

# Koegzystencja elektromagnetyczna

Źródła pola magnetostaticznego  
w środowisku pracy

# Koegzystencja elektromagnetyczna

## Źródła pola magnetostatycznego w środowisku pracy

Strona

	Przedmowa	
Część 1.	Parametryzacja zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w środowisku	
	1.1. Zależności charakteryzujące podstawowe parametry elektromagnetyczne	
	1.2. Zmienność w czasie pola-EM i powiązana z nią parametryzacja	
	1.3. Długość fali	
	1.4. Dualizm elektromagnetyczny	
	1.5. Bibliografia	
Część 2.	Fizyczne aspekty bezpieczeństwa i higieny pracy w otoczeniu źródeł pola magnetostatycznego (PMS)	
	2.1. Oddziaływanie magnetomechaniczne	
	2.2. Oddziaływanie elektrodynamiczne	
	2.3. Oddziaływanie magnetohydrodynamiczne	
	2.4. Oddziaływanie jądrowe (spinowe)	
	2.5. Oddziaływanie z dynamiką reakcji chemicznych	
	2.6. Miary fizycznego oddziaływania PMS z obiektami materialnymi	
	2.7. Bibliografia	
Część 3.	Biofizyczne aspekty bezpieczeństwa i higieny pracy w otoczeniu źródeł PMS	
	3.1. Biofizyczne aspekty elektrodynamicznego oddziaływania pola-M na organizm	
	3.2. Indukowane elektromagnetycznie prądy egzogenne	
Część 4.	Zagrożenia elektromagnetyczne w otoczeniu źródeł PMS	
	4.1. Zagrożenia elektromagnetyczne pracowników związane ze skutkami oddziaływania energii elektromagnetycznej w miejscu pracy	
	4.2. Zagrożenia związane z oddziaływaniem magnes-przedmioty ferromagnetyczne (ang.: <i>flying objects, ballistic hazards</i> )	
	4.3. Zagrożenia związane z indukowaną elektrostymulacją wrażeń zmysłowych w otoczeniu źródeł PMS (ang.: <i>movement related hazards</i> )	
	4.4. Zagrożenia związane z przewlekłym narażeniem na pole-EM w otoczeniu źródeł PMS	
Załączniki	Ochrona przed zagrożeniami elektromagnetycznymi w wymaganiach prawa pracy	



# Koegzystencja elektromagnetyczna

## Źródła pola magnetostatycznego w środowisku pracy

### Przedmowa

Dynamiczny rozwój rozwiązań technicznych wykorzystujących urządzenia i instalacje elektryczne (m.in. w energetyce, radiokomunikacji, medycynie, przemyśle i życiu codziennym), których użytkowanie związane jest nierozłącznie z rozpraszaniem w ich otoczeniu energii elektromagnetycznej, uwzględnianej wśród fizycznych parametrów środowiska pod określeniem **pole elektromagnetyczne (pole-EM)** – lub niemal synonimicznie pod określeniem **promieniowanie elektromagnetyczne** – spowodował upowszechnienie tego czynnika w środowisku pracy i życia codziennego. Uzasadnione jest więc rozpatrywanie w jakich okolicznościach nieunikniona powszechna koegzystencja ludzi oraz urządzeń i instalacji wykorzystywanych w różnorodnych technologiach elektromagnetycznych (**koegzystencja elektromagnetyczna**), nie przyczynia się do powstawania elektromagnetycznych zagrożeń bezpieczeństwa, zdrowia i życia ludzi.



Pole-EM oddziałujące na ludzi i środowisko materialne w danym środowisku bywa bardzo zróżnicowane pod względem jego rozkładu w przestrzeni i czasie oraz jego widma częstotliwości. Długoletnie badania naukowe (epidemiologiczne, laboratoryjne (*in vitro* i *in vivo*) i modelowe (*in silico*)), a także obserwacje okoliczności występowania zdarzeń wypadkowych w pobliżu źródeł pola-EM, ugruntowały podstawy naukowe do wypracowania metod i kryteriów dotyczących rozpoznawania i oceniania zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy i życia codziennego.

Najliczniejsze źródła pola-EM wykorzystywane są obecnie w środowisku życia codziennego, wskutek masowego użytkowania elektrycznych urządzeń powszechnego użytku, takich jak: telefony komórkowe, urządzenia komputerowe, elektryczne urządzenia gospodarstwa domowego i audio-wizualne, elektryczne narzędzia, oświetlenie i pojazdy, itp. Jednak to w środowisku pracy użytkowane są urządzenia dużej mocy, powodujące lokalnie znacznie

silniejsze oddziaływanie elektromagnetyczne na środowisko niż spotykane w miejscach  
40 dostępnych dla ludności. Ponadto urządzenia te (źródła pola-EM) są znacznie bardziej  
zróżnicowane pod względem konstrukcji, sposobu użytkowania oraz poziomu i  
częstotliwości emitowanego pola-EM. Narażenie pracowników bywa długotrwałe podczas  
dnia pracy, a także wielu dziesięcioleci aktywności zawodowej. W środowisku pracy  
występują równocześnie inne czynniki, tzw. środowiskowe co-faktory chemiczne i fizyczne,  
potencjalnie modyfikujące skutki narażenia na pole-EM, w porównaniu z warunkami  
laboratoryjnych badań dotyczących skutków narażenia na pole-EM (aplikowane jako  
pojedynczy stresor środowiskowy). Wyniki badań naukowych i obserwacji empirycznych  
skutków narażenia na pole-EM w środowisku życia codziennego mogą więc być zbyt mało  
50 reprezentatywne i niewystarczające do oceny zagrożeń elektromagnetycznych w  
środowisku pracy, szczególnie wynikających z narażenia wieloletniego, złożonego lub  
silnego.

Niniejsze opracowanie systematyzuje kluczowe informacje na temat istoty zagrożeń  
elektromagnetycznych związanych z procesami pracy, korygując nieprecyzyjne lub mylące  
obiegowe sądy na ten temat. Elektrodynamiczne skutki oddziaływania pola-EM na obiekty,  
w których zachodzą procesy elektryczne (jak to ma miejsce w przypadku urządzeń  
elektronicznych i organizmów żywych) może modyfikować ich działanie prowadząc np. do  
niepożądanych zakłóceń elektromagnetycznych w urządzeniach lub elektrostymulacji w  
organizmie. Zagrożenia takiego typu obserwowane bywają nawet przy stosunkowo niskim  
poziomie oddziaływania elektromagnetycznego, zależnie od charakterystyk amplitudowo-  
60 częstotliwościowej wrażliwości rozpatrywanego obiektu i oddziałującego na niego pola-EM.  
W organizmie człowieka największa wrażliwość (czułość) na indukowaną  
elektromagnetycznie stymulację charakteryzuje zwykle narządy zmysłów. W specyficznych  
warunkach środowiska pracy stymulacja taka może stać się jednym z czynników  
inicjujących zagrożenia wypadkowe, a nawet zagrożenie życia pracowników. Oprócz  
indukowanej elektromagnetycznie (bezprowadowo) elektrostymulacji, oddziaływanie pola-  
EM może wywoływać zdalnie również procesy termiczne w narażonych obiektach.  
Oddziaływanie tego typu jest celowo wykorzystywane m.in. do grzania, a nawet topienia,  
metali, do zgrzewania lub klejenia tworzyw sztucznych, do suszenia drewna i murów, ale  
również do termicznego oddziaływania na organizm człowieka w zabiegach  
70 fizykoterapeutycznych i onkologicznych. Oddziaływanie termiczne niezamierzone może  
stanowić poważne zagrożenie bezpieczeństwa i zdrowia pracowników – przy źródłach pola-  
EM dużej mocy zagrażające uszkodzeniem układu nerwowego, mięśni, skóry, oczu i  
organów wewnętrznych, które może doprowadzić do trwałej utraty zdrowia (np. amputacji  
dłoni, czy uszkodzenia narządu wzroku).

Profil zagrożeń elektromagnetycznych w dziedzinie czasu jest uzależniony od charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej pola-EM i wrażliwości obiektów znajdujących się w rozpatrywanym środowisku – różne zagrożenia rozpatrywane są w kontekście oddziaływania trwającego sekundy (elektrostymulacja, zakłócenia elektromagnetyczne urządzeń), minuty (skumulowane skutki termiczne w organizmie człowieka), a nawet lata (zagrożenia zdrowia rozpatrywane w badaniach epidemiologicznych dotyczących skutków narażenia przewlekłego na pole-EM). Niezależnie od charakterystyki widmowej pola-EM w środowisku pracy, niepożądane skutki narażenia na pole-EM pracowników mogą mieć charakter odwracalny (np. metaliczny posmak odczuwany w silnym polu magnetostatycznym) ustający po zakończeniu narażenia, lub nieodwracalny (np. uszkodzenie oka wskutek uderzenia metalowym przedmiotem przyciągniętym do źródła tego silnego pola magnetostatycznego), którego konsekwencje nie ustają mimo zakończenia narażenia (oddalenia się od źródła).

Ponadto, ocena stopnia zagrożenia w otoczeniu źródeł pola-EM wymaga obiektywnych danych parametryzujących występujące tam narażenie – na podstawie specjalistycznych pomiarów lub analizy parametrów technicznych tego źródła. Mimo wrażliwości ludzkich zmysłów na indukowaną przez pole-EM elektrostymulację, brak odczuwania takiej elektrostymulacji nie może być traktowany jako subiektywne (nie pomiarowe) wykazanie braku zagrożeń elektromagnetycznych w miejscu pobytu pracownika. Wspomniana elektrostymulacja występuje jedynie w specyficznych konfiguracjach parametrów amplitudowo-częstotliwościowych narażenia, na dodatek najczęściej przy jego poziomie na tyle wysokim, że inne poważne zagrożenia występują przy słabszych poziomach narażenia. Jest to dodatkowy powód uzasadniający konieczność zobiektywizowanego rozpoznawania i oceniania zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy oraz upowszechniania wiedzy i umiejętności koniecznych do ich poprawnego przeprowadzenia.

Biorąc pod uwagę powszechne zainteresowanie medialne warunkami użytkowania urządzeń radiokomunikacyjnych i związanymi z nim zagrożeniami oraz adekwatnymi rozwiązaniami chroniącymi bezpieczeństwo i zdrowie społeczeństwa, w niniejszym opracowaniu omówiono specyfikę warunków koegzystencji pracowników ze źródłami pola magnetostatycznego i okoliczności koniecznych do zapewnienia ich bezpieczeństwa. Ukierunkowanie rozważań na źródła pola magnetostatycznego w środowisku pracy uzasadniają złożone mechanizmy jego oddziaływania na człowieka i inne materialne obiekty w środowisku pracy, a także złożoność warunków takiego oddziaływania. Ponadto oddziaływanie pola magnetostatycznego powinno być rozpatrywane jako konglomerat narażenia na pole magnetostatyczne jednorodne i niejednorodne przestrzennie, o zróżnicowanej polaryzacji i rozkładzie przestrzennym, jak również narażenie na pole-EM złożone w dziedzinie częstotliwości (o składowych zmiennych w czasie występujących

równocześnie ze składową statyczną) i frakcjonowane w dziedzinie czasu podczas dnia pracy ze względu na lokalny charakter oddziaływania typowych źródeł pola magnetostatycznego.

