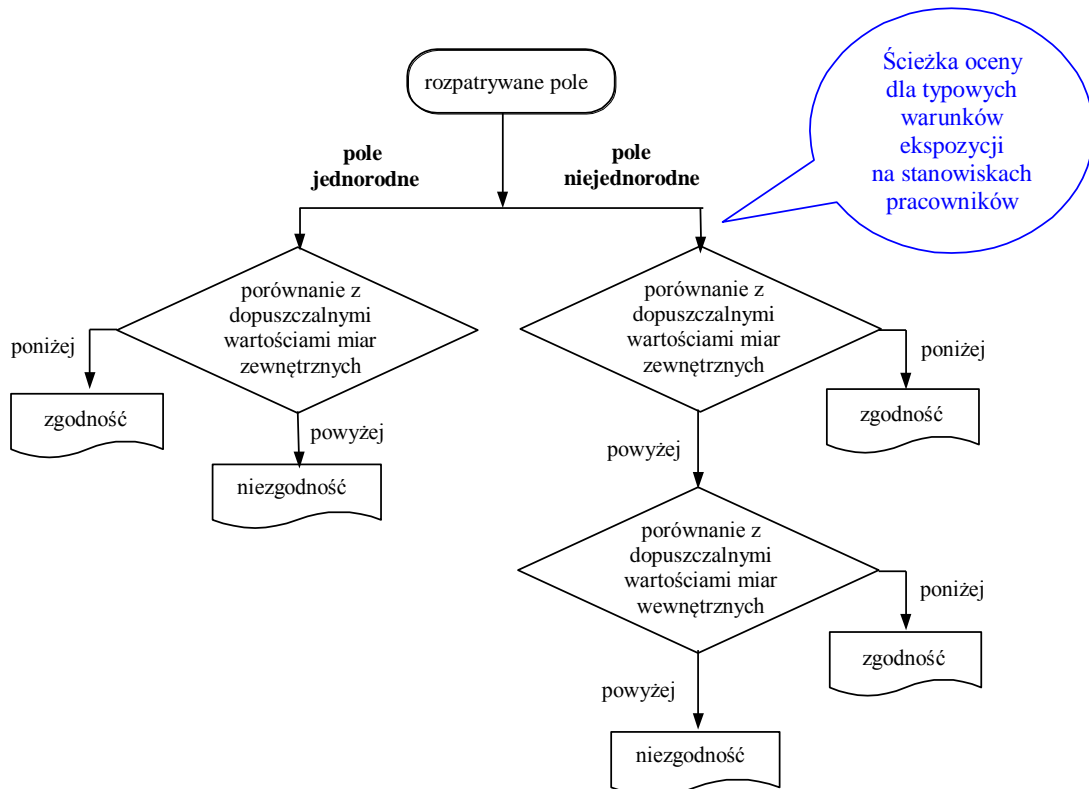
Miary wewnętrzne są skorelowane ze skutkami ekspozycji występującymi wewnątrz organizmu i zostały ustalone, aby zdefiniować najwyższy dopuszczalny poziom zagrożenia pracownika, jaki można dopuścić na stanowisku pracy w czasie ekspozycji. Posłużyły one do wyznaczenia, do celów rutynowej kontroli i oceny warunków ekspozycji pracownika, wartości granicznych miar zewnętrznych, tak aby w najbardziej niekorzystnych warunkach narażenia spełnienie wymagań odnoszących się do miar zewnętrznych gwarantowało również automatycznie spełnienie wymagań odnoszących się do miar wewnętrznych ekspozycji. Ich wartości zamieszczone w dyrektywie, zostały obliczone (oszacowane) na podstawie granicznych wartości miar wewnętrznych, według metodyki podanej w zaleceniach ICNIRP (ICNIRP 1998).

Jeżeli nie można wykazać zgodności warunków narażenia z wymaganiami odnoszącymi się do miar zewnętrznych, to niezbędne są bardziej szczegółowe badania warunków ekspozycji, uwzględniające m.in.: rozkład przestrzenny pola, sprzężenia pojemnościowe z obiektami materialnymi znajdującymi się na stanowisku pracy (tj. rozkład izolacji i uziemień elektrycznych w stosunku do ciała pracownika), zmienność ekspozycji w czasie i w razie potrzeby również oszacowanie miar wewnętrznych w modelach ciała.

Zgodnie z filozofią wymagań zawartych w dyrektywie 2004/40/WE, poziom ekspozycji na stanowisku pracy może być wyższy niż to wynika z oceny miar zewnętrznych, pod warunkiem, że nie występuje przekroczenie wartości dopuszczalnych miar wewnętrznych (rys. 4, 5).



Rys. 4. Zasady oceny poziomu ekspozycji pracownika na pole elektromagnetyczne, zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2004/40/WE; linia ciągła - dopuszczalna wartość miar zewnętrznych



Rys. 5. Schemat postępowania podczas oceny ekspozycji na pola elektromagnetyczne (zgodnie z wymaganiami zawartymi w dyrektywie 2004/40/WE)

Dopuszczenie takich warunków ekspozycji wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy odnoszącej się do miar wewnętrznych ekspozycji pracownika, tj. na przykład wykonania oceny natężenia prądu indukowanego w kończynach bądź symulacji numerycznych odnoszących się do współczynnika SAR lub gęstości prądu indukowanego J . Stopień rozwoju metod numerycznych jest obecnie dostateczny, aby mogły być stosowane do modelowania i oceny warunków ekspozycji występujących na stanowi-

skach pracy. Alternatywą w niektórych przypadkach może być odwołanie się do dokumentacji urzędów, podającej wyniki badań laboratoryjnych, np. wyniki pomiarów laboratoryjnych SAR w fantomach cieczowych stosowane do wykazania zgodności parametrów technicznych telefonów komórkowych z wymaganiami rekomendacji 519/1999/WE.

⇒ Reasumując, przestrzeganie ograniczeń dotyczących dopuszczalnych wartości miar zewnętrznych gwarantuje spełnienie ograniczeń dotyczących miar wewnętrznych, natomiast przekroczenie ograniczeń miar zewnętrznych nie oznacza przekroczenia dopuszczalnych miar wewnętrznych, a jedynie potrzebę wykonania bardziej dokładnej analizy ich spełnienia.

Pracodawca powinien oszacować oraz, jeśli jest to konieczne, zmierzyć lub obliczyć poziomy pola elektromagnetyczne, na które jest ekspozycyjny pracownik. W przypadku stwierdzenia przekroczenia granicznych wartości miar zewnętrznych na stanowisku pracy, pracodawca powinien oszacować oraz, jeśli jest to konieczne, obliczyć czy dopuszczalne wartości miar wewnętrznych nie zostały przekroczone. Oszacowanie, pomiary oraz obliczenia powinny być wykonywane zgodnie z procedurami podanymi w zharmonizowanych z dyrektywą normach Europejskiego Komitetu Normalizacji Elektrotechnicznej (CENELEC), które są sukcesywnie opracowywane (prEN50444, prEN50445, prEN50499, prEN50505, prEN50413, prEN50475, prEN50476). Do czasu ich opracowania mogą być wykorzystywane normy i zalecenia krajowe lub międzynarodowe oparte na wiedzy naukowej.

⇒ Ponieważ wartości miar zewnętrznych dla pól radio- i mikrofalowych z zakresu od 100 kHz do 10 GHz zostały obliczone tak, by chronić przed efektem termicznym wewnątrz ekspozycyjnego ciała, to do analizy zgodności z granicznymi wartościami miar wewnętrznych natężenie pola elektrycznego, oddziałującego na pracownika, powinno być uśrednione w przestrzeni stanowiska pracy i w czasie ekspozycji. Zasady oceny pól magnetycznych niejednorodnych i niesinusoidalnych są mniej jednoznaczne.

Warunki dopuszczalnej w Polsce ekspozycji pracowników

Dopuszczalną ekspozycję zawodową na pola elektromagnetyczne ustalono postanowieniami rozporządzenia ministra pracy i polityki społecznej w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń (NDS i NDN) czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (nowelizacja z 1999 r. obowiązuje obecnie wg postanowień podanych w DzU 217/2002, poz. 1833), a szczegóły dotyczące metodyki pomiarów i oceny ekspozycji w zharmonizowanej z rozporządzeniem normie PN-T-06580:2002.

NDN ustalono tak, aby oddziaływanie pola elektromagnetycznego na pracownika przez okres jego aktywności zawodowej (tj. od 20 do 45 lat) nie spowodowało ujemnych zmian w stanie jego zdrowia oraz w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń. W normie PN-T-06580:2002, zdefiniowano terminologię oraz zasady pomiaru natężenia pola elektrycznego, E , i magnetycznego, H , na stanowisku pracownika, a także zasady

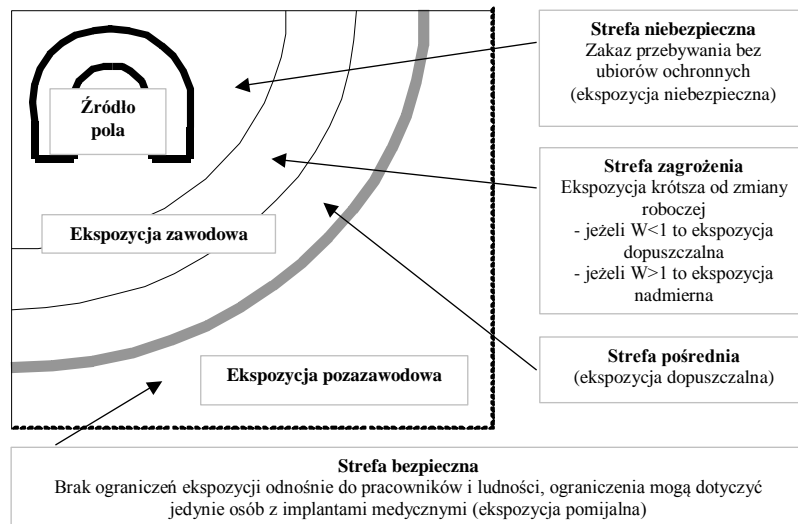
oceny warunków ekspozycji w polach elektromagnetycznych. Odnosnie do pól o częstotliwości 0÷300 GHz ustanowiono w nich:

- poziom ekspozycji, która nie wymaga nadzoru i okresowej kontroli (tzw. strefa bezpieczna lub obszar poza strefami ochronnymi)
- wyższy poziom ekspozycji dopuszczalnej dla pracowników pod warunkiem spełnienia określonych wymagań, m.in. okresowej kontroli poziomu ekspozycji na stanowisku pracy (tzw. strefy ochronne pól elektromagnetycznych)
- najwyższy poziom ekspozycji, uznany za ekspozycję zabronioną dla pracowników (tzw. strefa niebezpieczna).

