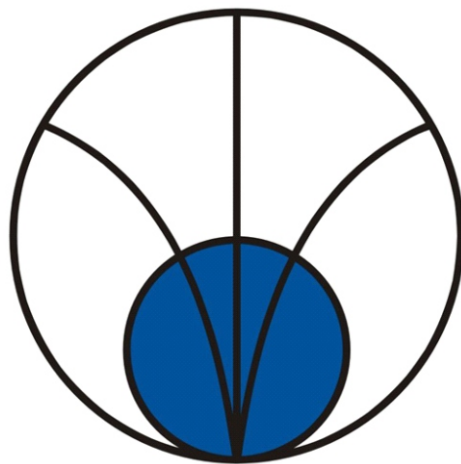


BEZPIECZEŃSTWO RADIACYJNE – PROMIENIOWANIE JONIZUJĄCE I NIEJONIZUJĄCE



Praca zbiorowa pod redakcją naukową:
Piotra Ulańskiego, Magdaleny Długosz-Lisieckiej
i Ewy M. Nowosielskiej

Zagrożenia związane z medycznym wykorzystaniem źródeł pola elektromagnetycznego

JOLANTA KARPOWICZ

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy,
00-701 Warszawa, Czerniakowska 16, e-mail: jokar@ciop.pl

Streszczenie: Omówiono charakterystykę elektromagnetycznego oddziaływania na obiekty materialne, związanego z wykorzystywaniem różnego typu technologii elektromagnetycznych w placówkach medycznych, podczas użytkowania diagnostycznych i terapeutycznych urządzeń medycznych w obrazowaniu medycznym, fizykoterapii, zabiegach inwazyjnych czy kosmetycznych, a także zagrożenia elektromagnetyczne, jakie mogą wynikać z takiego oddziaływania.

Abstract: The characteristics of the electromagnetic impact on material objects related to the use of various types of electromagnetic technologies in medical facilities, when using diagnostic and therapeutic medical devices in medical imaging, physical therapy, invasive or cosmetic procedures, as well as the electromagnetic hazards that may result from such impact, were discussed.

1. Medyczne technologie elektromagnetyczne

Technologie elektromagnetyczne w medycynie to zarówno wykorzystanie energii elektromagnetycznej do diagnostyki lub terapii medycznych, zarówno metodami inwazyjnymi, jak i nieinwazyjnymi (czy może mówiąc dokładniej – mniej inwazyjnymi), jak i wykorzystanie szerokiego wachlarza aplikacji bezprzewodowego, radiofalowego przesyłania informacji i energii w systemach wspomagających zarządzanie i bezpieczeństwo w placówkach medycznych, m.in. przez zdalne monitorowanie lokalizacji ich wyposażenia, pracowników i pacjentów, czy systemy radiokomunikacji wykorzystywane na terenie placówki medycznej oraz między placówką medyczną oraz pacjentami i pracownikami wykonującymi interwencje terenowe [1-8]. Do najpopularniejszych obecnie elektromagnetycznych aplikacji medycznych można zaliczyć:

- diagnozowanie obrazowe lub funkcjonalne z wykorzystaniem zjawiska jądrowego rezonansu magnetycznego, technik radarowych (mikrofalowych) oraz przeczaszkowej stymulacji magnetycznej,
- fizykoterapeutyczne stosowanie indukowanego w organizmie pola magnetycznego i elektrycznego oraz prądów egzogennych z wykorzystaniem

sprężenia indukcyjnego (tzw. magnetoterapia lub wspomniana przezczaszkowa stymulacja magnetyczna) lub pojemnościowego (tzw. diatermia fizykoterapeutyczna), w celu ograniczania procesów chorobowych lub wspomaganie wydolności organizmu (w medycynie sportowej),

- inwazyjne wykorzystanie diatermii radio- lub mikrofalowej tkanek miękkich do ich cięcia i koagulacji (np. w zabiegach chirurgicznych) lub hipertermii (np. wspomagającej terapii onkologicznej),
- (mało) inwazyjne wykorzystanie energii elektromagnetycznej do modyfikacji funkcjonowania (wyglądu) organizmu (w kosmetologii/medycynie estetycznej), np. do zabiegów dotyczących skóry, takich jak: redukcja zmarszczek, owłosienia, zwiotczenia, zmian pigmentacyjnych, itp.

Wspomniane urządzenia mogą być użytkowane zarówno w wysoce specjalistycznych placówkach medycznych (jak szpitale kliniczne) i w placówkach podstawowej opieki zdrowotnej, ale również w indywidualnych gabinetach fizykoterapeutycznych, medycznych lub kosmetycznych, bądź nawet samodzielnie przez pacjentów w środowisku domowym. Z tego powodu bardzo zróżnicowane są kwalifikacje i świadomość na temat konsekwencji oddziaływania pola elektromagnetycznego (pola-EM) na ludzi i inne obiekty materialne, a także związanych z nimi zagrożeniach bezpieczeństwa i zdrowia, które mogą dotyczyć użytkowników różnego typu urządzeń (pracowników medycznych, fizjoterapeutów, osoby wykonujące samodzielnie zabiegi, itp.), osób poddawanych zabiegom (pacjentów lub klientów) i osób postronnych (innych pacjentów lub klientów, osób towarzyszących pacjentom lub klientom, domowników osoby korzystającej z urządzenia w domu).

