

Zagrożenia zawodowe dla personelu medycznego obsługującego rezonans magnetyczny

Occupational hazards to the medical personnel operating magnetic resonance scanners

Jolanta Karpowicz, Krzysztof Gryz

Pracownia Zagrożeń Elektromagnetycznych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB), ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, tel. +48 (0) 22 623 46 50, e-mail: jokar@ciop.pl

Streszczenie

Tomografy rezonansu magnetycznego, umożliwiają uzyskanie obrazu poprzez ekspozycję ciała pacjenta na pole magnetostaticzne i zmienne pole elektromagnetyczne (pola impulsowe gradientowe i radiofalowe). Wytwarzaniu pól gradientowych towarzyszy emisja hałasu impulsowego o znacznych natężeniach. W artykule zaprezentowano metody oceny tych zagrożeń oraz charakterystykę ekspozycji pracowników.

Słowa kluczowe: tomografy rezonansu magnetycznego, pola elektromagnetyczne, hałas, ekspozycja zawodowa, zagrożenia zawodowe

Abstract

MRI enables to acquire images by exposition of the patient's body to the static magnetic field and time-varying electromagnetic field (pulsed gradient and radiofrequency fields). The emission of gradient field is correlated to a pulsed noise characterized by the high intensity. The principles of these hazards evaluation, as well as the characteristics of the medical personnel exposure are presented in the paper.

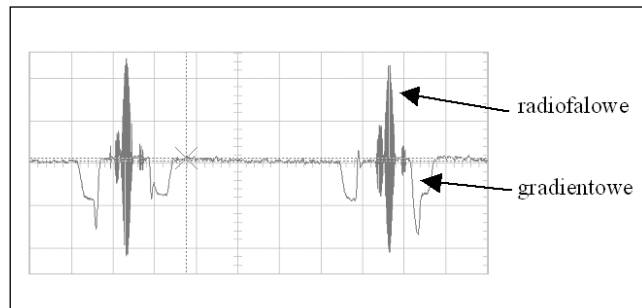
Key words: MRI scanners, electromagnetic fields, noise, occupational exposure, occupational hazards

Wprowadzenie

Jedną z najnowocześniejszych technik obrazowej diagnostyki medycznej, rozwijającą się dynamicznie od początku lat 80. XX w., jest rezonans magnetyczny (tzw. tomografy rezonansu magnetycznego – tomografy RM, ang. *magnetic resonance imaging scanners* – MRI scanners). W ostatnich latach stale wzrasta ilość tych urządzeń w placówkach medycznych, a także liczba pacjentów poddawanych badaniu MRI oraz pracowników obsługujących aparaty. Rozwój technologiczny tych urządzeń związany jest z doskonaleniem metod uzyskiwania obrazu i oprogramowania analizującego wyniki, wykorzystywaniem coraz silniejszych źródeł pola magnetostaticznego, wprowadzaniem nowych procedur diagnostycznych, m.in. diagnostyki śródoperacyjnej czy biopsji, pod kontrolą rezonansu magnetycznego.

W tomografach RM, w celu uzyskania danych diagnostycznych, badana część ciała pacjenta eksponowana jest równocześnie na pola magnetostaticzne i magnetyczne zmienne. Obecnie do wytwarzania pola magnetostaticznego wykorzystuje się najczęściej magnesy, wytwarzające w centrum tomografu pole o indukcji w zakresie od 0,15 T do 3,0 T. Ze względu na to, że są to najczęściej magnesy nadprzewodzące, w otoczeniu obudowy magnesu występuje stale silne pole magnetostaticzne. Jedynie w nielicznych tomografach RM stosowane są elektromagnesy rezystancyjne, które można wyłączyć po badaniu. Prowadzone są badania przedkliniczne wykorzystania silniejszych pól magnetostaticznych do diagnostyki (nawet do 14 T). W celu uzyskania informacji diagnostycznych

pacjent poddawany jest również ekspozycji na wytwarzane impulsowo pola magnetyczne (tzw. pola gradientowe, o widmie z zakresu częstotliwości do kilku kHz, które charakteryzuje się, podając ich zmienność w czasie dB/dt) i zmodulowane impulsowo pole magnetyczne o częstotliwości radiofalowej zharmonizowanej z poziomem centralnego pola magnetostaticznego w tomografie (o częstotliwości z zakresu 6-120 MHz, przy polach magnetostaticznych 0,15-3 T). Pola zmienne wytwarzane są tylko w czasie trwania badania pacjenta. Impulsy pól magnetycznych gradientowych wytwarzane są poprzez krótkotrwały, tj. w czasie rzędu 0,5 ms, przepływ prądu o natężeniach rzędu kA w cewkach gradientowych (rys. 1). Powoduje to wytwarzanie impulsowego hałasu, stanowiącego dodatkowe zagrożenie dla pacjentów i pracowników.