Ekspozycja na pola poza strefami ochronnymi jest **nazywana ekspozycją pozazawodową** (strefa bezpieczna). Ekspozycja na pola stref ochronnych jest **nazywana ekspozycją zawodową** i dotyczy np. pracowników obsługujących urządzenia wytwarzające silne pola elektromagnetyczne.

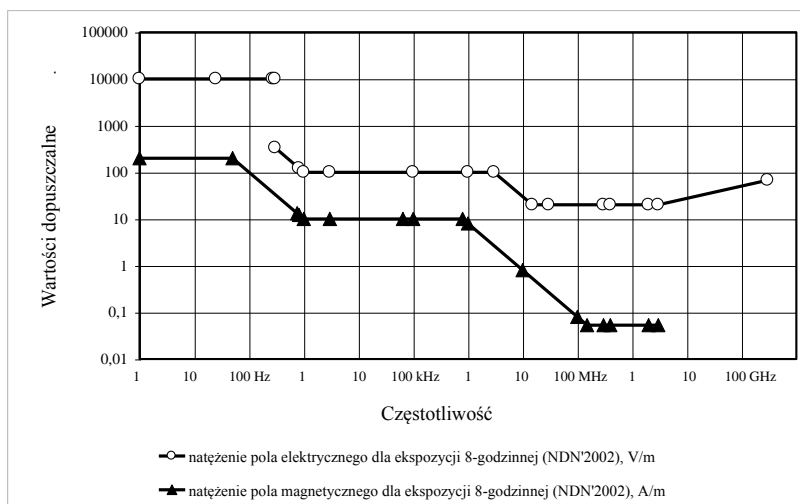
Przebywanie pracowników w polach stref ochronnych regulują następujące zasady (rys. 6):

1. strefa niebezpieczna jest to obszar, w którym nie wolno przebywać (z wyjątkiem stosowania specjalnych ochron indywidualnych, ograniczających narażenie)
2. strefa zagrożenia jest to obszar, w którym pracownicy mogą przebywać przez czas krótszy niż 8 godzin na dobę, tak aby przebywanie w polach występujących na stanowisku pracownika oraz specyfika pracy źródła pola i jego obsługi nie spowodowały przekroczenia dopuszczalnego wskaźnika ekspozycji pracownika (dolna granica strefy zagrożenia odpowiada dopuszczalnej ekspozycji nieprzerwanie przez 8 godzin na zmianę roboczą)
3. strefa pośrednia jest to obszar, w którym przebywanie pracowników nie podlega ograniczeniom w ramach całej 8-godzinnej zmiany roboczej.



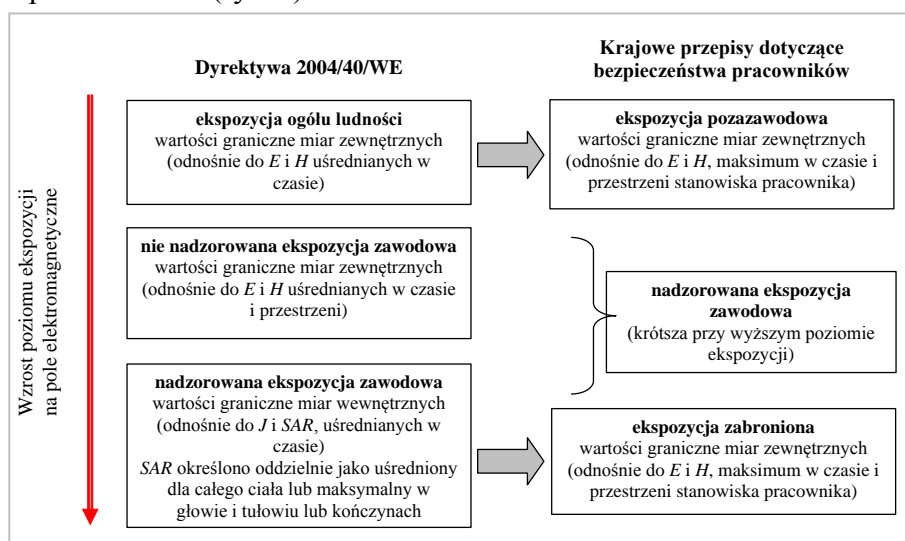
Rys. 6. Zasady przebywania w otoczeniu źródła pola elektromagnetycznego

Wartości natężeń pól elektrycznych i magnetycznych, które ustalają granice między strefą pośrednią i zagrożenia (tzw. NDN pól elektrycznych E_1 i magnetycznych B_1) są uzależnione od częstotliwości ocenianego pola (rys. 7).



Rys. 7. Natężenie pola elektrycznego (E_1) i magnetycznego (H_1) dopuszczalne przy ekspozycji 8-godzinnej (Rozporządzenie ... 2002)

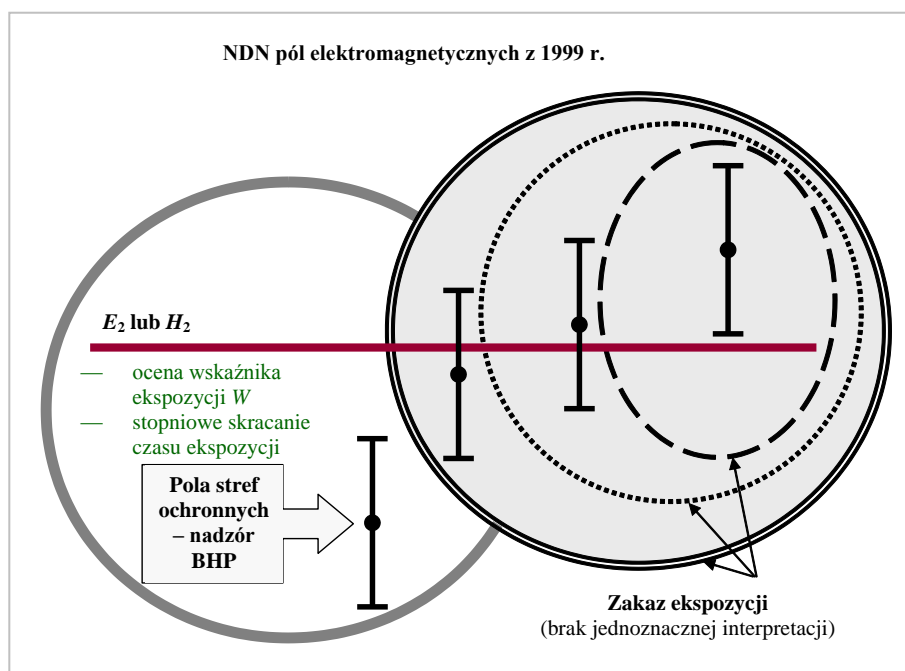
Okresowa ocena poziomu ekspozycji na pola elektromagnetyczne na stanowisku pracy jest w Polsce obowiązkowa, więc przepisy z nią związane odnoszą się wyłącznie do miar zewnętrznych (E , H). Miary wewnętrzne (J , SAR) nie są podane w rozporządzeniu, ponieważ nie ma możliwości ich pomiaru w rzeczywistych warunkach ekspozycji pracowników. Jednakże dopuszczalne wartości miar wewnętrznych zdefiniowane w zaleceniach ICNIRP'1998 i wykorzystane w dyrektywie 2004/40/WE, oraz zbliżone do nich wartości podane w normie IEEE'1999 (której aktualizacja została opublikowana w 2005), były podstawą opracowania naukowego stanowiącego uzasadnienie do ustalenia w aktualnych przepisach polskich poziomu ekspozycji zabronionej na pola elektromagnetyczne różnych częstotliwości. Natomiast NDN pól elektromagnetycznych pełni w procedurach BHP rolę analogiczną do wartości granicznych miar zewnętrznych z dyrektywy, tj. wskazuje stanowiska pracy, na których należy wdrażać nadzór nad warunkami ekspozycji i ewentualnie podjąć działania zmniejszające ryzyko zawodowe dla ekspozowanych pracowników (rys. 8).



Rys. 8. Porównanie filozofii oceny ekspozycji na pola elektromagnetyczne zgodnie z dyrektywą 2004/40/WE i aktualnymi przepisami polskimi

Zgodnie z postanowieniami zawartymi w normie PN-T-06580:2002, ekspozycja pracowników jest oceniana na podstawie pomiarów natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego. Za wynik pomiarów należy przyjąć maksymalną chwilową wartość skuteczną (lub maksymalną, zależnie od częstotliwości pola), zmierzoną wzdłuż linii odpowiadającej osi ciała pracownika, od podłoża do wysokości 2 m.

