

Jolanta Karpowicz

Patryk Zradziński

Krzysztof Gryz

MIARY NARAŻENIA ZAWODOWEGO NA ZMIENNE POLA MAGNETYCZNE MAŁEJ CZĘSTOTLIWOŚCI O NIEJEDNORODNYM ROZKŁADZIE PRZESTRZENNYM W KONTEKŚCIE ZALECEŃ MIĘDZYNARODOWYCH I NATURY ELEKTROMAGNETYCZNEGO ODDZIAŁYWANIA NA ORGANIZM

MEASURES OF OCCUPATIONAL EXPOSURE TO TIME-VARYING LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELDS
OF NON-UNIFORM SPATIAL DISTRIBUTION IN THE LIGHT OF INTERNATIONAL GUIDELINES
AND ELECTRODYNAMIC EXPOSURE EFFECTS IN THE HUMAN BODY

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy / Central Institute for Labour Protection –
National Research Institute, Warszawa, Poland

Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych / Electromagnetic Hazards Laboratory

STRESZCZENIE

Wstęp: Celem badań była analiza elektrodynamicznego oddziaływania pola magnetycznego na pracownika, z wykorzystaniem modelowania komputerowego, dla harmonizacji zasad oceny zagrożeń zawodowych z zaleceniami międzynarodowymi. **Materiał i metody:** Symulacje dotyczyły pól magnetycznych o częstotliwości 50 Hz, o różnych rozkładach przestrzennych, które odzwierciedlały warunki narażenia pracowników w przedsiębiorstwach. Wykorzystano jednorodne modele o przewodności elektrycznej $\sigma = 0,2$ S/m i wymiarach poszczególnych segmentów ciała: dłoni, głowy i tułowia, umieszczone w odległości 50 cm od źródła pola (odległość „wyciągniętej ręki”) lub 5 cm (bezpośrednio przy źródle), tworzonego przez przewody kołowe o średnicy 20 cm lub 200 cm. Miarami narażenia były parametry indukcji magnetycznej (B_i) pola oddziałującego na modele, a miarą skutków oddziaływania pola magnetycznego było natężenie pola elektrycznego indukowanego w modelach (E_{in}). **Wyniki:** Zależność E_{in}/B_i w analizowanych konfiguracjach narażenia i jego miar wynosi 2,59–479 (V/m)/T. Najsilniejszą korelację ($p < 0,001$) między B_i a E_{in} uzyskano dla parametrów charakteryzujących pola magnetyczne przy powierzchni modeli ciała. Parametry charakteryzujące wartość średnią pola oddziałującego na modele, wskazane w zaleceniach ICNIRP jako miary narażenia na pole niejednorodne, są słabiej skorelowane ze skutkami oddziaływania pola ($p < 0,005$). Względne narażenie tułowia i dłoni, E_{in} (tułowia)/ E_{in} (dłoni), ocenione na podstawie obliczeń E_{in} wynosi 3,81–4,56, natomiast ocenione na podstawie parametrów odpowiadających pomiarom B_i wynosi 3,96–9,74. **Wnioski:** Zasadne jest zezwolenie na narażenie kończyn 3,96–9,74 razy większe od tułowia. Wspiera to wymagania prawa pracy w Polsce, które dopuszczają w polu magnetycznym o częstotliwości do 800 kHz narażenie kończyn 5-krotnie silniejsze niż tułowia. Duża niepewność oceny skutków oddziaływania pól niejednorodnych, wynikająca z silnej zależności współczynników E_{in}/B_i od warunków narażenia i jego użytych miar, wymaga szczególnej uwagi przy definiowaniu dopuszczalnych poziomów pól magnetycznych i zasad oceny narażenia w środowisku pracy. Med. Pr. 2012;63(3):317–328

Słowa kluczowe: pola elektromagnetyczne, bezpieczeństwo i higiena pracy, miary narażenia, skutki narażenia, modelowanie numeryczne

ABSTRACT

Introduction: The aim of study was to analyze by computer simulations the electrodynamic effects of magnetic field (MF) on workers, to harmonize the principles of occupational hazards assessment with international guidelines. **Material and Methods:** Simulations involved 50 Hz MF of various spatial distributions, representing workers' exposure in enterprises. Homogeneous models of $\sigma = 0.2$ S/m conductivity and dimensions of body parts – palm, head and trunk – were located at 50 cm (“hand-distance”) or 5 cm (adjacent) from the source (circle conductor of 20 cm or 200 cm in diameter). Parameters of magnetic flux density (B_i) affecting the models were the exposure measures, and the induced electric field strength (E_{in}) was the measure of MF exposure effects. **Results:** The ratio E_{in}/B_i in the analyzed cases ranged from 2.59 to 479 (V/m)/T. The strongest correlation ($p < 0.001$) between B_i and E_{in} was found for parameters characterizing MF at the surface of body models. Parameters characterizing the averaged value of the field affecting models (measures of non-uniform field exposure following ICNIRP guidelines), were less correlated with exposure effects ($p < 0.005$). E_{in} (trunk)/ E_{in} (palm) estimated from E_{in} calculations was 3.81–4.56 but estimated from parameters representing B_i measurement accounted for 3.96–9.74.

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

Conclusions: It is justified to accept 3.96–9.74 times higher exposure to limb than that to trunk. This supports the regulation of labor law in Poland, which provides that the ceiling value for limb exposure to MF below 800 kHz is fivefold higher than that of the trunk. High uncertainty in assessing the effects of non-uniform fields exposure, resulting from a strong dependence of the E_{ind}/B_1 ratio on the conditions of exposure and its applied measures, requires special caution when defining the permissible MF levels and the principles of exposure assessment at workplace. *Med Pr* 2012;63(3):317–328

Key words: electromagnetic fields, occupational safety and health, exposure measures, exposure effects, numerical modeling

Adres autorów: Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, e-mail: jokar@ciop.pl
Nadesłano 29 lutego 2012, zatwierdzono 4 kwietnia 2012

WPROWADZENIE

W otoczeniu źródeł silnopiędowych pole elektromagnetyczne jest polem małej impedancji, tzn. dominuje w nim składowa magnetyczna, dlatego analizując zagrożenia dla ludzi, można pominąć ocenę skutków oddziaływania składowej elektrycznej. Omawiany rodzaj zagrożeń elektromagnetycznych występuje w środowisku pracy z różnym natężeniem przy urządzeniach i instalacjach takich, jak: zgrzewarki rezystancyjne, spawarki łukowe, skanery rezonansu magnetycznego, instalacje energetyczne, elektrolityczne, galwanizerskie i zasilania silnopiędowego urządzeń, np. elektrotermicznych. Wskutek procesów elektrodynamicznych pole magnetyczne indukuje wewnątrz znajdującego się w nim organizmu wirowe pole elektryczne, które zgodnie z prawem Ohma wywołuje w tkankach o przewodności σ przepływ prądów wirowych o gęstości:

$$J_{ind} = \sigma E_{ind} \quad [1]$$

gdzie

J_{ind} – gęstość prądu elektrycznego indukowanego w organizmie (A/m^2),

E_{ind} – natężenie pola elektrycznego indukowanego w organizmie (V/m).