Najpopularniejsze źródła pola-EM związane z wykorzystaniem energii elektromagnetycznej w placówkach medycznych scharakteryzowano w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka źródeł pola elektromagnetycznego w urządzeniach wykorzystywanych w placówkach medycznych

Urządzenia	Rodzaj emitowanego pola elektromagnetycznego	Źródło pola elektromagnetycznego
Urządzenia do diagnostyki rezonansu magnetycznego	Stale emitowane pole magnetyczne Pole wielkiej częstotliwości (radiofalowe) i quasistatyczne (gradientowe) emitowane podczas badania pacjenta	Magnes nadprzewodzący i cewki diagnostyczne
Urządzenia do diatermii chirurgicznej	Pole wielkiej częstotliwości lub mikrofalowe emitowane podczas zabiegu	Elektrody i kable łączące elektrody z generatorem (generator sporadycznie)
Urządzenia do diatermii fizykoterapeutycznej	Pole wielkiej częstotliwości lub mikrofalowe emitowane podczas zabiegu	Aplikatory i kable łączące aplikatory z generatorem (generator w mniejszym stopniu)

Urządzenia	Rodzaj emitowanego pola elektromagnetycznego	Źródło pola elektromagnetycznego
Urządzenia do magnetoterapii	Pole magnetyczne quasistatyczne (małych częstotliwości) lub magnetostatyczne emitowane podczas zabiegu	Aplikatory magnetoterapeutyczne
Urządzenia do zdalnego monitorowania obiektów na terenie placówek medycznych	Pole wielkiej częstotliwości lub mikrofalowe	Czytniki (np. systemów RFID) – ręczne lub stacjonarne, np. bramkowe lub naścienne
Urządzenia radiokomunikacyjne	Pole wielkiej częstotliwości lub mikrofalowe	Anteny radiotelefonów nasobnych, przewodnych i stacjonarnych, anteny stacji bazowych publicznych systemów łączności mobilnej i nasobnych telefonów komórkowych (smartfonów)

2. Parametry charakteryzujące zjawiska elektromagnetyczne

Najistotniejsze skutki oddziaływania pola-EM na obiekty materialne (lub ich grupy), które umożliwiają tworzenie technologii elektromagnetycznych, a także wymagają nadzoru ze względu na zagrożenia związane z wykorzystaniem takich technologii, to indukowanie potencjałów elektrycznych w obiektach materialnych pod wpływem oddziaływania zmiennego w czasie pola-EM, które zależnie od częstotliwości pola-EM i parametrów dielektrycznych obiektu mogą prowadzić do wzrostu temperatury obiektu oraz zakłócenia procesów elektrycznych zachodzących w obiekcie (niezależnie czy jest to obiekt biologiczny, czy urządzenie elektryczne) [9-13].

Ze względu na zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia powstające w środowisku wskutek oddziaływania pola-EM na ludzi i inne obiekty materialne rozpatruje się przede wszystkim parametry odnoszące się do jego oddziaływania, które można skorelować ze skutkami oddziaływania pola-EM na obiekty materialne, ale ocenić w środowisku poprzez pomiary, bądź na podstawie szacunków analitycznych wykorzystujących parametry techniczne urządzeń emitujących pole-EM:

- częstotliwość (f , wyrażona w hercach, Hz, lub jednostkach nadwielokrotnych – kilohercach, kHz, megahercach, MHz, gigahercach, GHz, lub terahercach, THz),
- natężenie pola elektrycznego (E , wyrażone w woltach na metr, V/m) i magnetycznego (H , w amperach na metr, A/m).

Alternatywnie, pole magnetyczne może być scharakteryzowane przez wartość indukcji magnetycznej (B , wyrażona w teslach, T, lub częściej w jednostkach podwielokrotnych – mikroteslach i militeslach).

Wprawdzie parametry te można ocenić również na podstawie wyników symulacji komputerowych wykorzystujących parametry techniczne urządzeń emitujących pole-EM, jednak ze względu na konieczność przeprowadzenia walidacji takich symulacji z wykorzystaniem wspomnianych pomiarów środowiskowych, wykorzystanie praktyczne tego typu symulacji w ocenie elektromagnetycznych zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia w środowisku jest marginalne.

W ocenie skutków oddziaływania pola-EM na obiekty materialne rozpatrywane są również parametry charakteryzujące skutki indukowane przez pole-EM w obiektach materialnych i organizmie człowieka, oceniane poprzez symulacje komputerowe (z zastosowaniem odpowiednich anatomicznych i wysokorozdzielczych modeli organizmu człowieka, odzwierciedlających jego budowę anatomiczną oraz parametry dielektryczne, oraz modeli źródła pola-EM), takie jak [9-15]:

- natężenie pola elektrycznego indukowanego w organizmie (E_w), wyrażanego w woltach na metr (V/m), (uwaga: nie mylić z natężeniem pola-EM oddziałującego na organizm (E)), dotyczące oceny skutków pozatermicznych oddziaływania pola-EM o częstotliwości mniejszej od 10 MHz (oddziaływania na obwodowy i ośrodkowy układ nerwowy oraz narządy zmysłów wskutek indukowania w organizmie potencjałów elektrycznych)
- współczynnik szybkości pochłaniania właściwej energii (SAR), dotyczący oceny skutków termicznego oddziaływania pola-EM w organizmie (o częstotliwości z zakresu od 100 kHz do 10 GHz), wyrażany w watach na kilogram (W/kg) i uśredniony w okresie dowolnych 6 minut ekspozycji.

Parametry charakteryzujące skutki oddziaływania pola-EM w obiektach materialnych oceniane wyłącznie na podstawie modelowania komputerowego, wykorzystywane są najczęściej w badaniach naukowych – dotyczących zarówno oceny zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku (dotyczących pacjentów, pracowników, osób postronnych lub urządzeń), ale również skutków wykorzystania energii elektromagnetycznej w zabiegach medycznych (na przykład oceny rozkładu skutków termicznych w organizmie pacjenta podczas hipertermii). Jednak oba zastosowania są raczej marginalne, ponieważ w zarządzaniu środowiskiem elektromagnetycznym dąży się do kategoryzacji poziomu niezamierzonych zagrożeń na podstawie parametrów środowiskowych (E i H w otoczeniu źródeł pola-EM), a w parametryzacji procedur zamierzonego medycznego wykorzystania pola-EM najczęściej wykorzystywane są nastawy parametrów pracy poszczególnych urządzeń).