Zasady oceny zgodności poziomu narażenia z poziomem zagrożenia, przy ekspozycji na pola elektromagnetyczne, przedstawiono schematycznie na rysunku 9. Ocena poziomu narażenia odbywa się jedynie na podstawie wyników pomiarów miar zewnętrznych, a ich wartość rozstrzyga kategorię o zgodności warunków ekspozycji z warunkami dopuszczalnymi. Próg, przy którym wyniki pomiarów są oceniane jako niezgodne z wymaganiami NDN, jest uzależniony od wartości granicznych strefy niebezpiecznej (zdefiniowanych przez rozporządzenie) oraz od przyjętego arbitralnie modelu postępowania z niepewnością pomiarów. Mechanizm stopniowego zaostrzania wymagań w miarę wzrastania poziomu ekspozycji (tj. dopuszczalny coraz krótszy czas ekspozycji pracownika w ciągu zmiany roboczej w miarę narastania poziomu ekspozycji) zmniejsza znaczenie istotność analizy niepewności pomiarów dla zapewnienia bezpieczeństwa pracowników przebywających w polach elektromagnetycznych.



Rys. 9. Zasady oceny zgodności poziomu ekspozycji na stanowisku pracownika z wymaganiami NDN (NDN'2002) – strzałka wskazuje na wynik pomiaru, zaznaczony z uwzględnieniem jego niepewności

Obowiązujące zasady dopuszczalnej ekspozycji na pola elektryczne i magnetyczne zostały opracowane na podstawie analizy obowiązujących w latach 1972-1999 polskich przepisów i zaleceń międzynarodowych, m.in.: ICNIRP (1998) i IEEE (1999) oraz przeglądu publikacji naukowych, dotyczących skutków biologicznych i zdrowotnych związanych z ekspozycją na pola elektromagnetyczne.

Przy ustalaniu NDN w 1999 roku uwzględniono m.in.:

- kontynuację stosowania zasad sprawdzonego w praktyce systemu ochrony pracowników, w celu uniknięcia kosztów ponoszonych przez pracodawców w przypadku radykalnych zmian wymagań prawa pracy
- wstępną harmonizację NDN z ograniczeniami ICNIRP, odnoszącymi się do miar wewnętrznych, przez wprowadzenie płynnej zależności wartości NDN od częstotliwości pola, zbliżonej do zaleceń ICNIRP (1998) dotyczących miar zewnętrznych ekspozycji.

Uwzględniając te podane założenia, dokonano szczególnie dużych zmian dawnych wartości NDN w odniesieniu do pól o częstotliwościach rezonansowych (tj. o częstotliwości kilkudziesięciu megaherców (MHz)), dla których występuje zwiększona absorpcja energii w organizmie.

Od czasu opracowania w 1999 roku dokumentacji dla NDN opublikowano wyniki licznych badań naukowych odnoszących się do mechanizmów oddziaływania pól elektromagnetycznych i skutków zdrowotnych, jakie one wywołują oraz opracowania monograficzne i znowelizowane zalecenia bezpieczeństwa, a także dyrektywę europejską 2004/40/WE dotyczącą ochrony pracowników przed nadmierną ekspozycją.

Dokonany w związku z koniecznością transpozycji wymagań dyrektywy 2004/40/WE do prawa polskiego, przegląd rezultatów przeprowadzonych w ostatnich latach badań naukowych odnoszących się do skutków oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizm człowieka przemawia za stosowaniem w dalszym ciągu systemu ochrony pracowników przed nadmierną ekspozycją na pola, w którym uwzględniono ochronę przed jej skutkami długoterminowymi, pomimo tego, że minimalne wymagania dyrektywy 2004/40/WE są łagodniejsze i odnoszą się jedynie do skutków ekspozycji występujących w czasie jej trwania (*Karpowicz i in.* 2008, IARC 20002; SCENIHR 2007). Celowe jest więc utrzymanie w możliwie największym stopniu istniejącego w Polsce systemu lepszej ochrony pracowników przed nadmierną ekspozycją, opartego na wartościach NDN pola elektrycznego i magnetycznego, strefach ochronnych oraz wskaźniku ekspozycji i wskaźniku zasięgu stref ochronnych. Radykalne zmiany tego systemu wymagałyby poniesienia znacznych kosztów przez wszystkich pracodawców prowadzących ocenę ryzyka zawodowego pracowników z uwzględnieniem występowania ekspozycji na pola elektromagnetyczne na stanowisku pracy. Szacuje się, że liczba takich stanowisk pracy może w Polsce znacznie przekraczać 100 tysięcy, więc opracowanie zasad oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy, adaptujących jak najszerszej wyniki dotychczasowych działań, ma znaczną wagę gospodarczą. Ze względu na niedoprecyzowane problemy praktyczne (m.in. nieukończone prace normalizacyjne), opracowanie takich zasad jest też przedsięwzięciem wymagającym systematycznych, specjalistycznych badań naukowych oraz szerokiej wiedzy praktycznej z zakresu specyfiki zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy. W wyniku przeprowadzonych badań wypracowano pogląd, że transpozycja wymagań dyrektywy 2004/40/WE do prawa polskiego powinna zostać zrealizowana przez lepszą harmonizację dotychczasowego systemu z minimalnymi wymaganiami ustalonymi w tej dyrektywie przez (*Karpowicz i in.* 2008; *Skowroń* 2007):

- wprowadzenie dopuszczalnych wartości miar wewnętrznych, które definiują w dyrektywie 2004/40/WE poziom narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne, jaki nie powinien być z żadnym wypadku przekroczony na stanowisku pracy — zmiana ta realizuje obligatoryjną transpozycję wymagań dyrektywy 2004/40/WE do prawa polskiego

- wprowadzenie wartości dopuszczalnych prądu kontaktowego i indukowanego w kończynach, których wartości dopuszczalne nie zostały dotychczas określone w polskich przepisach BHP
- zachowanie stosowanej dotychczas metodyki badań i oceny poziomu ekspozycji pracowników ustalonej postanowieniami normy PN-T-06580:2002 (m.in. ocena wartości maksymalnej natężenia pola na stanowisku pracownika), przy modyfikowaniu wartości miar zewnętrznych ekspozycji, tj. NDN pól elektrycznych i magnetycznych, tak aby uzyskać lepszą harmonizację wymagań krajowych, definiujących warunki, w jakich ocena poziomu ekspozycji pracownika może być wykonana na podstawie badań i oceny miar zewnętrznych bez konieczności analizowania wymagań odnoszących się do miar wewnętrznych ekspozycji).

Wynikająca z tego założenia modyfikacja NDN została opracowana na podstawie przeprowadzonych badań z wykorzystaniem symulacji numerycznych i zaakceptowana przez Międzyresortową Komisję ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynniki Szkodliwych w Środowisku Pracy (Karpowicz i in. 2008).

Wprowadzenie możliwości wykorzystania oceny wartości miar wewnętrznych odnośnie stanowisk pracy, na których występuje wysoki poziom ekspozycji, zostało zrealizowane poprzez propozycję następującego zapisu w rozporządzeniu ws. NDN (Karpowicz i in. 2008; Skowroń 2007):

⇒ W żadnym wypadku w wyniku ekspozycji na pola elektromagnetyczne w ciele pracownika nie mogą być przekroczone wartości dopuszczalne miar wewnętrznych ekspozycji. Warunek ten jest spełniony w przypadku przebywania pracownika poza polami strefy niebezpiecznej. W wyjątkowych sytuacjach, kiedy nie można zastosować środków zmniejszających poziom ekspozycji, dopuszcza się przebywanie pracowników w polach strefy niebezpiecznej, wyznaczonych z addytywnym uwzględnieniem niepewności pomiarowej, pod warunkiem spełnienia jednego z następujących warunków:

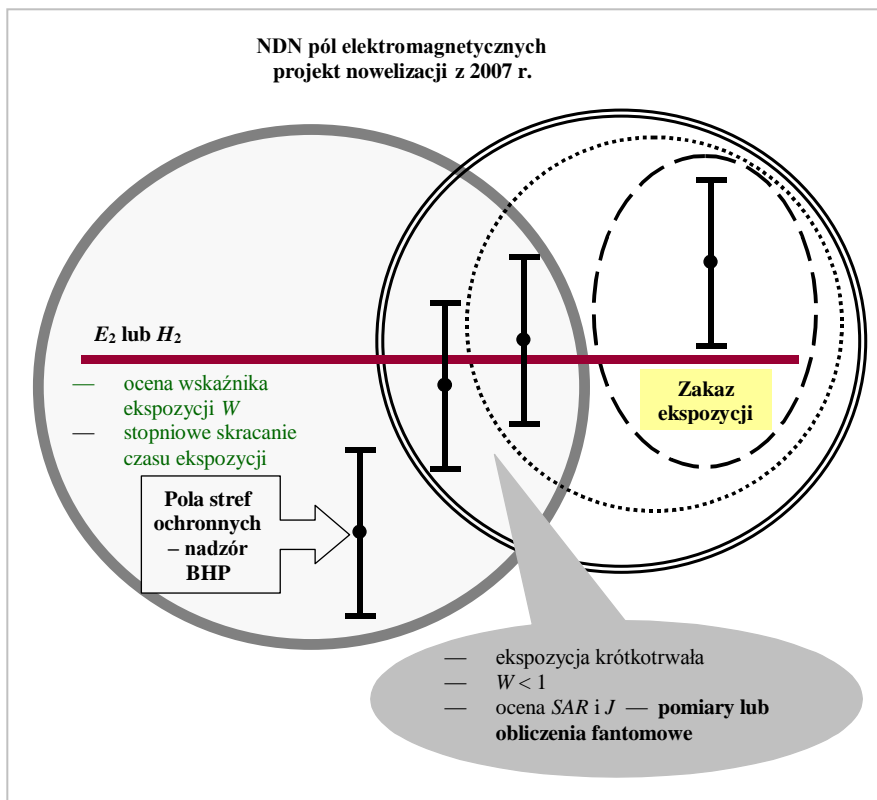
- pracownicy stosują odpowiednie środki ochrony indywidualnej
- łączny czas ekspozycji pracownika na pole elektromagnetyczne tej strefy nie przekracza 8 minut i wskaźnik ekspozycji W nie przekracza wartości dopuszczalnej jeden i pracodawca dysponuje udokumentowanymi wynikami oceny dotyczącej wartości miar wewnętrznych dla tej ekspozycji, potwierdzającymi, że nie zachodzi niebezpieczeństwo przekroczenia ich wartości dopuszczalnych w ciele eksponowanego pracownika.