Ze względu na wirowy charakter prądów indukowanych nie są dostępne techniki pomiarowe pozwalające na ich ocenę w organizmie. Zjawisko to można natomiast badać analitycznie, posługując się dwuwymiarowym modelem jednorodnej elipsy o wymiarach i przewodności elektrycznej reprezentujących organizm (1,2) bądź trójwymiarowym modelem walcowym lub elipsoidalnym (1,3,4). Również techniki symulacji numerycznych umożliwiają takie badania, zarówno z modelami dwuwymiarowymi, jak i trójwymiarowymi, o różnej złożoności i rozdzielczości przestrzennej – bryłowymi lub antropokształtnymi, jednorodnymi materiałowo

lub zróżnicowanymi i reprezentującymi budowę anatomiczną ciała (5,6).

W organizmie człowieka, który przebywa w polu magnetycznym, wskutek wspomnianego oddziaływania elektrodynamicznego zachodzą procesy biofizyczne mogące prowadzić do odpowiedzi komórek nerwowych – zarówno centralnego układu nerwowego, jak i nerwów obwodowych – takich jak: odczucie drżenia mięśni szkieletowych, wrażenia wzrokowe, tzw. magnetofosfery (7), czy relacjonowane przez pracowników zaburzenia równowagi i zawroty głowy, zaburzenia koordynacji wzrokowo-ruchowej lub odczuwanie metalicznego posmaku (8,9), a nawet zaburzenia sercowo-naczyniowe (10). Takie skutki oddziaływania pola utrudniają, a nawet uniemożliwiają wykonywanie niektórych czynności zawodowych (szczególnie wymagających precyzyjnej koordynacji wzrokowo-ruchowej), mogą też wywołać poważne wypadki przy pracy.

Wciąż nierozstrzygnięte są kontrowersje dotyczące skutków zdrowotnych przewlekłego oddziaływania pola magnetycznego, takich jak choroby nowotworowe (grupa 2B czynników możliwie kancerogennych dla ludzi według Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem – International Agency for Research on Cancer, IARC) czy neurodegeneracyjne – zwłaszcza stwardnienie zanikowe boczne (amyotrophic lateral sclerosis – ALS) i choroba Alzheimera (10–15). Wyniki badań naukowych nie dają więc na razie podstaw do przyjęcia, że nie ma zagrożeń zdrowia dla pracowników przewlekle narażonych zawodowo, szczególnie na silne i złożone pola magnetyczne.

Zasady oceny narażenia pracowników na pole magnetyczne

W międzynarodowych zaleceniach dotyczących ochrony przed nadmiernym narażeniem na pola magnetyczne o częstotliwości nieprzekraczającej kilkuset kiloherców (tj. pól małych i średnich częstotliwości) jako minimalne wymagania przyjęto takie chwilowe narażenie,

w którym pracownikowi nie zagraża pobudzenie tkanki nerwowej i mięśniowej wskutek omówionego oddziaływania elektrodynamicznego (1,16). Ochrona przed zagrożeniem zdrowia wskutek narażenia przewlekłego nie znalazła się wśród podstaw tych minimalnych wymagań. Ochronę taką odzwierciedlają jednak uzupełniające zalecenia dotyczące podejmowania niskokosztowych działań, które ograniczają narażenie niekonieczne, wprowadzone w wielu państwach oraz w opracowaniach Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) (13).

Zalecenia ICNIRP'1998

Obecnie stosowane w Polsce zasady oceny narażenia na pola magnetyczne małych i średnich częstotliwości opracowano na przełomie XX i XXI wieku, odnosząc się do zaleceń Międzynarodowej Komisji ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP) (1). Zalecenia te podają tzw. ograniczenia podstawowe (basic restrictions – BR), dotyczące dopuszczalnych skutków oddziaływania elektrodynamicznego wewnątrz ciała pracownika i wyrażone są jako gęstość prądu indukowanego (J_{ind}) w głowie i tułowie (tab. 1). Ponadto do wykorzystania przy rutynowej

kontroli narażeń na stanowisku pracy podano wartości tzw. poziomów odniesienia (reference levels – RL), wyrażonych jako indukcja magnetyczna (B) pola oddziałującego na pracowników*. Jako model do wyznaczenia 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. 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. W zaleceniach nie podano zasad takiej oceny pola niejednorodnego.

* Alternatywną miarą narażenia na pole magnetyczne jest natężenie pola magnetycznego (H). W niniejszej pracy dokonano analizy zagrożeń, odnosząc się tylko do indukcji magnetycznej. Zasady wykorzystania obu miar pola magnetycznego podaje PN-T-06580:2002.

Tabela 1. Ograniczenia dotyczące narażenia pracowników na pola magnetyczne o częstotliwości 50 Hz
Table 1. Limits regarding workers exposure to magnetic field of 50 Hz frequency

Zalecenia lub wymagania Guidelines or provisions	Ograniczenia podstawowe Basic restrictions (rms)	Poziomy odniesienia Reference levels (rms)	Uwagi Notes
ICNIRP, 1998 (1)	gęstość prądu w głowie i tułowie / current density in head and trunk: $J_{ind} = 10 \text{ mA/m}^2$	500 μT	pole o jednorodnym rozkładzie przestrzennym / field of uniform spatial distribution
ICNIRP, 2010 (16)	indukowane pole elektryczne / induced electric field strength: – tkanki centralnego układu nerwowego w głowie / central nervous system tissue of the head, – $E_{ind} = 0,1 \text{ V/m}$, – wszystkie tkanki głowy i ciała / all tissues of the head and body, – $E_{ind} = 0,8 \text{ V/m}$	1000 μT	pole o jednorodnym rozkładzie przestrzennym / field of uniform spatial distribution
Minister Pracy i Polityki Społecznej RP, 2002 / Minister of Labor and Social Policy Poland, 2002 (17)	zgodnie z pkt 3.2.2 normy PN-T-06580:2002 możliwe wykorzystanie BR ICNIRP / according to point 3.2.2 of standard PN-T-06580:2002 possible use of ICNIRP's BR	granica narażenia zabronionego / the limit of prohibited exposure: – całe ciało / whole body – 2500 μT – kończyny / limbs – 12 500 μT	pole o dowolnym rozkładzie przestrzennym / field of any spatial distribution

rms – wartość skuteczna / root mean square value.

ICNIRP – Międzynarodowa Komisja Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.

Zalecenia ICNIRP'2010

W roku 2010 opublikowano nowe zalecenia ICNIRP zmieniające zasady oceny pól elektromagnetycznych o częstotliwości 1 Hz–10 MHz (16), które definiują nowe wartości BR dotyczące ochrony przed takimi skutkami oddziaływania pola, jak pobudzenie centralnego i obwodowego układu nerwowego, wywołanie magnetofosfenów (pobudzenie siatkówki) i zakłócenia funkcjonowania mózgu. Przygotowano je, wykorzystując wyniki badań biomedycznych z użyciem dokładniejszych modeli ciała człowieka (5).

Do wyrażenia BR przyjęto nową miarę skutków oddziaływania elektrodynamicznego pola na organizm człowieka – natężenie pola elektrycznego indukowanego w tkance (E_{ind}), bez uśredniania w czasie, ale „uśredniane w tkance o objętości $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ antropomorficznego modelu numerycznego” (16). Rozróznięto dwa poziomy BR – dotyczące narażenia tkanek centralnego układu nerwowego głowy oraz wszystkich tkanek głowy i całego ciała (tab. 1). Stosując modelowanie numeryczne, określono wartości RL odpowiadające łącznie obu wartościom BR. Podano również, że zależność $K = E_{ind}/B$ odpowiada oddziaływaniu pola niezakłóconego, niemal jednorodnego w obszarze ciała człowieka, przy maksymalnym sprzężeniu pola z ciałem człowieka, przy uwzględnieniu zależności częstotliwościowych tego sprzężenia i niepewności wyników obliczeń.