W ocenie zjawisk elektromagnetycznych wykorzystywane jest również uzupełniające parametry oceniane zarówno poprzez pomiary jak i symulacje komputerowe:

- natężenie indukowanych prądów przepływających w kończynach osób przebywających w pobliżu źródła pola-EM lub dotykających do metalowych obiektów znajdujących się w zasięgu oddziaływania pola-EM o częstotliwości do 100 MHz (I_k , wyrażone w amperach, A, lub części w miliamperach, mA),

- indukcja pola magnetostaticznego w środowisku (B, wyrażona w teslach, T), tożsama z indukcją pola magnetostaticznego indukowanego w organizmie człowieka.

3. Systemowa ochrona przed zagrożeniami elektromagnetycznymi w środowisku pracy

System ochrony ludzi przed niepożądanymi skutkami oddziaływania pola-EM tworzą złożone, wzajemnie powiązane wymagania dotyczące różnych aspektów użytkowania źródeł pola-EM, określone w dokumentach prawnych i normalizacyjnych, a także zaleceniach opracowanych przez kompetentne grupy ekspertów [4-6, 10-14, 17]. Przykładowo, ze względu na skutki oddziaływania pola-EM na człowieka i inne obiekty materialne, zaliczono je do fizycznych, niebezpiecznych i szkodliwych czynników występujących w środowisku w procesie pracy [PN-80/Z-08052], których oddziaływanie powinno być ograniczane, aby podczas wieloletniej aktywności zawodowej nie powodowało negatywnych skutków zdrowotnych u pracownika i jego potomstwa [14, 18]. Chociaż pole-EM występuje powszechnie w środowisku, zagrożenia elektromagnetyczne powstają tylko lokalnie, jeśli jego oddziaływanie jest na tyle silne, że może spowodować różnego typu niekorzystne skutki.

W środowiska pracy, zarządzanie zagrożeniami elektromagnetycznymi odbywa się poprzez realizację systemu wymagań prawa pracy, dotyczących tzw. przestrzeni pola-EM stref ochronnych – niebezpiecznej (PPSN), zagrożenia (PPSZ) i pośredniej (PPSP) [14, 18]. Zarówno poziomy pola-EM, które traktuje się jako przestrzeń pola-EM stref ochronnych (PPSO), jak i wymagane działania ochronne, uzależnione są od częstotliwości pola-EM (ze względu na zróżnicowanie skutków oddziaływania energii elektromagnetycznej). W działaniach praktycznych najczęściej rozpatruje się zróżnicowanie skutków oddziaływania pola-EM w podziale na następujące zakresy jego częstotliwości: statyczne (magnetostaticzne (PMS) i elektrostaticzne (PES)), małej i średniej częstotliwości (quasi-statyczne (PQS)) oraz radiofalowe (wielkiej częstotliwości (PWCZ) i mikrofalowe (PMF)).

Wymagania dotyczące ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi określono wykorzystując dwa rodzaje limitów, dotyczących wielkości stosowanych do oceny zagrożeń elektromagnetycznych i narażenia pracujących [13, 14, 18]:

- Graniczne Poziomy Oddziaływania (GPO), rozumiane jako limity dotyczące wybranych miar zagrożeń elektromagnetycznych, związanych ze skutkami oddziaływania bezpośredniego pola-EM na ludzi (tj. ze skutkami oddziaływania termicznego w organizmie człowieka, występującymi pod wpływem oddziaływania PWCZ i PMF i mogącymi w organizmie wywołać uszkodzenia termiczne, lub z potencjałami elektrycznymi indukowanymi przez PQS w układzie nerwowym i mogącymi wywołać elektrostymulację w różnych strukturach organizmu),

- Interwencyjne Poziomy Narażenia (IPN), rozumiane jako limity dotyczące wybranych miar narażenia na pole-EM w miejscu pracy, określające poziomy operacyjne umożliwiające uproszczoną ocenę, czy narażenie spełnia wymagania określone przez limity GPO, oraz w celu określenia zasięgu przestrzeni pola-EM stref ochronnych (PPSO) i zastosowania w niej odpowiednich środków ochronnych – zmniejszających zagrożenie skutkami oddziaływania bezpośredniego i oddziaływania pośredniego pola-EM (obejmującymi m.in.: zakłócenia działania urządzeń elektrycznych i elektronicznych, w szczególności aktywnych implantów medycznych, spowodowane wrażliwością takich urządzeń na oddziaływanie pola-EM).

3.1. Ogólne zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych

Wymagania prawa pracy odnoszą się do ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi pracowników poinformowanych o zagrożeniach i przeszkolonych nt. sposobu bezpiecznego wykonywania pracy. Wymagania te nie dotyczą ludności, ponieważ nie dotyczy jej obowiązek szkolenia nt. sposobów ograniczania zagrożeń elektromagnetycznych. Wymagania te nie dotyczą również pacjentów, ponieważ ich narażenie powinno być uzasadnione względami medycznymi (nawet bardzo silne narażenie pacjentów może być uzasadnione, jeśli jest niezbędne do osiągnięcia zamierzonego celu diagnostycznego lub terapeutycznego), a za ograniczanie niepożądanych skutków medycznego użycia źródeł pola-EM odpowiadają producenci urządzeń medycznych oraz pracownicy przeprowadzający zabiegi.

Wymagania prawa pracy wyróżniają w przestrzeni pracy [14, 18]:

- przestrzeń pola-EM stref ochronnych (PPSO: PPSN, PPSZ i PPSP), w której obowiązuje stosowanie środków ochronnych dostosowanych do charakterystyki narażenia na pole-EM i rozpoznanych zagrożeń elektromagnetycznych, wynikających z bezpośrednich i pośrednich skutków oddziaływania pola-EM (obejmujące m.in. odpowiednie procedury oceny i zarządzania zagrożeniami elektromagnetycznymi, takie jak: oznakowanie ostrzegawcze, informowanie użytkowników i osoby postronne, ograniczenia dostępu do miejsca występowania zagrożenia, przeciwskazania do zabiegów, itp.)
- przestrzeń pola-EM strefy bezpiecznej (PPSB), tj. przestrzeń poza strefami ochronnymi, dla której nie określono warunków ograniczających ekspozycję (gdzie poziom pola-EM nie przekracza wartości IPNp-E i IPNp-H, czyli limitów pomocniczych rozgraniczających PPSP i PPSB).

