



Marek Zmysłony, Piotr Politański

**ZAGROŻENIA ZDROWIA
I OCHRONA ZDROWIA PRACUJĄCYCH
W NARAŻENIU NA POLA
I PROMIENIOWANIE
ELEKTROMAGNETYCZNE 0–300 GHz**



INSTYTUT MEDYCyny PRACY IM. PROF. J. NOFERA

Marek Zmysłony, Piotr Politański

**ZAGROŻENIA ZDROWIA
I OCHRONA ZDROWIA PRACUJĄCYCH
W NARAŻENIU NA POLA
I PROMIENIOWANIE
ELEKTROMAGNETYCZNE 0–300 GHz**



INSTYTUT MEDYCYNY PRACY IM. PROF. J. NOFERA

Wydanie sfinansowano z tematu 14/MP/2009/312/1011.

Copyright © by Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź 2009

Redakcja: Agata Arzapalo, Katarzyna Rogowska
Korekta: Edyta Olejnik
Skład i opracowanie typograficzne: Monika Popielata
Projekt okładki: Ida Kuśmierczyk

ISBN 978-83-60818-38-1

Wydawca:
Oficyna Wydawnicza Instytutu Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera
ul. św. Teresy 8, 91-348 Łódź
Redakcja: tel. 42 6314-717/718, e-mail: oficyna@imp.lodz.pl
Księgarnia: tel./faks: 42 6314-719, e-mail: ow@imp.lodz.pl
<http://www.imp.lodz.pl/oficyna/ksiegarnia>

Druk i oprawa:
Drukarnia Wydawnictw Naukowych Sp. z o.o.
ul. Wydawnicza 1/3, 92-333 Łódź

Spis treści

Wstęp	5
1. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne — podstawowe definicje	7
2. Naturalne i sztuczne PEM	15
3. Działanie PEM na obiekty biologiczne — mechanizmy	25
3.1. Pole elektryczne	26
3.2. Pole magnetyczne	28
3.3. Promieniowanie elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości	32
4. Efekty zdrowotne	35
5. Ochrona pracowników przed PEM w Polsce i Unii Europejskiej	41
Piśmiennictwo	51

Wstęp

Niejonizujące pola elektromagnetyczne (PEM) to jeden z bardziej tajemniczych i budzących niepokój czynników fizycznych występujących w środowisku człowieka. Towarzyszą one człowiekowi od zawsze, bowiem jako gatunek ukształtowaliśmy się w naturalnych polach ziemskich. Od momentu, w którym nauczone się wytwarzać energię elektryczną, a następnie przesyłać ją przy pomocy prądu elektrycznego, obserwuje się jednak systematyczny wzrost sztucznych PEM, tj. wytwarzanych przez człowieka.

Zjawisko to nasiliło się w pierwszej połowie XX wieku, kiedy do użytku wprowadzono szereg technik związanych z wykorzystaniem PEM (np. radio). Sztuczne PEM wielokrotnie przekraczają poziomy naturalnego pola ziemskiego, pojawiły się też pola o częstotliwościach, które w przyrodzie nie występują. Zwiększenie ekspozycji dotyczy wszystkich ludzi, ale szczególnie tych, którzy zatrudnieni są na stanowiskach pracy związanych z wykorzystaniem urządzeń wytwarzających PEM.

Głównym powodem, dla którego PEM jest obiektem zainteresowania higienistów, jest to, że jest ono formą energii. Energia ta rozprzestrzenia się z prędkością światła w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Kiedy w PEM znajdzie się obiekt materialny (np. człowiek), energia wnika w głąb niego i jest mu stopniowo przekazywana — na cząsteczki obiektu obdarzone ładunkami elektrycznymi (a z takich cząstek jest zbudowany człowiek) działa siła. Teoretycznie może to doprowadzić do zaburzenia funkcjonowania napromienionego organizmu.

Z uwagi na stosunkowo późne pojawienie się tego czynnika w środowisku pracy, w okresie gdy zaczęto przykładać dużą wagę do ochrony pracy, wprowadzono normatywy dotyczące PEM zanim jeszcze udowodniono ich rzeczywiste szkodliwe działanie (już w połowie XX wieku). Podstawą były głównie rozważania teoretyczne i bardzo mały zbiór wyników badań uzyskanych przede wszystkim dla PEM o bardzo dużych wartościach, nigdy niewystępujących

w warunkach rzeczywistych. Można więc powiedzieć, że od samego początku działań mających na celu ochronę zdrowia pracujących mieliśmy do czynienia z zasadą ostrożności¹. Nie będzie chyba przesadzone stwierdzenie, że tak wczesne wprowadzenie normatywów i systemu ochrony pracowników ekspozowanych zawodowo, sprawiło, że poziomy PEM emitowanych przez różne urządzenia nie wzrastały bez ograniczenia (głównie przez ich odpowiednie projektowanie i instalowanie), a co za tym idzie przyczyniło się do uchronienia zdrowia pracowników ekspozowanych przed negatywnym wpływem silnych pól. Należy jednak pamiętać, że nasza wiedza o biologicznym działaniu PEM — zwłaszcza o niskich poziomach — jest dalece niepełna i konieczne jest prowadzenie intensywnych badań, a w razie potrzeby weryfikacja przepisów, by ochrona zdrowia osób ekspozowanych była jeszcze skuteczniejsza.

Na pierwszej linii obrony przed negatywnymi skutkami ekspozycji na PEM stoją służby bhp i lekarze medycyny pracy. Powinni mieć oni wiadomości nie tylko o obowiązujących przepisach, ale również o aktualnym stanie wiedzy o skutkach biologicznych (zwłaszcza zdrowotnych), nie wspominając już o dotyczącej tego czynnika. Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie w prosty i skondensowany sposób informacji na powyższe tematy.

¹ Oczywiście baza danych doświadczalnych oraz nasza znajomość mechanizmów działania PEM znacznie się od tego czasu powiększyła i pojawiły się hipotezy o możliwości szkodliwego działania pól dotychczas uważanych za bezpieczne. To stało się podstawą do stawiania postulatów zaostrożenia normatywów higienicznych (co prawda zwłaszcza dla ochrony populacji generalnej), znowu powołując się na zasadę ostrożności.

1. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne — podstawowe definicje

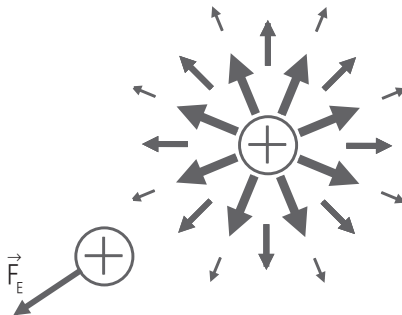
Aby móc opisać dowolne pole, należy podać jego źródło i opisującą je wielkość fizyczną. Każdemu punktowi przestrzeni otaczającej źródło przypisuje się odpowiednią wartość tej wielkości. W przypadku PEM mamy do czynienia z dwoma polami: elektrycznym i magnetycznym. Źródłem pola elektrycznego są wszystkie ładunki elektryczne, a wielkością je opisującą — natężenie pola elektrycznego \vec{E} (jest to wektor). Istnienie wektora \vec{E} powoduje, że na cząsteczkę obdarzoną ładunkiem (ładunek próbny), umieszczoną w tej przestrzeni, działa siła \vec{F}_E :

$$\vec{F}_E = q\vec{E} \quad [1]$$

gdzie:

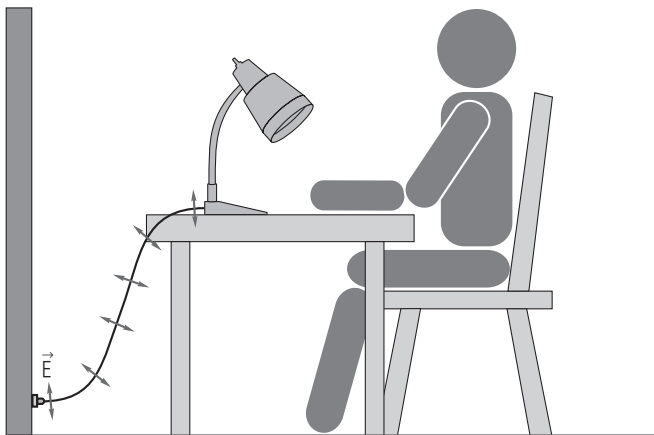
q — wartość ładunku próbnego,
jednostką wektora \vec{E} jest V/m (volt na metr) i jednostki pochodne,
przede wszystkim kV/m (1000 V/m).

W wyniku działania siły \vec{F}_E ładunki próbne, które początkowo są nieruchome, w polu elektrycznym zaczynają się poruszać po torach, które nazywane są liniami sił pola elektrycznego (ryc. 1).



Ryc. 1. Pole elektryczne.

W praktyce pole elektryczne jest wytwarzane w otoczeniu wszystkich urządzeń znajdujących się pod napięciem, np. w otoczeniu przewodu lampki biurowej włączonej do sieci (nawet nieświecącej) (ryc. 2).



Ryc. 2. Pole elektryczne w otoczeniu nieświecącej lampki elektrycznej.

Źródłem pola magnetycznego są poruszające się ładunki elektryczne (prąd elektryczny). Wielkością opisującą pole magnetyczne jest wektor indukcji magnetycznej \vec{B} . Jej jednostką jest T (tesla) i jednostki pochodne — najczęściej militesla ($1 \text{ mT} = 10^{-3} \text{ T}$) i mikrottesla ($1 \text{ }\mu\text{T} = 10^{-6} \text{ T}$), niekiedy używa się też G (gauss) ($1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$).

Drugą wielkością często używaną do opisu pola magnetycznego jest natężenie pola elektrycznego \vec{H} . Jego jednostką jest A/m (amper na metr). Dla próżni (w przybliżeniu również dla powietrza) między \vec{B} a \vec{H} istnieje związek powodujący, że ich wartości można przeliczać według zależności:

$$1 \text{ A/m} = 1,256 \times 10^{-6} \text{ T} \quad (1 \text{ A/m} = 1,256 \times 10^{-2} \text{ G}) \quad [2]$$

Obojętnie jest zatem, której z nich użyjemy do opisu pola.

Istnienie wektora \vec{B} (\vec{H}) powoduje, że na poruszającą się cząsteczkę obdarzoną ładunkiem (poruszający się ładunek próbny), umieszczoną w tej przestrzeni, będzie działała siła \vec{F}_B :

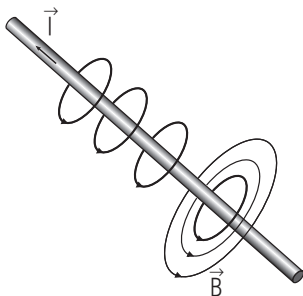
$$\vec{F}_B = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad [3]$$

gdzie:

\vec{v} — prędkość ładunku próbnego,

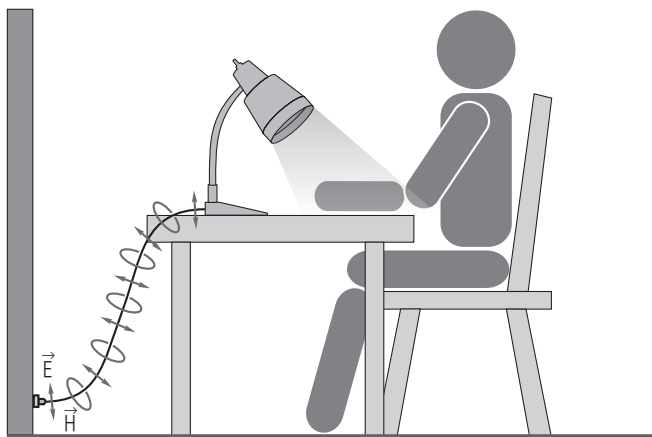
\vec{B} — indukcja magnetyczna.

W wyniku działania siły \vec{F}_B poruszające się ładunki próbne będą zakrzywiały swoje tory ruchu, ze względu na kolisty kształt linii indukcji magnetycznej (ryc. 3).



Ryc. 3. Linie indukcji magnetycznej.

W praktyce pole magnetyczne jest wytwarzane w otoczeniu wszystkich urządzeń, przez które płynie prąd elektryczny, np. w otoczeniu przewodu świecącej się lampki (ryc. 4).



W tym przypadku występuje również pole \vec{E} , ponieważ jego źródłem są zarówno stacjonarne, jak i poruszające się ładunki elektryczne.

Ryc. 4. Pole magnetyczne \vec{H} w otoczeniu świecącej się lampki.

Działanie na ładunki sił w polach elektrycznych i magnetycznych jest przyczyną naszego zainteresowania nimi. Człowiek bowiem, tak jak wszystkie obiekty materialne, jest zbudowany z ładunków i zmiany w ich położeniu czy zaburzenia ich ruchu mogą prowadzić do zmian w funkcjonowaniu organizmu.

Wynikiem działania na cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym sił jest ich ruch, czyli przepływ (indukowanie) prądu. Gęstość prądu indukowanego wynosi:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad [4]$$

gdzie:

σ — przewodność elektryczna obiektu.

Ponieważ na ładunki próbne umieszczone w polu elektrycznym i magnetycznym działa siła, w polach tych zgromadzona jest energia potencjalna, którą nazywamy energią elektryczną i magnetyczną.

Energia elektryczna W_E wyrażona jest wzorem:

$$W_E = \frac{1}{2} \epsilon (E)^2 \quad [5]$$

gdzie:

ϵ — stała dielektryczna.

Energia magnetyczna W_H :

$$W_H = \frac{1}{2} \mu (H)^2 \quad [6]$$

Podsumowując, dla naszych rozważań fundamentalna jest informacja, że w polu elektrycznym i magnetycznym zgromadzona jest energia, która może być przekazywana znajdującym się w nim obiektom materialnym (także biologicznym).

W drugiej połowie XIX wieku Maxwell wykazał, że jeżeli jedno z pól (elektryczne lub magnetyczne) zmienia się w czasie, to w wyniku tego zawsze powstaje pole drugie (również zmienne w czasie), przy czym jest ono zlokalizowane nieco dalej. W wyniku zaburzenia jednego z pól (spowodowanego tym, że zmienia się ono w czasie) powstaje impuls elektromagnetyczny, który będzie przesuwał się w przestrzeni. Zjawisko to nazywamy promieniowaniem elektromagnetycznym. Wraz z impulsem przesuwa się w przestrzeni energia elektromagnetyczna, którą można opisać wzorem:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad [7]$$

gdzie:

\vec{S} — gęstość strumienia energii (wektor Poyntinga).