Podobnie jak w zaleceniach z 1998 r. w nowych zaleceniach ICNIRP nie wyspecyfikowano zasad oceny narażenia na pola niejednorodne przestrzennie (np. w małych odległościach od źródła pola) – kiedy należy uśredniać natężenie pola w objętości ciała, a uśrednione natężenie pola nie powinno przekraczać wartości dopuszczalnych RL. Podano natomiast, że przy narażeniu miejscowym poszczególnych części ciała (np. kończyn) może wystąpić przekroczenie wartości RL, ale nie mogą być przekroczone wartości BR. Zasady oceny narażenia na niejednorodne pola i ich uśredniania przestrzennego powinny być zgodnie z zaleceniami ICNIRP przedmiotem prac organizacji normalizacyjnych – których wyniku dotychczas nie opublikowano.

Przepisy polskie – NDN pól elektromagnetycznych i PN-T-06580:2002

W Polsce zasady oceny narażenia pracowników na pola elektromagnetyczne o częstotliwości 0–300 GHz definiują przepisy bezpieczeństwa i higieny pracy, określające graniczne natężenia pola magnetycznego dla tzw. stref ochronnych (17). Poziom narażenia zabronionego (tj. granica między strefą zagrożenia a niebez-

pieczną – tab. 1) dla pól o częstotliwości przekraczającej 50 Hz został ustalony w 1999 roku tak, aby zapewnić spełnienie wymagań dotyczących BR zgodnie z zaleceniami ICNIRP'1998 (18). Podobnie jak RL w zaleceniach ICNIRP'1998 i ICNIRP'2010 wartości graniczne stref ochronnych dotyczą pola pierwotnego (niezakłócanego obecnością pracownika). W polach magnetycznych o częstotliwości nieprzekraczającej 800 kHz dopuszczalne jest narażenie kończyn 5 razy silniejsze od narażenia tułowia i głowy. W takim przypadku przeprowadza się oddzielną ocenę narażenia kończyn oraz głowy i tułowia pracownika.

Przy narażeniu na pola stref ochronnych zgodnie z pkt 3.2.2 normy PN-T-06580-3:2002: „Jeżeli obsługa urządzenia wymaga dotykania przez ciało pracownika elementów, które są pierwotnym albo wtórnym źródłem pola elektrycznego lub magnetycznego, w strefie zagrożenia lub niebezpiecznej, to pomiary natężeń tych pól nie mogą być jedynym kryterium oceny ekspozycji. Wymagana jest dodatkowa ocena na podstawie udokumentowanych wyników badań, obliczeń lub ekspertyz, uwzględniających takie warunki ekspozycji”. Omówione BR określone zaleceniami międzynarodowymi mogą być wykorzystane przy takiej ocenie, podobnie jak przy stosowaniu wymienionych zaleceń ICNIRP.

CEL BADAŃ

Celem prezentowanych badań była analiza elektrodynamicznych skutków oddziaływania pola magnetycznego małej częstotliwości o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym, z wykorzystaniem technik modelowania komputerowego, dla doskonalenia zasad oceny zagrożeń zawodowych. W szczególności wykonano analizę miar charakteryzujących warunki narażenia na niejednorodne pole magnetyczne i stopnia ich skorelowania ze skutkami elektrodynamicznego oddziaływania pola (w celu harmonizacji techniki oceny narażenia z zaleceniami międzynarodowymi dotyczącymi ochrony przed oddziaływaniem pól elektromagnetycznych na pracowników) oraz analizę stopnia zgodności krajowych wymagań bezpieczeństwa i higieny pracy z tymi zaleceniami.

MATERIAŁ I METODY

Wykonane symulacje numeryczne dotyczyły elektrodynamicznych skutków oddziaływania na organizm człowieka pól magnetycznych o różnych rozkładach przestrzennych. Odzwierciedlały one warunki narażenia pracowników, jakie występują w wielu przedsiębior-

stwach (tj. parametry pola magnetycznego na stanowisku pracy, reprezentowane przez indukcję magnetyczną B), oraz skutki elektrodynamicznego oddziaływania na ludzi ocenianego pola magnetycznego (tj. parametry indukowanego w organizmie pola elektrycznego, reprezentowane przez natężenie pola elektrycznego E_{in}).

Modele

Ze względu na konieczność systematycznej oceny zależności miar narażenia (B) i skutków oddziaływania (E_{in}) pól o różnych rozkładach przestrzennych w symulacjach wykorzystano rodzinę uproszczonych modeli różnych scenariuszy narażenia. Wykorzystano jednorodne modele odpowiadające wymiarom antropometrycznym poszczególnych segmentów ciała człowieka:

- model dłoni (oznaczony jako model D) – graniastopłup o wysokości 5 cm i podstawie w kształcie elipsy, o wymiarach 10×20 cm, odpowiadający obrysowi dłoni (bez kciuka) 50-centylowego modelu mężczyzny (20);
- model głowy (oznaczony jako model G) – sferoida o wymiarach 18×25 cm, odpowiadająca wymiarom głowy 50-centylowego modelu mężczyzny (20);
- model tułowia (oznaczony jako model T) – walec o wysokości 60 cm i średnicy 30 cm, odpowiadający znormalizowanemu tułowiowi ciała człowieka (21).

W modelach przyjęto przewodność elektryczną $\sigma = 0,2$ S/m, odpowiadającą uśrednionym parametrom, powszechnie stosowanym do jednorodnych modeli ciała człowieka przy częstotliwości 50 Hz (1).

Przygotowano modele 2 źródeł pola magnetycznego o częstotliwości 50 Hz, którymi były pojedyncze zwoje kołowe o różnych wymiarach, z przepływającym w nich prądem o ustalonym natężeniu:

- średnicy 200 cm (oznaczony jako model DP) – źródło pola dużych wymiarów reprezentujące narażenie np. przy rozłożonych swobodnie kablach spawalniczych;
- średnicy 20 cm (oznaczony jako model MP) – źródło pola małych wymiarów reprezentujące narażenie np. przy wzbudniku nagrzewnicy indukcyjnej lub małym zwoju kabli spawalniczych.

Analizowane scenariusze narażenia obejmowały: modele segmentów ciała (D, G lub T), umieszczone w odległości 5 cm lub 50 cm od jednego z modeli źródła pola (DP lub MP), przy położeniu modeli w płaszczyźnie źródła pola osiowo równoległe do promienia źródła, tj. kiedy pole magnetyczne jest spolaryzowane niemal prostopadle do największego przekroju modeli. Odległość 50 cm odpowiada sytuacji, w której pracownik znajduje się w odległości „wyciągniętej ręki” od źródła pola, a odległość 5 cm – sytuacji, w której pracownik

znajduje się bezpośrednio przy źródle (ze względu na skończoną rozdzielczość modeli numerycznych zamodelowanie mniejszej odległości między źródłem pola a ciałem pracownika wprowadziłoby znaczne błędy numeryczne wyników symulacji).