120 Usystematyzowanie tej tematyki wpisuje się w rozważania dotyczące oceniania i ograniczania zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy i życia codziennego, konieczne wobec narastającej skali użytkowania tego typu źródeł, m.in. w zróżnicowanych zastosowaniach przemysłowych, energetycznych i medycznych, takich jak: medyczne skanery rezonansu magnetycznego, aplikatory magnetoterapeutyczne i medyczne systemy nawigacji magnetycznej, laboratoryjne spektrometry nuklearnego rezonansu magnetycznego, chwytaki, separatory i defektoskopy magnetyczne, zgrzewarki rezystancyjne, spawarki łukowe, pojazdy elektryczne i sieci trakcyjne, instalacje fotowoltaiczne i sieci elektroenergetyczne, detektory metali, itp.

## Część 1. Parametryzacja zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w środowisku

Jolanta Karpowicz

130 Współcześnie powszechne jest wykorzystywanie we wszystkich gałęziach gospodarki i w życiu codziennym różnego typu „**technologii elektromagnetycznych**”, czyli rozwiązań technicznych, których użytkowaniu towarzyszy rozpraszanie w ich otoczeniu energii elektromagnetycznej (pola-EM) wskutek wykorzystywania energii elektrycznej. Oddziaływanie pola-EM na pracujących i materialne środowisko pracy występuje podczas użytkowania wszystkich urządzeń i instalacji zasilanych energią elektryczną – wskutek zachodzących w ich otoczeniu zjawisk elektromagnetycznych i zamierzonego lub niezamierzonego rozpraszania energii elektromagnetycznej w środowisku.

W literaturze naukowej i specjalistycznej, wymaganiach prawnych i normalizacyjnych oraz specyfikacjach technicznych, do scharakteryzowania zjawisk elektromagnetycznych stosuje się określenia:

- **pole elektromagnetyczne (pole-EM)**
- **promieniowanie elektromagnetyczne**
- **promieniowanie niejonizujące** - określenie obejmujące pole i promieniowanie elektromagnetyczne oraz promieniowanie optyczne.

Ponieważ w aktualnych wymaganiach prawa pracy najpowszechniej wykorzystywane jest określenie pole-EM, w niniejszym opracowaniu jest ono najczęściej wykorzystywane.

**Pole-EM jest** zatem określeniem powszechnie występującego w otoczeniu urządzeń i instalacji elektrycznych czynnika fizycznego środowiska, odnoszącym się do rozpraszanej tam energii elektromagnetycznej o parametrach zróżnicowanych w dziedzinie częstotliwości, czasu i przestrzeni.

150 Przy rozpoznawaniu, badaniu i ocenianiu parametrów narażenia na pole-EM zastosowanie mają zarówno techniki pomiarowe, symulacje komputerowe, jak i analiza parametrów technicznych emitujących je obiektów lub instalacji. W pewnych przypadkach można wykorzystać techniki hybrydowe celem redukcji złożoności i kosztów badań, jednakże takie podejście nie jest uniwersalne. Największą miarodajność w przypadku oceny zagrożeń zawodowych mają badania *in situ*, ponieważ umożliwiają ocenę zarówno rzeczywistych parametrów pola-EM w specyficznych warunkach rozpatrywanej przestrzeni pracy, gdzie użytkowane są różnorodne urządzenia i instalacje elektryczne, jak i rozmieszczone są zróżnicowane obiekty materialne modyfikujące morfologię ekspozycji (rozkład przestrzenny i zmienność w czasie), a także ocenę warunków narażenia przy aktualnym stanie

technicznym znajdujących się tam źródeł pola-EM (zmieniającym się wskutek zmiennych warunków użycia i konserwacji urządzeń oraz procesów starzeniowych). Punktem wyjścia w omawianym obszarze badań są zależności charakteryzujące pole-EM w otoczeniu różnego typu źródeł i ich powiązanie z elektrycznymi i geometrycznymi właściwościami źródeł pola-EM i ich otoczenia.

### 1.1. Zależności charakteryzujące podstawowe parametry elektromagnetyczne

Pole-EM opisywane jest modelem matematycznym, wykorzystującym **wielkości wektorowe**<sup>1</sup>. Wielkości charakteryzujące pole-EM i zależności między nimi w ogólności opisanymi są równaniami, bazującymi na zależnościach Maxwella [1.3, 1.5, 1.6]:

– prawo Faradaya 
$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-1)$$

– prawo Ampera 
$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-2)$$

– źródłowość pola-E 
$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (1-3)$$

– beźródłowość pola-M 
$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1-4)$$

– prawo zachowania ładunku elektrycznego 
$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-5)$$

– własność pola-E 
$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1-6)$$

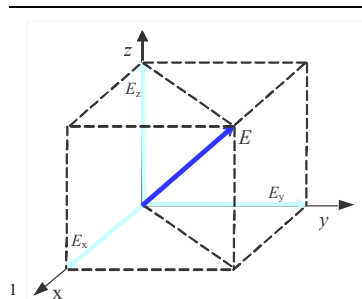
– własność pola-M 
$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (1-7)$$

– prawo Ohma 
$$\mathbf{J} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (1-8)$$

gdzie:

180  $H$  – natężenie pola magnetycznego (pola-M), w amperach na metr, A/m

$B$  – indukcja magnetyczna, w teslach, T [ $T=(Vs)/m^2$ ]



Wielkości wektorowe: w danym punkcie przestrzeni – w układzie współrzędnych ortogonalnych  $(x, y, z)$  – w każdej chwili czasu  $(t)$  można określić zarówno wartość (np. natężenie pola-E), jak i polaryzację wektora (w omawianym przykładzie kierunek i zwrot wektora natężenia pola-E).

- $E$  – natężenie pola elektrycznego (pola-E), w voltach na metr, V/m  
 $D$  – indukcja elektryczna, w kulombach na metr kwadratowy, C/m<sup>2</sup> [(C/m<sup>2</sup>)=(As)/m<sup>2</sup>]  
 $J$  – gęstość prądu elektrycznego, w amperach na metr kwadratowy, A/m<sup>2</sup>  
 $\sigma$  – przewodność elektryczna, w simensach na metr, S/m [(S/m)=A/(Vm)]  
 $\rho$  – gęstość objętościowa ładunku, w kulombach na metr kwadratowy, C/m<sup>3</sup> [(C/m<sup>3</sup>)=(As)/m<sup>3</sup>]  
 $\mu$  – przenikalność magnetyczna, w henrach na metr, H/m [H/m=(Vs)/(Am)]  
 $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni –  $4\pi 10^{-7}$  H/m  
 $\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna ośrodka (dla powietrza:  $\mu_r = 1$ )  
 $\varepsilon$  – przenikalność elektryczna, w faradach na metr, F/m [F/m=(As)/(Vm)]  
 $\varepsilon_0$  – przenikalność elektryczna próżni –  $[1/(36\pi)]10^{-9}$  F/m  
 $\varepsilon_r$  – względna przenikalność elektryczna ośrodka (dla powietrza:  $\varepsilon_r = 1$ )  
 $f$  – częstotliwość, w hercach, Hz  
 $v$  – prędkość, w metrach na sekundę, m/s  
 $t$  – czas, w sekundach, s  
 $rot$  – rotacja wektora<sup>2</sup>  
 $div$  – dywergencja wektora<sup>3</sup>.

- 200 Zgodnie z przytoczonymi zależnościami, **pole elektryczne (pole-E)** reprezentuje oddziaływanie między ładunkami elektrycznymi (lub obiektami naładowanymi elektrycznie), o różnym potencjale elektrycznym. Potencjał elektryczny ziemi jest tradycyjnie traktowany jako potencjał odniesienia równy zero. Przykładowo, między dwoma płaskimi płytami, czyli w układzie określanym w elektrotechnice jako kondensator płaski, wektor pola elektrycznego rozkłada się w płaszczyźnie prostopadłej do powierzchni tych płyt, prostopadle do nich, jednorodnie w całej objętości – z wyłączeniem przestrzeni przy krawędziach płyt (rys. 1-1.a). Natomiast w układzie „poziomy przewód pod napięciem-ziemia”, zbliżonym do „zdegenerowanego” kondensatora płaskiego, rozkład pola-E jest niejednorodny, zbliżony do rozkładu przy krawędziach płyt (rys. 1-1.b). Wartość natężenia jednorodnego pola-E,  $E$ , występującego wewnątrz kondensatora płaskiego, określona jest
- 210 zależnością (1-9):

$$E = \frac{U}{d} \quad (1-9)$$

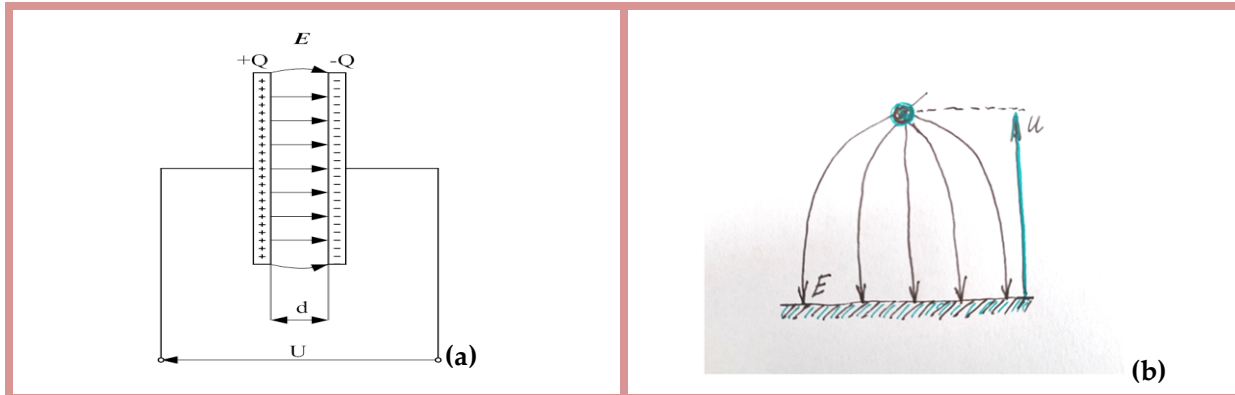
gdzie:

$U$  – napięcie w kondensatorze (różnica potencjału elektrycznego płyt tworzących kondensator), w V

<sup>2</sup> Rotacja lub wirowość wektora – operator różniczkowy w teorii pola, który działając na pole wektorowe tworzy pole wektorowe wskazujące wirowanie (gęstość cyrkulacji) pola wyjściowego.

<sup>3</sup> Dywergencja lub rozbieżność wektora, źródłowość pola wektorowego – operator różniczkowy przyporządkowujący polu wektorowemu w przestrzeni euklidesowej 3-wymiarowej pole skalarne będące formalnie iloczynem skalarnym operatora Nabla z wektorem pola.

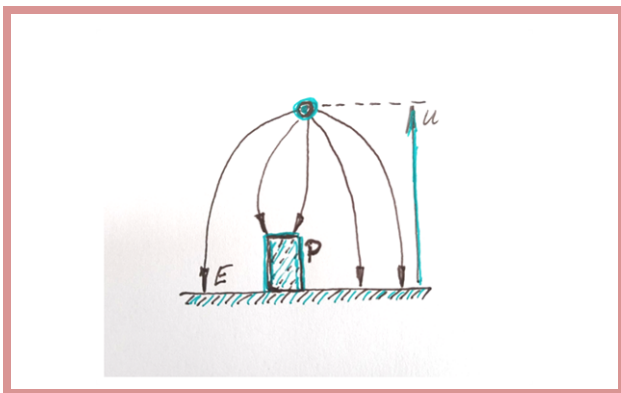
$d$  – odległość między płytami kondensatora, w m.