Jeżeli w przestrzeni pracy, przy obsługiwanym ręcznie lub znajdującym się w pobliżu źródle pola-EM występuje pole-EM strefy niebezpiecznej (PPSN) lub strefy zagrożenia (PPSZ) o poziomie przekraczającym wartości limitów bazowych (IPNob-E lub IPNob-H), konieczna jest szczegółowa ocena zagrożeń elektromagnetycznych odnosząca się do bezpośrednich skutków oddziaływania pola-EM

na pracujących (tj. ocena odnosząca się do dotrzymania wymagań określających limity GPO – dotychczas SAR i Ew).

Wspomniane limity dotyczące poziomu narażenia i skutków oddziaływania pola-EM w środowisku pracy określono, uwzględniając różnorodne zagrożenia elektromagnetyczne (czyli szkodliwe dla zdrowia, niebezpieczne lub uciążliwe skutki bezpośredniego lub pośredniego oddziaływania pola-EM), powstające w przestrzeni pracy w wyniku indukowania pola-E i prądu elektrycznego podczas oddziaływania pola-EM na obiekty materialne.

3.2. Bezpośrednie zagrożenia elektromagnetyczne

Bezpośrednie skutki biofizycznego oddziaływania zmiennego w czasie pola-EM są konsekwencją powstawania indukowanych potencjałów elektrycznych w obiektach materialnych znajdujących się w przestrzeni pola-EM (niezależnie od tego, czy zmienne w czasie oddziaływanie pola-EM wynika ze zmian położenie obiektu przy źródle pola statycznego, czy wynika z emisji zmiennego pola-EM przez jego źródło). Potencjały elektryczne zaindukowane w organizmie człowieka mogą wywołać uzależnione od częstotliwości pola-EM i okoliczności narażenia, reakcje fizjologiczne utrudniające procesy pracy, ale również mogące wywołać niepożądane (nadmierne, nieoczekiwane, niekontrolowane) skutki w organizmie pacjenta lub osoby postronnej znajdującej się z poblizu urządzeń medycznych emitujących pole-EM:

- pobudzenie (elektrostymulację) pobudliwych elektrycznie struktur organizmu, m.in. narządów zmysłów i centralnego układu nerwowego (w przypadku oddziaływania pola-EM o częstotliwościach nie przekraczających kilku megaherców)
- wzrost temperatury tkanek, aż do ich termicznego uszkodzenia (w przypadku oddziaływania pola-EM o częstotliwościach mega- lub gigahercowych)
- zakłócenia funkcjonowania układu sercowo-naczyniowego spowodowane zjawiskiem magnetohydrodynamicznym (przy oddziaływaniu pola magnetostatycznego)
- modyfikację dynamiki procesów biochemicznych (np. powiązanych z przemianami wolnych rodników).

Wprawdzie wymagania prawa pracy nie dotyczą formalnie bezpieczeństwa pacjentów podczas zabiegów medycznych, jednak należy brać pod uwagę, że podczas wielu rodzajów zabiegów na pacjenta w zamierzony sposób oddziałuje pole-EM o poziomach kwalifikowanych przez prawo pracy jako pole-EM stref ochronnych, a nawet strefy niebezpiecznej (konieczne do wywołania odpowiednio silnych skutków biofizycznych w organizmie pacjenta). Oznacza to, że pacjentów i osoby znajdujące się w poblizu mogą dotyczyć skutki oddziaływania pola-EM, jakie w środowisku pracy wymagają oceny i ograniczania (tabela 2).

Tabela 2. Charakterystyka zagrożeń elektromagnetycznych, które są związane z bezpośrednimi biofizycznymi skutkami oddziaływania pola-EM stref ochronnych na organizm człowieka; terminy i oznaczenia wg [14, 18]

Bezpośrednie skutki oddziaływania pola-EM na organizm człowieka	Charakterystyka pola-EM stwarzającego zagrożenia	
	częstotliwość	poziom oddziaływania
Skutki termiczne – ogrzanie tkanki przez pochłoniętą energię pola-EM	PWCZ, PMF	PPSN, PPSZ (> IPNob)
Skutki pozatermiczne – pobudzenie mięśni, nerwów lub narządów zmysłów mogące spowodować przejściowe objawy (np. zawroty głowy czy wrażenia wzrokowe, powodujące uciążliwości lub oddziałujące na funkcje poznawcze lub inne funkcje mózgu lub mięśni), ograniczając zdolność do bezpiecznego wykonywania pracy	PES, PMS, PQS, PWCZ (< 10MHz)	PPSN, PPSZ (> IPNob)
Prądy kończynowe indukowane – przepływające w kończynach prądy indukowane bezpośrednio w organizmie	PQS, PWCZ	PPSN, PPSZ (> IPNob)

3.3. Pośrednie zagrożenia elektromagnetyczne

Pośrednie skutki oddziaływania pola-EM na ludzi wynikają przeważnie również z indukowania potencjałów elektrycznych w obiektach materialnych, ale powstają kiedy wraz z człowiekiem w przestrzeni pola-EM znajdują się inne obiekty przewodzące prąd elektryczny (tabela 3). Pośrednie oddziaływanie pola-EM na ludzi występuje m.in. w postaci prądu kontaktowego przepływającego przez ciało człowieka dotykającego obiektu przewodzącego prąd elektryczny (który wskutek oddziaływania pola-EM ma inny potencjał elektryczny), mogącego wywołać odczuwanie bólu, a nawet poparzenia, podobnie jak rażenie prądem przy dotknięciu instalacji elektrycznej lub prądy indukowane bezpośrednio w organizmie [14, 16]. Zagrożenia związane z pośrednim oddziaływaniem pola-EM mogą również polegać na wywoływaniu zakłóceń w działaniu urządzeń elektronicznych [7, 8, 19-21].