Metodyka symulacji numerycznych

Symulacje numeryczne rozkładu przestrzennego oraz miar pola elektrycznego i indukcji magnetycznej, które występują przy poszczególnych źródłach pola, oraz miar skutków oddziaływania tego pola elektromagnetycznego, reprezentowanych przez pole elektryczne indukowane w modelach poszczególnych segmentów ciała, wykonano z zastosowaniem CST STUDIO SUITE 2010/opcja Magnetoquasistatic (MQS) (prod. CST, Niemcy). Jest to specjalistyczne oprogramowanie do analizy pola elektromagnetycznego, oparte na technice całek brzegowych (Finite Integration Technique – FIT). Analiza pola elektromagnetycznego tą techniką wymaga bardzo czasochłonnego rozwiązywania równania, które dotyczy rozpatrywanego obszaru:

$$\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \vec{E}) + i\omega\sigma\vec{E} - \omega^2\epsilon\vec{E} = i\omega\vec{J} \quad [2]$$

gdzie:

∇ – wektorowy operator różniczkowy Nabla,

μ – względna przenikalność magnetyczna,

E – natężenie pola elektrycznego,

i – jednostka urojona,

ω – pulsacja,

σ – przewodność elektryczna,

ϵ – względna przenikalność elektryczna,

J – gęstość prądu źródła pola magnetycznego.

W celu znacznego skrócenia czasu symulacji numerycznych zastosowano metodę skalowania częstotliwości, dopuszczoną do oceny elektromagnetycznych zagrożeń zawodowych zapisami normy PN-EN 50413:2009 (4).

Symulacje numeryczne wykonano przy użyciu specjalistycznej jednostki obliczeniowej (procesor Intel Core i7 / 3,2 GHz; pamięć RAM 12 GB; karta graficzna nvidia GeForce 295/1792 MB RAM wspomagająca procesor), która pozwala na symulacje przy 5-milimetrowej rozdzielczości modeli segmentów ciała człowieka (ok. 3,5–8 mln voxelów/model). Dla takiej konfiguracji czas obliczeń modeli wynosił ok. 10–90 godz., mimo wykorzystania metody skalowania częstotliwości do 5 MHz. Obliczenia testowe z modelem tułowia przy częstotliwości 500 kHz trwały ok. 220 godz. (ok. 10 dni).

Miarami narażenia wyznaczonymi na podstawie wyników symulacji numerycznych były w analizowanych scenariuszach następujące parametry pola magnetycznego oddziałującego na modele – indukcja magnetyczna (B_i) (ryc. 1):

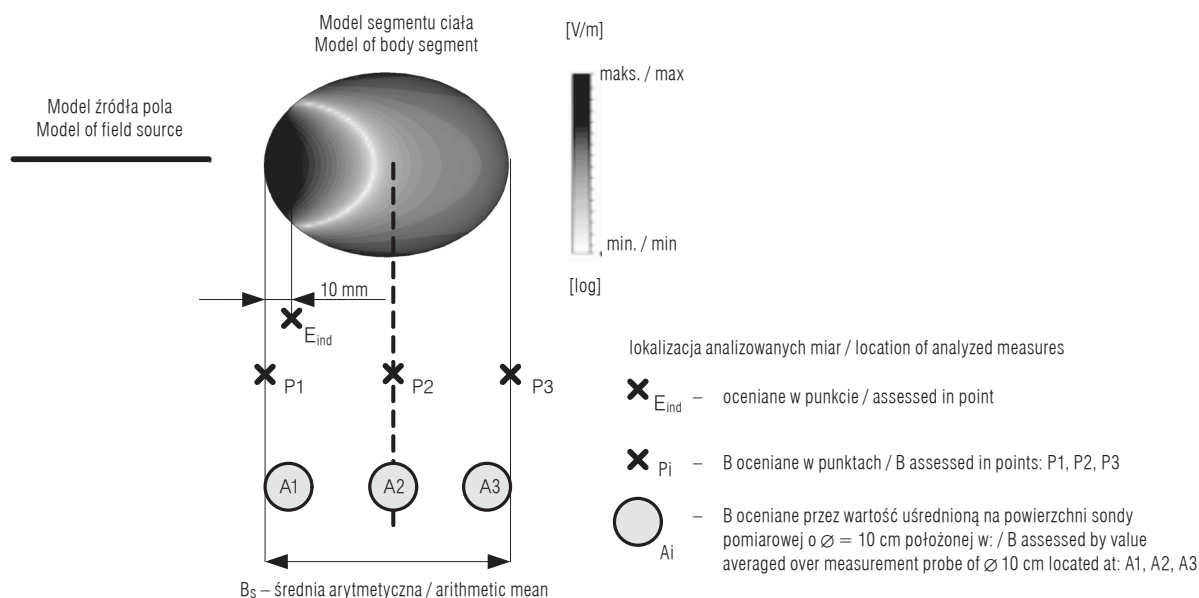
- indukcja pola magnetycznego wyznaczona w punktach na głównej osi modeli: na powierzchni najbliższej źródła pola (B_{P1}), w środku (B_{P2}) i na powierzchni najdalej od źródła pola (B_{P3}) oraz indukcja pola magnetycznego uśredniona w osi modeli (średnia arytmetyczna B_{P1} i B_{P3} oznaczona B_{P1-3}) – miary te można ocenić na podstawie wyników symulacji numerycznych lub pomiarów pola pierwotnego sondą hallotronową, stosowaną w przypadku pola magnetycznego małych częstotliwości lub magnetostatycznego;
- indukcja pola magnetycznego uśredniona na powierzchni pomiarowej odpowiadającej antenie ramowej o średnicy 10 cm, przy położeniu 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 indukcja pola magnetycznego uśredniona w osi modeli (średnia arytmetyczna B_{A1} i B_{A3} oznaczona B_{A1-3}) – miary te można ocenić na podstawie wyników symulacji numerycznych lub pomiarów

pola pierwotnego, tj. niezakłóconego obecnością pracownika w czasie pomiarów, wykonanych sondą z anteną ramową, która jest stosowana w przypadku pola magnetycznego małych i średnich częstotliwości;

- indukcja pola magnetycznego obliczona jako średnia arytmetyczna z rozkładu indukcji magnetycznej w osi modeli (B_s) – wprawdzie dokładnie miarę tę można oceniać jedynie na podstawie wyników symulacji numerycznych, jednak może być ona stosunkowo łatwo oszacowana jako średnia arytmetyczna z wyników serii pomiarów wykonanych w osi modeli (opisaną miarę wartości średniej pola oddziałującego na modele wybrano ze względu na możliwość stosunkowo łatwego jej oszacowania na podstawie pomiarów).