Jeżeli zamiast pojedynczego impulsu dysponujemy ich większą liczbą, np. powodujemy, że prąd w obwodzie elektrycznym (będący źródłem pola magnetycznego) zmienia okresowo swój kierunek na przeciwny z częstotliwością f , to będziemy mieli do czynienia z promieniowaniem ciągłym (f to liczba zmian kierunku ruchu w ciągu jednostki czasu. Jej jednostką jest Hz [hertz], równa jednej pełnej zmianie w ciągu 1 s i jej pochodne, np. kHz — 10^3 Hz, MHz — 10^6 Hz).

W pewnej odległości od źródła promieniowania (miejsca, w którym nastąpiło zaburzenie pola) ciągle promieniowanie elektromagnetyczne nabiera charakteru falowego, tzn. można je opisać przy pomocy wielkości charakterystycznych dla ruchu falowego, m.in. przy pomocy długości fali λ , tj. odległości między grzbietami impulsów (ryc. 5). Dla fali elektromagnetycznej wektory \vec{E} i \vec{H} są prostopadłe, a ich stosunek jest stały i wynosi:

$$\frac{\vec{E}}{\vec{H}} = 377\Omega \quad [8]$$

Kształt fali elektromagnetycznej przedstawiono na rycinie 5.

Przyjmuje się, że promieniowanie elektromagnetyczne staje się falą w odległości większej niż 1λ . Ponieważ długość fali jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości, to im mniejsza jest częstotliwość promieniowania, tym większa jest odległość, w której mamy do czynienia z falą elektromagnetyczną. Dla przykładu dla $f = 50$ Hz długość fali λ w powietrzu wynosi 5980 km, dla $f = 50$ kHz — $\lambda = 5,98$ km, dla $f = 50$ MHz — $\lambda = 5,98$ m, dla $f = 50$ GHz — $\lambda = 0,58$ cm itd. W odniesieniu do fali elektromagnetycznej rozważania teoretyczne dotyczące PEM znacznie się upraszczają. Dotyczy to zwłaszcza energii padającej, kiedy wektor Poyntinga ma następującą postać:

$$S = EH = \frac{1}{377\Omega} E^2 = 377\Omega H^2 \quad [9]$$

Można wykazać, że wartość S w odległości r od źródła promieniowania wynosi dla fali elektromagnetycznej:

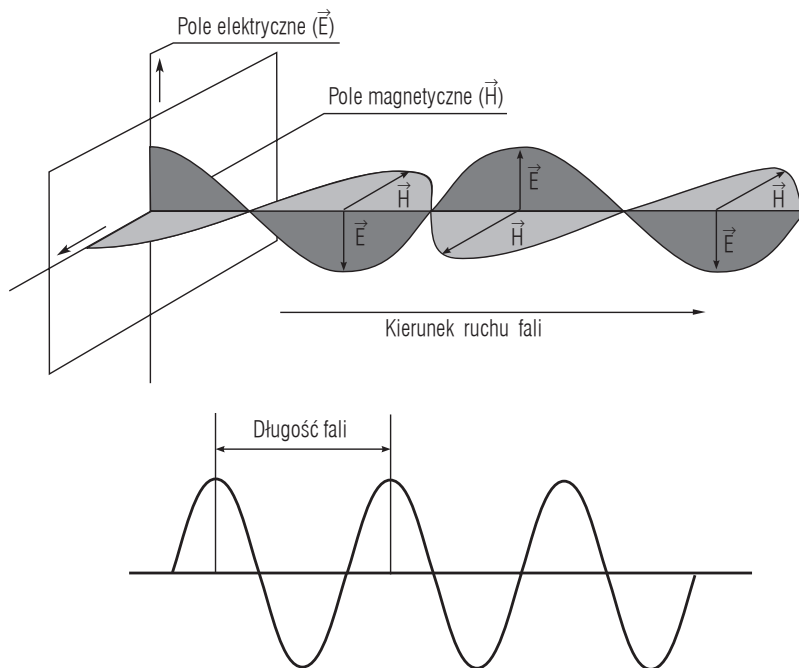
$$S = \frac{P}{r^2 4\pi} \quad [10]$$

gdzie:

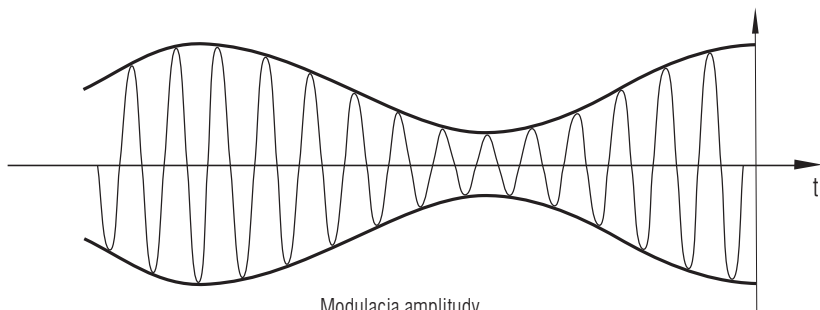
P — moc źródła [W].

Z tego powodu wektor Poyntinga często nazywa się gęstością mocy padającej, a jego jednostką jest W/m^2 . Wynika z tego, że jeżeli mamy do czynienia z promieniowaniem elektromagnetycznym o właściwościach fali, to do wyznaczenia wielkości energii elektromagnetycznej niesionej przez promieniowanie wystarczy znajomość tylko jednej składowej PEM, natomiast w przypadku odległości mniejszych konieczna jest znajomość obydwu składowych (również kąta pomiędzy nimi). Ma to ogromne znaczenie przy ocenie PEM wykonywanej dla celów ochrony przed nimi i przy tworzeniu normatywów.

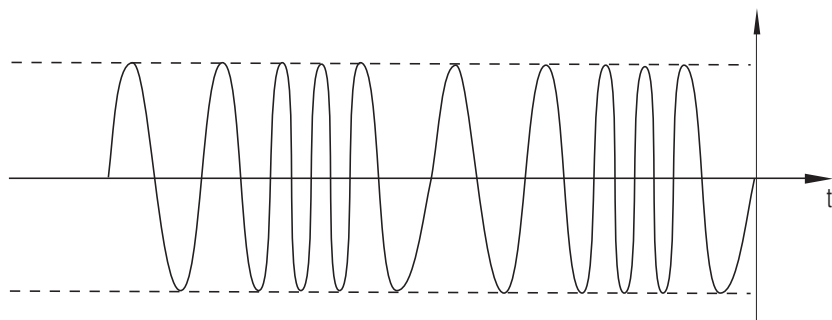
Fala elektromagnetyczna, która może mieć różny kształt (ryc. 5), jest falą ciągłą. Można ją jednak w różny sposób kształtować (modulować), wprowadzając okresowe zmiany jej parametrów. Bardzo wiele danych doświadczalnych wskazuje na to, że modulacja ma duże znaczenie dla wywoływania różnych efektów biologicznych. Na rycinie 6. przedstawiono podstawowe rodzaje modulacji.



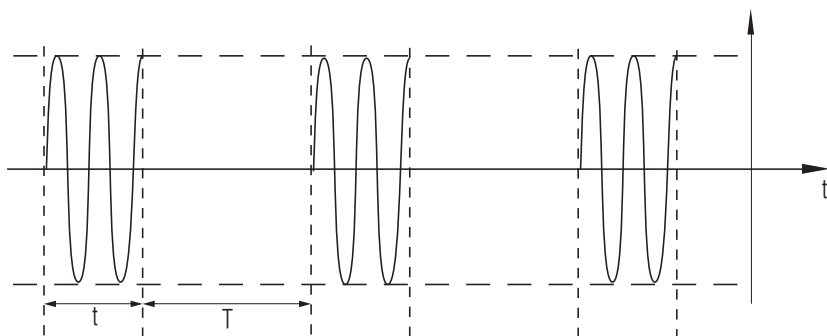
Ryc. 5. Fala elektromagnetyczna.



Modulacja amplitudy



Modulacja częstotliwości



Modulacja impulsowa

Ryc. 6. Różne rodzaje modulacji fali elektromagnetycznej.

2. Naturalne i sztuczne PEM

Jednym ze składników środowiska naturalnego człowieka jest środowisko elektromagnetyczne. Na Ziemi są więc wszędzie obecne towarzyszące jej od początku istnienia pola elektryczne i magnetyczne, które mają naturalne źródła. Dzieli się je na pola pochodzenia ziemskiego i pozaziemskiego. Najważniejszymi polami pochodzenia ziemskiego są stałe pola elektryczne i magnetyczne Ziemi.

Stałe pole elektryczne ziemskie jest prostopadłe do jej powierzchni, a jego powstawanie wynika z tego, że powierzchnia Ziemi jest naładowana ujemnie, a górne warstwy atmosfery — dodatnio. Wartość natężenia pola elektrycznego jest różna w różnych miejscach (największa w średnich szerokościach geograficznych, a maleje w kierunku równika i biegunów). Jako wartość średnią dla całej Ziemi przyjmuje się 130 V/m. Wartość pola maleje również ze zmianą wysokości, osiągając 5 V/m na wysokości 9 km nad powierzchnią Ziemi. Natężenie ziemskiego pola elektrycznego podlega zmianom rocznym — największe występuje w okresie grudnia–lutego, a najmniejsze w maju–lipcu.

Z kolei istnienie stałego ziemskiego pola magnetycznego wynika z tego, że Ziemia może być traktowana jak ogromny magnes — wektor indukcji magnetycznej \vec{B} w każdym punkcie na jej powierzchni można przedstawić jako sumę dwóch wektorów: prostopadłego i równoległego do powierzchni. Wektor prostopadły największy jest na biegunach magnetycznych Ziemi (nieco przesuniętych w stosunku do biegunów geograficznych), a jego wartość wynosi 67 μT , natomiast na równiku magnetycznym ma wartość zero. Wektor równoległy do powierzchni ma wartość maksymalną na równiku (około 33 μT), natomiast na biegunie ma wartość zero. W naszych szerokościach geograficznych wektor prostopadły ma wartość około 50 μT , a równoległy — 20 μT .

Zmienne naturalne pola elektryczne związane są przede wszystkim z burzami atmosferycznymi. Poniważ powodowane są przez wyładowania atmosferyczne, często nazywane są atmosferykami. Pola te mają bardzo różne częstotliwości — od pojedynczych Hz do MHz. W czasie burzy natężenie pola

elektrycznego osiąga wartości dziesiątek, setek, a nawet tysięcy V/m. Atmosferyki występują również przy ładnej pogodzie, jednak wtedy mają bardzo małe wartości — 0,0001–0,5 V/m (ich źródłem są odległe burze).

Zmienne naturalne pola magnetyczne związane są przede wszystkim z wpływem Słońca na prądy płynące w jonosferze. Słońce w zależności od swojej aktywności emituje promieniowanie, które po dotarciu do atmosfery ziemskiej wpływa na jej stan. Wyróżniono trzy główne typy emisji słonecznej:

- Pierwszy to tzw. tło, które podczas okresów niskiej aktywności Słońca jest stałe.
- Drugi wykazuje długookresowe zmiany związane ze zmianami liczby plam na Słońcu, jego wkład obserwowany jest głównie w zakresie częstotliwości od 500 MHz do 10 GHz.
- Trzeci typ emisji związany jest z rozbłyskami lub wybuchami na Słońcu, a jej intensywność może przekraczać intensywność innych rodzajów emisji tysiąckrotnie lub więcej (mówimy wówczas o burzach magnetycznych, które mogą trwać od kilku sekund do kilku godzin i sprawiają wiele kłopotów, szczególnie w łączności).

W okresie „spokojnego” Słońca zmienne pola magnetyczne mają wartość około 0,03 μT , a w trakcie wielkich burz magnetycznych mogą wzrastać do 0,5 μT . Ponieważ aktywność Słońca jest cykliczna, taki sam charakter ma również ziemskie pole magnetyczne. Wyróżnić w nim można np. 11-letni cykl zmian związany ze zmianą liczby plam na Słońcu czy okresowość roczną — aktywność magnetyczna jest największa w okresie zrównania dnia z nocą.

Poza Słońcem istnieją również inne pozaziemskie źródła pól elektromagnetycznych. Do zidentyfikowanych należą m.in. Księżyc, Jupiter i Kasjopea-A. Ich udział w naturalnych polach ziemskich jest jednak niewielki. Promieniowanie pozaziemskie (szczególnie Słońca) miałoby na Ziemi zupełnie inny charakter, gdyby nie atmosfera, jonosfera i magnetosfera. Dzięki nim do powierzchni Ziemi dociera tylko niewielka część promieniowania, ograniczona do dwóch okienek częstotliwościowych: optycznego — obejmującego część promieniowania ultrafioletowego, promieniowanie widzialne i podczerwone — oraz tzw. radiofalowego o granicach 10 MHz i 37,5 GHz.

Rozwój techniki spowodował, że w środowisku człowieka, zwłaszcza w środowisku pracy, znajduje się wiele urządzeń emitujących PEM o bardzo różnych częstotliwościach. W tabeli 1. przedstawiono widmo pól i promieniowania elektromagnetycznego od 0 Hz do 300 GHz (zakres ten wraz z promieniowaniem podczerwonym, widzialnym i częścią promieniowania ultrafioletowego

nazywa się promieniowaniem elektromagnetycznym niejonizującym) z zaznaczeniem najbardziej rozpowszechnionych.

Tabela 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego niejonizującego z zaznaczeniem najważniejszych zastosowań PEM 0–300 GHz

Częstotliwość	Rodzaj promieniowania	Zakres promieniowania	Urządzenia emitujące fale	Uwagi
Ekstremalnie niska	ELF	0–300 Hz	obrazowanie rezonansem jądrowym, generatory w elektrowniach, linie i stacje elektroenergetyczne, urządzenia elektryczne powszechnego użytku, piece indukcyjne	–
Akustyczna	VF	0,3–3 kHz	przemysłowe urządzenia do lutowania	–
Bardzo niska	VLF	3–30 kHz	monitory komputerowe, urządzenia radionawigacyjne	–
Niska	LF	30–100 kHz		–
		100–300 kHz	piece indukcyjne, radiofale nadajniki długofalowe	
Średnia	MF	0,3–3 MHz	nadajniki średnifalowe	radiofale
Wysoka	HF	3–30 MHz	diatermie krótkofalowe, zgrzewarki dielektryczne, aparaty do elektrochirurgii, nadajniki krótkofalowe, urządzenia do suszenia o wielkiej częstotliwości (w.cz.)	radiofale
Bardzo wysoka	VHF	30–300 MHz	nadajniki UKF, nadajniki telewizyjne	radiofale
Ultrawysoka	UHF	0,3–3 GHz	nadajniki telewizyjne, urządzenia telefonii komórkowej, urządzenia do teletransmisji, kuchnie mikrofalowe, diatermie mikrofalowe	mikrofale
Superwysoka	SHF	3–30 GHz	urządzenia do teletransmisji, urządzenia do telekomunikacji satelitarnej, radary meteorologiczne, alarmy przeciwwłamaniowe	mikrofale
Ekstremalnie wysoka	EHF	30–300 GHz	radary, urządzenia telekomunikacji satelitarnej, linie radiowe, urządzenia radionawigacyjne	mikrofale

Tabela 1. Widmo promieniowania elektromagnetycznego niejonizującego z zaznaczeniem najważniejszych zastosowań PEM 0–300 GHz — cd.

