

# Ocena narażenia pracowników na prądy indukowane przez pola magnetostacyjne tomografów rezonansu magnetycznego

Assessment of the exposure to currents induced in the workers' bodies by static magnetic fields of magnetic resonance scanners

Jolanta Karpowicz

Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB), Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, tel. +48 22 623 46 50, e-mail: jokar@ciop.pl

## Streszczenie

Wskutek poruszania w polu magnetostacyjnym, wytwarzanym przez magnes tomografu rezonansu magnetycznego, w ciele pracowników indukowane są prądy elektryczne, mogące zakłócać procesy bioelektryczne w organizmie. Zaprezentowano zasady oceny tego rodzaju narażenia poprzez pomiary dynamiki zmienności indukcji magnetycznej (dB/dt) na powierzchni ciała pracownika, wykonującego czynności zawodowe. Zaprezentowano również przykładowe wyniki badań narażenia występującego w czasie wykonywania sekwencji unormowanych ruchów przy magnesach wybranych tomografów otwartych (0,2T i 0,3T) oraz zamkniętych (1,0T i 1,5T).

**Słowa kluczowe:** tomografy rezonansu magnetycznego, pole magnetostacyjne, prąd indukowany, ocena narażenia, normalizacja procedury badań

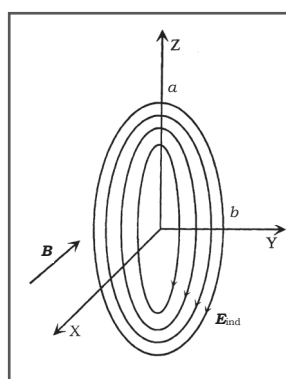
## Abstract

Movements of workers in static magnetic field produced by magnet of magnetic resonance scanner cause induced electric current in their body. Such current can disturb bioelectric processes in human organism. Principles of the assessment of the exposure to induced currents by measurements of dynamics of changes of magnetic flux density (dB/dt) at the surface of the body of worker performing occupational activities, were presented. The paper presents also exemplary results of examination of exposure of workers performing the sequence of standardized movements in the vicinity of magnets of selected scanners: with open structure (0,2T and 0,3T) and with bore magnets (1,0T and 1,5T).

**Key words:** magnetic resonance scanners (MRI), static magnetic field, induced current, exposure hazard, standardisation of the assessment protocol

## Wprowadzenie

Fizyczne oddziaływanie pola magnetostacyjnego (przesunięcie i polaryzacja naładowanych elektrycznie cząstek) powoduje skutki elektrodynamiczne w roztworach elektrolitów w ruchu (np. w krwi) oraz oddziałuje na spin elektronów, co może powodować zmiany w reakcjach chemicznych [4, 5]. Natomiast zmienne w czasie pole magnetyczne



Rys. 1 Pole elektryczne indukowane w eliptycznym modelu ciała człowieka eksponowanego na zewnętrzne, jednorodne, zmienne w czasie pole magnetyczne

zgodnie z prawem Faradaya indukuje wewnątrz organizmu człowieka pole elektryczne (rys. 1):

$$\oint E_{ind} \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t} \iint B \cdot ds \quad (1)$$

gdzie:

$E_{ind}$  – natężenie pola elektrycznego indukowanego w organizmie,

$dl$  – element jednostkowy pętli przewodzącej, w której indukowane jest pole elektryczne,

$B$  – indukcja pola magnetycznego, w którym przebywa człowiek,

$ds$  – element jednostkowy pola przekroju organizmu, prostopadły do polaryzacji wektora  $B$ .

W przypadku gdy jednorodne pole magnetyczne przenika zamkniętą pętlę o promieniu  $r$ , zgodnie z prawem Faradaya otrzymujemy zależność:

$$E_{ind} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

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

$$J = \sigma(f) E_{ind} \quad (3)$$

gdzie:  $\sigma(f)$  – przewodność elektryczna tkanek organizmu człowieka.