Tabela 3. Charakterystyka zagrożeń elektromagnetycznych, które są związane z pośrednimi skutkami oddziaływania pola-EM stref ochronnych na obiekty materialne i organizm człowieka; terminy i oznaczenia wg [14, 18]

Pośrednie skutki oddziaływania pola-EM	Charakterystyka pola-EM stwarzającego zagrożenia	
	częstotliwość	poziom oddziaływania
Zakłócenie działania urządzeń elektronicznych, spowodowane ich wrażliwością na oddziaływanie pola-EM (jeśli oddziaływanie jest silniejsze od odporności elektromagnetycznej urządzenia)	PES, PMS, PQS, PWCZ, PMF	PPSN, PPSZ, PPSP (> IPNp)
Zakłócenie elektronicznego sprzętu medycznego i wyrobów medycznych przeznaczonych do wprowadzenia w całości lub w części do ludzkiego ciała (stymulatory serca, pompy insulinowe i inne aktywne implanty)	PES, PMS, PQS, PWCZ, PMF	PPSN, PPSZ, PPSP (> IPNp)
Skutki termiczne oddziaływania na implanty aktywne i mechaniczne (pasywne implanty medyczne: endoprotezy ortopedyczne lub naczyniowe itp.)	PQS, PWCZ, PMF	PPSN, PPSZ (> IPNob)
Zagrożenie balistyczne, rozumiane jako zagrożenie powodowane gwałtownym przemieszczaniem się przedmiotów ferromagnetycznych w otoczeniu magnesu	PMS	PPSN, PPSZ
Uruchomienie elektrycznych urządzeń (sieci strzałowe, zapalniki) inicjujących detonację materiałów wybuchowych	PWCZ	PPSN, PPSZ
Zapłon materiałów łatwopalnych lub atmosfer wybuchowych (spowodowany przez: wyładowania elektrostatyczne, iskrzenie prądu indukowanego w obiektach technicznych lub wyładowania iskrowe prądu kontaktowego stanu przejściowego)	PES, PQS, PWCZ, PMF	PPSN, PPSZ, PPSP (> IPNp)
Prądy kończynowe kontaktowe – podczas dotykania obiektu w polu-EM (prądy: kontaktowe stanu ustalonego, gdy osoba ma ciągłą styczność z obiektem, lub stanu przejściowego, w momencie rozpoczęcia lub przerwania styczności z obiektem (zależne od parametrów dielektrycznych i przestrzennej konfiguracji obiektów materialnych, na które oddziałuje pole-EM)	PES, PQS, PWCZ	PPSN, PPSZ, PPSP (> IPNp)

4. Zagrożenia elektromagnetyczne związane z medycznym wykorzystaniem źródeł pola elektromagnetycznego

Stosowanie medycznych technologii elektromagnetycznych z reguły wymaga zamierzonego oddziaływania pola-EM na organizm pacjenta na tyle silnego, aby wywołać określone skutki biofizyczne. Są to więc narażenia na poziomie pola-EM stref ochronnych według konwencji terminologicznej prawa pracy. System ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi oparty jest na powszechnie uznanych wnioskach z badań naukowych dotyczących natury skutków oddziaływania pola-EM na organizmy żywe i infrastrukturę techniczną, w związku z tym niezależnie od okoliczności formalno-prawnych i przyczyny oddziaływania pola-EM na organizm człowieka lub inne obiekty materialne, skutki takiego oddziaływania są takie same, a także środki organizacyjno-techniczne, jakie można zastosować, aby ograniczyć niepożądane skutki oddziaływania pola-EM. W związku z tym w ocenie skutków oddziaływania pola-EM emitowanego przez urządzenia medyczne (zarówno na pacjentów, jak i osoby przebywające w otoczeniu, w tym pracowników) można wykorzystać parametry charakteryzujące poziom narażenia na pole-EM i poziom skutków oddziaływania pola-EM w organizmie, dla których w prawie pracy określono limity IPN i GPO – odnoszące się do wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego (E i H), współczynnika SAR i natężenia pola-E indukowanego w organizmie (Ew), a także natężenia prądu kończynowego kontaktowego, przepływającego w kończynach w wyniku dotykania obiektu w polu-EM, i prądu indukowanego bezpośrednio w organizmie człowieka znajdującego się w polu-EM.

4.1. Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC)

Przeciwdziałanie zagrożeniom bezpieczeństwa pacjentów i pracowników, związanym ze wspomnianymi oddziaływaniami pośrednimi na urządzenia elektryczne w pobliżu urządzeń emitujących pole-EM, przekształciło się w rozległy obszar działalności techniczno-administracyjnej określanej jako EMC (ang. *electromagnetic compatibility*) [7, 8, 19-21]. Celem stosowania reguł EMC jest zapewnienie, aby w pobliżu zamierzonego źródła pola-EM znajdowały się jedynie takie urządzenia, których konstrukcja zapewnia wystarczający poziom odporności na indukowane w nich elektromagnetycznie zakłócenia.

Limity dotyczące poziomu emisji elektromagnetycznych z urządzeń elektronicznych i elektrycznych przeznaczonych do użytku domowego i biurowego, a także minimalnej odporności takich urządzeń na zakłócenia wynikające z oddziaływania pola-EM są najniższe. Wyższe wymagania dotyczące odporności na oddziaływanie pola-EM stosuje się do urządzeń medycznych, jednak są one znacznie łagodniejsze od wymagań dotyczących ochrony ludności przed oddziaływaniem długotrwałym pola-EM (pomimo, że może ono dotyczyć również dzieci, kobiet w ciąży, osób starszych, chorych lub użytkujących elektroniczne implanty medyczne). Najsilniejsze

narażenia (tzn. najbardziej łagodne ograniczenia) dotyczą krótkotrwałej/tymczasowej ekspozycji pracowników (ze względu zarówno na dopuszczenie do takich ekspozycji jedynie pracowników, którzy nie mają przeciwwskazań zdrowotnych, jak i regularną kontrolę warunków ich narażenia i stosowanie koniecznych technicznych lub organizacyjnej środków ograniczenia zagrożeń-EM).

Konsekwencją wspomnianych zależności jest możliwość wystąpienia zagrożeń wynikających z niewystarczającej kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń elektronicznych w razie ich użytkowania w pobliżu omawianych urządzeń medycznych, a także zakłócenie pracy urządzeń medycznych przez inne źródła silnego pola-EM, np. radiotelefony lub czytniki RFID przeznaczone do użytkowania przy dalekim zasięgu komunikacji.