Częstotliwość	Rodzaj promieniowania	Zakres promieniowania	Urządzenia emitujące fale	Uwagi
Podczerwień	IR	0,3–385 THz	–	–
Światło widzialne	światło widzialne	385–750 THz	–	–
Nadfiolet	UV	750–3000 THz	–	–

Urządzenia wytwarzające PEM można podzielić na dwie grupy:

1. Emitujące niepożądane PEM — należą do nich przede wszystkim urządzenia służące do wytwarzania i przesyłania energii elektrycznej (od generatorów w elektrowniach, przez linie i stacje elektroenergetyczne, po przewody zasilające wszelkie urządzenia pracujące z wykorzystaniem prądu elektrycznego). Istnieje również wiele urządzeń, których elementy składowe emitują PEM (np. magnesy w głośnikach, silniki w maszynach szwalniczych, układy wytwarzające obraz na ekranie monitora itp.).
2. Emitujące PEM celowo — w swojej pracy wykorzystują one energię elektromagnetyczną. Znalazły zastosowanie przede wszystkim w łączności (telefonia przewodowa i komórkowa), radiokomunikacji (nadajniki radiowe i telewizyjne), medycynie (diatermie, urządzenia do elektrochirurgii, aparatura do obrazowania rezonansem jądrowym itd.), przemyśle (zgrzewarki dielektryczne, piece indukcyjne, wanny galwaniczne itp.), nauce (akceleratorzy, urządzenia EPR, rozdzielanie cząsteczek itd.) czy wojsku (radary). Również w gospodarstwach domowych coraz częściej stosowane są urządzenia wykorzystujące energię elektromagnetyczną, np. kuchenki mikrofalowe czy alarmy mikrofalowe. Ekspozycja pracowników wykorzystujących ww. urządzenia może być spowodowana przebywaniem w PEM zarówno niepożądanych, jak i roboczych.

Stałe pola elektryczne (pola elektrostatyczne) celowo wytwarzane występują w środowisku pracy raczej rzadko (np. przy filtrach i separatorach elektrostatycznych czy urządzeniach malarskich). Stosunkowo duże wartości takich pól można spotkać na stanowiskach pracy w przemyśle chemicznym, włókienniczym (np. w przędzalniach do 10–100 kV/m, tkalniach do 100–1000 kV/m)

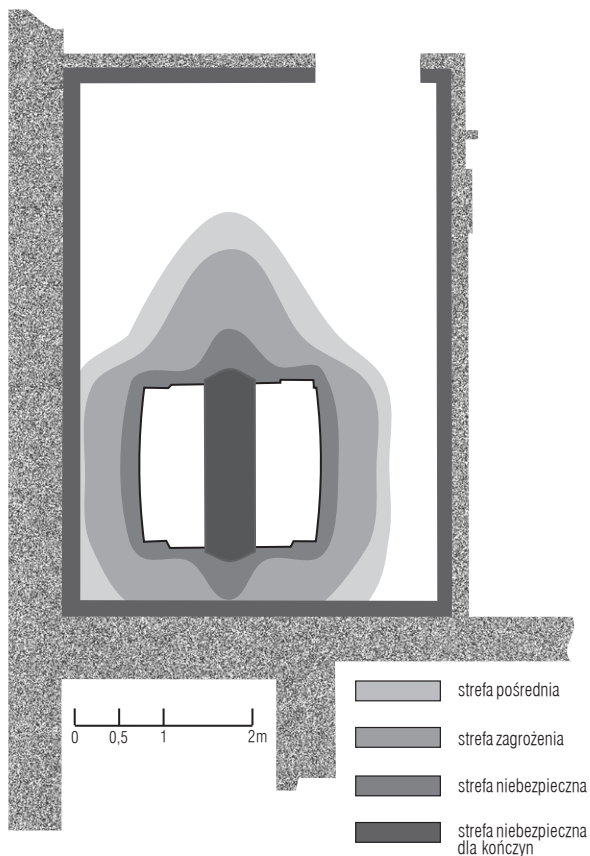
i papierniczym. Powodem ich powstawania są procesy technologiczne związane z tarciem różnych materiałów o siebie (elektryzacja). Należy zwrócić uwagę na to, że pola elektrostatyczne mogą występować również w biurach, np. przy kserokopiarkach (2–25 kV/m w odległości 0,1 m) czy drukarkach laserowych (6–40 kV/m w odległości 0,1 m).

Stałe pola magnetyczne (pola magnetostatyczne) występują głównie wokół torów wielkopądowych urządzeń elektrochemicznych, elektrotermicznych i niektórych spawalniczych, np. przy piecach grafityzacyjnych (0,4–1,3 kA/m), elektrolizerach (32–120 kA/m) czy termoelektrolizerach (28 kA/m). Spotyka się je również przy liniach prądu stałego (80–120 A/m). Niewielka ekspozycja na nie występuje też przy korzystaniu ze słuchawek audio (do 1,75 kA/m w odległości 1 cm i 1 kA/m w odległości 10 cm).

Wśród urządzeń emitujących pola magnetostatyczne na szczególną uwagę zasługują aparaty do obrazowania rezonansem magnetycznym. Obrazowanie tą metodą przekrojów narządów wewnętrznych jest nowoczesne i bardzo dokładne — dostarcza wielu informacji dotyczących rozmieszczenia, wielkości i składu badanych tkanek ciała. W silnym polu magnetycznym, wytwarzanym przez urządzenie, jądra atomów tworzących ludzkie tkanki wysyłają sygnały elektryczne. Odbiera je okrągła antena umieszczona wokół pacjenta. Intensywność sygnałów jest różna w zależności od typu tkanki. Komputer przyporządkowuje sygnały odpowiednim punktom w badanych rejonach ciała i przetwarza je na obraz widoczny na ekranie.

W aparacie stałe pole magnetyczne praktycznie nigdy nie jest wyłączane, w związku z czym ekspozycja na nie dotyczy nie tylko pacjentów, ale i personelu — zwłaszcza pielęgniarek, których zadaniem jest ułożenie pacjenta w komorze aparatu. W miejscu, w którym przebywają one podczas związanych z tym czynności, wartości indukcji magnetycznej wahają się od kilku do kilkudziesięciu mT w zależności od typu urządzenia (wielkości pola magnetycznego używanego do badania). Dla przykładu pomiary wykonane w Instytucie Medycyny Pracy w Łodzi w pobliżu manipulatorów aparatów pracujących z indukcją magnetyczną 0,5 T (a więc w miejscu przebywania pielęgniarek) wykazały, że pole ma wartość około 7 mT, a przy urządzeniu wykorzystującym indukcję 1,5 T — 83 mT. Wewnątrz komory rezonansowej, w miejscach, gdzie niekiedy pielęgniarki wkładają ręce, indukcje osiągają wartości nominalne dla danego aparatu, a więc w aparatach 0,5 T — 500 mT, a dla urządzeń 1,5 T — 1500 mT.

Na rycinie 7. zaznaczono zasięgi stref ochronnych w otoczeniu aparatu do obrazowania rezonansem magnetycznym pracującym z wykorzystaniem pola magnetycznego 1,5 mT.



Ryc. 7. Rozkład stref ochronnych w otoczeniu aparatu do obrazowania rezonansem magnetycznym pracującym z wykorzystaniem pola magnetycznego 1,5 mT (1).

Jak wynika z tabeli 1., PEM zakresu małych częstotliwości (1–100 kHz) emitowane są przez niektóre urządzenia stosowane w telekomunikacji długozasięgowej (morska, aeronautyczna), radionawigacji, przy ogrzewaniu, harto-

waniu i topieniu indukcyjnym, w przemiennikach mocy, w gabinetach fizyko-terapii czy przez elektroiskrowniki. W tabeli 2. przedstawiono wartości PEM dla wybranych urządzeń z tego zakresu.

Tabela 2. Maksymalne zmierzone wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego na stanowiskach pracy przy wybranych urządzeniach pracujących w zakresie 1–100 kHz (2,3)

Urządzenie	Częstotliwość pracy [kHz]	Natężenie pola elektrycznego [V/m]	Natężenie pola magnetycznego [A/m]
Elektrodrażarka	1,5–100	28–326	≤ 3
Nagrzewnica indukcyjna	1–40	33–280	0,5–175
Piec indukcyjny	8–82	33–210	58–100
Zgrzewarka	22	≤ 155	≤ 3
Magnetronik	2–50	≤ 20	580–2000 (wewnątrz zwojniczy)

Przez kilka lat szczególnym zainteresowaniem cieszyły się monitory ekranowe. Stwierdzono występowanie wokół nich PEM, których głównym źródłem były lampy elektronowe (zwłaszcza generatory odchyłania pionowego i poziomego wiązki elektronowej) pracujące w zakresie 15–35 kHz. Maksymalne wartości natężenia pola elektrycznego na stanowiskach pracy (0,5 m od monitora) wynosiły 1–10 V/m, a indukcji magnetycznej — 0,01–0,1 μ T. Rozwój techniki komputerowej (zastosowanie ekranów ciekłokrystalicznych i plazmowych, w których nie ma lamp elektronowych) sprawił jednak, że ekspozycja ta przestała występować.

Zdecydowanie najwięcej urządzeń emitujących PEM w środowisku pracy działa w zakresie wysokich częstotliwości (0,1 MHz–300 GHz). Radiofale (0,1–300 MHz) wykorzystywane są m.in. w:

- radiokomunikacji, np. radiofonia AM, amatorskie radia FM, radio UKF, telewizja VHF;
- telekomunikacji, np. radiotelefonicznych sieciach dyspozytorskich;
- w przemyśle, np. spawaniu, ogrzewaniu pojemnościowym (zgrzewanie, suszenie), nagrzewaniu indukcyjnym;
- ochronie zdrowia, np. diatermiach pojemnościowych i indukcyjnych, aparatach do elektrochirurgii, rezonansie magnetycznym;
- nauce.

Z kolei mikrofałe (0,3–300 GHz) wykorzystuje się w:

- radiokomunikacji, np. radiu amatorskim, telewizji UHF, liniach radiowych;
- telekomunikacji, np. telefonii komórkowej, radiotelefonii i radionawigacji;
- radiolokacji, służbach meteorologicznych (radary meteorologiczne);
- ochronie zdrowia, np. diatermiach mikrofalowych, zestawach do hipertermii, sterylizacji narzędzi;
- przygotowaniu pożywienia (kuchenki mikrofalowe);
- nauce, np. spektrometrach EPR, akceleratorach, radioastronomii, ogrzewaniu plazmowym;
- alarmach przeciwwłamaniowych.

Podane wyżej zastosowania PEM wielkiej częstotliwości można określić jako „klasyczne”, jednak wciąż opracowywane są nowe technologie z ich wykorzystaniem, np. radiotelemetria, radiosterowanie czy teleinformatyka. W związku z tym liczba stanowisk pracy, a co za tym idzie liczba osób zawodowo ekspozowanych na PEM, będzie wciąż rosła. Dokładna analiza ekspozycji zawodowej, jaka może występować przy tych urządzeniach, przekracza zakres tematyczny niniejszej pracy — w niej zostały przedstawione tylko wartości PEM dla wybranych, najczęściej stosowanych urządzeń (zestawionych w tabeli 3).

Tabela 3. Maksymalne zmierzone wartości natężenia pola elektrycznego i magnetycznego na stanowiskach pracy przy wybranych urządzeniach wielkiej częstotliwości

Urządzenie	Natężenie pola elektrycznego [V/m]	Natężenie pola magnetycznego [A/m]
Zgrzewarki dielektryczne	256	3
Piece indukcyjne	220	32
Diatermie krótkofalowe	200	5
Terapulsy	400	5,5
Ekranowane suszarki wielkiej częstotliwości	93	0,6
Kuchenka mikrofalowa	10	
Anteny UKF (wewnątrz systemu antenowego, moc nadajników: 16 kW, zysk anteny: 7,5 dB)	180	–
Antena telewizyjna IV/V zakres (na maszcie pod anteną)	150	–

Urządzeniem, które współcześnie jest źródłem znaczącej ekspozycji na PEM w.cz., jest komórkowy telefon doręczny (zwłaszcza w warunkach ekspozycji zawodowej, tzn. kiedy jest intensywnie używany do celów zawodowych). W pobliżu aparatów natężenia pola elektrycznego wahają się od około 8 V/m do nawet 30 V/m (zależy od typu telefonu, odległości od stacji bazowej, fazy rozmowy — maksymalne pola występują w trakcie wybierania numeru, a podczas trwania rozmowy ich wartość zmniejsza się nawet około 10-krotnie).

3. Działanie PEM na obiekty biologiczne — mechanizmy

Wielokrotnie już podkreślono, że energia niesiona przez promieniowanie elektromagnetyczne jest w napromieniowywanym obiekcie pochłaniana, czyli zamieniana na energię kinetyczną cząsteczek, z których obiekt jest zbudowany. We współczesnym bioelektromagnetyzmie pochłanianie energii przez obiekt biologiczny najczęściej opisywane jest przy pomocy tzw. współczynnika SAR (specific absorption rate — tempo pochłaniania właściwego), który określa szybkość, z jaką energia jest pochłaniana przez punktową masę obiektu:

$$\text{SAR} = \frac{1}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) \quad [11]$$

Współczynnik SAR można wyznaczyć doświadczalnie:

$$\text{SAR} = \frac{1}{c} \left(\frac{dT}{dt} \right) = \sigma \frac{E^2}{\rho} \quad [12]$$

gdzie:

T — przyrost temperatury w badanym punkcie,

c — właściwa pojemność cieplna tkanki,

σ — przewodność elektryczna tkanki,

ρ — gęstość.