Rys. 1-1. Pole-E w kondensatorze płaskim (a) i pod przewodem pod napięciem elektrycznym rozwieszonym nad ziemią (b) [archiwum własne]

- 220 W razie umieszczenia w polu-E obiektu o przewodności elektrycznej większej niż w jego otoczeniu, zachodzi skupianie linii pola-E w otoczeniu tego obiektu – zilustrowane w modelu pola-E pod poziomym przewodem z rysunku 1-1.b. (rys. 1-2). Wskutek omawianego zjawiska w otoczeniu obiektu przewodzącego powstaje lokalnie pole-E silniejsze, niż wynika to z oddziaływania źródła pola-E w środowisku bez tego obiektu – nazywane powstawaniem wtórnych źródeł pola-EM. Jednocześnie w większej odległości od obiektu następuje lokalne osłabienie pola-E, ilustrujące jeden z mechanizmów możliwej ochrony przed oddziaływaniem pola-EM w wybranych miejscach. Omawiane zależności można zaobserwować na przykład w otoczeniu linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia, w pobliżu ich słupów podporowych lub pobliskiego zadrzewienia.

230



Rys. 1-2. Pole-E w otoczeniu uziemionego, przewodzącego obiektu (OU) umieszczonego w powietrzu pod przewodem pod napięciem elektrycznym rozwieszonym poziomo nad ziemią [archiwum własne]

240 **Pole magnetyczne (pole-M)** reprezentuje oddziaływanie ładunków w ruchu (tzn. tworzących prąd elektryczny) lub magnesów trwałych (powstających dzięki namagnesowaniu obiektów z materiałów o specyficznych właściwościach magnetycznych wynikających m.in. z ich składu i sposobu wytwarzania). Przykładowo, wokół pojedynczego prostoliniowego nieskończenie długiego przewodu z prądem wektor pola magnetycznego rozkłada się w płaszczyźnie prostopadłej do tego przewodu, stycznie do okręgu przechodzącego przez punkt obserwacji (przez środek tego okręgu przechodzi przewód z prądem będący źródłem rozważanego pola-M), (rys. 1-3.a). Natomiast wartości natężenia rozpatrywanego pola-M,  $H$ , opisuje zależność (1-10):

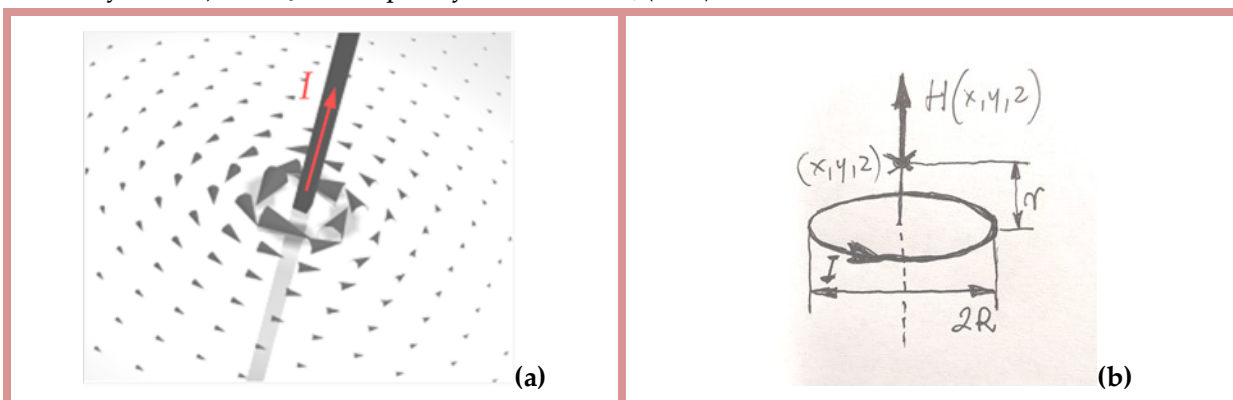
$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (1-10)$$

gdzie:

$I$  – natężenie prądu w przewodzie, w A

$r$  – odległość miejsca obserwacji od przewodu, w m.

250 Jeśli przewód z prądem zostanie zwinięty w okrąg (określany jako zwoj kołowy), wskutek superpozycji wektorów pola-M występującego wokół niego, powstaje pole-M o wirowym układzie wokół tego przewodu, ze składową osiową w centrum zwoju (zaprezentowaną na rys. 1-3.b) o natężeniu opisanym zależnością (1-11).



*Rys. 1-3. Natężenie pola-M wokół prostoliniowego przewodu z prądem (a) i wokół zwoju kołowego (b); strzałki reprezentują moduł - wielkość strzałek i polaryzację pola-M - kierunek i zwrot strzałek; symulacje numeryczne metodą MES [archiwum własne]*

$$H = \frac{I R^2}{2(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad (1-11)$$

gdzie:

$I$  – natężenie prądu w zwoju kołowym, w A

$r$  – odległość miejsca obserwacji w osi zwoju kołowego, liczona od płaszczyzny tego zwoju, w m

260

$R$  – promień zwoju kołowego.

W punkcie centralnym zwoju kołowego (gdzie  $r = 0$ ) natężenie pola-M zgodnie z tą zależnością wynosi:

$$H = \frac{I}{2R} \quad (1-12)$$

Zależności (1-10) – (1-12) opisują najbardziej rozpowszechnione w środowisku źródła pola-M, stanowiące intencjonalne aplikatory pola-M (zwoje przewodów z prądem, określane również jako cewki, induktry lub anteny ramowe) lub elementy instalacji zasilania elektrycznego (przewody prostoliniowe i zwoje przewodów z prądem).

270

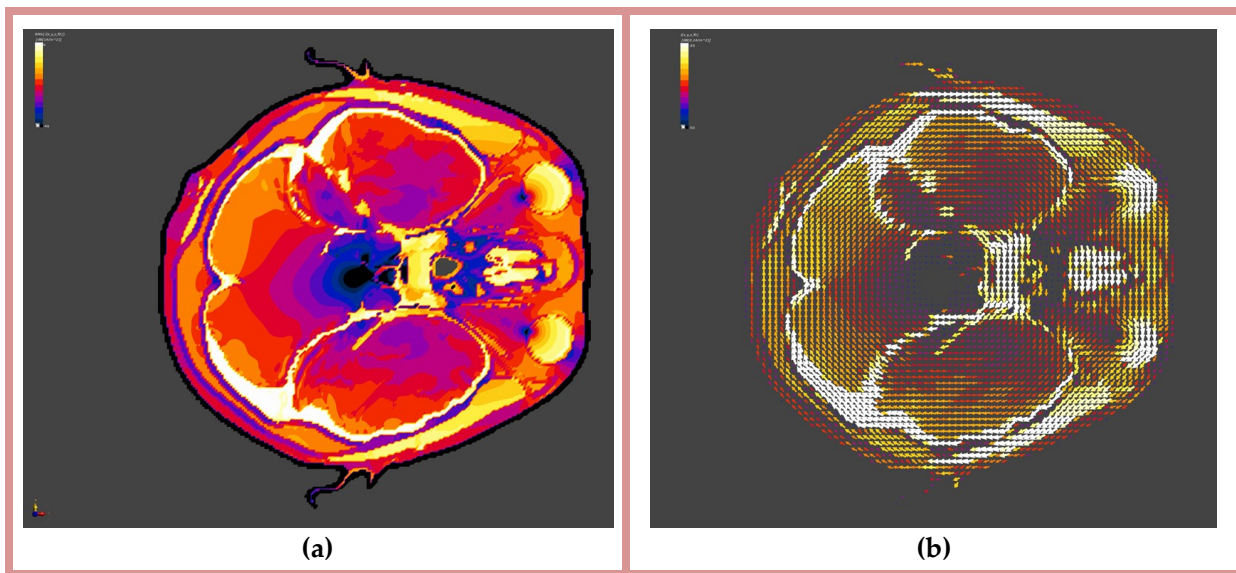
Przeciwnie do pola-E, rozkład przestrzenny pola-M jest jedynie nieznacznie modyfikowany przez objekty materialne wprowadzone do środowiska, o ile nie są to objekty o specyficznych cechach materiałowych, takich jak nadprzewodniki czy ferrimagnetyki.

280

Skomplikowana struktura omawianego modelu matematycznego odzwierciedla złożoność zjawisk elektromagnetycznych, zachodzących w źródłach pola-EM i w otaczających je ośrodkach, a także okoliczności fizycznego oddziaływania pola-EM na ludzi i inne objekty materialne (ożywione i nieożywione) w środowisku. Do kluczowych w tym kontekście właściwości pola-EM należy jego zdolność do propagacji (rozprzestrzeniania się) w dowolnym ośrodku otaczającym źródło (podobnie do innych zjawisk falowych). Natomiast szczególną cechą promieniowania elektromagnetycznego jest jego propagacja również w próżni. Przy czym w obecnie przyjmowanych modelach zjawisk elektromagnetycznych, prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w próżni jest maksymalna i jest to prędkość propagacji światła (będącego promieniowaniem elektromagnetycznym). Natomiast w innych ośrodkach propagacja promieniowania elektromagnetyczna zachodzi z mniejszą prędkością, uzależnioną od parametrów dielektrycznych tego ośrodka (przy zachowaniu częstotliwości jego zmienności w czasie).

Zależności (1-1) – (1-8) umożliwiają obliczenie metodami numerycznymi przestrzennego rozkładu pola-EM pochodzącego od źródeł o zróżnicowanych, realistycznych parametrach elektrycznych i geometrycznych oraz elektromagnetycznych skutków jego oddziaływania na objekty materialne, również na organizm człowieka. Obliczenia dotyczące skutków

290 oddziaływania pola-EM na człowieka wymagają zwalidowanych algorytmów rozwiązywania zagadnień polowych w przestrzeni wokselowej (skwantowanej) oraz wykorzystania odpowiednio dokładnego modelu człowieka (realistycznego, anatomicznego modelu wysokiej rozdzielczości, o realistycznych parametrach dielektrycznych i geometrii poszczególnych organów i tkanek), a także realistycznej pozycji ciała, np. osoby pochylonej przy urządzeniu lub siedzącej w pojeździe [1.8] (rys. 1-4).



Rys. 1-4. Przykładowy rozkład gęstości natężenia prądu zaindukowanego w wokselowym, anatomicznym modelu głowy człowieka przez zmienne w czasie pole-M spolaryzowane pionowo – reprezentacja skalarna (a) i wektorowa (b): natężenie prądu w skali barw od koloru czarnego (minimum) do białego (maksimum), [archiwum własne]

300

Analitycznie można opisać jedynie najprostsze przypadki, podobnie jak przykłady zaprezentowane na rys. 1-1 i 1-3. W procesie rozpoznania źródeł zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy najistotniejsze znaczenie praktyczne znajdują najbardziej uogólnione zależności:

- natężenie pola-E jest proporcjonalne do napięcia elektrycznego, występującego w źródle pola-EM
  - natężenie pola-M jest proporcjonalne do natężenia prądu przepływającego w źródle pola-EM
- 310 – wraz z odległością od źródła pola-EM wartość natężenia pola-E i pola-M najczęściej zmniejsza się.

Poziom pola-EM z reguły szybko maleje w miarę oddalania się od jego źródła. Na przykład, pole-M o natężeniu 1 000 A/m (1 kA/m) występuje w odległości ok. 15 cm od pojedynczego nieskończonego długiego przewodu, w którym płynie prąd o natężeniu 1000 A (w otoczeniu krótkich przewodów z takim prądem występuje słabsze pole-M). Natomiast w odległości 10 m od takiego przewodu natężenie pola-M zmniejsza się niemal 70-krotnie, do poziomu ok. 15 A/m.