Ocenę wartości miar wewnętrznych, o której mowa, należy dokonać zgodnie z wymaganiami norm europejskich zharmonizowanych z dyrektywą 2004/40/WE, przy addytywnym uwzględnieniu niepewności wyznaczenia ich wartości.

Uzasadnienie omawianych zmian w wykazie wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń fizycznych czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy oraz projekt nowelizacji w pełnym brzmieniu zamieszczono w dokumentacji projektu nowe-

lizacji NDN (Karpowicz i in. 2008). Dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne oraz prądu indukowanego i kontaktowego podano w Załączniku 1.

Zasady oceny zgodności poziomu narażenia z poziomem zagrożenia przy ekspozycji na pola elektromagnetyczne wynikające z zaproponowanej nowelizacji przepisów BHP przedstawiono schematycznie na rysunku 10.



Rys. 10. Zasady oceny zgodności poziomu ekspozycji na stanowisku pracownika z wymaganiami projektu nowelizacji NDN (prNDN'2007) – strzałka wskazuje na wynik pomiaru, zaznaczony z uwzględnieniem jego niepewności

W ocenie poziomu narażenia będzie można uwzględniać zarówno badania i ocenę miar zewnętrznych, jak i miar wewnętrznych odnośnie do stanowisk pracy eksponowanych na silne pola elektromagnetyczne. Kategorie rozstrzygnięcia o zgodności warunków ekspozycji z warunkami dopuszczalnymi będzie mogło zapaść na podstawie wyników oceny miar wewnętrznych ekspozycji, czyli w praktyce najczęściej danych dostarczonych przez producenta urządzeń (jak wspomniane dane nt. wartości współczynnika SAR od terminali telefonii komórkowej), ale w szczególnych przypadkach będzie można przeprowadzić również symulacje komputerowe z wykorzystaniem numerycznych fantomów ciała pracownika oraz modeli ocenianego stanowiska pracy. Niepewności pomiarów przypada w takim modelu oceny poziomu narażenia inna rola— addytywne uwzględnienie niepewności pomiarów natężenia pola elektrycznego lub magnetycznego będzie wyznaczać próg warunków ekspozycji, przy których należy wdrożyć postępowanie w celu oceny miar wewnętrznych ekspozycji (tj. kiedy brak jest pewności odnośnie do spełnienia wymagań dotyczących dopuszczalnych miar wewnętrznych), a nie jak dotychczas próg ekspozycji dopuszczalnej. Do wykazania zgodności poziomu nara-

zenia z dopuszczalnym poziomem zagrożenia niezbędne będzie również oszacowanie niepewności szacowania wartości miar wewnętrznych ekspozycji. Alternatywnie pracodawca może przyjąć, że warunki ekspozycji wymagające oceny poziomu miar wewnętrznych są w przedsiębiorstwie traktowane jako nieakceptowalne i wdrożyć program ograniczenia poziomu narażenia pracowników. Decyzja taka powinna być preferowana ze względu na lepsze zapewnienie bezpieczeństwa pracowników.

Ocena ryzyka zawodowego związanego z ekspozycją na pole elektromagnetyczne

Ocena ryzyka zawodowego odgrywa istotną rolę w procesie monitorowania środowiska pracy, będąc źródłem informacji niezbędnych do planowania działań korygujących i zapobiegawczych w stosunku do zidentyfikowanych niezgodności. Obecnie jest zalecana trzystopniowa skala oceny ryzyka zawodowego ogółu pracowników ekspozowanych na pola (zgodna z założeniami zawartymi w normie PN-N-18002:2000), oparta na parametrach charakteryzujących warunki ekspozycji:

- natężenia pól elektrycznych i magnetycznych (porównywane z wartościami granicznymi stref ochronnych)
- wskaźnik ekspozycji (porównywany z wartością dopuszczalną $W = 1$).

W przypadku pól elektromagnetycznych ogólne kryteria oceny ryzyka zawodowego tworzą następujące zasady:

- ryzyko duże występuje w przypadku przekroczenia dozwolonych prawem warunków ekspozycji, tj. kiedy stanowisko pracy znajduje się w strefie niebezpiecznej (ekspozycja niebezpieczna, zakaz przebywania bez środków ochrony indywidualnej) lub wskaźnik ekspozycji $W > 1$, tj. czas pracy w polach strefy zagrożenia jest zbyt długi (ekspozycja nadmierna)
- ryzyko średnie występuje wtedy, kiedy stanowisko pracy znajduje się w strefie pośredniej lub zagrożenia i dozwolone prawem warunki ekspozycji są zachowane (ekspozycja dopuszczalna, wskaźnik ekspozycji $W < 1$) albo pracownicy przebywający w polach strefy niebezpiecznej są wyposażeni w środki ochrony indywidualnej o odpowiedniej skuteczności
- ryzyko małe występuje wtedy, kiedy stanowisko pracy znajduje się poza zasięgiem stref ochronnych pola elektromagnetycznego (strefa bezpieczna, ekspozycja pomijalna, ograniczenia mogą dotyczyć jedynie osób z implantami medycznymi).

W przypadku pola magnetycznego o częstotliwości do 800 kHz, należy uwzględnić również dopuszczalne warunki ekspozycji kończyn, a dla pól impulsowych o częstotliwości powyżej 100 MHz – dodatkowo wartość maksymalną natężenia pola elektrycznego w impulsie, a jako ostateczną ocenę wybrać najgorszy przypadek wynikający z oceny wymienionych parametrów.

Do przeprowadzenia procesu oceny ryzyka zawodowego są zatem niezbędne informacje na temat warunków ekspozycji pracowników, np. wyniki wykonywanych pomiarów pól elektromagnetycznych (Rozporządzenie... 2005). W przypadku stwierdzenia ryzyka dużego lub średniego, niezbędne jest podjęcie działań zmniejszających to ryzyko. Zmniejszenie narażenia można osiągnąć metodami technicznymi i organizacyjnymi. Tam gdzie jest to możliwe, zgodnie z normą PN-N-18002, powinno się stosować środki techniczne jako bardziej niezawodne niż organizacyjne.

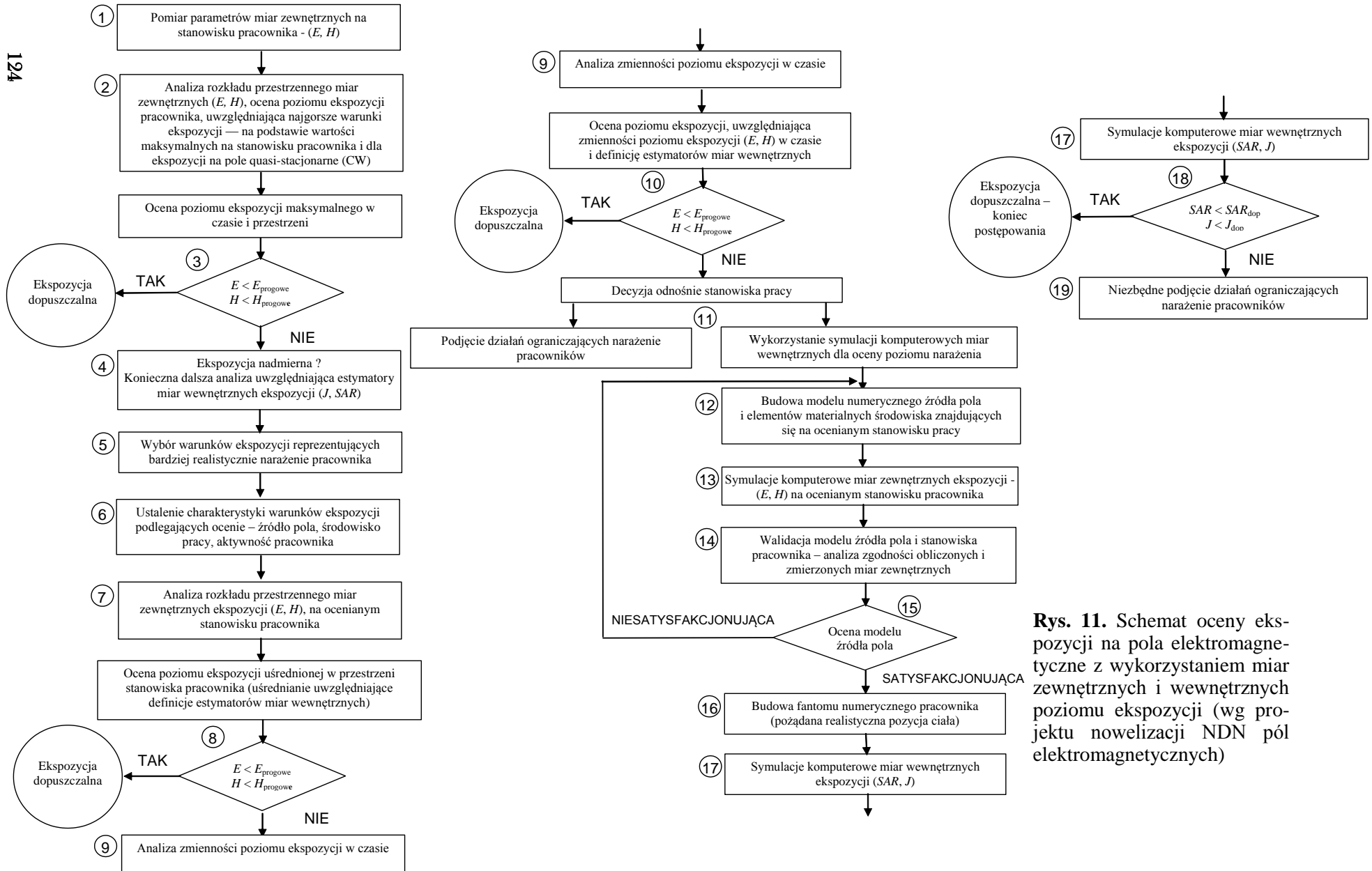
W związku z omówionymi wcześniej przygotowaniem transpozycji wymagań zawartych w dyrektywie 2004/40/WE do prawa polskiego, po wprowadzeniu możliwości stosowania miar wewnętrznych do oceny poziomu ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne, zostanie poszerzona również metodyka oceny ryzyka zawodowego. Ogólne kryteria oceny ryzyka zawodowego dla pracowników ekspozowanych na pole elektromagnetyczne będą następujące:

- ryzyko duże występuje w przypadku przekroczenia dozwolonych prawem warunków ekspozycji, tj. kiedy stanowisko pracy znajduje się w strefie niebezpiecznej i są przekroczone dopuszczalne wartości miar wewnętrznych lub wskaźnik ekspozycji $W > 1$, tj. czas pracy w polach strefy zagrożenia jest zbyt długi (ekspozycja nadmierna)
- ryzyko średnie występuje wtedy, kiedy stanowisko pracy znajduje się w strefie pośredniej lub zagrożenia i dozwolone prawem warunki ekspozycji są zachowane (ekspozycja dopuszczalna, wskaźnik ekspozycji $W < 1$) lub kiedy w strefie niebezpiecznej ekspozycja jest krótkotrwała i wskaźnik ekspozycji $W < 1$ oraz wykazano, że nie są przekroczone dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji albo pracownicy przebywający w polach strefy niebezpiecznej są wyposażeni w skuteczne środki ochrony indywidualnej
- ryzyko małe występuje wtedy, kiedy stanowisko pracy znajduje się poza zasięgiem stref ochronnych pola elektromagnetycznego.

Przyjmując, że stwierdzenie na stanowisku pracownika ekspozycji w strefie niebezpiecznej oznacza duże prawdopodobieństwo przekroczenia dopuszczalnych miar wewnętrznych (tj. nieakceptowalny poziom narażenia pracownika), uzyskujemy system oceny ryzyka zawodowego jak przy dotychczasowych rozwiązaniach. Natomiast w przypadku występowania tak określonego podejrzenia, że występuje ryzyko duże, pracodawca uzyska zgodnie z postanowieniami zawartymi w dyrektywie 2004/40/WE dodatkową możliwość uzyskania akceptowalnego poziomu ryzyka na stanowisku pracownika, tj. ryzyka średniego - przez zastosowanie skutecznych indywidualnych środków ochrony lub wykazanie zgodności z wymaganiami dotyczącymi dopuszczalnych miar wewnętrznych.

OGÓLNE ZASADY WYKORZYSTANIA MIAR ZEWNĘTRZNYCH I WEWNĘTRZNYCH DO OCENY POZIOMU EKSPOZYCJI

Zaprezentowane zasady oceny ekspozycji na pola elektromagnetyczne z wykorzystaniem miar zewnętrznych i wewnętrznych poziomu ekspozycji, odwołujące się do wymagań zawartych w dyrektywie 2004/40/WE oraz projektu nowelizacji NDN pól elektromagnetycznych, transponującego je do polskich przepisów BHP, proponuje się stosować w praktyce wg schematu zaprezentowanego na rysunku 11.



Rys. 11. Schemat oceny ekspozycji na pola elektromagnetyczne z wykorzystaniem miar zewnętrznych i wewnętrznych poziomu ekspozycji (wg projektu nowelizacji NDN pól elektromagnetycznych)

ZASADY MODELOWANIA ZAGROŻEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH NA STANOWISKU PRACY

Symulacje komputerowe są praktycznie jedynym sposobem oszacowania wielkości parametrów, które są miarami wewnętrznymi skutków ekspozycji. Rezultaty modelowania mogą być także przydatne do wyznaczenia parametrów, które są miarami zewnętrznymi. Wprawdzie miary zewnętrzne mogą być mierzone bezpośrednio, ale nie w każdej sytuacji jest możliwe wykonanie pomiarów, miarodajnie charakteryzujących poziom narażenia. Ponadto, pomiary dotyczą tzw. pola pierwotnego (bez obecności pracownika w obszarze pomiarowym, którego dotyczy ocena). Ciało pracownika wpływa np. na rozkład pola elektrycznego bezpośrednio przy urządzeniu stanowiącym jego źródło oraz sprzęga się pojemnościowo ze źródłem, co powoduje np. lokalne zwiększenie gęstości prądu indukowanego w partiach ciała stykających się z izolowanymi elementami źródła pola lub przepływ prądu kontaktowego przez ciało. W przypadku pola magnetycznego, istotne może być natomiast występowanie znacznych gradientów natężenia pola w obszarze bezpośrednio przy źródle pola.

Obliczenia numeryczne mogą być wykorzystane w dwóch różnych sytuacjach:

- do analizy warunków ekspozycji w przypadkach, w których nie ma możliwości wykonania oceny na podstawie rutynowych pomiarów natężenia pola elektrycznego i magnetycznego występującego na stanowisku pracy
- jako uzupełniające narzędzie analizy warunków ekspozycji, w przypadku kiedy można zastosować również metody klasyczne (pomiaru wymiennych wielkości).

Wyniki symulacji komputerowych uzyskane w drugim przypadku można skonfrontować z rezultatami uzyskanymi metodami klasycznymi oraz wykorzystać przy weryfikacji poprawności zbudowanych modeli numerycznych i przeprowadzonych symulacji.

Obliczenia numeryczne mogą zatem być użyteczne podczas prowadzenia oceny ekspozycji na podstawie miar wewnętrznych w przypadku modelowania warunków ekspozycji pracowników przebywających w bardzo małej odległości od źródła pola elektromagnetycznego, którego budowa fizyczna oraz parametry pracy są dobrze znane (np. układ i obciążenie przewodów z prądem, takich jak induktory, lub konfiguracja i potencjał elektryczny elementów konstrukcyjnych będących pod napięciem, takich jak anteny nadawcze). Jest to najczęściej stosowane w przypadku predykcji zagrożeń elektromagnetycznych na etapie konstrukcyjnym urządzenia lub przy ocenie warunków pracy na stanowiskach zlokalizowanych przy urządzeniu, którego pełna dokumentacja techniczna jest znana. Zadanie polega wtedy na symulacji rozkładu przestrzennego pól elektromagnetycznych w otoczeniu źródła pola i ocena stopnia zagrożenia dla pracowników, którzy będą to urządzenie obsługiwali.

Aby uzyskać wyniki najlepiej skorelowane z warunkami ocenianej ekspozycji, należy wybrać odpowiedni model ciała człowieka (*Durney 1980*). W przypadku konieczności wyznaczenia np. precyzyjnych rozkładów miar wewnętrznych w ciele człowieka, w jego modelu powinny zostać uwzględnione szczegóły anatomiczne. Gdy przedmiotem obliczeń są parametry całkowite można zastosować uproszczenia i użyć modelu jednorodnego o prostych kształtach geometrycznych. W przypadku odwzorowywania anatomicznej budowy ciała człowieka jest wymagana bardzo gęsta dyskretyzacja analizowanego obszaru (co najmniej rzędu $1 \div 2$ mm). W symulacjach warunków

ekspozycji na pola elektromagnetyczne w czasie wykonywania pracy należy uwzględnić także otoczenie pracownika. Gęsta dyskretyzacja pozwala na zmniejszenie błędów numerycznych. Natomiast dyskretyzacja z dużą rozdzielczością obszernego otoczenia sprawia, że obliczenia są bardzo długotrwałe lub wręcz niemożliwe do przeprowadzenia. Konieczny jest zatem kompromis między akceptowalną dokładnością, czasem symulacji i pracochłonnością przy tworzeniu modelu numerycznego.

Stosowanie uproszczeń przy odwzorowywaniu źródła pola pozwala na uzyskanie akceptowalnych na potrzeby oceny warunków ekspozycji wyników przy ograniczeniu pracochłonności związanej z budową modelu.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że jednym z podstawowych problemów przy tworzeniu modeli reprezentujących warunki ekspozycji pracowników są ograniczenia wynikające z właściwości poszczególnych metod obliczeniowych. Przykładowo, do analiz w zakresie małych częstotliwości jest możliwe efektywne wykorzystywanie metody elementów skończonych (FEM/MES). Metoda ta jednak nie sprawdza się przy modelowaniu ekspozycji związanych z polami częstotliwości radiowych. W tym przypadku powszechnie są stosowane modyfikacje metody różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD). Najbardziej niejasna sytuacja występuje w zakresie średnich częstotliwości, odnośnie do którego nie ma precyzyjnych zaleceń rozgraniczających zakres wykorzystania poszczególnych metod. Każdorazowo niezbędna jest analiza poprawności uzyskanych wyników symulacji. Nie można z nich korzystać bez wykazania, że model środowiska pracy, źródła pola i warunków ekspozycji umożliwiają, przy korzystaniu z konkretnej metody symulacji, uzyskanie satysfakcjonującej reprezentacji poziomu narażenia.

W celu uzyskania miarodajnych obliczeń, już na etapie tworzenia modelu pożądanym jest sprawdzenie jego poprawności i ustalenie, czy we właściwy sposób reprezentuje rzeczywiste warunki środowiskowe. Absolutnie niezbędne jest przeprowadzenie walidacji rezultatów na podstawie danych doświadczalnych, charakteryzujących modelowane środowisko pracy.

Do symulacji numerycznych służących ocenie ekspozycji pracowników niezbędny jest następujący zestaw oprogramowania do:

- tworzenia numerycznych modeli geometrycznych elementów środowiska pracy odwzorowywanych w modelach analizowanego stanowiska pracy
- realistycznego modelowania ciała pracownika
- prowadzenia obliczeń rozkładów wartości miar zewnętrznych (E i H) oraz miar wewnętrznych (SAR , J), charakteryzujących poziom narażenia pracowników ekspozowanych na pola elektromagnetyczne.