Branie SAR pod uwagę w rozważaniach na temat biologicznych skutków ekspozycji na PEM jest związane z założeniem, że zależą one głównie od chwilowej wartości PEM, tj. mają działanie „ostre”. W przypadku przyjęcia hipotezy, że skutki te zależą od całkowitej pochłoniętej energii, czyli działanie jest chroniczne, wyznacza się tzw. SA (specific absorption — pochłanianie właściwe):

$$\text{SA} = \frac{dW}{dm} = \int_t \text{SAR} \quad [13]$$

3.1. Pole elektryczne

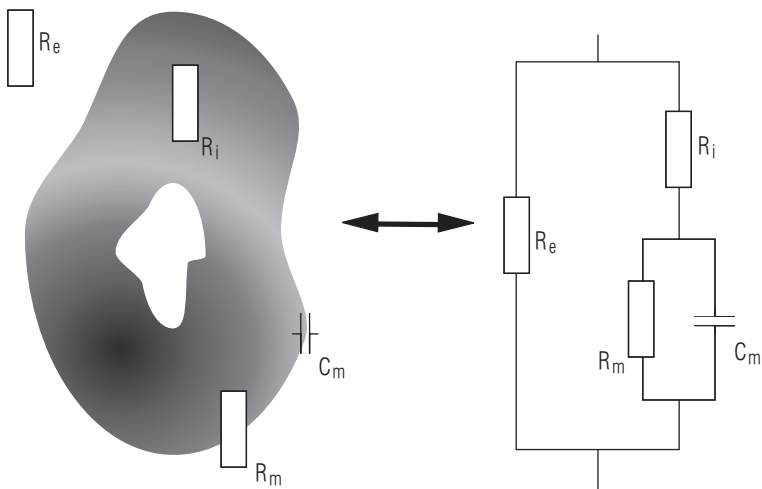
Przyczyną pochłaniania energii elektrycznej w obiektach materialnych jest to, że są one zbudowane z cząstek obdarzonych ładunkami elektrycznymi. Z definicji PEM wynika, że w polu elektrycznym różnoimienne ładunki elektryczne rozsuwają się i następuje polaryzacja ładunków. Nie dotyczy to tylko ładunków swobodnych, które w obiektach biologicznych są stosunkowo rzadko spotykane. Polaryzacja zachodzi również w cząsteczkach, w których sumaryczny ładunek elektryczny jest równy zeru. W takich cząstkach w wyniku polaryzacji powstają tzw. indukowane dipole elektryczne (na jednym końcu cząsteczki znajduje się nadmiar ładunku dodatniego, na drugim ujemnego). W zmiennym polu elektrycznym będzie następowało ciągle przepolaryzowywanie dipoli, co wymaga dostarczania energii — stąd pochłanianie energii pola elektrycznego.

Należy też pamiętać, że w obiektach biologicznych znajdują się cząstki zawsze będące dipolami elektrycznymi (niezależnie od istnienia pola) — najważniejszym dipolem są cząsteczki wody. Dipole trwałe w zmiennym polu elektrycznym będą drgały wokół własnej osi, czyli pochłaniały także energię elektryczną.

O zdolności obiektów materialnych do polaryzacji mówi stała dielektryczna ϵ . W zmiennych polach elektrycznych polaryzacja nie jest natychmiastowa. Jest to spowodowane głównie bezwładnością cząstek obdarzonych ładunkiem elektrycznym pod wpływem pola elektrycznego. Zależność właściwości elektrycznych komórki od częstotliwości skutkuje różnym miejscem działania na nią PEM. Analiza obwodu elektrycznego składającego się z oporności i pojemności, jakim w ujęciu elektrycznym jest komórka (ryc. 8), pokazuje, że oporność pojemnościowa błony komórkowej zaczyna być pomijana w zakresie 10 kHz–100 MHz, co sprawia, że PEM niskich częstotliwości nie przechodzi do wnętrza komórki (działa na błonę), a PEM wysokich częstotliwości wpływa głównie na wnętrze (błona jest dla niego „niewidoczna”). Sprawą wciąż otwartą jest bardziej szczegółowa identyfikacja elementów komórki, będących obiektem działania PEM (jego targetem).

W przypadku pól elektrycznych głównymi biofizycznymi mechanizmami efektów biologicznych (w tym i zdrowotnych) wydają się być:

1. Działanie siły elektrycznej na cząstki obdarzone ładunkami elektrycznymi,
2. Indukowanie dodatkowego potencjału na błonach komórkowych.



- R_e — rezystancja środowiska zewnątrzkomórkowego.
 R_i — rezystancja środowiska wewnątrzkomórkowego.
 R_m — rezystancja błony komórkowej.
 C_m — pojemność błony komórkowej.

Ryc. 8. Zastępczy układ elektryczny komórki biologicznej.

Obliczenia wykazały, że siły elektryczne działające na cząsteczki biologiczne są znikomo małe ze względu na bardzo duże tłumienie pola elektrycznego przez ciało człowieka, np. pole zewnętrzne o częstotliwości 60 Hz jest tłumione około 10^6 razy (4). Szacuje się, że ekspozycja na zewnętrzne pole elektryczne o częstotliwości 60 Hz i natężeniu 1 kV/m powoduje powstanie w organach wewnętrznych pola o wartości 1–3 mV/m (5). Wewnątrz błon pole jest większe (ze względu na własności dielektryczne błon komórkowych, między ich powierzchnią zewnętrzną a wewnętrzną występuje znaczna różnica potencjału), np. pole elektryczne o natężeniu 1 mV/m działające na komórkę o średnicy 20 μm powoduje powstanie we wnętrzu błony o grubości 6 nm pola o natężeniu około 2,5 V/m (6). Wynika z tego, że zewnętrzne pole elektryczne o natężeniu 1 kV/m spowoduje powstanie wewnątrz błony pola indukowanego o natężeniu około 2,5 V/m.

Na podstawie analizy różnych zjawisk fizycznych mogących być przyczyną efektów biologicznych można stwierdzić, że do ich wywołania potrzebne są

pola elektryczne o bardzo dużych wartościach, np. do wprowadzenia cząsteczek w ruch wirowy wymagane są zewnętrzne pola elektryczne o natężeniu kilku tysięcy kV/m (7), ponieważ zjawisko to wymaga działania na cząsteczki pola o natężeniu kilku kV/m, a do znaczącego biologicznie skręcenia cząsteczki białka wymagane jest pole o natężeniu ponad 10^9 V/m (8).

Z powyższego wynika, że skoro siły związane z ekspozycją na pola elektryczne występujące w środowisku są niewielkie, to również energia przekazywana przez to pole cząsteczkom biologicznym jest stosunkowo mała. Dla cząsteczki enzymu o masie 10^6 i elektrycznym momencie dipolowym $3,2 \times 10^{-26}$ cm, poddanej działaniu pola 1 mV/m, może się wahać od $10^{-13} k_B \tau$ do $10^{-5} k_B \tau$ (k_B — stała Boltzmanna, τ — temperatura w skali Kelwina), podczas gdy najsłabsze chwilowe wiązanie związane z siłami Van der Waalsa wynosi około $1,62 k_B \tau$ (6).

Również rozważania dotyczące możliwości wywoływania przez stałe i wolnozmiennie pola elektryczne szkodliwych efektów zdrowotnych poprzez indukowanie w tkankach dodatkowego potencjału na błonach komórkowych doprowadziły do wniosku, że w praktyce pola te nie mogą zagrażać zdrowiu człowieka. Analiza danych doświadczalnych na temat wartości progowych pola powodujących stymulację komórek pobudliwych, dokonana przez Bernhardta, wykazała, że dla pól o częstotliwości 60 Hz są one wyższe od około 10^3 kV/m, a więc wartości niespotykanych w praktyce higienicznej (9).

Z tego, co napisano wyżej, wynika, że stałe i wolnozmiennie pole elektryczne o wartościach spotykanych w praktyce higienicznej nie ma energii niezbędnej do wywoływania efektów biofizycznych, które mogą bezpośrednio wpływać na funkcjonowanie organizmu. We współczesnej literaturze bioelektromagnetycznej nie ma też w zasadzie prac wiążących ekspozycję na stałe i wolnozmiennie pola elektryczne z efektami zdrowotnymi (z wyjątkiem jednoczesnego działania pola elektrycznego i magnetycznego).

3.2. Pole magnetyczne

Z tego, że źródłem pola magnetycznego są poruszające się ładunki elektryczne (prądy elektryczne) wynika, iż wszystkie obiekty materialne mają własności magnetyczne, ponieważ składają się z atomów zawierających poruszające się po orbitach i wirujące elektrony. Ze względu na wartość wypadkowego

poła magnetycznego, jakie emitują cząsteczki (dokładniej momentu magnetycznego), dzieli się je na diamagnetyki, paramagnetyki i ferromagnetyki.

Najwięcej w przyrodzie występuje diamagnetyków, czyli cząstek mających wypadkowy moment magnetyczny równy zeru, w których jednak pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego powstaje dodatkowy moment magnetyczny. Jest on bardzo mały, w związku z czym diamagnetyzm jest zjawiskiem słabym. Z obliczeń teoretycznych wynika, że na 1 g dowolnej substancji (3×10^{23} elektronów, $0,5 \times 10^{-10}$ m — średni „promień” atomu), poddanej działaniu zewnętrznego pola magnetycznego o indukcji 1,8 T i gradiente 17 T/m, działa siła około 16×10^{-5} N (10). Diamagnetyzm doświadczalnie przejawia się wypychaniem obiektów materialnych z niejednorodnego pola magnetycznego (działa w kierunku zmniejszającego się pola magnetycznego). Można spodziewać się więc, że w bardzo silnych (z uwagi na słabość zjawiska) polach niejednorodnych, obserwować można zjawisko lewitacji (unoszenia się) obiektów materialnych. W 1996 roku w Nijmegen High Field Magnet Laboratory w Amsterdamie udało się dokonać lewitacji żaby w polu 16 T (11). Oczywiście w znacznie niższych polach będą lewitowały nadprzewodniki, w których teoretycznie wypierany jest cały strumień pola zewnętrznego (w tym samym laboratorium uzyskano lewitację nadprzewodnika w polu 0,1 T).

Zjawiskiem magnetycznym nieco silniejszym od diamagnetyzmu jest paramagnetyzm. W przeciwieństwie do tego pierwszego wykazują go nie wszystkie obiekty materialne — dotyczy on jedynie tych, które zbudowane są z cząsteczek posiadających niesparowane spiny elektronowe (tzn. mających bądź nieparzystą liczbę elektronów, bądź taką budowę elektronową, że spiny elektronów nie znoszą się nawzajem). Wówczas dzięki niesparowanemu spinowi elektronowemu atomy jako całość mają własności dipola magnetycznego i drgają w zmiennych polach magnetycznych, pochłaniając energię.

Trzecim rodzajem materiałów magnetycznych są ferromagnetyki. Ferromagnetyzm charakteryzuje się obecnością spontanicznego namagnesowania, nawet kiedy nieobecne jest zewnętrzne pole magnetyczne. Jedynymi pierwiastkami ferromagnetycznymi są: żelazo, kobalt, nikiel, gadolin i dysproz, ale wiele związków i stopów tych oraz innych pierwiastków to ferromagnetyki. Substancje ferromagnetyczne są silnie przyciągane przez nawet stosunkowo słabe pola niejednorodne, ponieważ ich namagnesowanie jest bardzo duże. Na 1 g żelaza umieszczony w polu magnetycznym 1,8 T o gradiente 17 T/m działa siła 4 N,

a więc siła o kilka rzędów wielkości większa od siły związanej z diamagnetyzmem i paramagnetyzmem.

W obiektach biologicznych najmniej spotyka się substancji ferromagnetycznych, chociaż istnieją bakterie czy algi zawierające duże ilości ferromagnetyków (w suchej masie bakterii magnetotaktycznych znajduje się około 2% żelaza) (12). Dotychczas w organizmach żywych znaleziono 12 minerałów żelaza, przy czym w organizmach kręgowców jedynie dwa — ferryhydryt ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$) oraz magnetyt (Fe_3O_4) (13). Drugi z nich ma właściwości ferromagnetyczne. Występowanie magnetytu stwierdzono m.in. w tkance mózgowej człowieka, przy czym jest go bardzo niewiele (kilka milionów kryształów magnetytu na 1 g tkanki rozłożonych w $5\text{--}10 \times 10^5$ oddzielnych grupach — liczba komórek mózgu przekracza liczbę kryształów ponad stukrotnie) (14).

Znacznie więcej (niż ferromagnetyków) spotyka się w organizmach żywych substancji paramagnetycznych. Należy do nich np. deoksyhemoglobina czy wspomniany wyżej ferryhydryt ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \times 9\text{H}_2\text{O}$). Szczególne zainteresowanie budzą jednak wolne rodniki powstające w wielu procesach biochemicznych zarówno endo-, jak i egzogennych zachodzących w organizmie (szczególnie w reakcjach enzymatycznych czy procesach oksydacyjnych).

Ferromagnetyki i paramagnetyki stanowią jednak znikomą (choć ważną biologicznie) część organizmów żywych. W skali makroskopowej mają one własności diamagnetyczne, o czym świadczy ww. lewitacja żaby. Gdyby pole wytwarzane przez zawarte w żabie substancje ferromagnetyczne i paramagnetyczne było porównywalne z polem wytwarzanym w wyniku diamagnetyzmu, miałyby ona znaczne problemy z unoszeniem się, gdyż pola związane z ferromagnetyzmem i paramagnetyzmem mają przeciwny znak do pola wywołwanego przez diamagnetyzm.

Zjawiska fizyczne występujące w obiektach biologicznych znajdujących się w polach magnetycznych można podzielić na:

1. Związane z powstawaniem siły Lorentza (np. powstawanie siły elektromotorycznej w poruszających się przewodnikach, powstawanie siły działającej na poruszające się naładowane cząsteczki, działanie skręcające na stałe dipole magnetyczne i niesferyczne cząsteczki para- i diamagnetyczne, działanie translacyjne na stałe dipole magnetyczne i cząsteczki para- i diamagnetyczne).
2. Działanie pól na stany spinowe elektronów.

W ostatnich latach szczególne zainteresowanie budzi wpływ pola magnetycznego na stany spinowe elektronów i rezonansowe pochłanianie energii

elektromagnetycznej. Kiedy na skutek rozerwania wiązania chemicznego w cząsteczce biologicznej powstaje para rodników², reakcja może przebiegać dwoma torami:

- na zasadzie rekombinacji rodników,
- na zasadzie rozdzielenia pary.