320 Uwaga: W okolicznościach umożliwiających powstawanie wspomnianych wtórnych źródeł pola-EM w środowisku, lokalnie zależność poziomu pola-EM od odległości od jego źródła może być niemonotoniczna, tzn. pomimo zwiększania się odległości od źródła również poziom pola-EM może narastać - na przykład w razie zbliżania się do metalowego ogrodzenia znajdującego się nieopodal linii elektroenergetycznej.

## 1.2. Zmienność w czasie pola-EM i powiązana z nią parametryzacja

330 Właściwości fizyczne pola-EM, m.in. energia kwantu promieniowania, są ściśle związane z jego zmiennością w czasie, charakteryzowaną jego częstotliwością (odwrotnie proporcjonalną do długości fali promieniowania). W związku z tym, kryterium częstotliwości stosowane jest np. w kontekście rozróżnienia promieniowania elektromagnetycznego niejonizującego i promieniowania jonizującego (tzn. o energii kwantu większej od 12,5 elektronowolta, eV, co oznacza promieniowanie o częstotliwości większej od 30 peta-herców, a o długości fali mniejszej od 10 nm). Pasma częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego mogą być rozróżniane również ze względu na jego właściwości biofizyczne (np. pasmo promieniowania widzialnego), a także ze względu na rozwiązania techniczne zastosowane w urządzeniach (np. pasmo promieniowania rentgenowskiego, emitowanego z tzw. lamp rentgenowskich, lub częstotliwości pracy sieci elektroenergetycznej), (rys. 1-5).

340 Promieniowanie elektromagnetyczne, które w dokumentach prawnych określono administracyjnie terminem „pole-EM” zostało wydzielone z pasma promieniowania niejonizującego. Pasma określone jako pole-EM obejmuje składowe statyczne (odpowiadające częstotliwości 0 Hz) oraz zmienne w czasie o częstotliwości harmonicznych składowych do 300 GHz (tj. 300 000 000 000 Hz). Jest to bardzo szerokie pasmo częstotliwości o rozpiętość ponad 11 rzędów wielkości. Uwzględniając, że również poniżej 1 Hz skutki oddziaływania na ludzi są traktowane formalnie jako zależne od częstotliwości pola-EM [1.3, 1.5] – w rozważaniach z zakresu inżynierii biomedycznej dotyczących ochrony bezpieczeństwa i zdrowia ludzi należy traktować pole-EM jako czynnik o zróżnicowaniu częstotliwości obejmującym co najmniej 14 rzędów wielkości. Dla porównania - fale

akustyczne mają częstotliwości z pasma o rozpiętości tylko 5-6 rzędów wielkości, a więc są czynnikiem miliony razy mniej zróżnicowanym niż omawiane tutaj pole-EM.

350

Promieniowanie niejonizujące										Promieniowanie jonizujące				
$f$ [Hz]	0.1	10	1k	100k	10M	1G	100G	10T	1P	100P	10E	1Z	100Z	
	$10^{-10}$	$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-4}$	$10^{-2}$	$10^0$	$10^2$	$10^4$	$10^6$	$10^8$	$10^{10}$	$10^{12}$	$f$ [GHz]	
Pola statyczne ( $\leq 0$ Hz / $\lambda = \infty$ )		$f=50$ Hz ( $\lambda=6000$ km)				$f=1$ GHz ( $\lambda=0.3$ m)		$f=300$ GHz ( $\lambda=1$ mm)						
POLE ELEKTROMAGNETYCZNE (pole-EM; $f < 300$ GHz)										Promieniowanie optyczne IF VIS UV			Rentgenowskie Gamma Kosmiczne	
Oznaczenia: k – kilo; M – mega; G – giga; T – tera; P – peta; E – eksa; Z – zetta; IF – podczerwień; VIS – widzialne; UV – nadfiolet $f$ – częstotliwość														

Rys. 1-5. Widmo częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego:

1) pole-EM (wg prawa pracy, pole-EM o częstotliwości mniejszej od 300 GHz):

360

- PMS – pole magnetostatyczne ( $f \leq 5$  Hz)
- PES – pole elektrostatyczne ( $f \leq 5$  Hz)
- PQS – pole-EM quasi-statyczne ( $5 \text{ Hz} < f \leq 100 \text{ kHz}$ )
- PWCZ – pole-EM wielkiej częstotliwości ( $100 \text{ kHz} < f \leq 300 \text{ MHz}$ )
- PMF – promieniowanie mikrofalowe ( $300 \text{ MHz} < f < 300 \text{ GHz}$ )

2) promieniowanie optyczne (podczerwone, widzialne i nadfioletowe)

3) promieniowanie jonizujące (rentgenowskie, gamma i kosmiczne) [archiwum własne]

370

Wspomniane pasmo częstotliwości (0-300 GHz) stopniowo uwzględniano w zaleceniach i wymaganiach dotyczących ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi – najstarsze zalecenia bezpieczeństwa elektromagnetycznego dotyczyły pasm megahercowych i niskich gigahercowych. Rozszerzano je stopniowo w kierunku wyższych częstotliwości (do 300 GHz) lub niższych częstotliwości kilohercowych i hercowych (obejmując m.in. tak zwaną częstotliwość przemysłową: 50 Hz - w Europie, czy 60 Hz - w Ameryce i Azji) oraz statycznego pola-E i pola-M. Obecnie przeważają opracowania, w których omawiane są zagrożenia i wymagania ochronne dotyczące pełnego (lub niemal pełnego) pasma częstotliwości - od pól statycznych do mikrofal o częstotliwości 300 GHz.

380

Wokół ładunków nieruchomych albo przepływających w sposób ustalony (prąd stały) występują pola-EM niezmiennie w czasie, określane jako statyczne: PES i PMS. Natomiast jeżeli poziom pola-EM jest okresowo zmienny w czasie i ma przebieg sinusoidalny to nazywane jest ono polem-EM harmonicznym. W elektrotechnice prądy takie powszechnie oznaczane są skrótem AC (ang. *alternating current*). Przebiegi harmoniczne (przemienne) wytwarzane są np. przez prądnice prądu przemiennego. Z tego powodu powszechnie

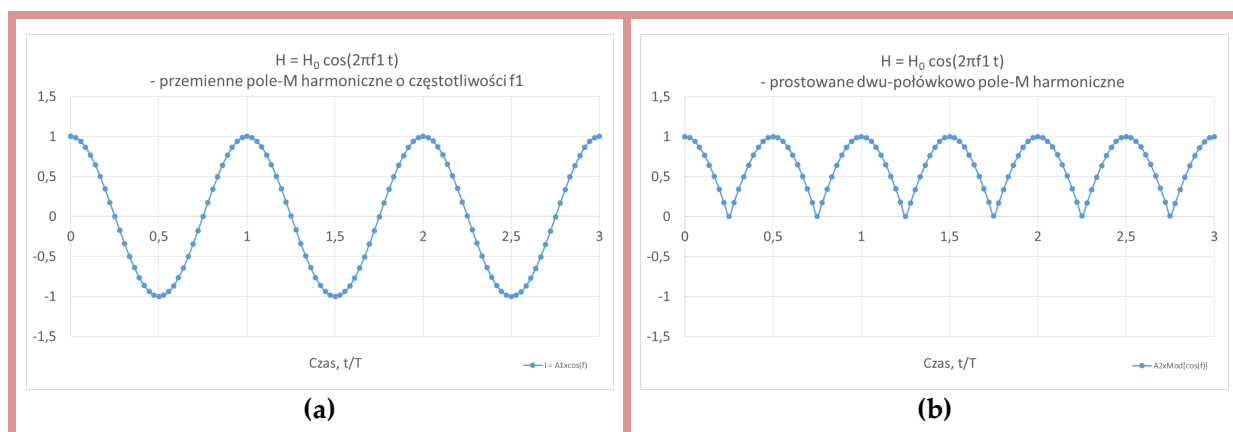
występuje w środowisku m.in. harmoniczne pole-EM o częstotliwości przemysłowej, powstające przy instalacjach elektroenergetycznych i urządzeniach elektrycznych. Narasta również występowanie pola-EM emitowanego przez instalacje prądu o częstotliwości 50 Hz przetworzonego w układach prostownikowych - w celu uzyskania tzw. prądu stałego, a bardziej precyzyjnie prądu prostowanego ze składową stałą. W elektrotechnice prądy stałe oznaczane są skrótem DC (ang. *direct current*). Prąd prostowany można zatem oznaczyć jako DC + AC.

390 W środowisku pracy użytkowane są różnego typu instalacje i urządzenia wykorzystujące wspomniane zasilanie prądem przemiennym o częstotliwości przemysłowej 50 Hz lub prądem prostowanym, jedno-, dwu- lub trzy-fazowym. Charakterystyczne cechy zmienności w czasie pola-EM emitowanego przez wspomniane instalacje zostaną zilustrowane na kolejnych przykładach, wraz z typowymi parametrami wykorzystywanymi podczas oceny zmiennego w czasie pola-EM w środowisku. Najprostszy przypadek to pole-M występujące w otoczeniu pojedynczego przewodu, w którym przepływa prąd przemienny  $I(t)$  (harmoniczny, sinusoidalnie zmienny w czasie ( $t$ )) o częstotliwości  $f = 50$  Hz i amplitudzie  $A$ , przebiegający zgodnie z zależnością:

$$I(t) = A \cos(2\pi f t) \quad (1-13)$$

lub prąd prostowany, w idealnym przypadku przebiegający zgodnie z zależnością (rys. 1-6):

400 
$$I(t) = A \text{Mod}[\cos(2\pi f t)] \quad (1-14)$$



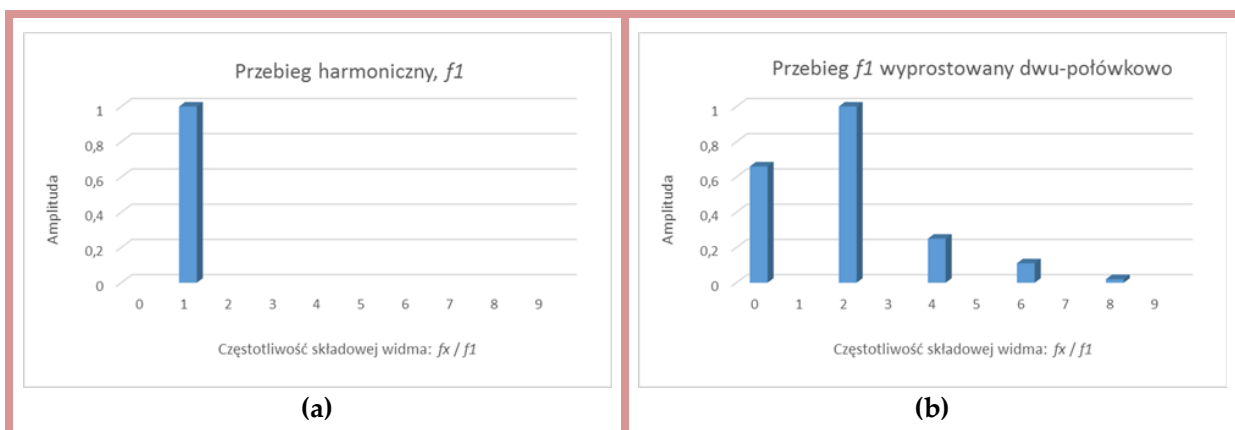
Rys. 1-6. Zmienność w czasie pola-M emitowanego wskutek przepływania w przewodzie przemiennego, harmonicznego prądu o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz (a) i prostowania dwu-połówkowego takiego prądu tworzącego przebieg o częstotliwości  $f_2 = 100$  Hz (b); [archiwum własne]

410 Wobec istotnej zależności parametrów dielektrycznych materii od częstotliwości pola-EM, a także związanej z tym zależności częstotliwościowej procesów bielektromagnetycznych w organizmach żywych, szeroko stosowane są alternatywne do charakterystyki przebiegów zmienności pola-EM w czasie, jego charakterystyki widmowe. Wykorzystywane są w takim

410 razie sformułowane przez Fouriera właściwości sygnałów: każdy przebieg okresowy w czasie można scharakteryzować matematycznie w dziedzinie częstotliwości jako sumę przebiegów harmonicznym o różnych amplitudach, fazach i częstotliwościach [1.4]. W zastosowaniach technicznych najpopularniejsze jest obecnie korzystanie z algorytmu tzw. szybkiej transformacji Fouriera (FFT), który określa dyskretne parametry amplitudowo-częstotliwościowe sumy zgodnych w fazie cosinusów o częstotliwościach będących wielokrotnościami częstotliwości podstawowej przebiegu, reprezentującej dany przebieg czasowy w dziedzinie częstotliwości.