WYMAGANIA OGÓLNE ODNOŚNIE DO PROCEDURY OCENY ZAGROŻEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH Z ZASTOSOWANIEM SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Stopień rozwoju metod numerycznych jest obecnie dostateczny, aby mogły one być stosowane do modelowania i oceny warunków ekspozycji występujących na stanowiskach pracy. Znalazło to odzwierciedlenie w dyrektywie 2004/40/WE. Postanowieniami dyrektywy dopuszczono trzy sposoby oceny warunków ekspozycji pracowników: oszacowanie, pomiary i obliczenia wielkości pól elektromagnetycznych, na które są ekspoz-

nowani pracownicy, z zaznaczeniem, że czynności te mają wykonywać osoby kompetentne (art. 4.4).

W dyrektywie dopuszczono zatem nie tylko pomiary pól elektromagnetycznych, charakteryzujących warunki ekspozycji pracowników, lecz także stosowanie obliczeń numerycznych do prowadzenia ocen narażenia w tym zakresie. Szczegółowe zasady postępowania przy ocenie warunków ekspozycji pracowników będą uregulowane zharmonizowanymi normami europejskimi, opracowywanymi przez CENELEC. Normy te będą dotyczyły: określenia potrzeb przeprowadzenia szczegółowej oceny ryzyka i związanej z tym metodyki oraz metod pomiarów i obliczeń użytecznych do prowadzenia oceny. Normy będą dotyczyły wszystkich źródeł ekspozycji znajdujących się na stanowisku pracy oraz poza nim oraz wszystkich możliwych warunków ekspozycji: pola bliskiego, pola dalekiego, różnych częstotliwości, impulsów, itd. (prEN50444, prEN50445, prEN50499, prEN50505, prEN50413, prEN50475, prEN50476). Wdrożenie do stosowania postanowień dyrektywy będzie wymagało od krajowych ośrodków zajmujących się oceną ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne opanowania również zasad wykorzystania do oceny miar wewnętrznych ekspozycji dokumentacji technicznej producentów urządzeń i publikacji tematycznych, a na potrzeby sytuacji szczególnych, również specjalistycznej metodyki modelowania numerycznego zagrożeń elektromagnetycznych do takiej oceny.

Szczegółowe normy z zakresu oceny zagrożeń elektromagnetycznych przy zastosowaniu symulacji komputerowych nie zostały dotychczas ustanowione. Ogólne informacje dotyczące metodyki symulacji do oceny współczynnika SAR podano w normach, jednak brak szczegółowych unormowań odnośnie symulacji zagrożeń elektromagnetycznych wynika np. z różnorodności możliwego wykorzystania wyników symulacji oraz różnorodności dostępnych metod obliczeniowych. W związku z tym, możliwe jest jedynie określenie ogólnych wymagań, które powinny być uwzględnione w procedurze wykonywania obliczeń do oceny zagrożeń elektromagnetycznych.

Procedura wykorzystania symulacji numerycznych do oceny warunków narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne powinna definiować:

1. Parametry fizyczne charakteryzujące narażenie na pola elektromagnetyczne, których oszacowanie jest przedmiotem obliczeń numerycznych, takie jak np.:
 - rozkład przestrzenny natężenie pola elektrycznego i/lub natężenie pola magnetycznego (indukcja magnetyczna) na stanowisku pracownika w otoczeniu źródła pola
 - natężenie lub gęstości prądu przepływającego między modelowanym obiektem ekspozycyjnym na pole i dotykającym go człowiekiem
 - rozkład przestrzenny zaindukowanego w organizmie natężenia pola elektrycznego i/lub magnetycznego
 - rozkład przestrzenny zaindukowanego w organizmie prądu elektrycznego
 - rozkładu przestrzenny zaabsorbowanej w organizmie energii (rozkład wartości współczynnika SAR)
 - krotność zmian ww. parametrów w przypadku analizy skuteczności środków technicznych ograniczających poziom zagrożenia.
2. Kryteria oceny wybranych parametrów narażenia.
3. Cechy charakterystyczne wybranych parametrów, zharmonizowane z kryteriami oceny, np.: sposób uśredniania w przestrzeni na stanowisku pracownika lub w osi tułowia pracownika, lub uśrednianie w czasie, którego powinny dotyczyć wyniki.

4. Charakterystyka danych, na podstawie których będą opracowywane modele numeryczne i wykonywane symulacje, np.:

- informacje techniczne o źródłach pól lub informacje o rozkładzie pól elektromagnetycznych pozwalające na odwzorowanie warunków ekspozycji w rozpatrywanym obszarze (prądy i napięcia w obwodach źródeł pól lub natężenia pola w określonych punktach obszaru)
- rozkład przestrzenny pola wyznaczony na podstawie wyników pomiarów na stanowisku pracownika
- rozkład przestrzenny pola ustalony na podstawie dokumentów technicznych
- dane techniczne źródła pola, np. prąd i wymiary geometryczne induktora
- informacje o charakterze czynności wykonywanych przez pracowników w rozpatrywanym obszarze (uwzględnienie ich specyfiki i zmienności, związanej np. z obsługą danego urządzenia i wymuszającej określoną pozycję ciała, usytuowanie względem innych niż obsługiwane urządzenie elementów materialnych znajdujących się w analizowanym obszarze, a mogących wpływać na stopień zagrożeń elektromagnetycznych dla pracownika)
- informacje o geometrii rozpatrywanego obszaru (uwzględnienie elementów materialnych, które mogą wpływać na rozkład przestrzenny pola elektromagnetycznego, a przez to wyniki obliczeń parametrów, na podstawie których prowadzić się będzie analizy stopnia zagrożeń elektromagnetycznych).

Odnosnie do wymienionych parametrów powinny być zdefiniowane warunki, po których spełnieniu, model przyjęty do symulacji może być traktowany jako podstawa oceny warunków narażenia pracownika, np. sposób określenia tzw. przypadku najgorszych warunków ekspozycji.

5. Rodzaj fantomu ciała człowieka oraz stopień jego dyskretyzacji, adekwatne do analizowanej sytuacji, taki jak np.:

- uproszczony geometrycznie model o jednorodnej strukturze materiałowej, np. do analizy wielkości całkowitych związanych z ekspozycją całego ciała na pola elektromagnetyczne, np. fantom walcowy, elipsoidalny, sferyczny
- anatomiczny fantom ciała człowieka, uwzględniający parametry materiałowe poszczególnych tkanek i narządów, np. do analizy rozkładów przestrzennych wielkości charakteryzujących skutki ekspozycji

Analizowany obszar modelu powinien zostać poddany takiej dyskretyzacji, aby najmniejszy rozmiar komórki był dużo mniejszy od najkrótszej długości fali, dla której są prowadzone obliczenia. Przyjmuje się, że rozdzielczości dyskretyzacji nie powinna być większa niż 1/10 długości fali przy najwyższej częstotliwości (najkrótsza długość fali).

Odnosnie do tych parametrów powinny być zdefiniowane minimalne wymagania dotyczące wykorzystywanych modeli oraz zasady porównywania i wykorzystywania wyników otrzymanych z obliczeń z tymi modelami.

6. Zasady wyboru odpowiedniego programu symulacyjnego z koniecznością uwzględnienia ograniczeń jego stosowania, wynikających z metody, na której jest oparty.

7. Wybór rodzaju symulacji 2D lub 3 D.

Wydaje się, że ze względu na konieczność możliwie najwierniejszego odwzorowania rzeczywistych warunków ekspozycji i konieczności uwzględnienia osiowo niesymetrycznych elementów środowiska pracy (źródła pola elektromagnetycznego, wyposażenie, pracownik) obliczenia numeryczne powinny dotyczyć z reguły mode-

lowania 3D. Jedynie sporadycznie, w przypadku wykonywania symulacji z uproszczonymi modelami ciała człowieka i symetrii modelu numerycznego analizowanej sytuacji, obliczenia można ograniczyć do 2D.

8. Określenie wymagań dotyczących zakresu walidacji wyników, np. przez porównanie wybranych danych z informacjami dostępnymi w literaturze tematu, odniesienie do wyników pomiarów, czy odniesienie do oszacowań analitycznych uwzględniających zagadnienia teorii pola elektromagnetycznego.
9. Określenie procesu modelowania, np. jako sekwencji kolejnych etapów:
 - budowa modelu geometrycznego odwzorowującego rozpatrywany obszar z uwzględnieniem geometrii źródeł pól i innych elementów materialnych
 - wybór i budowa modelu ciała człowieka z uwzględnieniem jego parametrów elektrycznych, odpowiadających analizowanej sytuacji (model geometryczny odwzorowujący eksponowane części ciała)
 - wybór rodzaju wymuszeń odwzorowujących źródło pola
 - przeprowadzenie obliczeń wybranego parametru, na którego podstawie prowadzi się ocenę poziomu zagrożeń elektromagnetycznych
 - analiza uzyskanych wyników i sprawdzenie ich poprawności na podstawie przygotowanych danych testowych.

Obecnie brak jest postanowień normalizacyjnych definiujących kompleksowo omówione zagadnienia. Pomocą przy definiowaniu procedury oceny dla konkretnego stanowiska pracy mogą być projekty opracowywanych norm europejskich. Ze względu na przystąpienie Polski do Unii Europejskiej i CENELEC oraz na ustanowienie dyrektywy 2004/40/WE i upoważnienie CENELEC do opracowania norm z nią zharmonizowanych, obecnie niecelowe jest opracowywanie projektów oryginalnych polskich norm dotyczących prezentowanych w niniejszej publikacji zagadnień.