W tym drugim przypadku powstają wolne rodniki mogące oddziaływać z molekułami ośrodka, w którym dyfundują. Wybór jednej z tych dróg zależy od wzajemnej orientacji niesparowanych spinów rodników. Zewnętrzne pole magnetyczne może tę wzajemną orientację zmieniać. Do procesów biochemicznych zachodzących z udziałem par rodników należą m.in. procesy oksydacyjne, takie jak peroksydacja lipidów czy oksydacyjne uszkodzanie DNA (a także ich procesy naprawcze). Jak dotychczas wykazano wpływ pól magnetycznych o stosunkowo niskich indukcjach (od kilkudziesięciu mikrotlesli) na proces peroksydacji lipidów w sztucznych błonach fosfolipidowych czy naturalnych błonach mikrosomalnych. Szczególne zainteresowanie budzą badania genotoksycznego działania sieciowych PEM (ze względu na związek takich uszkodzeń z procesem kancerogenezy).

Najbardziej znanym mechanizmem rezonansowego pochłaniania energii elektromagnetycznej jest rezonans cyklotronowy, który został opracowany do wyjaśnienia wyników doświadczeń nad wpływem jonów wapnia $^{45}\text{Ca}^{++}$ z tkanki mózgowej kurcząt (15). W stałym polu magnetycznym cząstka wykonuje w próżni ruch kołowy z prędkością kątową, zwaną częstotliwością cyklotronową. Jeżeli w takim układzie zostanie zastosowane PEM o częstotliwości cyklotronowej, to nastąpi rezonansowe przekazywanie energii pola do cząsteczki. Ponieważ w układach biologicznych jony (cząsteczki naładowane) przechodzą przez błony kanałami o kształcie spirali, ich zwiększona energia może skutkować zmianami w transporcie błonowym (16,17). Innymi modelami są rezonans paramagnetyczny (18) czy magnetyczny rezonans jądrowy (19).

Głównymi, dobrze poznanymi ich efektami biofizycznymi są:

- indukowanie prądów elektrycznych,
- efekt termiczny.

Przy analizowaniu działania na obiekty biologiczne prądów należy pamiętać, że bardzo duże znaczenie może mieć kształt działającego PEM, ponieważ od niego zależy wartość prądu indukowanego:

² Rodnik to atom lub grupa atomów połączonych wiązaniami chemicznymi, zawierający jeden lub dwa elektrony niesparowane.

$$j = \frac{\sigma r}{2} \frac{dB}{dt} \quad [14]$$

gdzie:

j — gęstość prądu [A/m^2],

σ — przewodność tkanki [S/m],

r — promień pętli prądu,

dB/dt — szybkość zmian indukcji magnetycznej.

Im krótszy zatem czas narastania i zanikania pola, tym gęstość prądu jest większa. Świadczyć o tym mogą obserwowane dla pól impulsowych efekty takie, jak stymulacja wzrostu kości, wpływ na podziały komórkowe, transport jonowy czy synteza DNA, RNA i białek.

3.3. Promieniowanie elektromagnetyczne wielkiej częstotliwości

Przez wiele lat uważano, że jedynym mechanizmem prowadzącym do znaczących efektów biologicznych ekspozycji na PEM w.cz. jest mechanizm termiczny (czyli zamiana energii elektromagnetycznej na energię cieplną). U jego podłoża leżą procesy relaksacyjne powodowane obrotami molekuł polarnych (mających trwałe i indukowany elektryczny moment dipolowy, takich jak woda, aminokwasy, białka i lipidy) w zmiennym polu elektrycznym, polaryzacja ładunków na strukturach dwuściennych wywołana ich niejednorodnością (np. na błonach komórkowych) i zjawisko przewodzenia jonowego.

Na skutek działania układu termoregulacyjnego człowieka pochłanianie energii elektromagnetycznej w jego ciele nie musi powodować proporcjonalnego wzrostu temperatury. Duże znaczenie dla tych oddziaływań mogą mieć również szybkie tempo ogrzewania i niejednorodne rozkłady przestrzenne pochłanianej energii. Ostatnio coraz częściej sugeruje się konieczność poszukiwań innych niż termiczne mechanizmów działania. Opinia o termicznym podłożu wszystkich efektów biologicznych opierała się na analizie energii kwantu PEM w.cz. Jest ona bardzo mała, np. dla PEM o częstotliwości 900 MHz wynosi 4 μeV , a dla 1,8 GHz — 7 μeV , podczas gdy do zerwania najsłabszego wiązania w cząsteczce DNA potrzebna jest energia około 1 eV. Ponieważ podobne energie potrzebne są do wywoływania uszkodzeń w innych biomolekułach, PEM w.cz. w zasadzie nie powinno wywoływać znaczących efektów biologicznych.

Wskazywano również na to, że wpływ energii PEM jest całkowicie maskowany przez energię tzw. szumu termicznego, która dla temperatury $\tau = 300^\circ\text{K}$ (temperatura ciała człowieka) wynosi około 26 meV. Rzeczywiście, różne rozpatrywane mechanizmy dają stosunkowo wysokie wartości progowe PEM, przy których mogą wystąpić znaczące efekty biologiczne. Na przykład w oparciu o model dipolowy komórki (pod wpływem pola elektrycznego komórka staje się dipolem elektrycznym) wyznaczono ten próg na około 300 V/m dla PEM o częstotliwości 100 MHz, natomiast dla modelu opracowanego w oparciu o przepływ prądów przez błonę komórkową na ponad 200 V/m (20). Pokazano jednak, że istnieją zjawiska o podłożu termicznym występujące dla niewielkich przyrostów temperatury, np. mikrofalowy efekt słuchowy pojawia się przy przyroście temperatury rzędu $5 \times 10^{-6}^\circ\text{C}$ (21).

Należy jednak pamiętać, że „termiczne” podejście do mechanizmów efektów biologicznych nie ma zastosowania przy rezonansowym przekazywaniu energii. Wśród modeli rezonansowych szczególne zainteresowanie budzi model opracowany przez Fröhlicha (22). Według niego duże molekuly lub części składowe tkanek wykonują mechaniczne drgania o określonych częstotliwościach. Zadziałanie polem o takiej samej częstotliwości powoduje rezonansowe pochłanianie energii (na zasadzie podobnej do odbiornika radiowego). Niektórzy autorzy sugerują, że do takich struktur należą polimery DNA i części składowe struktur podporowych komórki (23,24). Wydaje się też, że należy poważnie rozważyć możliwość wykorzystania do wyjaśniania zjawisk występujących przy ekspozycji na PEM w.c.z. mechanizmu rezonansu cyklotronowego.

4. Efekty zdrowotne

Na przełomie lat 70. i 80. pojawiły się pierwsze doniesienia na temat zachorowalności dzieci na białaczkę i guzy mózgu związanej z dużą liczbą sprzętu elektrycznego w gospodarstwach domowych i z odległością od linii wysokiego napięcia (na podstawie tych danych szacowano wielkość ekspozycji w domach) oraz zwiększonej umieralności na białaczkę pracowników wykonujących „zawody elektryczne”. Od tego czasu szczególne zainteresowanie budzi możliwość kancerogennego działania sieciowych PEM.

W latach 1980–2002 wykonano prawie 200 oryginalnych badań epidemiologicznych ryzyka zachorowania na nowotwory u osób eksponowanych na podwyższone sieciowe pola magnetyczne, w tym ponad 70 badań u mieszkańców w warunkach ekspozycji komunalnej i ponad 110 u pracowników energetyki. Wyniki tych badań, w tym również metaanalizy, spowodowały, że w 2002 roku Międzynarodowa Agencja Badań Nad Rakiem (International Agency for Research on Cancer — IARC) uznała pole magnetyczne zakresu ELF (3–3000 Hz) za przypuszczalnie rakotwórcze dla ludzi (grupa 2B), czyli stwierdziła, że istnieje ograniczony dowód działania rakotwórczego tych pól u ludzi przy braku wystarczającego dowodu rakotwórczości u zwierząt doświadczalnych.

Podejrzewa się również, że sieciowe pola magnetyczne mają także inny niż kancerogeny szkodliwy wpływ na organizm człowieka, np. na ośrodkowy układ nerwowy (stwardnienie boczne zanikowe i choroba Alzheimera), układ sercowo-naczyniowy (zwiększenie ryzyka względnego zgonu z powodu zaburzeń rytmu i zawału serca, wzrost odsetka osób z podwyższonym ciśnieniem tętniczym i zaburzoną dziennie-noctną regulacją ciśnienia krwi, wzrost ryzyka zaburzenia zmienności rytmu serca) czy na funkcje rozrodcze.

Po raz pierwszy zwiększone ryzyko zachorowania na stwardnienie boczne zanikowe (amyotrophic lateral sclerosis — ALS) wśród osób eksponowanych na zwiększony poziom sieciowych PEM zaobserwowano w latach 80. Dotyczyło ono pracowników zawodów elektrycznych (25). Od tego czasu pojawiło

się około 10 prac epidemiologicznych dotyczących tego zagadnienia (26), a autorzy większości z nich ją potwierdzają, przy czym w niektórych grupach zawodowych ryzyko to jest stosunkowo wysokie (OR = 4–5). Na obecnym etapie badań wyciąganie ostatecznych wniosków jest jednak zdecydowanie przedwczesne z kilku powodów:

1. W większości prac ocena ekspozycji następuje na podstawie nazwy zawodu — przyjmuje się, że „zawody elektryczne” związane są z większą ekspozycją na sieciowe PEM niż inne, których przedstawiciele są zaliczani do grupy kontrolnej. Wykazano jednak, że pracownicy zawodów „nieelektrycznych” są niekiedy ekspozycyjni na stosunkowo duże poziomy PEM, np. niekiedy maksymalny dzienny poziom ekspozycji urzędników może osiągać nawet 10 μ T.
2. W większości dotychczas wykonanych badań nie wykluczono możliwości innej niż PEM przyczyny obserwowanego efektu. Autorzy większości prac wiążą wzrost ryzyka zachorowania na ALS raczej z częstszym występowaniem w grupie pracowników zawodów elektrycznych porażenia prądem elektrycznym czy możliwością szkodliwego działania na nich takich czynników, jak ekspozycja na metale ciężkie czy rozpuszczalniki, które często występują na ich stanowiskach pracy.
3. Występują poważne problemy z diagnozowaniem ALS do celów badań epidemiologicznych. Szczególnie dotyczy to badań prowadzonych na podstawie rejestrów zgonów, które oparte są często o diagnozy lekarzy niebędących specjalistami.

Dokładnie takie same zastrzeżenia można mieć do badań epidemiologicznych dotyczących choroby Alzheimera (Alzheimer Disease — AD). Z tego powodu z dużą ostrożnością należy podchodzić do prac wskazujących na wzrost ryzyka zachorowania na AD u osób zawodowo ekspozowanych na sieciowe pola magnetyczne (27–31). Należy podkreślić, że w kilku pracach wyniki są niejednoznaczne, np. obserwowano wzrost ryzyka zachorowania na AD u mężczyzn, których główna praca była związana z ekspozycją na PEM, natomiast wzrostu ryzyka nie obserwowano u kobiet (podobna sytuacja miała miejsce w przypadku analizy w oparciu o średnią życiową dawkę sieciowego pola magnetycznego) (32). Są też prace, w których efektu zwiększenia ryzyka w ogóle nie obserwowano (33).

Badania wpływu PEM na funkcje reprodukcyjne człowieka budzą duże zainteresowanie od lat, m.in. ze względu na wyniki badań na zwierzętach (34). We wczesnych badaniach stwierdzono zaburzenia płodności wśród mężczyzn

eksponowanych na sieciowe PEM i obniżenie stosunku płci u ich potomstwa (35,36). Zaobserwowano również, że ciąży u partnerek mężczyzn pracujących w stacjach elektroenergetycznych 400 kV trzykrotnie częściej kończyły się urodzeniem dziecka z wrodzoną wadą rozwojową w porównaniu z częstością obserwowaną w grupie kontrolnej, którą stanowiły partnerki mężczyzn zatrudnionych przy innych urządzeniach elektrycznych. Pojawiały się również doniesienia o zaburzaniu rozwoju płodów u ciężarnych kobiet używających koców elektrycznych i podgrzewanych elektrycznie łóżek (37), ale nowsze badania nie potwierdzają tej obserwacji (38,39), chociaż są badania wskazujące na istnienie związku między całkowitą „domową” ekspozycją na sieciowe pole magnetyczne a liczbą poronień (według różnych autorów wzrost ryzyka występuje dla sieciowego pola magnetycznego o maksymalnej indukcji w ciągu dnia większej od 1,6–2,3 μT (40,41). Współczesne badania dotyczące ekspozycji zawodowej (średnia ważona w ciągu zmiany roboczej powyżej 0,5 μT) nie wskazują na jej negatywny wpływ na liczbę poronień.

Układ krążenia i współpracujący z nim układ nerwowy (regulacja neurovegetatywna) ze względu na ich typowo „elektryczny” charakter od samego początku badań nad bioelektromagnetyzmem były uważane za szczególnie wrażliwe na działanie zewnętrznych PEM. W latach 60. ukazało się w ZSRR wiele prac potwierdzających tę hipotezę, w których stwierdzono zaburzenia rytmu serca i ciśnienia tętniczego krwi u pracowników zawodów elektrycznych (42,43). W krajach zachodnich z reguły takiego efektu nie obserwowano (44,45). W 1998 roku ukazała się jednak praca, w której raportowano wpływ ekspozycji na sieciowe PEM na zaburzenia rytmu serca (46). Ponieważ w wielu badaniach wykazano, że zaburzenia takie mogą prowadzić do ostrych incydentów sercowych (47), podjęto prace nad zbadaniem wpływu ekspozycji sieciowych pól magnetycznych na umieralność z powodu chorób serca. Taki związek został potwierdzony tylko w jednym badaniu, w którym obserwowano zwiększoną umieralność pracowników zawodów elektrycznych na ostre zapalenie mięśnia sercowego i z powodu arytmii (48). Inni autorzy w zdecydowanej większości nie potwierdzili jednak tych obserwacji (49–51).

Obecnie zatem związek między ekspozycją na sieciowe PEM a chorobami serca jest wątpliwy, tym bardziej, że badania nad tym zagadnieniem są obarczone podobnymi wadami, jak opisane wyżej badania wpływu PEM na ryzyko zachorowania na choroby neurodegeneratywne (błędy przy diagnozowaniu przyczyny zgonu, wątpliwości przy ocenie ekspozycji czy etiologii choroby).