4.2. Zagrożenia termiczne

Biorąc pod uwagę silne narażenie pacjentów na pole-EM, stosowane w zabiegach medycznych wykorzystujących skutki termiczne oddziaływania pola-EM, przeciwdziałanie niepożądanym skutkom narażenia na pole-EM pacjentów i przeprowadzających zabiegi pracowników, powinno uwzględniać zalecenia ochronne sformułowane na podstawie badań naukowych dotyczących zagrożeń w środowisku pracy. Istotnym odniesieniem w tym zakresie mogą być najnowsze zalecenia dotyczące ograniczania zagrożeń wynikających z narażenia na pole-EM częstotliwości radiowych i ich uzasadnienie sformułowane w zaleceniach ICNIRP 2020, w którym podano [11]:

- *Jedynie w ramach stosowania odpowiedniego programu zapewnienia bezpiecznych i higienicznych warunków pracy można korzystać z kryteriów oceny zagrożeń-EM określonych w formie limitów określonych jako „zawodowe”.*
- *Stosowanie takiego programu wymaga zrozumienia potencjalnych skutków narażenia na pole-EM o częstotliwości radiowej, w tym rozważenia czy skutki biologiczne wynikające z narażenia pracownika mogą sumować się ze skutkami biologicznymi wynikającymi z innych okoliczności wykonywania pracy (np., gdy temperatura wewnętrzna ciała jest już podwyższona z powodu forsownej aktywności fizycznej).*
- *Podobnie ważne jest także rozważenie, czy dana osoba cierpi na chorobę lub stan, który może wpływać na jej zdolność do termoregulacji lub czy mogą występować przeszkody środowiskowe w rozpraszaniu ciepła powstającego w organizmie wskutek oddziaływania pola-EM.*
- *Limity SAR dotyczące całego ciała przyjęto w celu ochrony pracownika przed zwiększonym obciążeniem układu sercowo-naczyniowego (ze względu na pracę, którą musi on wykonać, aby ograniczyć wzrost temperatury wewnętrznej ciała) oraz (w razie wzrostu temperatury ciała do niebezpiecznego poziomu) przed kaskadą zmian funkcjonalnych, które mogą prowadzić zarówno do odwracalnych, jak i nieodwracalnych skutków w organizmie*

- (w tym w mózgu, sercu i nerkach) – za niebezpieczny fizjologicznie przyjmuje się poziom temperatury wewnętrznej ciała przekraczający 40°C (lub wzrost o około 3°C w stosunku do normotermii).
- Oddziaływania pola-EM na poziomie „zawodowym” (tj. poniżej limitów IPNob) nie powinno spowodować wzrostu wewnętrznej temperatury ciała o więcej niż 0,1°C i niepożądanych skutków obciążenia termicznego organizmu, ale należy zachować ostrożność w ocenie zagrożeń-EM, gdy pracownika dotyczą również inne zagrożenia/okoliczności wpływające na temperaturę wewnętrzną ciała, takie jak: wysoka temperatura otoczenia, wysoka aktywność fizyczna i utrudnienia w normalnej termoregulacji (takie jak używanie odzieży termoizolacyjnej lub niektóre schorzenia). Tam, gdzie spodziewane jest znaczne ciepło z innych źródeł, zaleca się, aby pracownicy byli wyposażeni w odpowiednie środki do sprawdzania wewnętrznej temperatury ciała.
 - Dotrzymanie limitów dotyczących miejscowych skutków oddziaływania pola-EM w organizmie powinno ograniczyć prawdopodobieństwo wystąpienia odczuć bólowych i termicznego uszkodzenia tkanek. W opinii ekspertów ICNIRP w obrębie tkanki typu 1., na przykład w skórze i kończynach, ból (spowodowany stymulacją nocyceptorów) i uszkodzenie tkanki (spowodowane denaturacją białek) mogą wystąpić, jeśli temperatura w organizmie osiągnie lokalnie około 41°C.
 - W przypadku tkanek typu 2., występujących w okolicy głowy i na tułowie (z wyłączeniem tkanek powierzchniowych), wystąpienie uszkodzeń jest również mało prawdopodobne w temperaturze poniżej 41°C.
 - Ostrożność zalecono, gdy pracownik jest narażony na oddziaływanie termiczne innych źródeł ciepła, które mogą zwiększać skutki narażenia na pole-EM o częstotliwości radiowej, takich jak te opisane powyżej w odniesieniu do wewnętrznej temperatury ciała. W przypadku powierzchniowych scenariuszy narażenia miejscowy dyskomfort termiczny i ból mogą być ważnymi wskaźnikami potencjalnego termicznego uszkodzenia tkanek. Dlatego ważne jest, szczególnie w sytuacjach, w których występują też inne stresory termiczne, aby pracownik rozumiał, że narażenie na pole-EM o częstotliwości radiowej może przyczynić się do jego obciążenia termicznego, i był w stanie podjąć odpowiednie działania w celu złagodzenia potencjalnych szkód.

4.3. Zagrożenia w otoczeniu źródeł silnego pola magnetostatycznego

Bezpośrednią przyczyną bardzo poważnych zagrożeń bezpieczeństwa pracowników, a także uszkodzenia urządzeń może być bardzo silne pole magneto-statyczne (PMS), występujące np. przy magnesach nadprzewodzących skanerów rezonansu magnetycznego [14, 22]. Skutkiem oddziaływania PMS o niejednorodnym rozkładzie przestrzennym na przedmioty ferromagnetyczne jest siła przesunięcia (translacji). Jeśli oddziaływanie takie przewyższa opory tarcia, to przedmiot jest