Rys. 1 Zmienne pola elektromagnetyczne emitowane przez tomograf RM (3ms/dz)

Pacjenci podlegają ekspozycji na wszystkie komponenty pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez tomografy RM oraz hałas impulsowy, w przypadku konieczności wykonania badań (zwykle nie częściej niż kilkakrotnie w ciągu całego życia), natomiast pracownicy codziennie, przez długie lata aktywności zawodowej. Na pracowników dodatkowo oddziałują prądy indukowane w organizmie przy poruszaniu się w polu magnetostaticznym w pobliżu magnesu.

Kryteria i metody oceny zagrożeń

Narażenie pacjentów podlega ograniczeniom zgodnie z zasadami dopuszczania interwencji medycznych, tj. uboczne, negatywne skutki lub ryzyko ich wystąpienia mogą być zaakceptowane, jeżeli oczekuje się przewyższających je korzyści, wynikających z diagnostyki lub terapii wymagającej tej ekspozycji. Odnosnie do pracowników obowiązują inne zasady – ekspozycja nie powinna prowadzić do żadnych negatywnych skutków zdrowotnych u pracownika w czasie jego wieloletniej aktywności zawodowej (nawet 30-40-letniej), jak również u jego potomstwa (zasady bezpieczeństwa i higieny pracy podano m.in. w rozporządzeniu ministra pracy [DzU 217/2002, poz. 1833] i dyrektywach europejskich 89/391/EWG, 2004/40/WE i 2003/10/WE).

Prądy indukowane wskutek ekspozycji na pola zmienne oraz poruszania się w polu magnetostaticznym są źródłem zagrożeń zawodowych; w czasie ekspozycji może dochodzić do stymulacji tkanek elektrycznie pobudliwych [1-5]. Bezpo-

średnie oddziaływanie pól o częstotliwościach radiofalowych prowadzi do ogrzewania tkanek wskutek pochłaniania przez nie energii elektromagnetycznej. Dotychczas badania naukowe nie wykluczyły możliwości występowania negatywnych skutków zdrowotnych stałej ekspozycji na pola elektromagnetyczne, szczególnie ekspozycji o wysokim poziomie. Badania naukowe w tym zakresie dotyczą oceny ryzyka wystąpienia takich negatywnych skutków zdrowotnych, jak: rozwój nowotworów, zaburzenia układu krwionośnego, nerwowego i immunologicznego. Badania tego typu są prowadzone w wielu ośrodkach.

Bezpośrednie odczuwanie pól elektromagnetycznych możliwe jest np. w polach małych częstotliwości, które mogą wywołać wrażenia wzrokowe, tzw. magneto- lub elektrofosfory. Poruszanie się w silnym polu magnetostaticznym (zależnie od wrażliwości osobistej, w polach $> 1,5$ T lub > 2 T) powoduje takie odczucia, jak: zawroty głowy, nudności, utrudnioną koordynację wzrokowo-ruchową. Odczucia te są skutkiem zaindukowania prądów elektrycznych w poruszającym się w polu magnetostaticznym organizmie. Objawy te ustają po zakończeniu ekspozycji i mają nieustalony dotychczas wpływ na stan zdrowia przy ekspozycji chronicznej, natomiast mogą istotnie ograniczać zdolność do wykonywania precyzyjnej pracy.

Hałas impulsowy o dużym natężeniu może prowadzić do czasowego upośledzenia słuchu lub nawet do całkowitej trwałej utraty słuchu.

W polach magnetostaticznych występuje również zjawisko tzw. latających obiektów. Przedmioty ferromagnetyczne, np. z elementami ze stali magnetycznej, mogą zostać porwane w kierunku magnesu, zamieniając się w lecące pociski. Pole magnetostaticzne może uszkodzić nośniki pamięci magnetycznej, a pola zmienne zakłócać funkcjonowanie układów elektronicznych. Oddziaływania te są nieobojętne dla bezpieczeństwa pacjentów i pracowników i są istotne ze względu na wybór przedmiotów, które można bezpiecznie używać w pobliżu tomografów, np. urządzeń pomiarowych, ochron osobi- stych lub implantów medycznych.