Badania skutków zdrowotnych ekspozycji na PEM w.cz. są zdecydowanie rzadsze niż dla pól sieciowych. W latach 60. i 70. XX wieku pojawiały się pojedyncze doniesienia na ten temat. Zaobserwowano np. zaburzenia funkcjonowania układu krążenia u pracowników stacji nadawczych średniofalowych 1 MHz (52) i u fizykoterapeutów stosujących diatermie krótkofalowe 27 MHz (53), a także zaburzenia neurologiczne i negatywny wpływ na narząd wzroku u pracowników stosujących zgrzewarki dielektryczne 27 MHz (54,55), u monterów instalujących oraz konserwujących nadajniki radiowe i telewizyjne czy w zawodach mikrofalowych (56). Zaobserwowano również wzrost ryzyka białaczki u radioamatorów i u personelu wojsk radiolokacyjnych (57,58). Badania zdrowotnych skutków ekspozycji na mikrofałe (300 MHz–300 GHz) od kilku lat przeżywają renesans w związku z pojawieniem się i burzliwym rozwojem telefonii komórkowej (w Polsce w tej chwili zainstalowane są systemy pracujące z częstotliwościami w pasmach 450 MHz, 900 MHz, 1800 MHz i 2000 MHz).

Przed przystąpieniem do omówienia wyników badań wpływu telefonii komórkowej na zdrowie człowieka należy przypomnieć, że telefonia komórkowa składa się z dwóch podstawowych elementów — telefonów (terminali) doręcznych i stacji bazowych. Charakter ekspozycji na PEM powodowany przez nie jest zupełnie różny. Terminale (telefony) doręczne emitują stosunkowo silne PEM głównie w czasie rozmowy, a pola te działają przede wszystkim na głowę. Z kolei PEM emitowane przez stacje bazowe są w miejscach przebywania ludzi bardzo słabe (setki razy mniejsze niż PEM telefonów doręcznych), działają na całe ciało człowieka, a ekspozycja jest ciągła. Ekspozycja zawodowa może dotyczyć głównie telefonów doręcznych.

W badaniach zdrowotnych skutków ekspozycji na PEM emitowane przez terminale doręczne szczególne miejsce zajmują badania działania rakotwórczego. Ich wyniki są wciąż niejednoznaczne. Coraz więcej danych wskazuje na możliwość kancerogennego działania PEM emitowanych przez telefony 1G (pierwszej generacji), czyli analogowe (wykorzystujące głównie modulację częstotliwości i fazy). Dla przykładu w szwedzkich badaniach przeprowadzonych u 1429 osób i 1470 z grupy kontrolnej stwierdzono, że ryzyko nowotworów głowy u osób używających analogowych telefonów komórkowych wzrasta (OR = 1,3). Wzrost ten jest przy tym znacznie większy, jeżeli okres używania telefonów trwa dłużej niż 10 lat (OR = 1,8) (59). Dotychczas nie odnotowano podobnych obserwacji dla telefonów cyfrowych (GSM i UMTS).

Spośród wszystkich badań zdecydowana przewaga obserwacji potwierdzających wpływ PEM na zdrowie człowieka dotyczy jedynie funkcji ośrodkowego układu nerwowego. Między innymi w badaniu epidemiologicznym wykonanym w Szwecji (12 000 badanych) i Norwegii (5000 badanych) stwierdzono, że 31% osób badanych w Norwegii i 13% w Szwecji podawało występowanie przynajmniej jednego symptomu kojarzonego z telefonem komórkowym (uczucie ciepła w okolicy ucha, ból głowy, pieczenie skóry, zawroty głowy, uczucie zmęczenia, uczucie dyskomfortu). Na podstawie wyników badań autorzy sugerują związek między częstotliwością i długością rozmów a podawanymi symptomami (60).

W kilku badaniach stwierdzono wpływ PEM telefonów komórkowych na EEG podczas wykonywania skomplikowanych zadań (takiego efektu nie było w EEG spoczynkowym lub podczas wykonywania zadań prostych) (61,62). Zaobserwowano również wpływ PEM 900 MHz emitowanego przez telefon komórkowy na funkcje poznawcze i pamięć operacyjną (roboczą) człowieka. Stwierdzono przyspieszenie czasu odpowiedzi w reakcji prostej i zadaniach mierzących czujność oraz skrócenie czasu potrzebnego do wykonania zadań arytmetycznych. Według autorów świadczy to, że takie PEM ułatwiają pracę mózgu, zwłaszcza przy zadaniach wymagających uwagi i manipulowania informacjami w pamięci operacyjnej (63). W związku z działaniem PEM telefonów komórkowych na głowę uzasadnione jest podejrzenie, że mogą one zaburzać inne neurologicznie sterowane funkcje fizjologiczne, np. rytm serca czy ciśnienie krwi. Istnieją już dane eksperymentalne potwierdzające tę hipotezę, np. stwierdzono niewielki wzrost ciśnienia tętniczego krwi (5–10 mmHg) i obniżenie tętna po 35 minutach ekspozycji (64).

Wśród zgłaszanych przez pacjentów problemów zdrowotnych, kojarzonych przez nich z ekspozycją na PEM, spory odsetek stanowią objawy dermatologiczne (zaczerwienienie skóry, uczucie mrowienia na powierzchni skóry, lokalne uczucie ciepła czy przegrzania skóry), neurologiczne czy wegetatywne (ogólne zmęczenie, zaburzenia koncentracji, problemy z pamięcią, zawroty i bóle głowy, zaburzenia snu, wrażenia słuchowe, palpacje serca, nudności i różne zaburzenia trawienne) o różnym nasileniu, powodujące dyskomfort zdrowotny i utrudniające codzienną egzystencję (65–67).

Diagnostyka jest w tym przypadku bardzo trudna, gdyż są to przede wszystkim subiektywne odczucia danej osoby. Coraz częściej o takich osobach mówi się jako o „nadwrażliwych na PEM”. Według różnych szacunków ocenia się,

że przypadłość ta dotyka 2–6% populacji. Istnieje wiele definicji nadwrażliwości na PEM. Według ekspertów Unii Europejskiej jest to zjawisko, w którym dana osoba odczuwa negatywne efekty zdrowotne, kiedy używa bądź pozostaje w bliskości urządzeń emitujących pola elektryczne, magnetyczne lub elektromagnetyczne. Wielu specjalistów ma jednak poważne wątpliwości co do realnego występowania nadwrażliwości. Wskazują oni na to, że zdecydowana większość obiektywnych badań doświadczalnych nie potwierdza różnic w reagowaniu na PEM osób „nadwrażliwych” i reagujących normalnie. Badacze ci uważają, że nadwrażliwość to syndrom psychosomatyczny przyjmujący postać nerwicy. Symptomy nerwicowe związane są ze stresem, emocjami, stylem życia, a wybór PEM jako przyczyny objawów zdrowotnych jest przypadkowy (68). Według innych, dużą rolę może w tym przypadku odgrywać efekt „nocebo”, czyli obawa przed negatywnym działaniem PEM podsycana przez środki masowego przekazu.

5. Ochrona pracowników przed PEM w Polsce i Unii Europejskiej

Jednym z najważniejszych elementów systemu ochrony przed PEM jest ustalenie ich najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN). Na świecie prace nad tym zagadnieniem trwają od lat 50. ubiegłego wieku. Pierwsze standardy ekspozycji opracowano w USA i ZSRR, przy czym koncepcje leżące u podstaw ich ustalania w obu krajach były inne, co spowodowało znaczne różnice wartości NDNów. W USA za podstawę przyjęto ograniczenie jedynie efektu termicznego, a w ZSRR także domniemanych efektów nietermicznych. Pozostałe kraje w początkowym okresie adoptowały te standardy (przy wyborze jednego z dwóch miała rolę odgrywały względy polityczne, np. Polska w 1961 r. przyjęła w zasadzie bez zmian standard ZSRR), a w następnych latach podjęły prace nad ustaleniem własnych.

Szczególłą rolę w pracach nad normatywnymi ochroną przed PEM odegrała (i nadal odgrywa) Międzynarodowa Komisja ds. Ochrony przed Promieniowaniem Niejonizującym (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection — ICNIRP), która co kilka lat na podstawie aktualnego stanu wiedzy przedstawia propozycje dopuszczalnych wartości ekspozycji na pola elektromagnetyczne. Ostatnia wersja tych propozycji została opublikowana w 1998 r. (poprzednie w latach 1984 i 1988) (69). Komisja opiera ustalanie normatywów o ograniczenia wielkości podstawowych (tzw. miar wewnętrznych), którymi w zależności od częstotliwości PEM są wartości gęstości indukowanego w obrębie głowy i tułowia, wartość SAR uśredniona dla całego ciała, wartości lokalne SAR w obrębie kończyn oraz gęstość mocy na powierzchni ciała (dla PEM o częstotliwościach 10–300 GHz). Ze względu na to, że w warunkach środowiskowych wielkości te nie mogą być mierzone, ICNIRP określił wartości tzw. miar zewnętrznych — natężenia pola elektrycznego i magnetycznego, indukcji magnetycznej i gęstości mocy zapewniających ograniczenia wielkości podstawowych.

Wytyczne ICNIRP zostały zaadoptowane w wielu państwach, a także przyjęte do stosowania przez Parlament i Komisję Europejską. Konieczność ochrony zdrowia pracowników ekspozowanych na PEM wynika z Dyrektywy Rady Europy 89/391/EEC z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy (70). Realizacją artykułu 16.1 tej dyrektywy stała się Dyrektywa 2004/40/EC z 29 kwietnia 2004 r. o minimalnych wymaganiach w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników podlegających ekspozycji na pola elektromagnetyczne (71).

Kraje członkowskie UE mają obowiązek wprowadzić w życie jej postanowienia do kwietnia 2012 roku. Jak wspomniano wyżej, wartości normatywne w niej zawarte są powtórzeniem zaleceń ICNIRP.

Należy podkreślić, że wartości podane w tabelach 4. i 5. określają minimalne wymagania w stosunku do ograniczania poziomów PEM. Zgodnie z prawem unijnym przepisy krajów członkowskich mogą być rygorystyczniejsze.

W Polsce system ochrony pracowników przed PEM (własny — niebazujący na systemie wprowadzonym w ZSRR) obowiązuje od lat 70. ubiegłego wieku. Podstawą jest Kodeks pracy (dział X), który stanowi, że „Pracodawca jest obowiązany chronić zdrowie i życie pracowników poprzez zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków pracy przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki” oraz że „Niedopuszczalne jest stosowanie materiałów i procesów technologicznych bez uprzedniego ustalenia stopnia ich szkodliwości dla zdrowia pracowników i podjęcia odpowiednich środków profilaktycznych”. Do ustalenia czynników szkodliwych upoważnione zostało Ministerstwo Zdrowia w porozumieniu z Ministerstwem Pracy i Polityki Społecznej. Pola i promieniowanie elektromagnetyczne 0–300 GHz zostało uznane za czynnik szkodliwy dla zdrowia, w związku z czym pracodawca ma obowiązek zapewnienia profilaktycznej ochrony zdrowia ekspozowanych pracowników, ich szkolenia, badania i pomiarów PEM na stanowiskach pracy, a także dostarczenia środków ochrony indywidualnej. Należy podkreślić, że dotyczy to pracowników zatrudnionych na podstawie umowy o pracę, a nie samozatrudniających się (chyba że pracodawca wskazuje im miejsce pracy).

Przepisami wykonawczymi do Kodeksu pracy są: Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2005 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (72) oraz Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie

Tabela 4. Wartości graniczne ekspozycji zawodowej na PEM według Dyrektywy Rady Europy 2004/40/EC (ograniczenia podstawowe) (71)

Zakres częstotliwości	Gęstość prądu [mA/m ² — wartość skuteczna]	SAR uśredniony dla całego ciała [W/kg]	SAR miejscowy (głowa i szyja) [W/kg]	SAR miejscowy (kończyny) [W/kg]	Prąd kontaktowy [mA]
0–1 Hz	40	–	–	–	1
1–4 Hz	40/f	–	–	–	1
4–1000 Hz	10	–	–	–	1
1–2,5 kHz	f/100	–	–	–	1
2,5–100 kHz	f/100	–	–	–	4×10 ⁻⁴ f
0,1–10 MHz	f/100	0,4	10	20	40
10–100 MHz	–	0,4	10	20	40
0,1–10 GHz	–	0,4	10	20	–
10–300 GHz	–	0,4	10	10	–

f — częstotliwość w jednostkach z danego normowanego przedziału.

Tabela 5. Wartości graniczne ekspozycji zawodowej na PEM według Dyrektywy Rady Europy 2004/40/EC (miary zewnętrzne) (71)

Zakres częstotliwości	Natężenie pola elektrycznego E [V/m]	Natężenie pola magnetycznego H [A/m]	Indukcja magnetyczna B [μT]	Równoważna gęstość mocy fali płaskiej S [W/m ²]
0–1 Hz	20 000	1,63×10 ⁵	2×10 ⁵	–
1–8 Hz	20 000	1,63×10 ⁵ /f ²	2×10 ⁵ /f ²	–
8–25 Hz	20 000	2×10 ⁴ /f	2,5×10 ⁴ /f	–
0,025–0,82 kHz	500/f	20/f	25/f	–
0,82–65 kHz	610	24,4	30,7	–
0,065–1 MHz	610	1,6/f	2/f	–
1–10 MHz	610/f	1,6/f	2/f	–
10–400 MHz	61	0,16	0,2	10
400–2000 MHz	3f ²	0,008f ²	0,01f ²	f/40
2–300 GHz	137	0,36	0,45	50

f — częstotliwość w jednostkach z danego normowanego przedziału.

najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń (NDN) czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (73) z późniejszymi zmianami. To pierwsze

reguluje m.in. częstotliwość wykonywania pomiarów PEM i podaje wykaz jednostek do tego uprawnionych.

Pomiary PEM należy wykonywać:

- co najmniej raz w roku — przy stwierdzeniu w ostatnio przeprowadzonym badaniu lub pomiarze natężenia PEM powyżej 0,5 wartości najwyższego dopuszczalnego natężenia (NDN);
- co najmniej raz na 2 lata — przy stwierdzeniu w ostatnio przeprowadzonym badaniu lub pomiarze natężenia PEM powyżej 0,1 do 0,5 wartości NDN;
- w każdym przypadku wprowadzenia zmiany w warunkach występowania tego czynnika.

Badań i pomiarów PEM występującego w środowisku pracy nie przeprowadza się, jeżeli wyniki dwóch ostatnio przeprowadzonych badań i pomiarów nie przekroczyły 0,1 wartości NDN, a w procesie technologicznym lub w warunkach występowania PEM nie dokonała się zmiana mogąca wpływać na wysokość natężenia. Do pomiarów uprawnione są laboratoria akredytowane.