Wrażliwość organizmu człowieka na takie oddziaływanie jest dobrze poznana i wynika z elektrofizjologicznych właściwości błon komórkowych, a szczególnie z właściwości dynamicznych kanałów jonowych w błonach [1, 2, 4, 5]. Prądy indukowane mogą zatem zakłócać pracę organizmu na skutek zaburzenia naturalnych procesów elektrofizjologicznych w komórkach nerwowych lub mięśniowych. Omówione oddziaływania są podstawą zaleceń bezpieczeństwa, dotyczących dopuszczalnej ekspozycji na pola magnetyczne.

Rozpatrzmy parametry ekspozycji obiektu w odniesieniu do lokalnego układu współrzędnych związanego z tym obiektem – ekspozycja obiektu nieruchomego przy źródle pola magnetycznego zmiennego w czasie jest tożsama z ekspozycją obiektu poruszającego się w otoczeniu źródła pola magnetostacyjnego. Poprawność takiej oceny zagrożeń dla ludzi przebywających w polu magnetostacyjnym potwierdza

m.in. fakt, że pracownicy wykonujący czynności zawodowe w pobliżu silnych magnesów tomografów rezonansu magnetycznego (RM), będących źródłami pola magnetostatycznego, czasami odczuwają w czasie poruszania się wrażenia wzrokowe (magnetofosfeny), podobnie jak w przypadku ekspozycji na pola magnetyczne zmienne o częstotliwości ok. 20 Hz i indukcji magnetycznej przekraczającej 10 mT.

Gęstość prądu indukowanego jest proporcjonalna do pola powierzchni pętli, jaką tworzy eksponowana część ciała, przenikalności elektrycznej tkanek i szybkości zmian w czasie strumienia magnetycznego przenikającego tę pętlę, a więc jest proporcjonalna zarówno do poziomu ekspozycji, jak i do szybkości poruszania się człowieka w obszarze pola magnetostatycznego.

Wymienione zależności wskazują, że do oceny poziomu narażenia pracowników obsługujących tomografy RM można wykorzystać badania dynamiki zmienności w czasie poziomu pola magnetycznego oddziałującego na pracownika, w czasie gdy porusza się on w pobliżu magnesu. Badania parametrów charakteryzujących zmienność w czasie poziomu indywidualnej ekspozycji poszczególnych pracowników na pola magnetostatyczne, umożliwiające również ocenę narażenia na prądy indukowane, są najnowszą możliwością techniczną w tym zakresie.

## Cel badań

Celem prezentowanych badań jest opracowanie metody umożliwiającej ocenę poziomu narażeń na prądy indukowane w ciele pracownika, jakie występują w czasie wykonywania pracy w pobliżu magnesów tomografów RM. Zagrożenia takie dotyczą zarówno personelu medycznego asystującego pacjentowi przed badaniami, w ich trakcie i po badaniu, jak i pracowników sprzątających otoczenie magnesów oraz pracowników wykonujących prace serwisowe przy tomografach, takie jak np. przeglądy okresowe i naprawy.

## Metodyka

W związku z omówionym mechanizmem oddziaływania pól magnetycznych oraz jego wektorowym charakterem badano parametry pól elektromagnetycznych, związane z lokalnym układem współrzędnych ortogonalnych XYZ, który reprezentuje parametry ekspozycji tułowia w czasie poruszania się względem nieruchomego magnesu, tj. funkcję zmian w czasie indywidualnego poziomu ekspozycji danego pracownika na pola magnetostatyczne podczas wykonywania poszczególnych czynności zawodowych. Bezpośrednim wynikiem badań są funkcje zmienności w czasie, rejestrowane za pomocą ortogonalnych anizotropowych czujników indukcji magnetycznej zlokalizowanych na ciele pracownika:  $-B_x(t), B_y(t), B_z(t)$  – wartości składowych ortogonalnych wektora indukcji magnetycznej  $B_v$ ,  $-B_v(t)$  – wartości modułu wektora indukcji magnetycznej, pola oddziałującego na pracownika.