Ocena poziomu zagrożeń wynikających z ekspozycji na pola elektromagnetyczne jest prowadzona na podstawie pomiarów lub obliczeń parametrów pola oddziałującego na ludzi i obiekty techniczne, znajdujące się w środowisku pracy [5]. Pomiarów dotyczą poziomu natężenia pola elektrycznego (E) i natężenia pola magnetycznego (H) lub indukcji magnetycznej (B), uzupełnieniem mogą być pomiary prądów indukowanych lub kontaktowych. Obliczenia zwykle dotyczą współczynnika szybkości pochłaniania właściwego SAR oraz prądów indukowanych i kontaktowych. SAR jest miarą skutków termicznych ekspozycji i ma zastosowanie odnośnie do pól o częstotliwości powyżej 100 kHz. Prądy indukowane i kontaktowe wykorzystuje się do oceny ekspozycji na pola o częstotliwościach do 100 MHz.

Aktualne przepisy krajowe bezpieczeństwa i higieny pracy określają natężenia pól E i H dopuszczalne w miejscu przebywania pracownika (tzw. miary zewnętrzne ekspozycji) oraz długość ich trwania w ciągu zmiany roboczej (wskaźnik ekspozycji). Pola elektromagnetyczne o natężeniach tak wysokich, że dopuszczalna jest w nich jedynie ekspozycja pracowników, zwane są polami stref ochronnych. Pola, w których nawet rutynowa ekspozycja pracowników jest zabroniona, zwane są polami strefy niebezpiecznej.

Dyrektywa 2004/40/WE ustala dopuszczalne wartości miar zewnętrznych ekspozycji oraz dopuszczalne wartości miar wewnętrznych ekspozycji (współczynnika SAR oraz gęstości prądów indukowanych w głowie i tułowiu). Wartości graniczne współczynnika SAR podano dla częstotliwości z zakresu 100 kHz – 10 GHz jako wartości uśrednione dla całego ciała, wartości lokalne dla głowy i tułowia oraz jako odrębne, lokalne wartości dla kończyn. Uzupełnieniem są wartości dopuszczalne prądu kontaktowego i indukowanego, ściśle związane z miarami wewnętrznymi, ale możliwe do zmierzenia na stanowisku pracy. Wartości graniczne dopuszczalnych miar wewnętrznych ekspozycji nie powinny być przekraczane w żadnym wypadku. Analiza tego wymagania polega zwykle na oce-

nie poziomu miar wewnętrznych na podstawie wyników symulacji numerycznych. Ma ona więc niewielkie znaczenie praktyczne. W praktyce dąży się więc do oparcia systemu zarządzania BHP przy źródłach pól na badaniach i ocenie wielkości miar zewnętrznych ekspozycji, występującej na stanowisku pracownika.

Pomiary należy wykonywać zgodnie z wymaganiami norm zharmonizowanych z poszczególnymi dokumentami, stanowiącymi wymagania dotyczące dopuszczalnych warunków ekspozycji. Normy zharmonizowane z dyrektywą 2004/40/WE są w trakcie opracowywania przez CENELEC. Polska Norma PN-T-06580:2002 jest zharmonizowana z rozporządzeniem w sprawie najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN). Wartości NDN ustalono odnośnie do wartości maksymalnych natężeń pól oddziałujących na pracowników, tak by granica strefy niebezpiecznej była zharmonizowana z wymaganiami co do dopuszczalnych wartości miar wewnętrznych, w przypadku realistycznych warunków ekspozycji pracownika. Pomiary i ocena dotyczą wartości skutecznej, wartości maksymalnej pól zmodulowanych lub do wskaźnika ekspozycji, z uwzględnieniem widma i uzależnionych od częstotliwości wartości dopuszczalnych E i H poszczególnych składowych pola na stanowisku pracownika. Uzupełnieniem norm CENELEC i Polskich Norm mogą być w niektórych przypadkach normy IEC, np. odnośnie do zasad pomiarów i oceny pól gradientowych.

Charakterystyka zagrożeń w pracy przy tomografach rezonansu magnetycznego

Ekspozycja pracowników medycznych (techników, pielęgniarek, radiologów, anestezjologów) zachodzi w czasie krótkotrwałego asystowania pacjentowi przed i po badaniu (kilka minut na jednego pacjenta), a w przypadku magnesów nadprzewodzących i trwałych również w czasie czynności niezwiązanych z diagnozowaniem, np. podczas sprzątania, przeglądów i konserwacji tomografu [2, 4, 6]. Podczas wykonywania badania pracownicy znajdują się najczęściej poza kabiną elektromagnesu, z dala od obszaru silnego pola magnetostaticznego i zasięgu występowania pól zmiennych.