przesuwany w kierunku magnesu. W przypadku przedmiotów o wydłużonym kształcie występuje również siła obrotu, której skutkiem jest dążenie przedmiotu do ustawienia, w którym dłuższa oś przedmiotu jest zgodna z polaryzacją oddziałującego pola (podobnie do zachowania igły kompasu ustawiającej się zgodnie z polaryzacją pola geomagnetycznego). Podatność przedmiotów na wspomniane oddziaływania jest zależna od ich kształtu i masy, rodzaju materiału z jakiego są wykonane, a także od rodzaju powierzchni przedmiotów i podłoża na jakim się znajdują. Siła translacji wywierana przez PMS jest proporcjonalna do iloczynu indukcji magnetycznej (B) tego pola i gradientu indukcji w przestrzeni (dB/dx), natomiast siła obrotu jest proporcjonalna do kwadratu indukcji magnetycznej. W pobliżu źródła PMS poziom indukcji magnetycznej raptownie wzrasta w miarę zbliżania się do niego, np. w pobliżu skanera rezonansu magnetycznego można szacować, że przy obudowie poziom indukcji jest 100-krotnie wyższy niż w odległości 100 cm. W związku z tym, w otoczeniu magnesu siła translacji i siła obrotu gwałtownie narastają w miarę zbliżania się do niego. W takim miejscu obiekty ze stali magnetycznej czy niklu, nawet o masie wielu kilogramów (takie jak narzędzia, klucze, butle z tlenem, krzesła, łóżka pacjentów) mogą zachowywać się jak lecące w stronę magnesu pociski i z tego powodu stwarzają poważne zagrożenie, nie tylko uszkodzenia infrastruktury technicznej, ale również zagrożenia zdrowia i życia pacjentów i pracowników.

W razie oddziaływania omagnetomechanicznego przewyższającego siłę grawitacji, przedmiot ferromagnetyczny może lewitować w kierunku magnesu z narastającą gwałtownie prędkością – z tego powodu wspomniane skutki określane bywają jako zagrożenia balistyczne lub zagrożenia powodowane „latającymi przedmiotami” (ang. *ballistic hazards*, *projectile hazards* lub „*flying objects*” *hazards*). Na oddziaływanie magnetomechaniczne podatne są przede wszystkim ferromagnetyki, do których zaliczane są żelazo czyste lub techniczne i nikiel. Oddziaływanie tego typu nie dotyczy przedmiotów z materiałów diamagnetycznych i paramagnetycznych. Paramagnetykami są na przykład powietrze, aluminium i tytan, a diamagnetykami próżnia, złoto, srebro, miedź i woda.

Ponadto poruszanie się w obszarze silnego PMS wywołuje przepływ w organizmie prądów zaindukowanych (podobnie jak oddziaływanie pola zmiennego w czasie) i może powodować takie odczucia jak: zawroty głowy i utrata równowagi, nudności, utrudniona koordynacja wzrokowo-ruchowa. Ustają one po oddaleniu się od źródła PMS i mają nieustalony dotychczas wpływ na stan zdrowia przy narażeniu wieloletnim, natomiast mogą istotnie ograniczać zdolność do wykonywania wielu czynności zawodowych w sposób bezpieczny dla pracownika i pacjenta, a także z zachowaniem niezbędnej dokładności [14, 23].

5. Podsumowanie

Nieodłącznym elementem licznych procedur medycznych jest wykorzystanie urządzeń emitujących silne pole-EM różnych częstotliwości z zakresu promieniowania niejonizującego, tj. o częstotliwościach nie przekraczających 300 GHz. Podobne konsekwencje oddziaływania silnego pola-EM podczas zabiegów medycznych należy brać pod uwagę zarówno w stosunku do pacjentów, jak i pracowników (tabela 4).

Tabela 4. Charakterystyka zagrożeń elektromagnetycznych przy typowych urządzeniach wykorzystujących pole-EM do zamierzonych zastosowań medycznych

Urządzenia	Rodzaj pola-EM	Typowe zasięg pola-EM wymagającego stosowania środków ochronnych	Zagrożenia bezpieczeństwa i zdrowia
Urządzenia do diagnostyki rezonansu magnetycznego	Stale emitowane PMS Podczas badania pacjenta PQS i PWCZ	wewnątrz sali diagnostycznej ekranowanej elektromagnetyczne	ZB, ZI, ZP, ZR, ZEMC
Urządzenia do diatermii chirurgicznej	Podczas zabiegu PWCZ lub PMF	do 100 cm od elektrod i kabli	ZI, ZP, ZEMC
Urządzenia do diatermii fizykoterapeutycznej	Podczas zabiegu PWCZ lub PMF	do 300 cm od aplikatorów, kabli i generatorów	ZI, ZP, ZEMC
Urządzenia do magnetoterapii	Podczas zabiegu PQS lub PMS	do 100 cm od aplikatorów	ZI, ZEMC

– ZB – zagrożenia balistyczne; ZI – zagrożenie dla osób z implantami, ZP – zagrożenie poparzeniem radiofale, ZR – zagrożenia związane z poruszaniem się w silnym polu magnetycznym, ZEMC – zagrożenia dla aparatury elektronicznej (niewystarczająca kompatybilność elektromagnetyczna)

Jedynymi osobami, których narażenie jest zamierzone są pacjenci poddawani zabiegom zgodnym z zaleceniami lekarskimi, jednak nawet ich narażenie nie powinno powodować nieplanowanych, nadmiernych skutków zastosowanej interwencji medycznej. Z tego powodu konieczne jest zapewnienie odpowiedniej ochrony przed niepożądanym lub niekontrolowanym oddziaływaniem pola-EM – zarówno na pracowników różnych specjalności medycznych, jak i pacjentów, a także osoby postronne, przebywające w pobliżu pracujących urządzeń medycznych emitujących silne pole-EM.

W każdym przypadku właściwe rozpoznanie zagrożeń elektromagnetycznych, jakie mogą wystąpić podczas użytkowania poszczególnych urządzeń, ułatwia zaplanowanie i wdrożenie skutecznych środków ochronnych ograniczających praw-

dopodobieństwo lub ciężkość niepożądanych skutków oddziaływania pola-EM na ludzi i inne obiekty materialne.