Na podstawie tych danych możliwe jest określenie narażenia na prądy indukowane w czasie wykonywania poszczególnych czynności zawodowych, tj. wyznaczenie parametrów dB/dt, zarówno dla składowych X, Y, Z, jak i dla wartości modułu wektora V. Zgodnie z ogólną zależnością, jednostkowa zmiana wartości modułu wektora V między kolejnymi próbkami zarejestrowanymi w chwili t1 i t2 wyraża się zależnością:

$$\Delta V = \sqrt{B_x^2(t_2) + B_y^2(t_2) + B_z^2(t_2)} - \sqrt{B_x^2(t_1) + B_y^2(t_1) + B_z^2(t_1)} \quad (4)$$

Wartość  $\Delta V$  może być wykorzystana do scharakteryzowania zmienności modułu indukcji magnetycznej pola oddziałującego na człowieka:  $dB_v(t)/dt$ . Do oceny narażenia na prądy indukowane można również wykorzystać moduł wektora, wyznaczony na podstawie jednostkowych zmian wartości poszczególnych składowych X, Y, Z i wyrażony zależnością:

$$\Delta V1 = \sqrt{[B_x(t_2) - B_x(t_1)]^2 + [B_y(t_2) - B_y(t_1)]^2 + [B_z(t_2) - B_z(t_1)]^2} \quad (5)$$

Analiza wyników prezentowanych badań obejmuje zarówno wielkość  $dB_v(t)/dt$ , jak i  $dB_{v1}(t)/dt$ .

Do badań parametrów pola magnetostatycznego na powierzchni ciała pracowników przebywających w otoczeniu magnesów tomografów RM wykorzystano zasilany bateryjnie przenośny miernik z izotropową sondą pomiarową z czujnikami hallotronowymi, o zakresie pomiarowym od 0,01 mT do 20 T, z częstotliwością próbkowania od 0,01 Hz do 100 Hz i pamięcią wewnętrzną, umożliwiającą archiwizację wyników sesji pomiarowych w plikach tekstowych typu.txt i ich dalszą analizę.

## Wyniki

Wykorzystując omówiony miernik pola magnetostatycznego, dokonano rejestracji parametrów pola magnetostatycznego oddziałującego na pracownika wykonującego rutynowe czynności zawodowe (rys. 2). Ze względu na niepowtarzalny charakter takich przebiegów przy badaniach uwzględniono zarówno realistyczne wykonywanie czynności w pobliżu magnesu, jak i unormowane poruszanie się pracownika, reprezentujące typowe sytuacje związane z przemieszczeniem się pracownika w polu magnetostatycznym w otoczeniu magnesu. Uwzględniono następujące sytuacje:

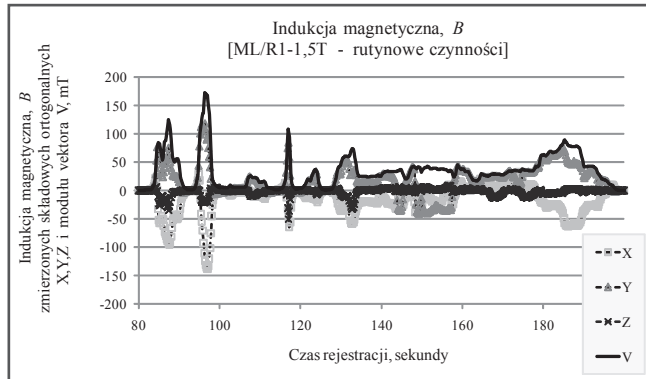
- wyprostowany pracownik zbliża się lub oddala do/od magnesu, stojąc do niego bokiem przy krawędzi stołu pacjenta, w odległości 0,5-1,0 m od magnesu (oznaczenie: P;B-M);
- wyprostowany pracownik zbliża się lub oddala do/od magnesu, stojąc do niego przodem przy krawędzi stołu pacjenta, w odległości 0,5-1,0 m od magnesu (oznaczenie: P;P-M);
- wyprostowany pracownik obraca się o 90° wokół własnej osi, stojąc przodem/bokiem do magnesu ok. 1,0 m od magnesu, obok stołu pacjenta (oznaczenie O);
- wyprostowany pracownik, stojący bokiem do magnesu, pochyla się o 45° nad łóżem dla pacjenta w odległości ok. 1,0 m od magnesu (oznaczenie N-S);
- wyprostowany pracownik, stojący pod kątem do magnesu, pochyla się o 45° w kierunku wlotu tunelu magnesu, z pozycji w odległości ok. 1,0 m od magnesu (oznaczenie N-O);
- wyprostowany pracownik obraca się o 90° wokół własnej osi, stojąc przodem/bokiem do magnesu ok. 0,5 m od magnesu, obok stołu pacjenta (oznaczenie O(M)).