Miarą elektrodynamicznych skutków oddziaływania pola magnetycznego, wyznaczoną na podstawie wyników symulacji numerycznych, było w analizowanych scenariuszach natężenie pola elektrycznego indukowanego w modelach poszczególnych segmentów ciała (E_{in}) (ryc. 1). Cytowane przez ICNIRP'2010 badania Dimbyłowa (5) wskazują, że jeśli miarą skutków narażenia jest wartość 99-centylowa** rozkładu

** Wartość 99-centylowa to wartość po odrzuceniu 1% największych wyników z analizowanego zbioru danych.



Ryc. 1. Schemat geometrii analizowanych scenariuszy narażenia – przekrój w płaszczyźnie prostopadłej do źródła pola magnetycznego z prezentacją rozkładu natężenia pola elektrycznego, zaindukowanego w modelu G (tj. modelu głowy) przez pole magnetyczne źródła MP (tj. źródła o $\varnothing = 20$ cm) oraz schemat lokalizacji poszczególnych miar narażenia
Fig. 1. The scheme of geometry of analyzed exposure scenarios – cross section perpendicular to the magnetic field source, including representation of the distribution of the strength of electric field induced in the G model (model of head) by magnetic field of MP source (model of $\varnothing 20$ cm) and the scheme of location of particular measures of exposure

wyników symulacji E_{in} , pozwala to wyeliminować błędy numeryczne, które występują na granicy modelowanych struktur (wskutek m.in. braku reprezentacji skóry w modelach i spowodowanych tym większych różnic przenikalności elektrycznej na granicy powietrza i modeli, niż mające miejsce w rzeczywistości na powierzchni ciała człowieka). Przy rozdzielczości przestrzennej wykonanych symulacji jako miarę skutków narażenia na pole magnetyczne przyjęto wartości E_{in} w modelach poszczególnych segmentów ciała, które występują w punktach zlokalizowanych w płaszczyźnie przewodników w odległości 10 mm od krawędzi modeli najbliższej źródła pola magnetycznego (w modelu tułowia jest to wartość 98-centylowa, zbliżona do wartości 99-centylowej zalecanej przez Dimbyłowa).

Analiza statystyczna

Do analizy statystycznej korelacji poszczególnych miar narażenia na pole magnetyczne i natężenia indukowanego w modelach pola elektrycznego wykorzystano test nieparametryczny Spearmana i oprogramowanie Statistica 9.0 PL. Istotność statystyczną oceniono na poziomie $p < 0,01$, $p < 0,005$ oraz $p < 0,001$.

WYNIKI BADAŃ

W poszczególnych analizowanych scenariuszach narażenia modele segmentów ciała znajdują się w polach magnetycznych o znacznie różniącym się rozkładzie przestrzennym. Miarą charakteryzującą niejednorodność pola, które oddziałuje na modele, może być iloraz największej wartości indukcji pola magnetycznego oddziałującego na modele (B_{p1}) do wartości najmniejszej (B_{p3}): $RBP = B_{p1}/B_{p3}$. Wskaźnik tak zdefiniowany ma wartość 1 w przypadku narażenia na pole jednorodne. W analizowanych scenariuszach narażenia wskaźnik RBP wynosił 1,55–201 (tab. 2). W związku z tak znacznym zróżnicowaniem warunków narażenia w poszczególnych scenariuszach również skutki elektrodynamicznego oddziaływania pola magnetycznego są rozłożone różnie i niesymetrycznie w poszczególnych scenariuszach – wskaźnik RE_{in} dotyczący rozkładu E_{in} w punktach oznaczonych 1 i 3 na ryc. 1., zdefiniowany analogicznie do wskaźnika RBP, wynosi 1,31–51,7 (tab. 2). Kolejną miarą niejednorodności narażenia w poszczególnych przypadkach jest iloraz największej i uśrednionej wartości indukcji magnetycznej w poszczególnych przypadkach: $RB = B_{p1}/B_s$, który wynosi 1,25–11,2.

Tabela 2. Miary charakteryzujące stopień niejednorodności narażenia na pole magnetyczne poszczególnych modeli w rozpatrywanych scenariuszach narażenia

Table 2. Measures representing non-uniformity of magnetic field exposure of particular models in analyzed exposure scenarios

Modele segmentów ciała Body section models	Scenariusze narażenia – odległość modeli ciała od źródła pola Exposure scenarios – distance between models and field source											
	5 cm						50 cm					
	MP		DP		MP		DP		MP		DP	
miary niejednorodności narażenia measures of exposure non-uniformity												
	RB	RBP	RE_{in}	RB	RBP	RE_{in}	RB	RBP	RE_{in}	RB	RBP	RE_{in}
D	4,39	21,6	6,33	2,63	5,97	2,86	1,44	2,04	1,55	1,25	1,55	1,31
G	5,47	31,1	7,56	2,91	7,20	3,23	1,57	2,35	1,76	1,29	1,65	1,47
T	11,2	201	51,7	5,57	21,7	9,20	2,62	5,99	3,82	1,77	2,91	2,30

D – dłoń / palm, G – głowa / head, T – tułów / trunk.

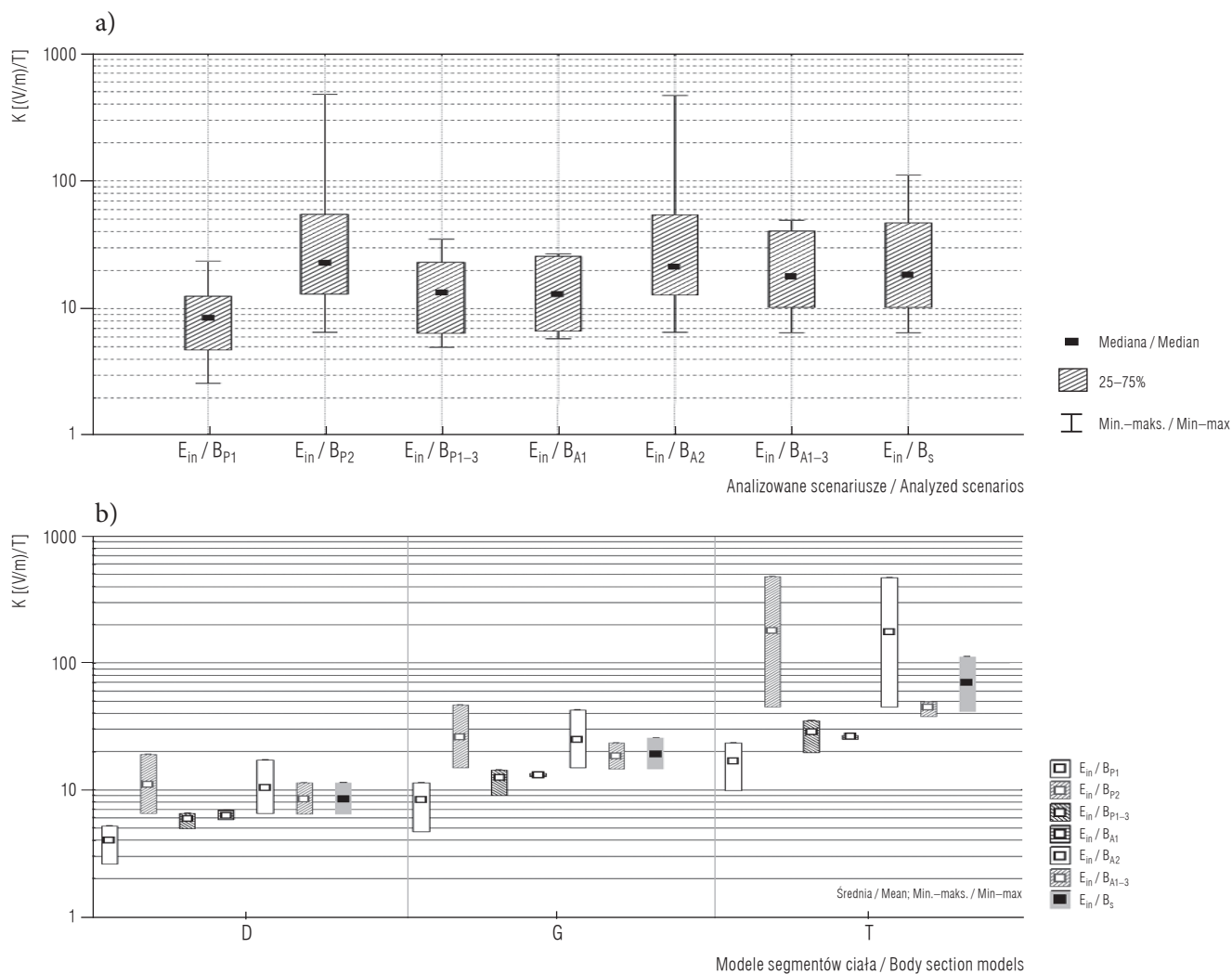
MP – model kołowego źródła pola o $\varnothing = 20$ cm / the model of circle field source $\varnothing = 20$ cm; DP – model kołowego źródła pola o $\varnothing = 200$ cm / the model of circle field source $\varnothing = 200$ cm. Miary niejednorodności narażenia na pole magnetyczne / Measures representing non-uniformity of magnetic field exposure: $RB = B_{p1}/B_s$, $RBP = B_{p1}/B_{p3}$, $RE_{in} = E_{in}(1)/E_{in}(3)$:

- B_{p1} i B_{p3} – indukcja pola magnetycznego w punktach na powierzchni modeli; B_{p1-3} – średnia arytmetyczna B_{p1} i B_{p3} (patrz ryc. 1) / B_{p1} and B_{p3} – magnetic flux density in points located at the surface of the models; B_{p1-3} – arithmetic mean of B_{p1} and B_{p3} (see Fig. 1);
- B_s – średnia arytmetyczna obliczona z rozkładu indukcji magnetycznej w osi modeli (patrz ryc. 1) / B_s – arithmetic mean calculated from distribution of magnetic flux density in the axe of models (see Fig. 1);
- $E_{in}(1)$ i $E_{in}(3)$ – natężenie pola elektrycznego indukowanego przy skrajnych powierzchniach modeli (patrz ryc. 1) / $E_{in}(1)$ and $E_{in}(3)$ – electric field strength induced by extreme surfaces of models (see Fig. 1).

Do kluczowych zadań metodyki oceny narażeń na pola magnetyczne, które występują na stanowisku pracy, należy ustalenie stopnia skorelowania poszczególnych miar narażenia na pole magnetyczne (w niniejszej pracy są to omówione parametry B_i ; B_{P1} , B_{Ai} , B_S) ze skutkami elektrodynamycznymi występującymi w organizmie (E_{in}). Wartości wskaźnika $K = E_{in}/B_i$, dla

poszczególnych scenariuszy narażenia oraz poszczególnych miar narażenia scharakteryzowano na rycinie 2. i w tabeli 3.

Istotne znaczenie praktyczne ma również względna relacja skutków oddziaływania elektrodynamicznego pola magnetycznego na poszczególne części ciała, która wynika z ich różnych wymiarów (tab. 4).



D - dłoń / palm, G - głowa / head, T - tułów / trunk.

B_{P1} i B_{P3} - indukcja pola magnetycznego w punktach na powierzchni modeli / magnetic flux density in points located at the surface of the models; B_{P2} - indukcja pola magnetycznego w środku modeli / magnetic flux density in the centre of models; B_{P1-3} - średnia arytmetyczna B_{P1} i B_{P3} (patrz ryc. 1) / arithmetic mean of B_{P1} and B_{P3} (see Fig. 1).

B_{A1} i B_{A3} - indukcja pola magnetycznego uśredniona na powierzchni anteny pomiarowej położonej przy powierzchni modeli / magnetic flux density averaged over the surface of measurement antenna located by models' surface; B_{A2} - indukcja pola magnetycznego uśredniona na powierzchni anteny pomiarowej położonej w środku modeli / magnetic flux density averaged over the surface of measurement antenna located in the centre of models; B_{A1-3} - średnia arytmetyczna B_{A1} i B_{A3} (patrz ryc. 1) / arithmetic mean of B_{A1} and B_{A3} (see Fig. 1). B_S - średnia arytmetyczna obliczona z rozkładu indukcji magnetycznej w osi modeli (patrz ryc. 1) / B_S - arithmetic mean calculated from distribution of magnetic flux density in the axe of models (see Fig. 1).

E_{in} - natężenie indukowanego pola elektrycznego, występującego w odległości 10 mm od powierzchni modeli, która jest najbliżej źródła pola (patrz ryc. 1) / E_{in} - induced electric field strength, located 10 mm from the surface of models which is the nearest to the field source (see Fig. 1).

Ryc. 2. Zależność indukowanego pola elektrycznego od warunków narażenia na pole magnetyczne w poszczególnych scenariuszach modelowanych numerycznie - $K = E_{in}/B_i$: a) dla wszystkich 12 analizowanych scenariuszy; b) z rozróżnieniem modeli segmentów ciała wykorzystanych w poszczególnych scenariuszach

Fig. 2. The ratio of the induced electric field and magnetic field measures in particular numerical scenarios - $K = E_{in}/B_i$: a) in all 12 analyzed scenarios; b) divided into groups of scenarios with the same body segments scenarios

Tabela 3. Współczynnik $K = E_{in}/B_i$ dla różnych miar B_i charakteryzujących warunki narażenia na pole magnetyczne w analizowanych scenariuszach narażenia
Table 3. The ratio $K = E_{in}/B_i$ for various measures B_i representing conditions of exposure to magnetic field in the analyzed exposure scenarios

Miary B_i B_i measures	Współczynnik $K = E_{in}/B_i$ The ratio $K = E_{in}/B_i$ [(V/m)/T]			
	wszystkie scenariusze all scenarios		min.–maks. min–max	
	min.–maks. / średnia min–max / mean	współczynnik korelacji r-Spearmana / Spearman's correlation coefficient p	MP / DP	odległość modeli ciała od źródła pola distance between models and field source 5 cm / 50 cm
B_{P1}	2,59–23,5 / 9,70	0,958*	2,59–19,9 / 3,43–23,5	2,59–13,8 / 4,85–23,5
B_{P2}	6,56–479,0 / 72,3	0,805***	7,21–479,0 / 6,56–131,0	11,10–479,0 / 6,56–63,3
B_{P1-3}	4,96–34,9 / 15,7	0,905**	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*	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***	7,15–461 / 6,53–130,0	10,70–467 / 6,53–62,9
B_{A1-3}	6,46–49,3 / 23,8	0,912*	6,96–49,3 / 6,46–48,1	9,04–49,3 / 6,46–43,0
B_S	6,46–111,0 / 32,7	0,879**	6,96–110,0 / 6,46–76,8	9,04–111,0 / 6,46–22,9

* $p < 0,001$, ** $p < 0,005$, *** $p < 0,01$.

B_{P1} i B_{P3} – indukcja pola magnetycznego w punktach na powierzchni modeli / magnetic flux density in points located at the surface of the models; B_{P2} – indukcja pola magnetycznego w środku modeli / magnetic flux density in the centre of models; B_{P1-3} – średnia arytmetyczna B_{P1} i B_{P3} (patrz ryc. 1) / arithmetic mean of B_{P1} and B_{P3} (see Fig. 1).