Jak z tego wynika, najważniejszym parametrem określającym częstotliwość wykonywania pomiarów jest wartość NDN. Dla różnych zakresów częstotliwości wartości NDN zostały podane w Rozporządzeniu Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń (NDN) czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (73).

Polskie przepisy dotyczące NDN zostały oparte o zasadę stref ochronnych, tzn. w otoczeniu urządzenia emitującego PEM wyznacza się strefy ochronne (niebezpieczną, zagrożenia, pośrednią) i bezpieczną, w których obowiązują odmienne zasady przebywania pracowników. W strefie niebezpiecznej obowiązuje zakaz przebywania (w szczególnych przypadkach dopuszczalne jest przebywanie w ubiorach ochronnych), w strefie zagrożenia można przebywać przez ściśle określony czas w ciągu zmiany roboczej (według Kodeksu pracy zmiana robocza wynosi 8 godzin), w strefie pośredniej można przebywać przez całą zmianę roboczą, a w strefie bezpiecznej nie ma żadnych ograniczeń czasu przebywania.

Wynika z tego, że ponieważ NDN fizycznych czynników szkodliwych dla zdrowia jest ustalone jako wartość średnia — której oddziaływanie na pracownika w ciągu 8-godzinnego dobowego i przeciętnego tygodniowego (określonego w Kodeksie pracy) wymiaru czasu pracy, przez okres jego aktywności zawodowej, nie powinno spowodować ujemnych zmian w jego stanie zdrowia

oraz w stanie zdrowia jego przyszłych pokoleń — to NDN dla PEM jest wartością na granicy strefy pośredniej i zagrożenia.

W tabelach 6. i 7. przedstawiono wartości natężenia pola elektrycznego E (tab. 6) i natężenia pola magnetycznego H (tab. 7) na granicach poszczególnych stref dla całego zakresu częstotliwości 0–300 GHz.

Tabela 6. Dopuszczalne wartości graniczne natężenia pola elektrycznego E(f) dla strefy pośredniej (E_0), zagrożenia (E_1) i niebezpiecznej (E_2)

Zakres częstotliwości	$E_0(f)$ [V/m]	$E_1(f)$ [V/m]	$E_2(f)$ [V/m]
$0 \text{ Hz} \leq f \leq 0,5 \text{ Hz}$	10 000	20 000	40 000
$0,5 \text{ Hz} < f \leq 0,3 \text{ kHz}$	5 000	10 000	20 000
$0,3 \text{ kHz} < f \leq 1 \text{ kHz}$	$33,3/f$	$100/f$	$1 000/f$
$1 \text{ kHz} < f \leq 3 \text{ MHz}$	33,3	100	1 000
$3 \text{ MHz} < f \leq 15 \text{ MHz}$	$100/f$	$300/f$	$3 000/f$
$15 \text{ MHz} < f \leq 3 \text{ GHz}$	6,66	20	200
$3 \text{ GHz} < f \leq 300 \text{ GHz}$	$0,053f+6,5$	$0,16f+19,5$	$1,6f+195$

Tabela 7. Dopuszczalne wartości graniczne natężenia pola magnetycznego H(f) lub indukcji magnetycznej³ B(f) dla strefy pośredniej (H_0 , B_0), zagrożenia (H_1 , B_1) i niebezpiecznej (H_2 , B_2)

Zakres częstotliwości	Natężenie pola magnetycznego H(f) [A/m]			Natężenie pola magnetycznego H(f) [A/m]		
	$H_0(f)$	$H_1(f)$	$H^2(f)$	$B_0(f)$	$B_1(f)$	$B_2(f)$
$0 \text{ Hz} \leq f \leq 0,5 \text{ Hz}$	2 666	8 000	80 000	3348	10 048	100 480
$0,5 \text{ Hz} < f \leq 50 \text{ Hz}$	66,6	200	2 000	83,6	251,2	2512
$0,05 \text{ kHz} < f \leq 1 \text{ kHz}$	$3,33/f$	$10/f$	$100/f$	$4,2/f$	$12,6/f$	$125,6/f$
$1 \text{ kHz} < f \leq 800 \text{ kHz}$	3,33	10	100	4,2	12,6	125,6
$0,8 \text{ MHz} < f \leq 150 \text{ MHz}$	$2,66/f$	$8/f$	$80/f$	$3,3/f$	10,0	100,5
$0,15 \text{ GHz} < f \leq 3 \text{ GHz}$	0,018	0,053	0,53	0,02	0,07	0,67

³ Przeliczone z wartości H(f) przy założeniu, że $1 \text{ A/m} = 1,256 \mu\text{T}$.

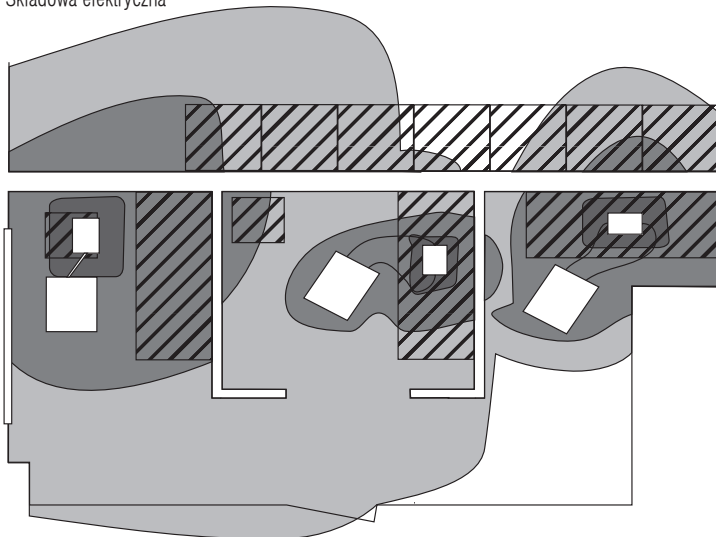
Pomiary PEM mają doprowadzić do oceny ekspozycji pracowników. W tym celu wyznacza się tzw. wskaźnik ekspozycji W (procedura wyznaczania jest skomplikowana, a jej opis przekracza potrzeby tej publikacji). W zależności od wartości wskaźnika W wielkość ekspozycji na PEM określana jest jako:

- ekspozycja pomijalna — pracownicy przebywają w obszarze poza strefami ochronnymi (strefa bezpieczna), tj. nie występuje PEM o wielkościach, w których przebywanie podlega ograniczeniom ze względu na obowiązujące przepisy;
- ekspozycja dopuszczalna — pracownicy są ekspozycyjni na PEM o wartościach strefy pośredniej lub zagrożenia, a równocześnie wskaźnik ekspozycji $W \leq 1$;
- ekspozycja nadmierna — pracownicy przebywają w obszarze strefy zagrożenia lub/oraz pośredniej i wskaźnik ekspozycji $W > 1$;
- ekspozycja niebezpieczna — pracownicy przebywają w obszarze strefy niebezpiecznej, niezależnie od wartości wskaźnika ekspozycji W ;
- ekspozycja niedopuszczalna — pracownicy podlegają ekspozycji nadmiernej lub niebezpiecznej, bez względu na wartość wskaźnika ekspozycji W .

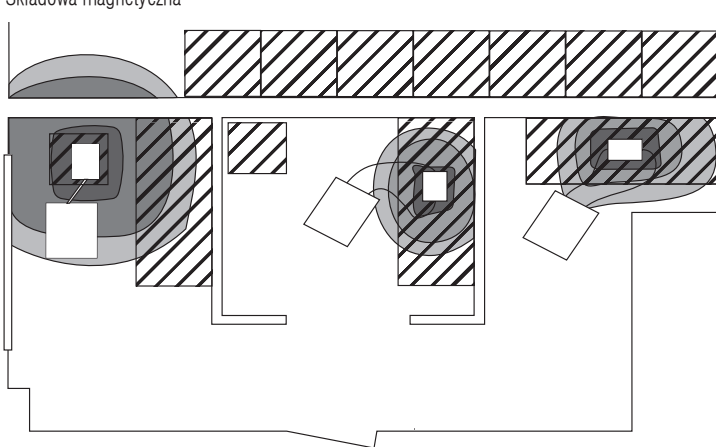
Drugim celem pomiarów jest wykonanie szkiców (osobno dla pola elektrycznego i magnetycznego) rozkładu stref ochronnych, z którym powinni być zaznajomieni pracownicy. Na rycinie 9. przedstawiono przykładowe szkice wykonane na podstawie pomiarów wykonanych w Instytucie Medycyny Pracy w Łodzi.





Jak wspomniano wyżej, Polska jako kraj Unii Europejskiej ma obowiązek wdrożenia do kwietnia 2012 roku Dyrektywy Rady Europy 2004/40/EC z 29 kwietnia 2004 r. o minimalnych wymaganiach w zakresie bezpieczeństwa i ochrony zdrowia pracowników podlegających ekspozycji na pola elektromagnetyczne (71). Nie wydaje się to być trudne, ponieważ w prawie całym zakresie 0–300 GHz, polskie NDN są ostrzejsze niż wymagane przez tę dyrektywę. W zasadzie jedynym problemem jest wprowadzenie do polskich przepisów miar wewnętrznych (dotychczas opierają się one o miary zewnętrzne). Obecnie projekt nowelizacji najwyższych dopuszczalnych natężeń PEM harmonizujący dopuszczalny poziom ekspozycji pracowników z Dyrektywą 2004/40/EC został przez Międzyresortową Komisję ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynniki Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy przekazany do Ministerstwa Pracy i Polityki Społecznej i oczekuje na wdrożenie do porządku prawnego w Polsce.

Składowa elektryczna



Składowa magnetyczna



- | | |
|--|--|
|  strefa niebezpieczna |  strefa pośrednia |
|  strefa zagrożenia |  sprzęt drewniany |

Ryc. 9. Rozkład stref ochronnych w otoczeniu urządzeń wytwarzających pola elektromagnetyczne (szkic dla celów bhp) (73).

Zgodnie z Kodeksem pracy obowiązkiem pracodawcy jest rejestrowanie i przechowywanie wyników badań i pomiarów PEM oraz udostępnianie ich pracownikom. Oprócz przeprowadzania na swój koszt pomiarów PEM pracodawca ma też obowiązek zapewnienia pracownikom profilaktycznej opieki zdrowotnej. W jej skład wchodzi m.in. badania wstępne i okresowe. Ich zakres regulują „Wskazówki metodyczne w sprawie przeprowadzania badań profilaktycznych u pracowników” (75).

Obowiązującym minimum badań, jakie należy wykonać w trakcie badania wstępnego u kandydata do pracy w narażeniu na PEM, jest: badanie ogólnolekarskie, badanie neurologiczne i badanie okulistyczne z oceną soczewek. Obligatoryjnym badaniem pomocniczym jest badanie EKG, natomiast EEG wykonywane jest w przypadkach, w których lekarz neurolog stwierdzi wskazania do jego przeprowadzenia. Ten sam zakres badań obowiązuje w kolejnych badaniach okresowych, które powinny być wykonywane co 4 lata. Należy jednak pamiętać, że lekarz może poszerzyć zakres badań profilaktycznych o dodatkowe konsultacje specjalistyczne i badania pomocnicze, a także wyznaczyć wcześniejszy termin badania, niż wynika to ze wskazówek — jeżeli uzna, że jest to niezbędne do oceny stanu zdrowia i przydatności do pracy.

Zakres badań związany jest z uznaniem układu nerwowego, bodźcotwórczego serca, soczewek i układu hormonalnego za układy (narządy) krytyczne dla działania PEM (75). Lekarz przeprowadzający badanie powinien zebrać szczegółowy wywiad dotyczący występowania dolegliwości ze strony tych narządów, badanie przedmiotowe ukierunkować na ich ocenę, a występujące odchylenia dokładnie zdiagnozować. Powinien także wyczerpująco poinformować pracownika o wynikach przeprowadzonego badania, ryzyku zdrowotnym, jakie może być związane z warunkami pracy, oraz możliwościach minimalizowania tego ryzyka.

Pracownik powinien być pouczony o objawach, dolegliwościach lub innych odchyleniach w stanie zdrowia, jakie mogą wystąpić w następstwie narażenia na PEM i które powinny skłonić go do zgłoszenia się do lekarza wcześniej, niż to wynika z wyznaczonego terminu badania okresowego. Tego rodzaju postępowanie ma w tym przypadku szczególnie istotne znaczenie, ponieważ dolegliwości obserwowane w grupie osób zawodowo ekspozowanych na PEM są niespecyficzne i nieświadomemu pacjentowi mogą nie kojarzyć się z narażeniem zawodowym. Odrębne przepisy regulują możliwość zatrudnienia w ekspozycji na PEM pracowników młodocianych i kobiet w ciąży.

Niewielka liczba potwierdzonych doniesień o skutkach zdrowotnych ekspozycji zawodowej na PEM stała się główną przyczyną wykreślenia z wykazu chorób zawodowych skutków zdrowotnych narażenia na ten czynnik (znajdowały się one w wykazie obowiązującym w latach 1983–2002). Uzasadniono to także brakiem dostatecznych dowodów potwierdzających inne niż termiczne efekty działania PEM na organizm człowieka oraz czynnościowym i na ogół odwracalnym charakterem zaburzeń. Wydaje się, że uzasadnienie to jest dyskusyjne, jednak zgodnie z zaleceniem Komisji Europejskiej z dnia 22 maja 1990 r. i proponowaną listą chorób zawodowych możliwe jest poszerzenie wykazu o choroby spowodowane innymi czynnikami fizycznymi, niż wymienione w nim, jeżeli został udowodniony bezpośredni związek między narażeniem zawodowym a chorobą rozpoznaną u pracownika. Prawdą jest również, że liczba stwierdzonych przypadków choroby zawodowej, za przyczynę której uznano PEM, była w Polsce bardzo mała. W 1991 roku było to 5 przypadków, w 1992 nie stwierdzono żadnego, w 1993 stwierdzono 1 przypadek, w 1994 — 0, 1995 — 2 itd. (na około 11 tys. przypadków wszystkich chorób zawodowych w ciągu roku).

Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń (NDN) czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (73) stanowi, że w strefie niebezpiecznej pracownikom wolno przebywać pod warunkiem stosowania odpowiednich środków ochrony indywidualnej. Należą do nich m.in. kombinезony z włókien elektroprzewodzących, gogle z metalizowanymi okularami, kaski itp. Korzystanie z nich i ich konserwacja wymaga jednak dużej ostrożności i specjalistycznej wiedzy, gdyż jakakolwiek nieszczelność może powodować lokalne zwiększenie poziomu PEM, przez co mogą one stanowić dodatkowe zagrożenie dla zdrowia.