Odległość od magnesu zdefiniowano zgodnie z postanowieniami PN-T-06580:2002 odnośnie do położenia osi tułowia.

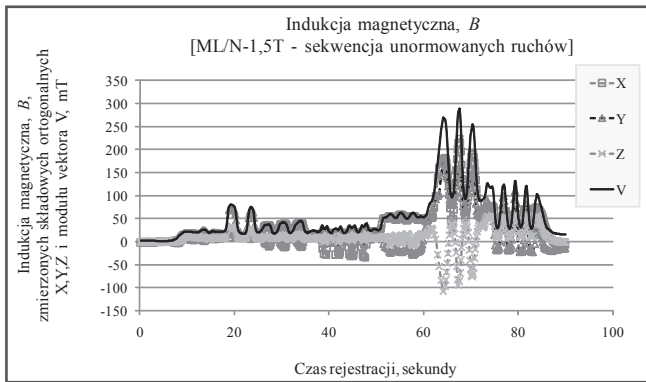
Przykładowe dane prezentowane w dalszej części artykułu uzyskano w czasie badań wykonanych przy tomografach RM otwartych, z magnesami 0,2T i 0,3T (oznaczonych odpowiednio BL-0,2T i GD-0,3T) oraz tomografach zamkniętych z magnesami 1,0T i 1,5T (oznaczonych odpowiednio: CD-1,5T; CO-1,5T; ML-1,5T; PL-1,0T) (tabela 1, rys. 2-7).

Tabela 1 Parametry narażenia na prądy indukowane w czasie wykonywania unormowanych ruchów w otoczeniu magnesu tomografów RM 0,2-1,5T

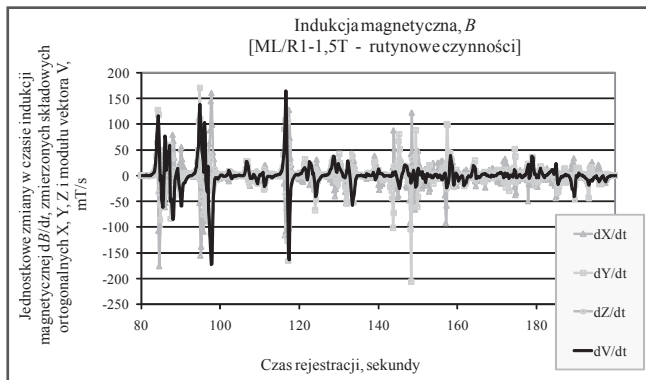
Lp.	Oznaczenie tomografu RM	Maksymalna szybkość zmian indukcji magnetycznej w czasie zarejestrowana przy wykonywaniu unormowanych ruchów w otoczeniu magnesu tomografu RM dB/dt, mT/s						
		PB-M	P-P-M	O	N-O	N-S	P-S	O(M)
1.	CD-1,5T	100	200	350	270	50	---	---
2.	CO-1,5T	140	220	220	330	70	---	---
3.	ML-1,5T	110	---	150	300	45	60	250
4.	PL-1,0T	150	180	150	180	50	---	---
5.	BL-0,3T	32	45	15	70	10	---	---
6.	GD-0,2T	9	13	6	17	3	---	---