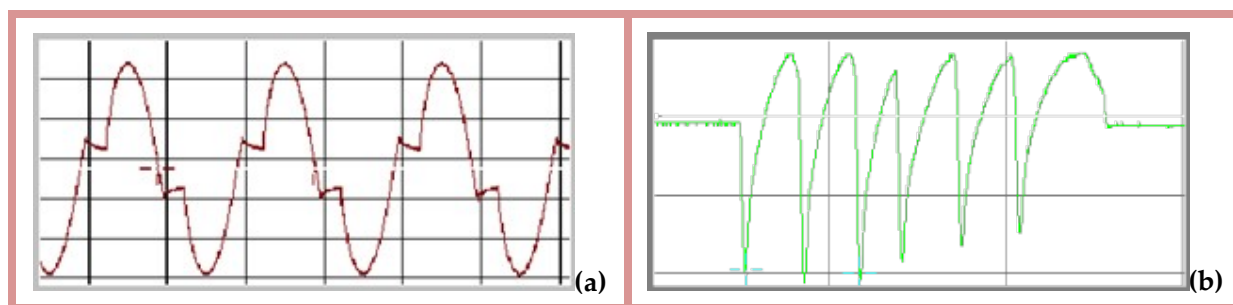
420 Reprezentacją graficzną widma FFT sygnału (transformaty FFT) są względne amplitudy kolejnych składowych częstotliwościowych widma ( $f_0$  – składowa stała, równa wartości średniej w czasie analizowanego przebiegu;  $f_1$  – składowa podstawowa;  $f_2=2f_1$  – druga harmoniczna;  $f_3=3f_1$  – trzecia harmoniczna itd.). Na rys. 1-7 zaprezentowano przykładowe widma amplitudowo-częstotliwościowe przebiegów z rys. 1-6. Omawiany przebieg harmoniczny jest w dziedzinie częstotliwości reprezentowany przez pojedynczą składową o takiej samej częstotliwości (w naszym przykładzie  $f_1 = 50$  Hz) i jej amplitudzie wynoszącej 100%. Po jego dwupołówkowym prostowaniu, wynikowy przebieg reprezentowany jest przez widmo amplitudowo-częstotliwościowe radykalnie zmienione – składowa zmienna (AC) nie zawiera już składowej o częstotliwości  $f_1$ , natomiast zawiera składową o podwójnej częstotliwości  $f_2=2f_1$ , która ma najwyższą amplitudę w widmie, składowe o wielokrotnościach  $f_2$  (tzw. parzyste harmoniczne) o znacznie niższych amplitudach, a także składową stałą  $f_0$  o amplitudzie reprezentującej wartość średnią przebiegu (składową DC).

430

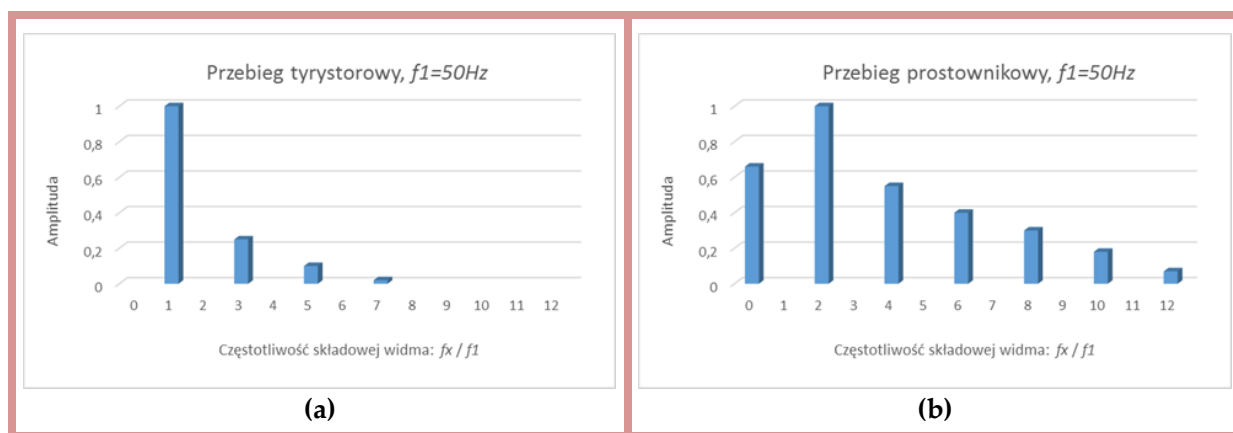


Rys. 1-7. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe pola-M emitowanego wskutek przepływu w przewodzie przemiennego, harmonicznego prądu o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz – jak na rys. 1-6.a (a) i dwu-połówkowego prostowania tego prądu, tworzącego przebieg o częstotliwości  $f_2 = 100$  Hz – jak na rys. 1-6.b (b); [archiwum własne]

Niedoskonałości techniczne urządzeń i instalacji elektrycznych są ponadto przyczyną zaburzenia przebiegów harmonicznym, odzwierciedlanego w widmie amplitudowo-częstotliwościowym dodatkowymi składowymi o różnych częstotliwościach i amplitudach. 440 Przykładowo, użytkowanie układów tyrystorowych wnosi nieparzyste harmoniczne, a użytkowanie układów prostownikowych parzyste harmoniczne. Na rys. 1-8 i 1-9 zaprezentowano przykładowe przebiegi i widma amplitudowo-częstotliwościowe rozpoznane metodą FFT w przebiegach czasowych pola-M zarejestrowanego w otoczeniu układu tyrystorowego i prostownikowego.



Rys. 1-8. Zmienność w czasie pola-M zarejestrowanego w otoczeniu przemysłowego układu tyrystorowego (a) i prostownikowego (b), zasilanych z sieci elektroenergetycznej jedno-fazowej 50 Hz [archiwum własne]



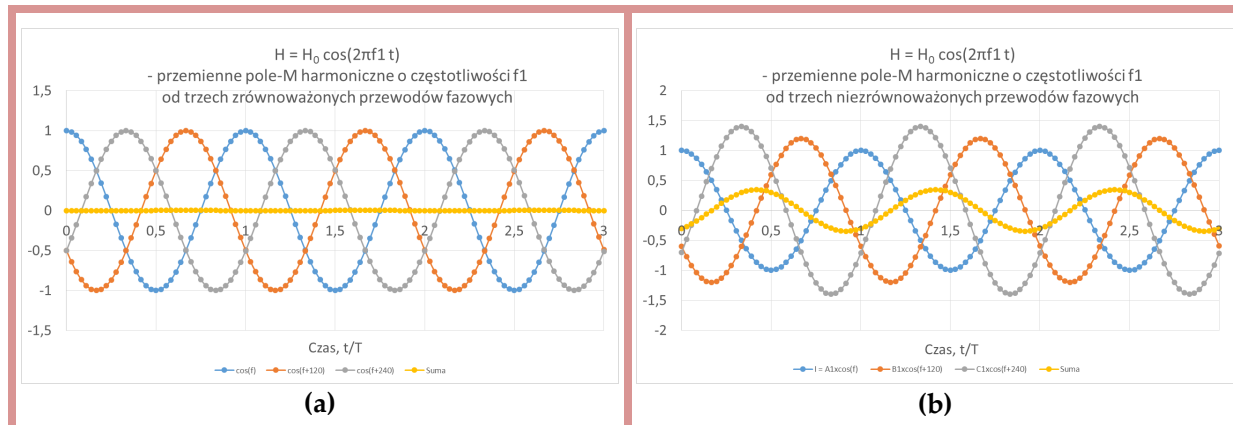
450 *Rys. 1-9. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe pola-M zarejestrowanego w otoczeniu przemysłowego układu tyrystorowego (a) i prostownikowego (b), zasilanych z sieci elektroenergetycznej jedno-fazowej 50 Hz - jak na rys. 1-8 [archiwum własne]*

Odmienne i bardziej złożone zależności można zaobserwować przy instalacjach i urządzeniach elektrycznych zasilanych 3-fazowo, tzn. przez prąd przemienny harmoniczny o częstotliwości nominalnej 50 Hz o przesunięciu między fazami o 120 stopni (tj.  $2/3 \pi$  radianów) (rys. 1-10). Nominalnie natężenie prądu poszczególnych faz powinno być jednakowe, jak na rys. 1-10.a. Sumaryczne oddziaływanie elektromagnetyczne takiej zrównoważonej instalacji zasilającej jest bliskie zero w jej otoczeniu, ze względu na

460 wzajemne kompensowanie kolinearnych wektorów pola-M wywołanych prądem poszczególnych faz (wartość średnia przebiegu sumarycznego równa zero - linia w żółtym kolorze). Jednak w rzeczywistych warunkach mogą wystąpić niezrównoważone fazowe obciążenia prądowe, jak na rys. 1-10.b. Ponadto, jeśli przewody fazowe są oddzielone od siebie przestrzennie (np. przy zasilaniu izolowanymi powietrznie szynoprzewodami), to w otoczeniu takiej instalacji odległości od rozpatrywanego miejsca do poszczególnych