Szczególnie istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa personelu medycznego są pola magnetostaticzne, z uwagi na ich ciągłe występowanie w otoczeniu obudowy magnesu. Wewnątrz kabiny tomografu największe zagrożenie występuje bezpośrednio przy magnesach. Pracownicy są ekspozycyjni na silne pola magnetostaticzne w trakcie czynności związanych z obsługą poszczególnych badań. Czynności te są wykonywane w polach magnetostaticznych o dużej niejednorodności przestrzennej. Poziom pola magnetostaticznego zmniejsza się gwałtownie wraz z odległością od obudowy magnesu, nawet 100 razy w odległości ok. 2 m od obudowy. Wyniki pomiarów rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej wokół różnych typów tomografów rezonansu magnetycznego (ponad 25 typów, o magnesach 0,2-2 T) wskazują na bardzo znaczne uzależnienie poziomu ekspozycji pracowników od rodzaju urządzenia, dostępnego wyposażenia technicznego, stosowanych procedur medycznych i organizacji pracy w poszczególnych placówkach służby zdrowia oraz cech antropometrycznych i doświadczenia pracowników.

Ekspozycja pracowników podczas rutynowych czynności, przy niewłaściwej organizacji pracy, może dochodzić do 150 mT (całe ciało) i 600 mT (kończyny). W wypadku wykonywania czynności bezpośrednio przy magnesie lub w jego wnętrzu pracownicy mogą być narażeni na pola silniejsze (tabela 1). Może również występować ekspozycja kończyn (czasami też głowy) na pola o indukcji porównywalnej z ekspozycją pacjenta (np. do 1,5 T w przypadku niewłaściwego podłączania lub rozłączania kabli cewek diagnostycznych do gniazda umieszczonego wewnątrz magnesu 1,5 T). Podczas wykonywania przez personel medyczny czynności bezpośrednio przy magnesie indukcja magnetyczna pola magnetostaticznego, działającego na pracowników, może znacznie przekraczać

Tabela 1 Pole magnetostatyczne działające na pracowników w otoczeniu różnego rodzaju tomografów RM podczas przygotowania pacjentów do badania

Rodzaj czynności	Narażenie zawodowe na pole magnetostatyczne przy różnym rodzaju tomografach RM, mT		
	tzw. słabe pola magnes rezystancyjny/stały		tzw. silne pola magnes zamknięty
	magnes otwarty (ok. 0,2 T)	magnes zamknięty (ok. 0,3 T)	1,5 T
umieszczanie cewek diagnostycznych na łożu pacjenta lub na badanej części ciała pacjenta	3-50*	6-15*	50-150*
	5-100**	5-50**	120-600**
podłączanie i odłączanie cewek diagnostycznych, obsługa konsoli	60-100**	15-30**	4-100** do 1500 ¹⁾ **
maksymalny poziom pola występujący na dostępnym dla pracowników elemencie obudowy magnesu	200-270	50	250-600

¹⁾ w przypadku lokalizacji gniazda przyłączeniowego wewnątrz magnesu

*) poziom ekspozycji całego ciała

***) poziom ekspozycji kończyn

wartości dopuszczalne (wg przepisów krajowych bezpieczeństwa i higieny pracy, jak również dyrektywy europejskiej 2004/40/WE).

Pomiary pól gradientowych wykazały, że ich maksymalne oddziaływanie na pracowników w czasie badań rutynowych nie przekracza wartości dopuszczalnych, a wartość skuteczna natężeń pól radiofaloowych nie przekracza wartości dopuszczalnych dla ekspozycji ludności. Wysoki poziom ekspozycji może wystąpić np. w czasie procedur śródoperacyjnych. Dużej ostrożności wymagają jednak ocena tych pól ze względu na ich modulację impulsową, wpływającą na czułość aparatury pomiarowej, kalibrowanej do pomiaru wartości skutecznych natężeń pól, oraz brak konsensusu międzynarodowego odnośnie do kryteriów oceny. Ocenę ekspozycji na pole magnetostatyczne i radiofaloowe można prowadzić w oparciu o rutynowe pomiary oraz krajowe przepisy BHP, natomiast pola gradientowe mogą być oceniane przy zastosowaniu specjalistycznej metodyki i kryteriów opracowanych na podstawie normy IEC lub dyrektywy 2004/40/WE i zaleceń ICNIRP odnośnie do pól impulsowych. Do takiej oceny mogą być również wykonane symulacje komputerowe, w celu obliczenia gęstości prądów indukowanych przez pola gradientowe. Podobne postępowanie powinno mieć miejsce przy ocenie narażenia, wynikającego z poruszania się pracownika w polu magnetostatycznym w otoczeniu magnesu lub ekspozycji bezpośrednio przy pracującym tomografie podczas badania śródoperacyjnego. Badania zagrożenia hałasem są utrudnione, zarówno ze względu na impulsowy charakter, jak i oddziaływanie pól elektromagnetycznych tomografu bezpośrednio na aparaturę pomiarową. Natomiast notowane są przypadki czasowego pogorszenia funkcjonowania słuchu, zarówno wśród pacjentów, jak i personelu medycznego. W związku z tym zalecane jest stosowanie ochron słuchu, dobranych do charakterystyki zagrożeń emitowanych przez tomografy i niewrażliwych na oddziaływanie silnych pól elektromagnetycznych.