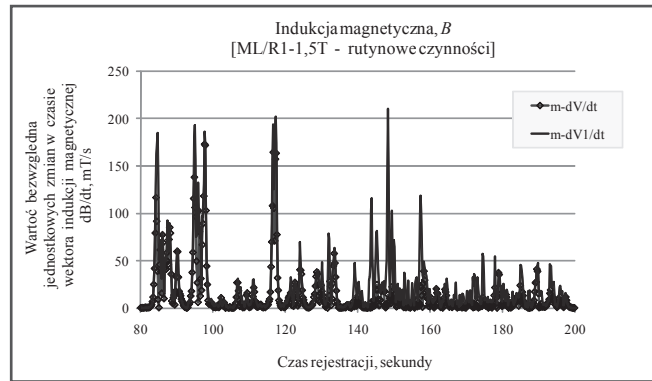
Rys. 2 Przykładowe rejestracje indywidualnego poziomu narażenia na pole magnetostatyczne w czasie rutynowych przygotowań badań w tomografie RM 1,5T



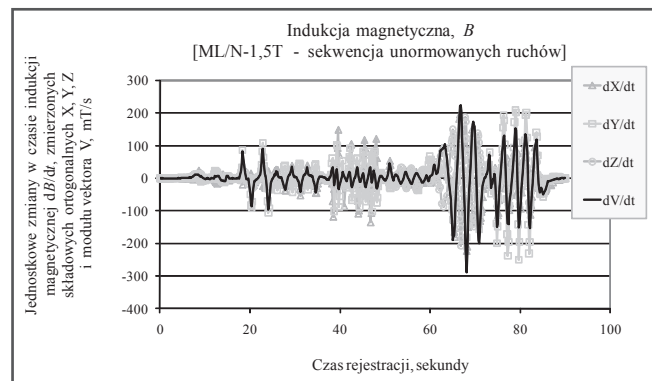
Rys. 3 Przykładowe rejestracje indywidualnego poziomu narażenia na pole magnetostatyczne w czasie wykonywania sekwencji unormowanych ruchów przy tomografie RM 1,5T



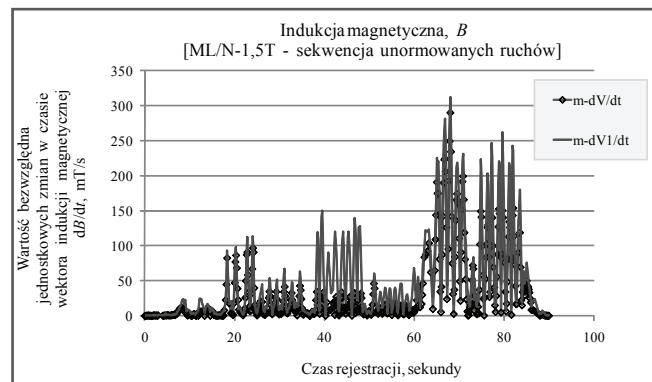
Rys. 4 Dynamika zmienności w czasie indukcji magnetycznej pola oddziałującego na pracownika w czasie rutynowych przygotowań badań w tomografie RM 1,5T. Przebieg B(t) prezentuje rys. 2



Rys. 5 Dynamika zmienności w czasie indukcji magnetycznej pola oddziałującego na pracownika w czasie rutynowych przygotowań badań w tomografie RM 1,5T. Przebieg B(t) prezentuje rys. 2



Rys. 6 Dynamika zmienności w czasie indukcji magnetycznej pola oddziałującego na pracownika w czasie wykonywania sekwencji unormowanych ruchów przy tomografie RM 1,5T. Przebieg B(t) prezentuje rys. 3