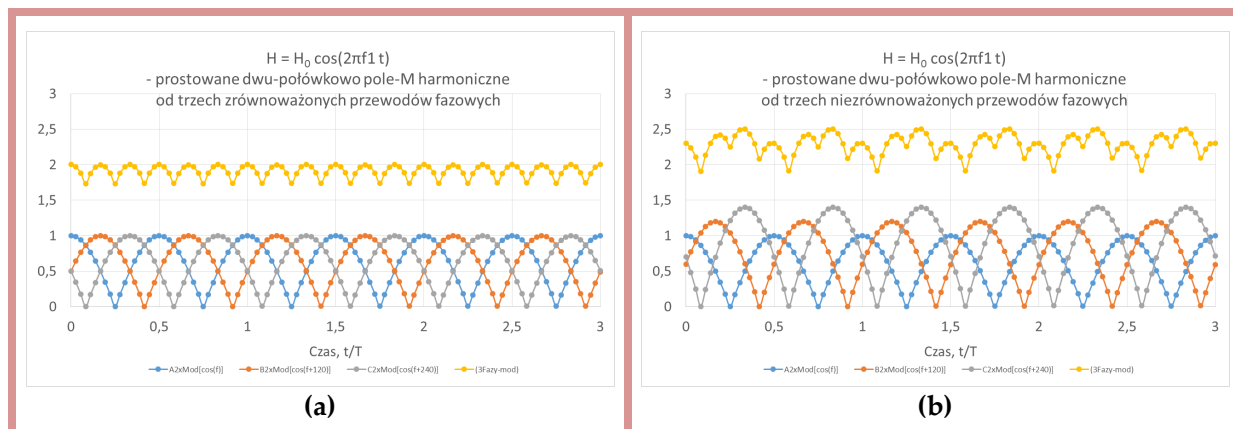
470 przewodów mogą się różnić. Z obu przyczyn, w określonym miejscu natężenie (amplituda) pola-M pochodzącego od poszczególnych prądów fazowych może się różnić, w stopniu istotnym z punktu widzenia środowiska elektromagnetycznego. W takim przypadku zachodzi niepełna kompensacja wektorów pola-M wywołanych prądem poszczególnych faz, i w otoczeniu niezrównoważonych prądowo przewodów fazowych może wystąpić istotne oddziaływanie wypadkowego pola-M, nawet dochodzące do poziomu porównywalnego z oddziaływaniem pojedynczego przewodu (przebieg sumaryczny o częstotliwości zgodnej z częstotliwością przebiegów fazowych  $f_1$  i amplitudzie wynikającej z relacji między amplitudami poszczególnych prądów fazowych - linia w żółtym kolorze). Sygnalizowane zjawisko zachodzi nawet przy przewodach fazowych znajdujących się w różnych miejscach, jedynie arytmetyczne sumowanie amplitud kolinearnych wektorów pola-M pochodzącego od poszczególnych przewodów (stosowane przy wiązce przewodów zlokalizowanych obok siebie) należy zamienić regułami sumowania wektorów o różnych kierunkach w przestrzeni (ze względu na zróżnicowaną lokalizację źródeł rozpatrywanego pola-M).

480



Rys. 1-10. Zmienność w czasie pola-M emitowanego wskutek przepływu w przewodach trzy-fazowej instalacji elektrycznej przemiennego, harmonicznego prądu o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz (linie w kolorach szarym, niebieskim i pomarańczowym): przy zrównoważonym obciążeniu prądowym przewodów fazowych (a); przy niezrównoważonym obciążeniu prądowym przewodów fazowych (b); przebieg sumaryczny – linia w żółtym kolorze [archiwum własne]

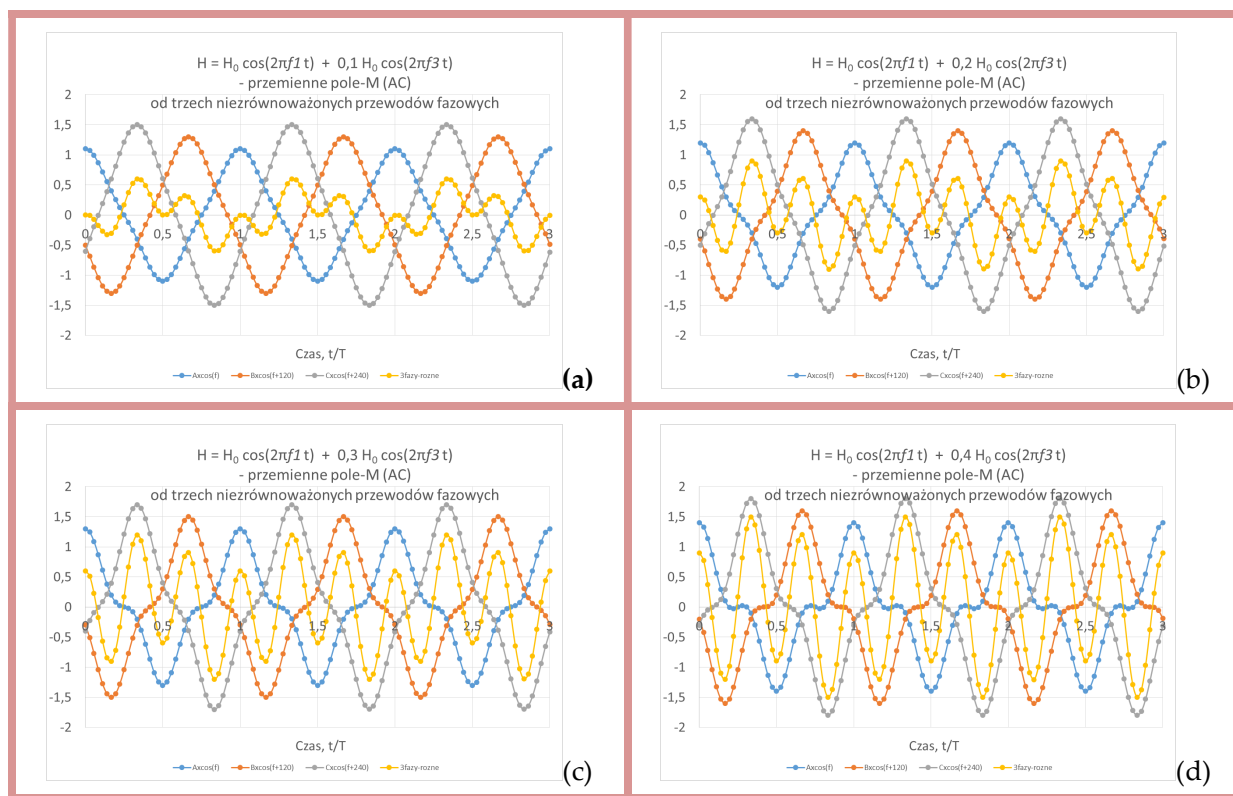
Natomiast w otoczeniu trzy-fazowej instalacji elektrycznej DC (prądu prostowanego) pojawia się pole-M prostowane (DC), o składowej zmiennej (AC) o podstawowej częstotliwości 300 Hz (wzbogaconej wyższymi harmonicznymi) i składowej stałej (DC) 490 zbliżonej do podwojonej amplitudy przebiegu fazowego – zależnie od stopnia zrównoważenia obciążenia prądowego poszczególnych przewodów fazowych (rys. 1-11).



Rys. 1-11. Zmienność w czasie pola-M emitowanego wskutek przepływu w przewodach trzy-fazowej instalacji elektrycznej prostowanego prądu o częstotliwości  $f_2 = 100$  Hz (linie w kolorach szarym, niebieskim i pomarańczowym), wynikającej z prostowania prądu harmonicznego o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz: przy zrównoważonym obciążeniu prądowym przewodów fazowych (a); przy

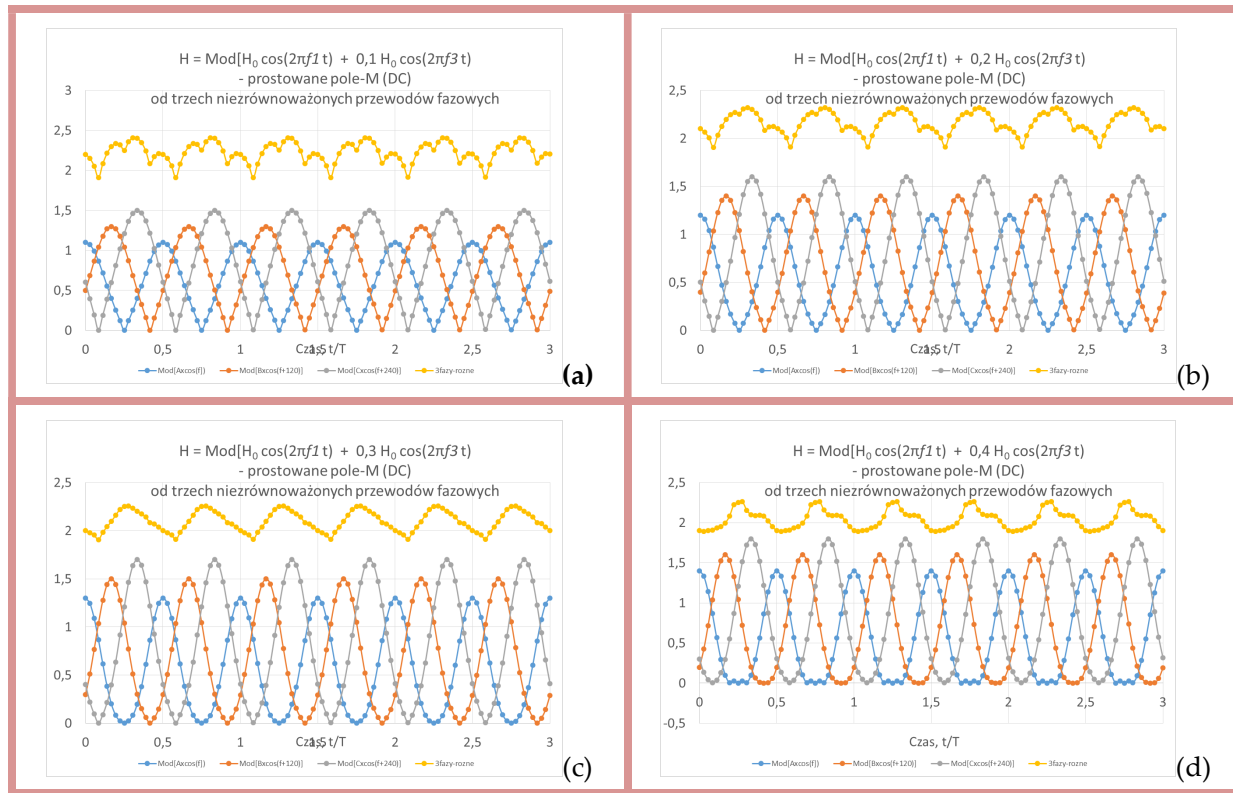
niezrównoważonym obciążeniu prądowym przewodów fazowych (b); przebieg sumaryczny – linia w żółtym kolorze [archiwum własne]

- 500 Również w razie zniekształceń harmonicznymi prądów przemiennych (AC), w otoczeniu kabli zasilania trój-fazowego pojawia się znacząco odkształcony przebiegu pola-M (rys. 1-12). Jeśli jest to instalacja trój-fazowa, której prąd podlega prostowaniu (DC), również pojawia się znacząco zniekształcony przebiegu pola-M, jednak o istotnie różnym przebiegu i charakteryzujących go parametrach (rys. 1-13).