PODSUMOWANIE

Dozymetria komputerowa może być metodą oceny zagrożeń elektromagnetycznych występujących w środowisku pracy. Modelowanie numeryczne może być w niektórych przypadkach jedyną możliwością stosunkowo miarodajnego oszacowania poziomu ekspozycji i jej oceny ze względu na bezpieczeństwo i higienę pracy, np. kiedy ciało pracownika znajduje się w bardzo małej odległości od elementów źródła pola elektromagnetycznego (mniejszej od ok. 10 cm) lub do niego dotyka.

Przeprowadzone symulacje wykazały jednak, że dokonanie obliczeń wymaga dobrej znajomości odwzorowywanej sytuacji, posiadania wielu szczegółowych danych w celu właściwego zdefiniowania rozpatrywanego problemu oraz weryfikacji wiarygodności uzyskanych wyników obliczeń. Wyniki obliczeń numerycznych nie mogą być przyjmowane do prowadzenia ocen ekspozycji pracowników czy rozpatrywanych zjawisk związanych z oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na środowisko pracy bez uprzedniego przeprowadzenia ich walidacji.

Zastosowanie uproszczeń w modelu numerycznym pozwala w wielu przypadkach dokonać oceny ekspozycji środowiska na pola elektromagnetyczne z dokładnością wystarczającą z punktu widzenia bezpieczeństwa i higieny pracy. Wybór stopnia uproszczenia zależy od rozwiązywanego problemu i jest kompromisem między pracochłonnością związaną z tworzeniem modelu, czasochłonnością symulacji oraz możliwo-

ściami dostępnego oprogramowania i wyposażenia komputerowego, a rodzajem wyników symulacji, które są niezbędne do prowadzenia oceny ekspozycji.

Wyniki obliczeń odnoszących się do tego samego problemu związanego z zagrożeniami elektromagnetycznymi w środowisku pracy różnymi programami pozwalają stwierdzić, że zastosowanie różnego rodzaju metod obliczeniowych może prowadzić do zbliżonych wyników. Nie jest zatem potrzebna unifikacja narzędzi obliczeniowych do analizy danego typu problemu. Konieczne jest natomiast odpowiednie zamodelowanie analizowanych warunków ekspozycji – uwzględnienie geometrii źródła pola i rodzaju wymuszenia, obecności elementów wpływających na wynik obliczeń, parametrów materiałowych i odpowiednie zdefiniowanie warunków brzegowych w utworzonym modelu numerycznym dla rozwiązywanego problemu.

W celu uzyskania wiarygodnych wyników obliczeń pożądane jest na etapie tworzenia modelu zweryfikowanie jego poprawności i ustalenie, czy odzwierciedla on z niezbędną precyzją modelowaną sytuację rzeczywistą, tak aby wyniki odpowiadały z akceptowalną dokładnością realnemu poziomowi narażenia.

Modelowanie komputerowe zagrożeń elektromagnetycznych oraz przeprowadzenie na ich podstawie oceny środowiska pracy i poziomu ekspozycji pracowników jest w związku z omówionymi wymaganiami nadal zagadnieniem specjalistycznym i będzie możliwe do prowadzenia jedynie przez nieliczne zespoły naukowo-badawcze.

Publikacja została opracowana na podstawie wyników programu wieloletniego pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej”, dofinansowanego w latach 2005-2007 w zakresie badań naukowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz uaktualniona w ramach działalności Centrum Badań i Promocji Bezpieczeństwa Elektromagnetycznego Pracujących i Ludności, w ramach programu wieloletniego pn. "Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy", dofinansowywanego w latach 2008-2010 w zakresie zadań służ państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

PIŚMIENNICTWO

ACGIH (2007) TLVs and BEIs. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, American Conference Governmental and Industrial Hygienists, OH.

Bezpieczeństwo pracy i ergonomia (1997) [Red. nauk.] D. Koradecka. T. 1. Warszawa, CIOP.

Bortkiewicz A. (2008) Skutki zdrowotne działania pól elektromagnetycznych - przegląd badań, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 4(58), 67-88.

Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne 2007 (2007). Red. D. Augustyńska i M. Pośniak. Warszawa, CIOP-PIB.

Dokumentacja nowelizacji NDN pól elektromagnetycznych (2007) Warszawa, CIOP-PIB [materiał niepublikowany].

Durney C. H. (1980) Electromagnetic dosimetry for models of humans and animals. A review of theoretical and numerical techniques. Proceedings of the IEEE, 68.

EC Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). Official Journal of the European Communities 1999/519/EC [dokument nieobligatoryjny].

Gabriel C. (1996) Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequencies. Brooks Air Force Technical Report AL/OE-TR-1996-0037. <http://www.fcc.gov/cgi-bin/dielec.sh>

Gdowski T. (2005) Occupational safety and health in electromagnetic fields – National Labour Inspectorate inspection activities. Proceedings of International Workshop Electromagnetic Fields in the Workplace, Poland, Warsaw 5–7.09.2005, S4/23-S4/27.

Gedliczka A. (2001) Atlas miar człowieka – Dane do projektowania i oceny ergonomicznej. Warszawa, CIOP.

Gryz K., Karpowicz J. (2000) Pola elektromagnetyczne w środowisku pracy. Seria: Zarządzanie Bezpieczeństwem i Higieną Pracy. [Red. nauk.] D. Koradecka, Warszawa, CIOP.

Gryz K., Karpowicz J. (2007) Wyniki badań ekspozycji pracowników na pola elektromagnetyczne 2000-2007. Warszawa, CIOP-PIB [materiał niepublikowany].

Gryz K., Karpowicz J. (2008) Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 4(58).

GUS (2006) Warunki pracy w 2005 roku. Informacje i opracowania statystyczne. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa.

IARC (2002) Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon, IARC Monographs 80, IARC Press.

ICNIRP (1998) *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*. Health Physics, 74, 4 (April), 494–522.

ICNIRP (2001) Review of the epidemiological literature on EMF and health. Standing Committee on Epidemiology. Environ. Health Perspect., 109 (Suppl.6), 911–933.

IEC 601-2-33: 1995 Medical electrical equipment. Part 2: Particular requirements for the safety of magnetic resonance equipment for medical diagnosis.

IEEE (2006) Std C95.1-2005 Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York, Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEEE (2002a) Std C95.3-2002 Recommended practice for measurements and computations of radio frequency electromagnetic fields with respect to human exposure to such fields, 100 kHz–300 GHz. New York, Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEEE (2002b) Std C95.6-2002 Standard for safety levels with respect to human exposure to frequency electromagnetic fields, 0 Hz to 3 kHz. New York, Published by the Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ILO (1998) Safety in the use of radiofrequency dielectric heaters and sealers. Occupational Safety and Health Series. Geneva, 73.

ILO (1999) Draft code of practice on ambient factors at workplace. Geneva, Meeting of Experts on Ambient Factors at the Workplace.

Karpowicz J., Gryz K. (2001) Kontrola i kształtowanie warunków pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym. Zakres częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Bezpieczeństwo Pracy 10, 7–13.

Karpowicz J., Gryz K. (2004) Nowa dyrektywa dotycząca ekspozycji zawodowej na pola elektromagnetyczne – 2004/40/EC. *Bezpieczeństwo Pracy* 11, 20–23.

Karpowicz J., Gryz K. (2005) EMF exposure level – and duration-dependent approach to workers exposure assessment used in Poland. Warsaw, Proceedings of International Workshop Electromagnetic Fields in the Workplace 5–7.09.2005, S1/11-S1/20.

Karpowicz J. i in. (2006) Electromagnetic fields associated with Spot Welding – examples of measurements and calculations for compliance”. Workshop Handbook "Electromagnetic fields of welding equipment in the framework of the directive 2004/40/EC", VITO, Mol, Belgia, 06.04.2006.

Karpowicz J. i in (2008) Pola i promieniowanie elektromagnetyczne o częstotliwości z zakresu 0 Hz ÷ 300 GHz. Dokumentacja nowelizacji harmonizującej dopuszczalny poziom ekspozycji pracowników z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 4(58), 7-46.

Korniewicz H. (1996) Modelowanie elektrodynamicznych procesów oddziaływania pól elektromagnetycznych na organizm ludzki. Praca na stopień doktora habilitowanego. Warszawa, CIOP.

Korniewicz H. i in. (2001) Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 Hz. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2(28), 97–238

NRPB (2003) Proposals for limiting exposure to electromagnetic fields (0-300 GHz). [Consultation dokument].

Obwieszczenie ministra gospodarki, pracy i polityki społecznej z dnia 28 sierpnia 2003 r. w sprawie jednolitego tekstu rozporządzenia ministra pracy i polityki socjalnej w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy. *DzU* 2003, nr 169, poz. 1650.

Ocena stanu bezpieczeństwa i higieny pracy w 2005 roku (2006) Warszawa, Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej.

PN-77/T-06582 *Ochrona pracy w polach elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości w zakresie 0,1-300 MHz. Metody pomiaru natężenia pola na stanowiskach pracy.*

PN-N-01256/03:1993 (PN-93/N-01256/03) *Znaki bezpieczeństwa, Ochrona i higiena pracy.*

PN-N-18002: 2000. *Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.*

PN-T-06260:1974 (PN-74/T-06260) *Źródła promieniowania elektromagnetycznego. Znaki ostrzegawcze.*

PN-T-065890: 2002 *Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz. Arkusz 01. Terminologia. Arkusz 03. Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy.*

Polk Ch., Postow E. (1996) *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*. Sec. ed. CRC Press.

prEN50444. *Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic fields from equipment for arc welding and allied processes.*

prEN50445. *Product family standard to demonstrate compliance of equipment for resistance welding, arc welding and allied processes with the basic restriction related to human exposure to electromagnetic fields (0 Hz – 300 GHz).*

prEN 50499:2006. *Determination of workers exposure to electromagnetic field.*

prEN50505. *Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic fields from equipment for arc welding and allied processes.*

prEN 50413:2007. *Basic standard on measurement and calculation procedures for human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields (0 Hz - 300 GHz)*

prEN 50475:2007 *Basic standard for the calculation and the measurement of human exposure to electromagnetic fields from broadcasting service transmitters in the HF bands (3 MHz - 30 MHz)*

prEN 50476:2007 *Product standard to demonstrate the compliance of broadcast station transmitters with the reference levels and the basic restrictions related to public exposure to radio frequency electromagnetic fields (3 MHz - 30 MHz.)*

Raport Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy (2005) *Expert forecast on emerging physical risks related to occupational safety and health. Risk observatory.* EU office, Luxemburg.