B_{A1} i B_{A3} – indukcja pola magnetycznego uśredniona na powierzchni anteny pomiarowej położonej przy powierzchni modeli / magnetic flux density averaged over the surface of measurement antenna located by models' surface; B_{A2} – indukcja pola magnetycznego uśredniona na powierzchni anteny pomiarowej położonej w środku modeli / magnetic flux density averaged over the surface of measurement antenna located in the centre of models; B_{A1-3} – średnia arytmetyczna B_{A1} i B_{A3} (patrz ryc. 1) / arithmetic mean of B_{A1} and B_{A3} (see Fig. 1).

B_S – średnia arytmetyczna obliczona z rozkładu indukcji magnetycznej w osi modeli (patrz ryc. 1) / B_S – arithmetic mean calculated from distribution of magnetic flux density in the axe of models (see Fig. 1).

E_{in} – natężenie indukowanego pola elektrycznego, występującego w odległości 10 mm od powierzchni modeli, która jest najbliższej źródła pola (patrz ryc. 1) / E_{in} – induced electric field strength, located 10 mm from the surface of models which is the nearest to the field source (see Fig. 1).

Inne objaśnienia jak w tabeli 2 / Other abbreviations as in Table 2.

Tabela 4. Względne skutki oddziaływania elektrodynamicznego pola magnetycznego w modelach poszczególnych segmentów ciała
Table 4. Relative electrodynamic effects of magnetic field exposure in particular models of body sections

Analizowane zależności różnych miar zagrożenia Analyzed relations between various exposure measures	Scenariusze narażenia – odległość modeli ciała od źródła pola Exposure scenarios – distance between models and field source			
	5 cm		50 cm	
	MP	DP	MP	DP
T/D				
$E_{in}(T)/E_{in}(D)$	3,81	4,02	4,10	4,56
$[E_{in}/(B_{P1-3})(T)]/[E_{in}/(B_{P1-3})(D)]$	3,96	4,49	5,23	5,57
$[E_{in}/(B_{A1-3})(T)]/[E_{in}/(B_{A1-3})(D)]$	4,33	5,31	6,18	5,87
$[E_{in}/(B_S)(T)]/[E_{in}/(B_S)(D)]$	9,74	8,49	7,48	6,43
G/D				
$E_{in}(G)/E_{in}(D)$	1,80	2,06	2,10	2,21
$[E_{in}/(B_{P1-3})(G)]/[E_{in}/(B_{P1-3})(D)]$	1,82	2,11	2,20	2,25
$[E_{in}/(B_{A1-3})(G)]/[E_{in}/(B_{A1-3})(D)]$	2,06	2,18	2,28	2,25
$[E_{in}/(B_S)(G)]/[E_{in}/(B_S)(D)]$	2,24	2,28	2,30	2,26

Objaśnienia jak w tabeli 2 i 3 / Abbreviations as in Table 2 and 3.

OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Prezentowane dane odnoszą się do ustawienia modeli ciała, które odpowiada najgorszemu przypadkowi narażenia, tj. kiedy wektor pola magnetycznego jest prostopadły do największego przekroju modeli ułożonych w płaszczyźnie źródeł pola magnetycznego. W badaniu wybrano ułożenie dłuższej osi modeli segmentów ciała wzdłuż promienia źródeł pola, tj. kiedy rozkład pola jest najbardziej niejednorodny w modelach. Przy innych polaryzacjach pola, które pada na model, natężenie pola elektrycznego indukowanego w obiektach jest mniejsze, a narażenie jest bardziej jednorodne.

Walidacja uzyskanych wyników natężenia indukowanego pola elektrycznego poprzez porównanie z wynikami symulacji uzyskanych przez innych autorów daje pozytywny wynik. Przykładowo w badaniach przeprowadzonych przez Dimbylowa (5) – które dotyczyły 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) uzyskano 99-centylową wartość natężenia indukowanego pola elektrycznego równą 23 (V/m)/T. W wynikach prezentowanych badań modelowych dla przypadku najbardziej jednorodnego pola magnetycznego (źródło pola magnetycznego DP w odległości 50 cm od modeli segmentów ciała ludzkiego) w walcowym modelu tułowia (o przewodności elektrycznej 0,2 S/m) uzyskano zbliżoną, 99-centylową wartość natężenia indukowanego pola elektrycznego równą 23,7 (V/m)/T. Potwierdza to zasadność wykorzystania prezentowanych wyników przy ocenie zagrożeń zawodowych.

Ze względu na liniową zależność natężenia pola elektrycznego indukowanego w ciele od częstotliwości wywołującego go pola magnetycznego zaprezentowane wyniki symulacji, które dotyczą częstotliwości 50 Hz, można liniowo skalować do wykorzystania przy ocenie narażeń na pola o innych częstotliwościach z pasma do 5 MHz (23).

Stosunek skutków narażenia do miar narażenia, E_{in}/B_i w analizowanych konfiguracjach narażenia i jego różnych miar wynosi 2,59–479 (V/m)/T, co wskazuje na możliwość stanowienia różnych poziomów dopuszczalnego narażenia pracownika na pole magnetyczne, kiedy występuje narażenie o różnych rozkładach przestrzennych. Prezentowane w tabeli 4. zależności skutków narażenia głowy, tułowia i dłoni, wynikające bezpośrednio z obliczeń natężenia indukowanego pola elektrycznego, wskazują, że $E_{in}(T)/E_{in}(D)$ wy-

nosi 3,81–4,56, natomiast $E_{in}(G)/E_{in}(D)$ – 1,80–2,21. Zależności te mają jednak małe znaczenie praktyczne, ponieważ zarówno organy kontroli sanitarnej, jak i specjaliści bezpieczeństwa i higieny pracy podczas obowiązkowej oceny warunków narażenia na pole magnetyczne na stanowiskach pracy z reguły dysponują jedynie wynikami pomiarów pola magnetycznego oddziałującego na pracowników.

Kiedy skutki narażenia na pole magnetyczne różnych części ciała oceniane są na podstawie pomiarów, należy uwzględnić, że relacja odzwierciedlająca skutki narażenia w poszczególnych częściach ciała jest funkcją nie tylko warunków narażenia, ale również miar pola magnetycznego użytych do oceny tego narażenia. W związku z tym nieco inne zależności uzyskano, kiedy uwzględniono przypadek wniosku o poziomie narażenia na pole magnetyczne na podstawie pomiarów poszczególnych miar narażenia B_i , które odzwierciedlają uśrednione pole magnetyczne:

- $[E_{in}/(B_{P1-3})(T)]/[E_{in}/(B_{P1-3})(D)]: 3,96-5,57,$
a $[E_{in}/(B_{P1-3})(G)]/[E_{in}/(B_{P1-3})(D)]: 1,82-2,25;$
- $[E_{in}/(B_{A1-3})(T)]/[E_{in}/(B_{A1-3})(D)]: 4,33-6,18,$
a $[E_{in}/(B_{A1-3})(G)]/[E_{in}/(B_{A1-3})(D)]: 2,06-2,28;$
- $[E_{in}/(B_S)(T)]/[E_{in}/(B_S)(D)]: 6,43-9,74,$
a $[E_{in}/(B_S)(G)]/[E_{in}/(B_S)(D)]: 2,24-2,30.$

Przeprowadzona analiza zależności miar narażenia B_i i skutków oddziaływania pola E_{in} wykazała również, że najsilniejsza korelacja ($p < 0,001$) występuje dla parametrów, które charakteryzują pola magnetyczne przy powierzchni modeli segmentów ciała (B_{P1} i B_{A1}). Parametry charakteryzujące wartość średnią pola oddziałującego na modele (B_{P1-3} , B_{A1-3} , B_S) – wskazane w zaleceniach ICNIRP (16) jako miary narażenia na pole niejednorodne – są słabiej skorelowane ze skutkami oddziaływania pola ($p < 0,005$). Przy słabszym poziomie istotności ($p < 0,01$) również parametry odnoszące się do pola magnetycznego w środku modeli są skorelowane ze skutkami narażenia.