Rys. 7 Dynamika zmienności w czasie indukcji magnetycznej pola oddziałującego na pracownika w czasie wykonywania sekwencji unormowanych ruchów przy tomografie RM 1,5T. Przebieg B(t) prezentuje rys. 3

## Dyskusja wyników badań

Prezentowane przykładowe wyniki badań dB/dt, będące estymatorem narażenia na prądy indukowane wskutek oddziaływania pola magnetycznego na człowieka, wykonane w odniesieniu do ekspozycji pracowników obsługujących różnego typu tomografy RM z magnesami od 0,2T do 1,5T, pokazują powtarzającą się przy wszystkich urządzeniach zależność. Największe wartości dB/dt zarejestrowano w czasie pochylania się pracownika w kierunku otworu magnesu (miejsca, w którym w czasie badania przebywa pacjent), skośnie nad stołem (N-O), oraz w czasie obracania się wyprostowanego pracownika w stosunku do pionowej osi tułowia (O, O(M)) – większe wartości występują, gdy pracow-



nik wykonuje takie ruchy, stojąc bliżej obudowy magnesu. Mniejsze wartości dB/dt występują, gdy pracownik przesuwa się bokiem lub przodem w kierunku magnesu i od niego oddala, poruszając się wzdłuż stołu pacjenta (P-B-M, P-P-M) – mniejsze narażenie występuje, gdy pracownik porusza się bokiem.

Zaobserwowano, że w porozumieniu z pracownikami obsługującymi tomografię RM można wypracować technikę obsługi rutynowych badań ograniczającą do minimum nachylenie się w kierunku otworu magnesu i obracanie się w pobliżu magnesu. Rezultat taki osiąga się na przykład wtedy, gdy czynności techniczne przy cewkach diagnostycznych wykonywane są przy podniesionym stole pacjenta i w taki sposób, że pracownik znajduje się zawsze po tej stronie stołu, z której znajdują się gniazda przyłączające do kabli cewek.

Przy czynnościach wykonywanych w nieco większej odległości od obudowy magnesu, takich jak pochylanie się nad stołem (N-S) lub podchodzenie z boku do stołu pacjenta (P-S), występują znacznie mniejsze wartości dB/dt.

Szczególne uwagę należy zwrócić na wartość dB/dt zarejestrowaną przy pochylaniu się w kierunku otworu magnesu 0,3T (BL-0,3T / N-O), która jest zbliżona do poziomu dB/dt rejestrowanego przy tomografiach 1,0-1,5T, przy poruszaniu się w otoczeniu stołu pacjenta (N-S, P-S). Wynika stąd, że przy nieodpowiedniej organizacji pracy narażenie na prądy indukowane może osiągać przy słabych magnesach wartości tak wysokie, że są porównywalne do takich, jakie przy silnych magnesach można osiągnąć przy optymalnej organizacji pracy.

Wartości dB/dt wyznaczonej bezpośrednio na podstawie przyrostów jednostkowych modułu wektora indukcji magnetycznej ( $dV$  – zależność [4]) oraz z przyrostów jednostkowych składowych ortogonalnych indukcji magnetycznej rejestrowanej na powierzchni ciała poruszającego się w pobliżu magnesu pracownika ( $dV$  – zależność [5]) wskazują, że ocena narażenia na prądy indukowane powinna opierać się na analizie zmienności składowych rejestrowanych indywidualnie ( $dV1$ ). Ocena na podstawie zmienności modułu wektora indukcji magnetycznej  $dV$  jest istotnie zaniżona, ponieważ oceniane zjawisko determinowane jest przez dwa niezależne czynniki – rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej w obszarze poruszania się pracownika oraz dynamika i miejsce wykonywania poszczególnych ruchów. Ze względu na wektorowe właściwości pola magnetycznego jedynie parametry narażenia oceniane w kontekście polaryzacji pola magnetycznego w stosunku do poruszającego się ciała pracownika charakteryzują miarodajnie poziom narażenia na prądy indukowane ( $dV1$ ).