Rys. 1-12. Zmienność w czasie pola-M emitowanego wskutek przepływu w przewodach trzy-fazowej instalacji elektrycznej prądu przemiennego, harmonicznego o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz ze zniekształceniami wskutek zawartości 3-ciej harmonicznej  $f_3 = 150$  Hz, przy niezrównoważonym obciążeniu prądowym przewodów fazowych, a zróżnicowanej zawartości 3-ciej harmonicznej (linia w kolorach szarym, niebieskim i pomarańczowym): (a)  $f_1 + 0,1f_3$ ; (b)  $f_1 + 0,2f_3$ ; (c)  $f_1 + 0,3f_3$ ; (d)  $f_1 + 0,4f_3$ ; przebieg sumaryczny – linia w żółtym kolorze [archiwum własne]

510



Rys. 1-13. Zmienność w czasie pola-M emitowanego wskutek przepływu w przewodach trzy-fazowej instalacji elektrycznej prądu przemiennego, harmonicznego o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz ze zniekształceniami wskutek zawartości 3-ciej harmonicznej  $f_3 = 150$  Hz podlegającego prostowaniu dwu-połówkowemu, przy nierównoważonym obciążeniu prądowym przewodów fazowych, a różnicowanej zawartości 3-ciej harmonicznej (linie w kolorach szarym, niebieskim i pomarańczowym): (a)  $f_1 + 0,1f_3$ ; (b)  $f_1 + 0,2f_3$ ; (c)  $f_1 + 0,3f_3$ ; (d)  $f_1 + 0,4f_3$ ; przebieg sumaryczny – linia w żółtym kolorze [archiwum własne]

520

W rzeczywistym środowisku, szczególnie w środowisku pracy przy różnego typu urządzeniach i instalacjach przemysłowych, charakterystyka zmienności pola-EM obserwowanego w określonym miejscu może istotnie odbiegać od zamierzonych parametrów sygnału elektrycznego zasilającego/wytwarzanego w źródle pola-EM - wskutek superpozycji pola-EM emitowanego z różnych elementów tego źródła, skali zniekształceń harmonicznych oraz omówionych procesów kształtowania przebiegów i widma częstotliwościowego złożonego pola-EM pochodzącego od wielu źródeł. Przykładem

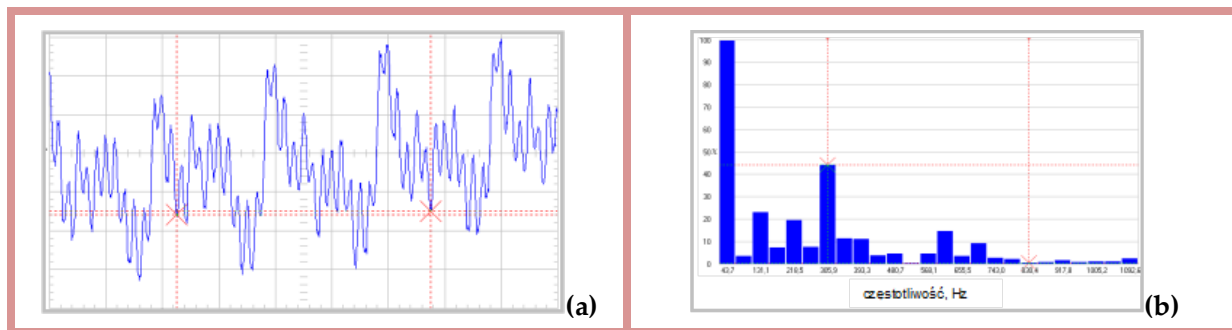
530

sygnalizowanego problemu może być obecność wyższych harmonicznych w widmie amplitudowo-częstotliwościowym pola-EM w otoczeniu instalacji elektroenergetycznych, mimo wytwarzania w elektrowni prądów elektrycznych wolnych praktycznie od

zniekształceń harmonicznych (rys. 1-14). Ponadto obiekty materialne modyfikują rozkład przestrzenny pola-E.

Z tego względu w badaniach dotyczących oddziaływania pola-EM na ludzi i inne obiekty materialne, niezwykle istotne jest miarodajne rozpoznanie charakterystyki zmienności w czasie i przestrzeni tego pola-EM – konieczne zarówno ze względu na właściwe dobranie aparatury pomiarowej i interpretację wyników pomiarów, jak i dobranie właściwych kryteriów oceny i odpowiadających im miar narażenia [1.1, 1.2, 1.3].

540



Rys. 1-14. Przykładowy przebieg czasowy (a) i widmo amplitudowo-częstotliwościowe (b) pola-M zarejestrowanego oscyloskopowo w otoczeniu instalacji elektrolitycznej (skala: 10 ms/dz) i przeanalizowanego metodą FFT [archiwum własne]

Oprócz parametrów zmienności przebiegu w czasie i jego widma amplitudowo-częstotliwościowego, ze względu na skutki oddziaływania na obiekty materialne istotne znaczenie mają również właściwości energetyczne zmiennego w czasie pola-EM występującego w środowisku [1.1, 1.2]. Do najpowszechniej wykorzystywanych w elektrotechnice miar zmiennych w czasie wielkości należy wartość skuteczna przebiegu okresowego, oznaczana skrótem RMS (ang. *root-mean square*). Wartość RMS definiowana jest zgodnie z uśrednioną w czasie zależnością całkową, która w przypadku prądu AC reprezentuje jego konsekwencje energetyczne (ekwiwalent ciepła wydzielonego przez prąd DC o takim natężeniu jak wartość RMS natężenia prądu AC):

550

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{RMS}}} \int_0^{T_{\text{RMS}}} x^2(t) dt} \quad (1-15)$$

gdzie:  $x(t)$  jest wartością bieżącą przebiegu zmiennego w czasie  $t$ ;  $T_{\text{RMS}}$  jest przedziałem czasu, w którym obliczana jest wartość skuteczna.

Ponieważ ciepło wydzielone w obiekcie jest proporcjonalne do kwadratu natężenia przepływającego w nim prądu DC, to kwadrat wartości RMS natężenia prądu AC

(uśredniony w odpowiednio długim okresie czasu) jest dobrze skorelowany ze  
 560 skumulowanymi w obiekcie skutkami termicznymi różnych procesów, m.in. oddziaływania  
 pola-EM na obiekty materialne. W zależności od rozpatrywanego zjawiska, stosowane są  
 różne długości czasu uśredniania przy wyznaczaniu wartości RMS. Przykładowo, w  
 elektronicznych analogowych urządzeniach pomiarowych, ustalenie wskazań wartości RMS  
 mierzonego sygnału może wymagać jego uśredniania w okresie rzędu sekundy. Natomiast  
 podczas monitorowania obciążenia ludzi skutkami termicznymi oddziaływania  
 promieniowania elektromagnetycznego stosowane są znacznie dłuższe czasy uśredniania  
 kwadratu wartości RMS natężenia pola-E mierzonego w środowisku – rzędu od wielu minut  
 do nawet pół godziny [1.1, 1.2, 1.3, 1.8].

W dziedzinie czasu ocena warunków narażenia na pole-EM powinna odzwierciedlać  
 570 zróżnicowane mechanizmy jego oddziaływania na człowieka [1.2, 1.8]. Istotne może być  
 rozpatrzenie również innych niż wartość RMS parametrów pola-EM w środowisku, lepiej  
 skorelowanych z zagrożeniami występującymi w przypadku oddziaływania pola-EM z  
 określonego pasma częstotliwości, np. jeśli rozpatrywane pole-EM powoduje nie termiczne  
 zagrożenia wynikające z jego oddziaływania na ludzi i inne obiekty materialne. W  
 przypadku zagrożeń wynikających z oddziaływania na układ nerwowy stosowana bywa  
 ocena wartości szczytowej (P), określonej jako maksymalna wartość chwilowa wybranego  
 parametru charakteryzującego pole-EM, w ciągu określonego przedziału czasu (T).

Wykorzystywana jest również wartość średnia wybranego parametru charakteryzującego  
 pole-EM, w ciągu określonego przedziału czasu (T). Przykładowo, wartość średnia  
 580 przebiegu prostowanego charakteryzuje składową stałą tego przebiegu, skorelowaną ze  
 skutkami oddziaływania pola magnetostaticznego na narażone obiekty.

Dla przebiegu harmonicznego o amplitudzie  $X_0$  (t.j. wartości szczytowej  $X_P = X_0$ ) wartość  
 RMS wyznaczona zgodnie z zależnością (1-15) jest równa wartości szczytowej podzielonej  
 przez pierwiastek kwadratowy z liczby 2 (tj. ok. 1,41):

$$X_{RMS} = 0,7X_0 = 0,7X_P \quad (1-16)$$

Wynika stąd, że w przypadku oceny harmonicznego pola-EM fizyczne pomiary wartości  
 szczytowej (P) i skutecznej (RMS) są równoważne, ponieważ są to wielkości skorelowane.  
 Zależnie od struktury wykorzystywanych czujników i algorytmów przetwarzania sygnału  
 pomiarowego, aparatura pomiarowa może być fizycznie czuła np. na wartość RMS lub  
 590 wartość P mierzonego sygnału, a jedynie skalowana do wskazań parametru, który jest  
 oczekiwany przez jej użytkownika. Zależność (1-16) w badaniach zjawisk harmonicznym  
 pozwala na zamienne wykorzystywanie obu skorelowanych parametrów – wskazań  
 wartości RMS skalowanej na podstawie informacji z fizycznego pomiaru wartości P  
 przebiegu i odwrotnie – pod warunkiem, że dostępne są informacje techniczne wskazujące,

na który z tych parametrów fizycznie wrażliwa jest wykorzystywana aparatura pomiarowa. Niestety miernik często nie pozwala zmierzyć fizycznie ani wartości RMS, ani P sygnału (np. miernik z detektorem diodowym, który zależnie od amplitudy badanego sygnału jest detektorem wartości P lub RMS, i jedynie w ograniczonym zakresie dynamicznym pomiaru można przeprowadzić jego wzorcowanie jako miernika wartości RMS lub P – zależnie od 600 oczekiwań użytkownika. Jest to jedna z przyczyn ograniczonej dokładności pomiaru parametrów nieharmonicznego pola-EM [1.1, 1.2].

W razie badań pola-EM nieharmonicznego, jak omówione przykładowo pola-EM w otoczeniu instalacji prądu prostowanego, wartości RMS nie można traktować jako skorelowanej z wartością szczytową – oba parametry powinny być ocenione niezależnie, np. metodami oscyloskopowymi. Na przykład, pole-M o przebiegu złożonym ze składowych harmonicznych o jednakowej fazie początkowej (ustalonych np. metodą FFT:  $H_i(t) = H_{iP} \cos(2\pi f_i t)$ , o amplitudach  $H_{iP}$  i częstotliwościach  $f_i$ , (z przedziału od  $i=1$  do  $i=n$ ) wartość RMS tego przebiegu złożonego może być obliczana na podstawie zależności:

$$(H_{Z_{RMS}})^2 = (H_{0P})^2 + (0,7 H_{1P})^2 + (0,7 H_{2P})^2 + \dots + (0,7 H_{nP})^2 \quad (1-17)$$

610 Natomiast wartość szczytowa P omawianego przebiegu złożonego może być obliczona na podstawie zależności:

$$H_{ZP} = H_{0P} + H_{1P} + H_{2P} + \dots + H_{nP} \quad (1-18)$$

Wielkość będąca wynikiem zastosowania zależności (1-16) oznaczana jest w elektrotechnice skrótem RSS (od terminu ang. *root square sum*) i reprezentuje wynik tzw. szerokopasmowego pomiaru wartości RMS – obejmującego wszystkie składowe przebiegu przy stałej w tym pasmie częstotliwości czułości sondy pomiarowej. Wielkość ta charakteryzuje się wyraźnym uwypukleniem dominującego składnika sumy. Oznacza to, że wynik szerokopasmowego pomiaru wartości RMS jest w przybliżeniu wynikiem pomiaru wartości RMS składowej, której amplituda jest dominująca w widmie amplitudowo-częstotliwościowym przebiegu.

620 Ilustruje to prosty przykład szerokopasmowego pomiaru przebiegu złożonego z trzech składowych o amplitudach: 10 A/m, 5 A/m i 5 A/m. Zgodnie z zależnością (1-17) wynik pomiaru RMS wyniesie ok. 12 A/m, a więc wartość jedynie o 20% wyższą od natężenia dominującej składowej. Kwadrat tak zmierzonej wartości RMS wyniesie ok. 145 (A/m)<sup>2</sup>, a więc wzrośnie jedynie o ok. 45% w stosunku do kwadratu wartości RMS dominującej składowej, wynoszącego 100 (A/m)<sup>2</sup>.