WNIOSKI

Uzyskane wyniki symulacji numerycznych pozwoliły na analizę zasad oceny narażenia zawodowego na zmienne pola elektromagnetyczne małej impedancji o zróżnicowanym stopniu niejednorodności rozkładu przestrzennego, z uwzględnieniem natury oddziaływania elektrodynamicznego tego pola na organizm człowieka i zachodzące w nim procesy biofizyczne. Przypadek narażenia na pole jednorodne odpowiada modelowi referencyjnemu, który przyjęto w zalece-

niach ICNIRP'2010 (16), natomiast przypadek pola niejednorodnego – warunkom częściej spotykanym na stanowiskach pracy. Na podstawie wyników modelowania numerycznego 12 scenariuszy narażenia przeanalizowano warunki narażenia głowy, tułowia i dłoni na pole magnetyczne. Części ciała były reprezentowane różnymi parametrami indukcji magnetycznej, które są możliwe do zmierzenia lub jedynie obliczenia, oraz wartościami natężenia pola elektrycznego indukowanego w poszczególnych segmentach ciała.

Wyniki obliczeń potwierdziły, że zarówno w polu quasi-jednorodnym, jak i w polu o znacznej zmienności przestrzennej zwiększone narażenie kończyn w porównaniu z narażeniem głowy i tułowia nie grozi zwiększonym poziomem pola elektrycznego indukowanego w kończynach. Przy ocenie narażenia pracowników na podstawie pomiarów pola magnetycznego na stanowisku pracy, zależnie od rozkładu przestrzennego pola magnetycznego i miar narażenia wykorzystywanych do oceny narażenia, zasadne jest dopuszczenie narażenia kończyn zwiększonego 3,96–9,74-krotnie w porównaniu z narażeniem tułowia. Uzyskany wynik symulacji numerycznych jest potwierdzeniem poprawności merytorycznej wymagań prawa pracy w Polsce, według których w polu magnetycznym o częstotliwości do 800 kHz dopuszczalne jest 5-krotnie silniejsze narażenie kończyn niż tułowia.

Prezentowane wyniki symulacji numerycznych wskazują również, że w przypadku oceny pól niejednorodnych należy liczyć się ze stosunkowo dużą niepewnością oceny narażenia, która wynika z silnej zależności współczynnika K od warunków narażenia i jego miar wykorzystanych do oceny zagrożeń elektromagnetycznych na stanowisku pracy. Współczynnik K reprezentuje dla różnych warunków narażenia zależność indukowanego pola elektrycznego od miar pola magnetycznego E_{in}/B_i .

Zarówno ten aspekt metodyki oceny zagrożeń elektromagnetycznych, jak i ustalenie dopuszczalnego poziomu narażenia dla różnych warunków narażenia i różnych miar jego oceny wymaga przeanalizowania większej liczby scenariuszy narażenia, uwzględniających zarówno inne modele ciała człowieka, jak i różne parametry pola magnetycznego, takie jak różne polaryzacje i rozkład przestrzenny. Szersze badania z tego zakresu powinny być przeprowadzone na potrzeby prac legislacyjnych i normalizacyjnych, które są zapowiadane w zaleceniach ICNIRP (16). W takich badaniach mogą być wykorzystane metodyka i miary narażenia prezentowane w niniejszej pracy.

PIŚMIENNICTWO

1. International Commission on Non-Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). *Health Phys.* 1998;74(4):494–522
2. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Std C95.6-2002 Standard for safety levels with respect to human exposure to frequency electromagnetic fields, 0 Hz to 3 kHz. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York 2002
3. Zeńczak M.: Analiza technicznych problemów związanych z dozymetrią pól elektromagnetycznych o częstotliwości przemysłowej [rozprawa habilitacyjna]. Pr. Nauk. Politechn. Szczec. Inst. Elektrotechn. 1998;26(543):3–204
4. 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
5. Dimbylow P.J.: 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.* 2005;50:1047–1070
6. Karpowicz J., Gryz K., Zradziński P.: Zasady wykorzystania symulacji komputerowych do oceny zgodności z wymaganiami dyrektywy 2004/40/WE dotyczącej bezpieczeństwa i higieny pracy w polach elektromagnetycznych. *Podst. Metody Oceny Środ.* Pr. 2008;4(58):103–135
7. Reilly P.J.: Applied bioelectricity. From electrical stimulation to electropathology. Springer-Verlag, New York 1998
8. Wilen J., de Vocht F.: Health complaints among nurses working near MRI scanners – A descriptive pilot study. *Eur. J. Radiol.* 2011;80(2):510–513
9. De Vocht F., Stevens T., van Wendel-de Joode B., Engels H., Kromhout H.: Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure–response relations. *J. Magn. Reson. Imaging* 2006;23(3):291–297
10. Bortkiewicz A.: Skutki zdrowotne działania pól elektromagnetycznych – przegląd badań. *Podst. Metody Oceny Środ.* Pr. 2008;4(58):67–87
11. Ahlbom C., Cardis E., Green A., Linet M., Savitz D., Swerdlow A. i wsp.: Review of the epidemiologic literature on EMF and health. *Environ. Health Perspect.* 2001;109(Supl. 6):911–933
12. International Agency for Research on Cancer – World Health Organization: Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC Monographs 80. IARC Press, Lyon 2002, s. 429

13. World Health Organization. Environmental Health Criteria 238, Extremely Low Frequency Fields (ELF). WHO, Geneva 2007 [cytowany 1 grudnia 2011]. Adres: http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html
14. Zmysłony M.: Efekty biologiczne i ryzyko zdrowotne sieciowych pól elektromagnetycznych (z wyłączeniem nowotworów). *Med. Pr.* 2008;59(5):421–428
15. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR): Health Effects of Exposure to EMF, Opinion adopted at the 28th plenary on 19 January 2009, Brussel, Belgium. Bruksela 2009 [cytowany 1 grudnia 2011]. Adres: http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_022.pdf
16. International Commission on Non-Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys.* 2010;99(6):818–836
17. 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 (zał. 2., cz. E: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz – 300 GHz). *DzU* z 2002 r. nr 217, poz. 1833
18. Korniewicz H., Karpowicz J., Gryz K., Aniołczyk H., Zmysłony M., Kubacki R. i wsp.: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz–300 GHz – dokumentacja. *Podst. Metody Oceny Środ. Pr.* 2001;2(28): 97–238
19. 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
20. Gedliczka A.: Atlas miar człowieka. Dane do projektowania i oceny ergonomicznej. Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2001
21. 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
22. Computer Simulation Technology: Workflow & Solver Overview [materiały firmowe]. CST EM Studio, Norymberga 2010
23. Barchanski A.: Impact of the displacement current on low-frequency electromagnetic fields computed using high-resolution anatomy models. *Phys. Med. Biol.* 2005;50:243–249