Piśmiennictwo

1. Aniołczyk H., Politański P., Mamrot P.: Sprawozdanie ZZE nr 029/BHP/2003 [niepublikowane]. Instytut Medycyny Pracy [archiwum], Łódź 2003
2. World Health Organization. Environmental Health Criteria. Tom 35: Extremely Low Frequency. WHO, Genewa 1984
3. Szuba M.: Źródła pól elektromagnetycznych o częstotliwości 50 Hz w środowisku człowieka. XIV Szkoła Jesienna PTBR „Wpływ fal elektromagnetycznych na organizmy żywe”. 18–22 października 1993, Zakopane. Zakopane 1993, ss. 23–40
4. Kaune W.T., Phillips R.D.: Comparison of the coupling of grounded humans, swine, and rats to vertical 60-Hz electric fields. *Bioelectromagnetics* 1980;1:117–130
5. Dawson T.W., Caputa K., Stuchly M.: High-resolution organ dosimetry for human exposure to low frequency electric fields. *IEEE Trans. Power Deliv.* 1997;13(2):366–373
6. Portier C.J., Wolfe M.S. [red.]: Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. Working Group Report, Research Triangle, NC (USA) 1998
7. Pohl H.A.: Cellular spin resonance, a new method for determining the dielectric properties of living cells. *Int. J. Quantum Chem.* 1983;10:161–174
8. Noji H., Yasuda R., Yoshida M., Kinoshita K.: Direct observation of the rotation of F_1 -ATPase. *Nature* 1997;386:299–302
9. Bernhardt J.H.: The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effects. *Radiat. Environ. Biophys.* 1988;27:1–27
10. Purcell E.M.: Elektryczność i magnetyzm. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1975
11. Berry M.V., Geim A.K.: Of flying frogs and levitrons. *Eur. J. Phys.* 1997;18:307–313
12. Torres de Araujo F.F., Pires M.A., Frankel R.B., Bicudo C.E.M.: Magnetite and magnetotaxis in algae. *Biophys. J.* 1985;50:375–378
13. Kirschvink J.L., Kobayashi-Kirschvink A., Diaz-Ricci J.C., Kirschvink S.J.: Magnetite in human tissues: A mechanism for the biological effects of weak elf magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 1992;[Supl. 1]:101–113

14. Tenforde T.S.: Cellular and molecular pathways of extremely low frequency electromagnetic field interactions with living systems. *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*. Red. M. Blank, San Francisco 1993
15. Bawin S.M., Kaczmarek L.K., Adey W.R.: Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1975;247:74–81
16. Liboff A.R., Rozek R.J., Sherman M.L., McLeod B.R., Smith S.D.: 4^5Ca^{++} cyclotron resonance in human lymphocytes. *J. Bioelectr.* 1987;6:13–22
17. Smith S.D., McLeod B.R., Liboff A.R., Cooksey K.: Calcium cyclotron resonance and diatom mobility. *Bioelectromagnetics* 1987;8:215–227
18. Lednev V.V.: Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. *Bioelectromagnetics* 1991;12:71–75
19. Blackman C.F., Benane S.G., Elliot D.J., House D.E., Pollock M.M.: Influence of electromagnetic fields on the efflux of calcium ions from brain tissue *in vitro*: A three — model analysis consistent with the frequency response up to 510 Hz. *Bioelectromagnetics* 1988;9:535–547
20. Adair R.K.: Effects of weak high-frequency electromagnetic fields on biological systems. W: Klauenberg B.J., Grandolfo M., Erwin D.N. [red.]. *Radiofrequency Radiation Standards*. Plenum Press, New York 1994, s. 207
21. Guy A.W., Chou C.K., Lin J.C., Christensen D.: Microwave-induced effects in mammalian auditory systems and physical materials. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1975;247:194–218
22. Fröhlich H.: The biological effects of microwaves and related questions. *Adv. Electron. Electron. Phys.* 1980;53:85–152
23. Kohli M., Mei W.N., Prohofsky E.W., van Zandt L.L.: Calculated microwave absorption of double-helical Bconformation poly(dG).poly(dC). *Biopolymers* 1981;20(4):853–864
24. Van Zandt L.L.: Resonant microwave absorption by dissolved DNA. *Phys. Rev. Lett.* 1986;57(16):2085–2087
25. Deapen D.M., Henderson B.E.: A case-control study of amyotrophic lateral sclerosis. *Am. J. Epidemiol.* 1986;123:790–799
26. Li C.Y., Sung F.C.: Association between occupational exposure to power frequency electromagnetic fields and Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Am. J. Ind. Med.* 2003;43:212–220
27. Savitz D.A., Loomis D.P., Tse C.K.J.: Electrical occupations and neurodegenerative disease: Analysis of U.S. mortality data. *Arch. Environ. Health* 1998;53:71–74
28. Sobel E., Davanipour Z., Sulkava R., Erkinjuntti T., Eikstrom J., Henderson V.W. i wsp.: Occupations with exposure to electromagnetic fields: a possible risk factor Alzheimer's disease. *Am. J. Epidemiol.* 1995;142:515–524

29. Sobel E., Dunn M., Davanipour Z., Qian Z., Chui H.C.: Elevated risk of Alzheimer disease among workers with likely electromagnetic field exposure. *Neurology* 1996;47:1477–1481
30. Davanipour Z., Tseng C.-C., Lee P.-J., Sobel E.: A case-control study of occupational magnetic field exposure and Alzheimer's disease: results from the California Alzheimer's Disease Diagnosis and Treatment Centers. *BMC Neurol.* 2007;7:13
31. Harmanci H., Emre M., Gurvit H., Bilgic B., Hanagasi H., Gurol E. i wsp.: Risk factors for Alzheimer disease: a population-based case-control study in Istanbul, Turkey. *Alzheimer Dis. Assoc. Disord.* 2003;17:139–145
32. Qiu C., Fratiglioni L., Karp A., Windbland B., Bellander T.: Occupational exposure to electromagnetic fields and risk of Alzheimer disease. *Epidemiology* 2004;15:687–694
33. Graves A.B., Rosner D., Echeverria D., Mortimer J.A., Larson E.B.: Occupational exposure to electromagnetic fields and Alzheimer disease. *Alzheimer Dis. Assoc. Disord.* 1999;13:165–170
34. Delgado J.M.R., Leal J., Monteagudo J.L., Gracia M.G.: Embryological changes induced by weak, extremely-low frequency electromagnetic fields. *J. Anat.* 1982;134:187–220
35. Knave B., Gamberale F., Brike E., Iregren A., Kolmodin-Hedman B., Wenneberg A.: Long-term exposure to electric fields: a cross-sectional epidemiologic investigation of occupationally exposed workers in high voltage substations. *Scand. J. Work Environ. Health* 1979;5:115–125
36. Nordstrom S., Birke E., Gustavsson L.: Reproductive hazards among workers at high voltage substations. *Bioelectromagnetics* 1983;4:91–102
37. Wertheimer N., Leeper E.: Possible effects of electric blankets and heated waterbeds on fetal development. *Bioelectromagnetics* 1986;7:13–22
38. Belanger K., Leaderer B., Hallenbrand K., Holford T.R., McSharry J., Power M.E. i wsp.: Spontaneous abortion and exposure to electric blankets and heated water beds. *Epidemiology* 1998;9:36–42
39. Bracken M.B., Belanger K., Hellenbrand K., Długosz L., Holford T.R.: Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth retardation. *Epidemiology* 1995;6:263–270
40. Lee G.M., Neutra R.R., Hristova L., Yost M., Hiatt R.A.: A nested case-control study of residential and personal magnetic field measures and miscarriages. *Epidemiology* 2002;13:21–31

41. Li D.K., Odouli R., Wi S., Janevic T., Goldith I., Bracken T.D. i wsp.: A population-based prospective cohort study of personal exposure to magnetic fields during pregnancy and the risk of miscarriage. *Epidemiology* 2002;13:9–20
42. Asanova T.P., Rakov A.T.: The state of health of persons working in electric fields of outdoor 400 and 500 kV switch-yards. *Gig. Tr. Prof. Zabol.* 1966;10:50–52
43. Sazanova T.E.: Physiological and hygienic assessment of labor conditions at 400–500 kV outdoor switch-yards. *Gig. Tr. Prof. Zabol.* 1965;9:34–39
44. Broadbent D.E., Broadbent M.H., Male J.C., Jones M.R.: Health of workers exposed to electric fields. *Br. J. Ind. Med.* 1985;42:75–84
45. Knave B., Gamberale F., Brike E., Iregren A., Kolmodin-Hedman B., Wenneberg A.: Long-term exposure to electric fields: a cross-sectional epidemiologic investigation of occupationally exposed workers in high voltage substations. *Scand. J. Work Environ. Health* 1979;5:115–125
46. Sastre A., Cook M.R., Graham C.: Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm. *Bioelectromagnetics* 1998;2:98–106
47. Greenland P., Daviglius M.L., Dyer A.R., Liu K., Huang C.F., Goldberger J.J. i wsp.: Resting heart rate is a risk factor for cardiovascular and noncardiovascular mortality. *Am. J. Epidemiol.* 1999;9:853–862
48. Savitz D.A., Liao D., Sastre A., Kleckner R.C., Kavet R.: Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 1999;149:135–142
49. Sahl J., Mezei G., Kavet R., McMilan A., Silvers A. i wsp.: Occupational magnetic field exposure and cardiovascular mortality in a cohort of electric of electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 2002;156:913–918
50. Sorahan T., Nichols L.: Mortality from cardiovascular disease in relation to magnetic field exposure: findings from a study of UK electricity generation and transmission workers, 1973–1997. *Am. J. Ind. Med.* 2004;45:93–102
51. Johansen C., Feychting M., Moller M., Arnsbo P., Ahlbom A., Olsen J.H.: Risk of severe cardiac arrhythmia in male utility workers: a nationwide Danish cohort study. *Am. J. Epidemiol.* 2002;156:857–861
52. Bortkiewicz A., Gadzicka E., Zmyslony M.: Heart rate variability in workers exposed to medium-frequency electromagnetic fields. *J. Auton. Nerv. Syst.* 1996;59(3): 90–97
53. Hamburger J.N., Logue P.M., Silverman P.M.: Occupational exposure to non-ionizing radiation and an association with heart disease: An exploratory study. *J. Chronic. Dis.* 1983;36(11):791–802

54. Bini M.G., Checcucci A., Ignesti A., Millanta L., Olmi R., Rubino N. i wsp.: Exposure of workers to intense RF electric fields that leak from plastic sealers. *J. Microw. Power* 1986;21(1):33–40
55. Kolmodin-Hedman B., Mild H.K., Jonsson E., Andersson M.-C., Eriksson A.: Health problems among operators of plastic welding machines and exposure to radio-frequency electromagnetic fields. *Ind. Arch. Occup. Environ. Health* 1988;60(4): 243–247
56. Hollows F.C., Douglas J.B.: Microwave cataract in radiolinemen and controls. *Lancet* 1984;2(8399):406–407
57. Milham S.: Silent Keys: leukaemia mortality in amateur radio operators. *Lancet* 1985;1(8432):812–812
58. Szmigielski S., Bielec M., Lipski S., Sokolska G.: Immunological and cancer-related aspects of long-term exposure to low level radiofrequency and microwave fields. W: Marino A.A. [red.]. *Modern Bioelectricity*. Marcel Dekker, New York 1988, ss. 861–925
59. Hardell L., Mild K.H., Carlberg M.: Further aspects on cellular and cordless telephones and brain tumours. *Int. J. Oncol.* 2003;22(2):399–407
60. Oftedal G., Wilen J., Sandstrom M., Mild K.H.: Symptoms experienced in connection with mobile phone use. *Occup. Med. (Oxford)* 2000;50(4):237–245
61. Freude G., Ullsperger P., Eggert S., Ruppe I.: Microwaves emitted by cellular telephones affect human slow brain potentials. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2000;81(1–2):18–27
62. Krause C.M., Sillanmaki L., Koivisto M., Haggqvist A., Saarela C., Revonsuo A. i wsp.: Effects of electromagnetic field emitted by cellular phones on the EEG during a memory task. *Neuroreport* 2000;11(4):761–764
63. Koivisto M., Revonsuo A., Krause C., Haarala C., Sillanmaki L., Laine M. i wsp.: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. *Neuroreport* 2000;11(2):413–415
64. Braune S., Wrocklage C., Raczek J., Gailus T., Lücking C.H.: Resting blood pressure increase during exposure to a radio-frequency electromagnetic field. *Lancet* 1998;351(9119):1857–1858
65. Moser M., Roosli M.: Epidemiological Studies on Mobile Phone base Stations and Health Possible Biological Outcomes and Study Designs. Cost 281 Workshop in Dublin, Mobile Phone base Stations and Health. 15–16 maja 2003. Dublin, Irlandia
66. Santini R., Santini P., Le Ruz P., Danze J.M., Seigne M.: Survey Study of People Living in the Vicinity of Cellular Phone Base Stations. *Electromagn. Biol. Med.* 2003;22(1):41–49

67. Hutter H.P., Moshammer H., Kundi M.: Mobile Telephone Base-stations. Effects on Health and Wellbeing. W: Kostarakis P. [red.]. Biological Effects of EMFs Proceedings of 2nd International Workshop, Greece. 7–11 października 2002. Grecja
68. Rössli M.: Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: A systematic review. *Environ. Res.* 2008;107(2):277–287
69. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Heath Phys.* 1998;74(4):494–522
70. Dyrektywa Rady Europy z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy (89/391/EWG). Dziennik Urzędowy L 183. 29 czerwca 1989. Adres: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31989L0391:PL:HTML>
71. Directive 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields) (18th individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC). EN Official Journal of the European Union, L159. 30 kwietnia 2004. Bruksela, Belgia
72. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2005 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU z 2005 r. nr 73, poz. 645
73. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń (NDN) czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. Zał. 2. Cz. E. DzU z 2002 r. nr 217, poz. 1833
74. Aniołczyk H., Politański P., Mamrot P.: Sprawozdanie z pomiarów [niepublikowane]. Instytut Medycyny Pracy [archiwum], Łódź
75. Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzania profilaktycznych badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych dla celów przewidzianych w Kodeksie pracy. Załącznik nr 1. „Wskazówki metodyczne w sprawie przeprowadzania badań profilaktycznych u pracowników”. DzU z 1996 r. nr 69, poz. 332