Do medycznych źródeł silnego pola-EM zaliczamy w pierwszym rzędzie urządzenia elektrochirurgiczne, fizykoterapeutyczne i skanery rezonansu magnetycznego. Inne urządzenia fizykoterapeutyczne stosowane do terapii prądem (elektroterapii) lub ultradźwiękami nie wytwarzają pola-EM o poziomach wymagających kontroli lub ograniczania. W związku z dynamicznym rozwojem różnych technik medycznych, konieczne jest jednak monitorowanie doniesień prezentujących charakterystyki pola-EM wykorzystywanego w nowych zastosowaniach i charakterystyki jego oddziaływania na ludzi i środowisko techniczne.

Wykorzystanie doświadczeń praktycznych z zakresu ochrony pracowników przed zagrożeniami elektromagnetycznymi i umiejętności praktycznych, jakie pracownicy zdobywają w ramach edukacji z zakresu bezpieczeństwa i higieny pracy, może być również przydatne w poprawie bezpieczeństwa pacjentów poddawanych medycznym zabiegom „elektromagnetycznym”.

Opracowano w ramach realizacji VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej (zadanie nr 3.ZS.14, pt. Badanie i ocena warunków koegzystencji człowieka z urządzeniami w świecie technologii elektromagnetycznych w ramach Centrum Badań i Promocji Bezpieczeństwa Elektromagnetycznego Pracujących i Ludności (EM-Centrum)). Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] WHO – World Health Organization: Environmental Health Criteria 137, *Electromagnetic Fields (300 Hz-300 GHz)*, 1993, <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc137.htm> [Tłumaczenie – *Pola elektromagnetyczne*, Łódź, IMP, 1995, Kryteria Zdrowotne Środowiska, 137].
- [2] SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. *Health effects of exposure to EMF*, SCENIHR adopted this opinion at the 28th plenary meeting on 19 January 2009.
- [3] SCENIHR, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks. *Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)*, SCENIHR adopted this opinion at the 9th plenary meeting on 27 January 2015.
- [4] KORNIWICZ H., KARPOWICZ J., GRYZ K. i in., *Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu częstotliwości 0 Hz-300 GHz. Dokumentacja proponowanych znowelizowanych wartości dopuszczalnych ekspozycji zawodowej*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2001, 2(28), 97-238.

- [5] KARPOWICZ J., BORTKIEWICZ A., GRYZ K. i in., *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*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2008, 4(58), 7-45.
- [6] KARPOWICZ J., *Ochrona przed zagrożeniami elektromagnetycznymi w środowisku pracy w świetle najnowszych opracowań międzynarodowych*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2022, 4(114), 153-177.
- [7] ZRADZIŃSKI P., KARPOWICZ J., GRYZ K., *Podstawy oceny elektromagnetycznych okoliczności użytkowania nasobnych urządzeń Internetu Rzeczy*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2022a, 4(114), 7-38.
- [8] ZRADZIŃSKI P., KARPOWICZ J., GRYZ K., *Ocena elektromagnetycznych okoliczności użytkowania nasobnych lokalizatorów*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2022b, 4(114), 65-78.
- [9] BIEŃKOWSKI P., KARPOWICZ J., KIELISZEK J., *Przegląd miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne i właściwości metrologicznych mierników, istotnych podczas oceny narażenia w środowisku pracy*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2016, 4(90), 41-74.
- [10] ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*, Health Phys. 1998, 74, 494-522.
- [11] ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)*, Health Phys. 2020, 118(5), 483-524.
- [12] IEEE Std C95.1-2019, Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA, 2019.
- [13] *Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2013/35/UE z dnia 26 czerwca 2013 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na zagrożenia spowodowane czynnikami fizycznymi (polami elektromagnetycznymi) (dwudziesta dyrektywa szczegółowa w rozumieniu art. 16 ust. 1 dyrektywy 89/391/EWG) i uchylająca dyrektywę 2004/40/WE*, Dz. Urz. UE L 179/1 z 29.06.2013.
- [14] *Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 czerwca 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na pole elektromagnetyczne*, Dz.U. 2018, poz. 331 (t.j.).
- [15] Zradziński P. *Uwarunkowania wykorzystania numerycznych modeli pracowników do oceny zagrożeń bezpośrednich wynikających z narażenia na pole elektromagnetyczne*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2016, 4(90), 75-89.
- [16] GRYZ K., KARPOWICZ J., *Zasady oceny zagrożeń elektromagnetycznych związanych z występowaniem prądów indukowanych i kontaktowych*, Podst. Metod. Ocen. Srod. Pr. 2008, 4(58), 137-171.
- [17] ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, *General approach to protection against non-ionizing radiation*, Health Phys. 2002, 82(4), 540-548.
- [18] *Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdro-*

- wia w środowisku pracy. Załącznik 2. Część E: „Pole elektromagnetyczne”, Dz.U. z 2018 r. poz. 1286.
- [19] PN-EN 61000-4-8:2010 *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-8: Metody badań i pomiarów – Badanie odporności na pole magnetyczne o częstotliwości sieci elektroenergetycznej.*
- [20] ZRADZIŃSKI P., KARPOWICZ J., GRYZ K., *Electromagnetic energy absorption in a head approaching a radiofrequency identification (RFID) reader operating at 13.56 MHz in users of hearing implants versus non-users*, Sensors, 2019, 19, 3724.
- [21] ZRADZIŃSKI P., KARPOWICZ J., GRYZ K., i in., *Evaluation of the safety of users of active implantable medical devices (AIMD) in the working environment in terms of exposure to electromagnetic fields: practical approach to the requirements of European Directive 2013/35/EU*, Int. J. Occup. Med. Environ. Health 2018, 31(6), 795-808.
- [22] KARPOWICZ J., GRYZ K., *Experimental evaluation of ballistic hazards in imaging diagnostic center*, Polish Journal of Radiology, 2013, 78(2): 31-37.
- [23] KARPOWICZ J., GRYZ K., *Rozpoznanie i ocena zagrożeń elektromagnetycznych w placówkach diagnostyki obrazowej rezonansu magnetycznego – część I*, Inżynier i Fizyk Medyczny, 6, 2017:399-406.