Reilly P.J. (1998) *Applied bioelectricity. From electrical stimulation to electropathology.* New York, Springer.

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 2002, nr 217, poz. 1833.

Rozporządzenie ministra zdrowia i opieki społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie pracy. DzU 1996, nr 69, poz. 332; 1997, nr 60, poz. 375; 1998, nr 159, poz. 1057; 2001, nr 37, poz. 451.

Rozporządzenia ministra zdrowia z dnia 20 kwietnia 2005 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2005, nr 73, poz. 645.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 1996 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych kobietom. DzU nr 114, poz. 545; 2002, nr 127, poz. 1092.

Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 24 sierpnia 2004 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym i warunków ich zatrudniania przy niektórych z tych prac. DzU nr 200, poz. 2047; zm. DzU 2005, nr 136, poz. 1145.

Serwis internetowy nt. zagrożeń elektromagnetycznych. <http://www.ciop.pl/EMF>

SCENIHR (2007) *Komitet naukowy ds. pojawiających się i nowo rozpoznanych zagrożeń dla zdrowia, Opinia wstępna na temat potencjalnego oddziaływania pól elektromagnetycznych (EMF) na zdrowie człowieka.* Bruksela.

Skowroń J. (2007) 55. posiedzenie Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. *Bezpieczeństwo Pracy*, 9, 30–31.

The International EMF Dosimetry Handbook. <http://www.emfdosimetry.org>

The Visible Human Project, National Library of Medicine
http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html.

WHO (1993) *Environmental Health Criteria 137, Electromagnetic Fields (300 Hz – 300 GHz).*
<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc137.htm>

WHO (2006) *Environmental Health Criteria 232, Static Fields*. <http://www.who.int/peh-emf/publications/reports/ehcstatic/en/index.html>

WHO (2007) *Environmental Health Criteria 238, Extremely Low Frequency Fields (ELF)*. http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html

Wiaderekiewicz R. (2008) Skutki biologiczne ekspozycji na pola elektromagnetyczne - badania eksperymentalne. *Metody Oceny Środowiska Pracy* 4(58), 47-66.

JOLANTA KARPOWICZ, KRZYSZTOF GRYZ, PATRYK ZRADZIŃSKI

Principles of using computer simulation for conformity assessment in accordance with Directive 2004/40/EC regarding occupational safety in electromagnetic fields

S u m m a r y

Electromagnetic field is an environmental factor that, in accordance with occupational safety and health (OSH) regulations, is subject to compulsory assessment in the working environment because of the risk it may cause to the workers. The level of workers exposure is assessed by classic measurement methods (i.e. by measuring various parameters of electric and magnetic field strength) or with the use of computer simulation results. Both methods play various roles in OSH engineering.

Computer simulations require specialist software, high-performance computers, and a highly skilled user. Numerical models of the human body, sources of electromagnetic fields and material objects present in the workplace are also necessary. Therefore, this type of investigation requires high-class scientific skills and techniques. As they are time-consuming and entail high costs, it is especially justified to conduct them as part of scientific research aimed at analyzing exposure level that may be permitted by OSH regulations and at assessing the emission of EMF generated by mass production devices (as part of product tests performed by the manufacturers). The use of computer simulations for exposure assessment at real work stations can only be performed with reference to selected models, representing the typical scenarios of performing a job, or to a model representing a scenario for the worst case of exposure conditions when performing such a job.

Measurements of electric and magnetic field strength may be performed at each individual work place, so they make it possible to make individual assessment of exposure level for each worker. They can also be used in developing data necessary to design numerical models of the workplace, verification of selected calculation outcomes and in laboratory testing of electromagnetic emission from particular devices.

This publication presents the principles of the use of computer simulation outcomes for assessing the level of workers exposure to electromagnetic fields, with special focus on the assessment of compliance with Directive 2004/40/EC provisions and with requirements of OSH regulations compulsory in Poland.

The study is intended for experts dealing with the assessment of occupational hazards to the workers who operate devices generating electromagnetic fields and with supervising work conditions in an enterprise.

The principles of using computer simulation outcomes for assessing workers' exposure level, and the review of research on electromagnetic hazards assessment, presented in the article, may also be instrumental for researchers dealing with computer simulations. The principles of using numerical methods for solving field tasks discussed in a great number of specialist scientific studies and guides for using particular software packets are not the subject of the present paper.

ZALĄCZNIK

Dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji wg projektu nowelizacji NDN pól elektromagnetycznych harmonizującej dopuszczalny poziom ekspozycji pracowników z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE

Tabela. Wartości dopuszczalne miar wewnętrznych ekspozycji na pole elektromagnetyczne o częstotliwości f oraz wartości dopuszczalne natężenia prądu kontaktowego i indukowanego w kończynach.

Lp.	Zakres częstotliwości	$J(f)$ #1) mA/m ²	$I_C(f)$ #2) mA	I_L mA	SAR_C W/kg	SAR_{GT} W/kg	SAR_K W/kg	S W/m ²	SA mJ/kg
1.	$f \leq 1 \text{ Hz}$	40	1		–	–	–	–	–
2.	$1 \text{ Hz} < f \leq 4 \text{ kHz}$	$40/f$	1		–	–	–	–	–
3.	$4 \text{ kHz} < f \leq 1 \text{ kHz}$	10	1		–	–	–	–	–
4.	$1 \text{ kHz} < f \leq 25 \text{ kHz}$	$f/100$	1		–	–	–	–	–
5.	$25 \text{ kHz} < f \leq 100 \text{ kHz}$	$f/100$	$0,4 f$		–	–	–	–	–
6.	$100 \text{ kHz} < f \leq 10 \text{ MHz}$	$f/100$	40		0,4	10	20	–	–
7.	$10 \text{ MHz} < f \leq 110 \text{ MHz}$	–	40	100	0,4	10	20	–	–
8.	$110 \text{ MHz} < f \leq 0,3 \text{ GHz}$	–	–		0,4	10	20	–	–
9.	$0,3 \text{ GHz} < f \leq 10 \text{ GHz}$	–	–		0,4	10	20	–	10
10.	$10 \text{ GHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$	–	–		–	–	–	50	–

Uwagi:

#1) – f – częstotliwość pola elektromagnetycznego zmiennego w czasie w Hz

#2) – f – częstotliwość pola elektromagnetycznego zmiennego w czasie w kHz

a) Wartości dopuszczalne gęstości prądu (J) oznaczają wartości skuteczne gęstości prądu przepływającego przez jednostkowe pole przekroju i uśrednione w przekroju poprzecznym o powierzchni 1 cm², prostopadłym do kierunku przepływu prądu w ciele pracownika. Dla częstotliwości do 100 kHz, dopuszczalna wartość maksymalnej gęstości prądu jest 1,41 razy większa od wartości skutecznej.

Dla częstotliwości do 100 kHz i dla impulsowych pól magnetycznych o czasie trwania impulsów t_p , maksymalna gęstość prądu spowodowanego takimi warunkami ekspozycji, obliczona na podstawie czasów narastania/opadania i maksymalnej prędkości zmian indukcji magnetycznej nie powinna przekraczać dopuszczalnej wartości $J(f)$, odpowiadającej częstotliwości $f = 1/(2t_p)$.

b) Wartości dopuszczalne szybkości pochłaniania właściwego energii (SAR) oznaczają wartości uśrednione w okresie dowolnych sześciu minut. Wartości SAR_C oznaczają wartość uśrednioną względem całego ciała. Wartości dopuszczalne miejscowych wartości SAR (SAR_{GT} - miejscowa wartość w głowie i tułowie; SAR_K - miejscowa wartość w kończynach) oznaczają maksymalne wartości uśrednione odnośnie dowolnych 10 g zwartej tkanki, o niemal jednorodnych właściwościach elektrycznych (może to być tkanka o kształcie sześciangu pod warunkiem, że obliczone wielkości SAR mają wartości odpowiednio mniejsze od dopuszczalnych).

c) Wartość dopuszczalna gęstość mocy (S) oznacza gęstość mocy promieniowania padającego prostopadle do powierzchni, uśrednioną dla 20 cm² powierzchni poddanej ekspozycji i dowolnego okresu ekspozycji o czasie trwania $dt = 68/f^{1,05}$ minut (gdzie częstotliwość f w GHz). Maksymalne miejscowe gęstości mocy uśrednione dla 1 cm² nie powinny przekroczyć wartości 1000 W/m².

d) Wartość dopuszczalna wartość energii pochłoniętej w jednostce masy tkanki biologicznej, (SA) oznacza wartość uśrednioną w 10 g tkanki.

e) Wartość dopuszczalna natężenia prądu indukowanego przepływającego w kończynie eksponowanego pracownika (I_L) oznacza wartość skuteczną natężenia prądu, z dowolnego okresu sześciu minut.

f) Dopuszczalna wartość natężenia prądu kontaktowego przepływającego pomiędzy pracownikiem, a przewodzącym przedmiotem znajdującym się w polu elektromagnetycznym (I_C), oznacza wartość skuteczną natężenia prądu.

g) Ograniczenia dotyczące dopuszczalnych wartości gęstości prądu indukowanego J i szybkości pochłaniania właściwego energii SAR (SAR_C , SAR_{GT} i SAR_K) mają być spełnione równocześnie. Spełnienie ograniczeń dotyczących dopuszczalnej wartości prądu indukowanego przepływającego w kończynach I_L jest wystarczającym potwierdzeniem spełnienia ograniczeń dotyczących miejscowych wartości SAR_K .