## Podsumowanie

Prezentowane wyniki badań na obecnym etapie nie mogą być wykorzystywane do analizy zgodności warunków narażenia pracowników z wymaganiami prawa pracy, ponieważ prezentowana nowa technika badań nie została jeszcze objęta takimi wymaganiami [rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych natężeń pól elektromagnetycz-

nych w środowisku pracy, DzU 217/2002, poz. 1833, zharmizowana PN-T-06580:2002]. Do uwzględnienia tej techniki badania i oceny narażenia pracowników w systemie prawa pracy konieczne są dalsze prace, w celu normalizacji omawianej procedury badań oraz ustalenia na podstawie symulacji numerycznych korelacji parametrów ekspozycji, wyrażanych jako dB/dt składowych ortogonalnych (X, Y, Z) zmierzonych na powierzchni ciała pracownika, z polem elektrycznym lub prądem elektrycznym, indukowanym w centralnym układzie nerwowym ekspozowanego pracownika. Niezbędne jest również ustalenie kryteriów oceny omawianego parametru dB/dt, na przykład analogicznie do propozycji oceny ekspozycji na pola gradientowe [3].

Natomiast rozwój prezentowanej techniki oceny parametrów narażenia na prądy indukowane pozwala już obecnie na porównanie poziomu narażeń występujących przy poszczególnych czynnościach zawodowych, przy tomografiach RM różnej konstrukcji. Prezentowane porównanie poziomu narażenia w czasie wykonywania sekwencji unormowanych ruchów wskazuje, przy jakiego rodzaju czynnościach występuje największe narażenie pracowników. Podczas szkoleń pracowników, a także działań kontrolnych w placówkach diagnostycznych należy zwrócić szczególną uwagę pracowników na potrzebę ograniczenia czynności związanych z największymi narażeniami na prądy indukowane lub wykonywanie ich odpowiednio wolniej, w celu zmniejszenia skutków ekspozycji występujących w ciele. Takie postępowanie ochronne wdrożone jest wobec pacjentów – przesuwanie stołu wewnątrz magnesu odbywa się powoli, tak aby nie narażać ich na konsekwencje oddziaływania prądów indukowanych, takie jak zawroty głowy czy magnetofosfeny. ■

*Opracowano na podstawie wyników Programu Wieloletniego p.n. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, dofinansowywanego w latach 2008-2010 w zakresie projektów badawczych rozwojowych przez Ministerstwo Nauki. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy*

## Literatura

1. J. Karpowicz, K. Gryz: *Zagrożenia zawodowe dla personelu medycznego obsługującego rezonans magnetyczny*, Inżynieria Biomedyczna – Acta Bio-Optica et Informatica Medica, vol. 14, 2008, s. 255-257.
2. J. Karpowicz, K. Gryz: *Ekspozycja pracowników obsługujących tomografię rezonansu magnetycznego w aspekcie narażenia zawodowego i bezpieczeństwa pracy*, Inżynieria Biomedyczna – Acta Bio-Optica et Informatica Medica, vol. 14, 2008, s. 326-330.
3. H. Korniewicz, K. Gryz, J. Karpowicz: *Metoda pomiarów i oceny ekspozycji zawodowej na magnetyczne pola gradientowe tomografów NMR*, Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna, M. Nałęcz (red.), XI Krajowa Konferencja Naukowa, PAN – Komitet Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Warszawa 1999, s. 368-372.
4. P.J. Reilly: *Applied bioelectricity. From electrical stimulation to electropathology*, Springer-Verlag, New York 1998.
5. WHO 2006. Environmental Health Criteria 232, Static Fields, World Health Organization, [http://www.who.int/peh-emf/publications/EHC\\_232\\_Static\\_Fields\\_full\\_document.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/EHC_232_Static_Fields_full_document.pdf).

otrzymano / received: 30.09.2009  
zaakceptowano / accepted: 29.11.2009