Podsumowanie

Ocena zagrożeń dla zdrowia prowadzona jest m.in. na podstawie badań laboratoryjnych *in vivo* i *in vitro*, badań eksponowanych ochotników i badań epidemiologicznych oraz modelowania numerycznego występujących w organizmie skutków ekspozycji. Pacjenci i pracownicy eksponowani są na pola magnetostatyczne znacznie przekraczające poziomy, dla których zebrano dotychczas dane epidemiologiczne. Skutki zdrowotne takiego chronicznego oddziaływania nie zostały dotychczas przebadane, natomiast oddziaływanie na zdolność do pracy jest bezspornie negatywne. Jednym z istotnych problemów jest ustalenie rodzaju i skali oddziaływania impulsowego hałasu i złożonych pól elektromagnetycznych tomografów RM na rozwój płodu i małe dzieci. Jest to istotne zarówno ze

względem zastosowania medyczne, jak i bezpieczeństwo kobiet w ciąży obsługujących tomografy.

Wartości dopuszczalne, określające dopuszczalny poziom ekspozycji pracowników, istotnie zależą od częstotliwości pola elektromagnetycznego, a wielkość stosowana do ich oceny (np. wartość skuteczna, wartość dB/dt) zależy od modulacji i zakresu częstotliwości, w jakim zawierają się istotne składowe widma częstotliwości. Z tego powodu do wybrania odpowiednich metod pomiarów i kryteriów oceny niezbędne jest uprzednie zidentyfikowanie charakterystyki pól elektromagnetycznych oddziałujących na pracowników. Odnośnie do zasad pomiarów i kryteriów oceny pól gradientowych nadal brak konsensusu międzynarodowego. Stało się to jednym z powodów zainicjowania przez Komisję Europejską przesunięcia o 4 lata terminu wdrożenia dyrektywy 2004/40/WE i konieczności ponownego przedyskutowania jej wymagań.

Niezależnie od wielkości natężeń pól działających na ludzi, ze względu na wspomniane możliwości negatywnego oddziaływania ekspozycji chronicznej, w miarę możliwości zalecane jest dążenie do zminimalizowania pola elektromagnetycznego oddziałującego na pracowników. W celu wyeliminowania nadmiernej ekspozycji pracowników konieczne jest stosowanie różnorodnych działań technicznych i organizacyjnych. ■

Opracowano w związku z realizacją projektu badawczego nr: N N518 0811 33, finansowanego ze środków na naukę w latach 2007-2009.

Literatura

1. K. Gryz, J. Karpowicz: *Pola elektromagnetyczne w środowisku pracy*, CIOP, Warszawa, 2000.
2. J. Karpowicz, K. Gryz: *Health Risk Assessment of Occupational Exposure to a Magnetic Field From Magnetic Resonance Imaging Devices*, JOSE, vol. 12, 2006, s. 155-167.
3. J. Karpowicz, M. Hietanen, K. Gryz: *EU Directive, ICNIRP Guidelines and Polish Legislation on Electromagnetic Field*, JOSE, vol. 12, 2006, s. 125-136.
4. J. Karpowicz, M. Hietanen, K. Gryz: *Occupational risk from static magnetic fields of MRI scanners*, Environmentalist, vol. 27, 2007, s. 533-538.
5. W.M. Zawieska: *Ryzyko zawodowe – Metodyczne podstawy oceny*, CIOP-PIB, Warszawa, 2007.
6. Serwis internetowy nt. zagrożeń elektromagnetycznych – <http://www.ciop.pl/EMF>

otrzymano / received: 09.06.2008 r.
zaakceptowano / accepted: 18.08.2008 r.