Natomiast zgodnie z zależnością (1-18) wartość szczytowa P przebiegu złożonego jest sumą amplitud składowych. W zacytowanym przykładzie wynik pomiaru P wyniesie 20 A/m, a więc wartość o 100% wyższą od natężenia dominującej składowej (10 A/m).

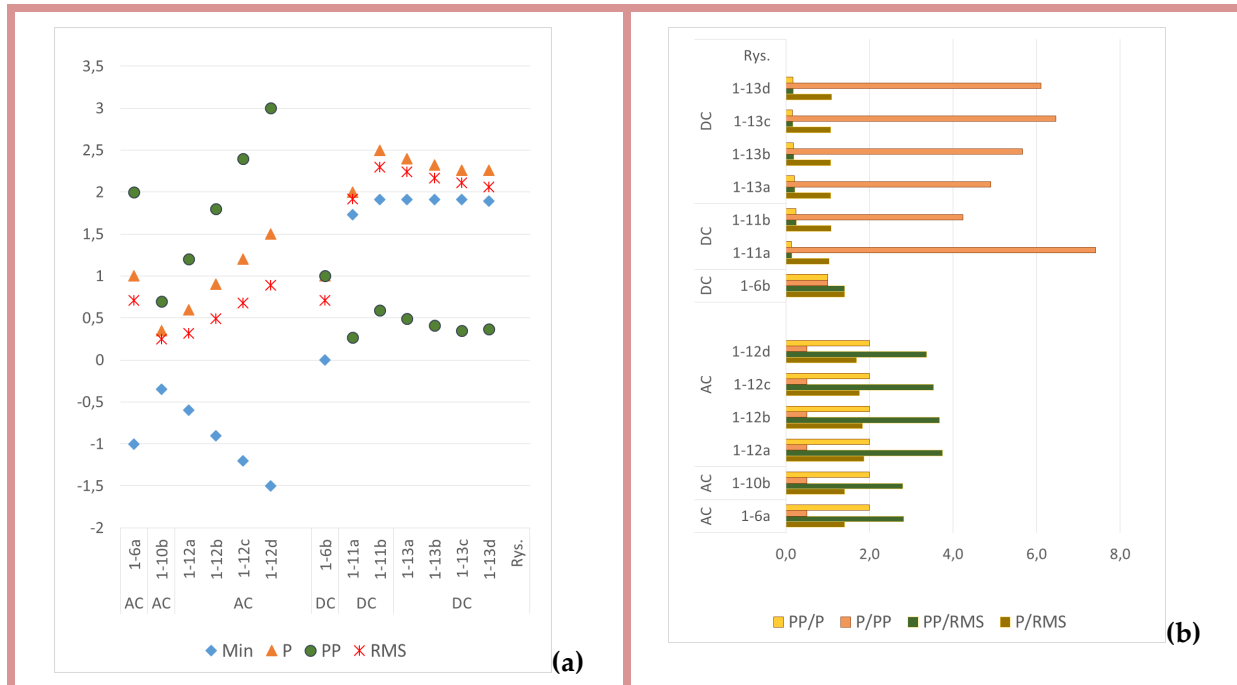
Szerokopasmowe mierniki różnią się również charakterystyką widmową czułości dla poszczególnych składowych częstotliwościowych – zarówno szerokością pasma częstotliwości, w którym czułość miernika jest stała (tzw. pasmo pomiarowe), jak i stopniem obniżenia (lub zwiększenia) czułości dotyczącej składowych o częstotliwościach poniżej i powyżej tego pasma. Oznacza to, że czułość pomiaru poszczególnych składowych może być znacząco zróżnicowana, i różniąca się przy użyciu różnych przyrządów pomiarowych. W analizowanym przykładzie przebiegu złożonego z trzech składowych (o amplitudach 10 A/m, 5 A/m i 5 A/m), może zachodzić przypadek, że pasmo pomiarowe miernika obejmuje wszystkie składowe, jedynie dwie składowe, lub nawet jedynie jedną składową – powodując istotne zaniżenie wskazań miernika (nawet do 5 A/m jeśli pasmo miernika obejmuje tylko środkową lub ostatnią składową). W skrajnych przypadkach można więc uzyskać wyniki pomiaru takiego przebiegu różniące się 4-krotnie (od 5 A/m do 20 A/m).

Podkreślenia wymaga ponownie, że wartość RMS przebiegu złożonego jest skorelowana z obciążeniem termicznym narażonego obiektu, a wartość szczytowa z zagrożeniem wywołania indukowanej elektrostymulacji. Aparatura pomiarowa najczęściej jest kalibrowana do pomiaru wartości RMS i wzorcowana w jednorodnym przestrzennie polu harmonicznym – niezależnie od tego czy jej fizyczna czułość jest zbliżona do czułości na wartość RMS, P, czy inny parametr mierzonego przebiegu. Podczas oceny narażenia na harmoniczne pole-EM, spotykane np. często w otoczeniu instalacji elektroenergetycznych, wspomniane powyżej zróżnicowanie fizycznie mierzonych miar narażenia pracowników ma niewielkie znaczenie praktyczne ze względu na stałą wartość współczynnika P/RMS. Jednak w razie pomiarów pola-EM o zmienności w czasie istotnie odbiegającej od sinusoidalnej, problem ten wymaga szczególnej uwagi, ze względu na: możliwość znacznych rozbieżności współczynników P/RMS ocenianego przebiegu oraz zróżnicowaną zależność wskazań różnych przyrządów pomiarowych od współczynników P/RMS mierzonego sygnału, determinowaną cechami metrologicznymi mierników (parametru, którego dotyczy największa fizyczna czułość sondy miernika i algorytmu wewnętrznego przetwarzania sygnałów w mierniku).

Na rysunku 1-15 oraz w tabeli tabela 1-1 zostały przykładowo zestawione parametry (miary) charakteryzujące przebiegi zaprezentowane na rysunkach od 1-6 do 1-13. Największe różnice obserwujemy między proporcjami poszczególnych parametrów w przebiegach przemiennych (AC) i przebiegach prostowanych, ze składową stałą (DC). W związku z tym należy brać pod uwagę, że wyniki pomiarów i oceny parametrów narażenia na przemienne pole-EM mogą istotnie odbiegać od wyników podobnej oceny narażenia na pole-EM zawierające składową stałą (czyli takie, jakiego możemy oczekiwać w otoczeniu źródeł PMS), mimo, że miałyby jednakowy jeden z parametrów, np. wartość szczytową. Jak wspomniano wcześniej, wyniki pomiarów pola-EM złożonego ze składowych o różnych

częstotliwościach mogą istotnie się różnić przy użyciu różnej aparatury pomiarowej. Jeszcze większych różnic należy spodziewać się, kiedy w narażeniu występuje składowa stała, np. PMS. W wielu praktycznych przypadkach konieczne bywa wykonanie badań więcej niż jednym przyrządem pomiarowym, aby ocenić poziom poszczególnych składowych widmowych narażenia.

670



Rys. 1-15. Parametry charakteryzujące wybrane przebiegi pola-M: wartość minimalna (Min), wartość szczytowa (P); wartość międzyszczytowa, maksimum minus minimum (PP), wartość skuteczna (RMS) [archiwum własne]

Kolejnym problemem będzie dobranie adekwatnych kryteriów oceny narażenia złożonego (szczegółnej uwagi wymaga dopasowanie aparatury pomiarowej do parametrów, wobec których sformułowano kryteria oceny narażenia – preferowane powinny być przyrządy pomiarowe skonstruowane w taki sposób, aby były fizycznie czułe na parametr wykorzystany w kryteriach oceny narażenia). Na przykład, do kryteriów sformułowanych w odniesieniu do wartości RMS natężenia pola-E lub pola-M, powinny być stosowane mierniki wyposażone w detektory i tory pomiarowe wartości RMS takiego natężenia, a do kryteriów sformułowanych w odniesieniu do wartości szczytowej mierniki z detektorami wartości szczytowej. Wykorzystywanie aparatury i kryteriów oceny, w których zastosowano przeliczenie (przekalibrowanie) parametrów na podstawie zależności obowiązujących dla

680

skorelowanych ze sobą parametrów przebiegów harmoniczych, powoduje znaczne zwiększenie niepewności wyników oceny narażenia złożonego przy źródłach PMS, a nawet ich nieprzydatność w razie skrajnie wysokich niepewności.

<b>Tabela 1-1. Zestawienie dla przebiegów z wykresów</b>										
Rysunek przedstawiający przebieg pola-M w otoczeniu przewodów z prądem i jego charakterystyka	Miary charakteryzujące przebieg pola-M w otoczeniu									
	Min	P	PP	Aver	RMS	P/RMS	PP/RMS	P/PP	PP/P	<i>fd</i>
Rys. 1-6a / <b>AC, 1-faza:</b> $A \cos f1$ ; $A = 1,0$	-1,0	1,0	2,0	0,0	0,7	1,4	2,8	0,5	2,0	$f1$
Rys. 1-10a / <b>AC, 3-fazy zrównoważone:</b> $A \cos f1 + B \cos f1 + C \cos f1$ / $A = B = C = 1,0$	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	nd	nd	nd	nd	nd
Rys. 1-10b / <b>AC, 3-fazy niezrównoważone:</b> $(A \cos f1) + (B \cos f1) + (C \cos f1)$ / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$	-0,4	0,35	0,7	0,0	0,25	1,4	2,8	0,5	2,0	$f1$
Rys. 1-12a / <b>AC, 3-fazy niezrównoważone:</b> $A (\cos f1 + Z \cos f3) + B (\cos f1 + Z \cos f3) + C (\cos f1 + Z \cos f3)$ $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,1$	-0,6	0,6	1,2	0,0	0,3	1,9	3,8	0,5	2,0	$3 f1$
Rys. 1-12b / j.w. / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,2$	-0,9	0,9	1,8	0,0	0,5	1,8	3,7	0,5	2,0	$3 f1$
Rys. 1-12c / j.w. / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,3$	-1,2	1,2	2,4	0,0	0,7	1,7	3,5	0,5	2,0	$3 f1$
Rys. 1-12d / j.w. / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,4$	-1,5	1,5	3,0	0,0	0,9	1,7	3,4	0,5	2,0	$3 f1$
Rys. 1-6b / <b>DC, 1-faza:</b> $\text{Mod}(A \cos f1)$ ; $A = 1,0$	0,0	1,0	1,0	0,6	0,7	1,4	1,4	1,0	1,0	$2 f1$
Rys. 1-11a / <b>DC, 3-fazy zrównoważone:</b> $\text{Mod}(A \cos f1) + \text{Mod}(B \cos f1) + \text{Mod}(C \cos f1)$ / $A = B = C = 1,0$	1,7	2,0	0,3	1,9	1,9	1,0	0,14	7,4	0,14	$6 f1$
Rys. 1-11b / j.w. / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$	1,9	2,5	0,6	2,3	2,3	1,1	0,26	4,2	0,24	$6 f1 + 2 f1$
Rys. 1-13a / <b>DC, 3-fazy niezrównoważone:</b> $A \text{Mod}[(\cos f1 + Z \cos f3)] + B \text{Mod}[(\cos f1 + Z \cos f3)] + C \text{Mod}[(\cos f1 + Z \cos f3)]$ $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,1$	1,9	2,4	0,5	2,2	2,2	1,1	0,22	4,9	0,20	$2 f1 + 6 f1$
Rys. 1-13b / j.w. / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,2$	1,9	2,3	0,4	2,2	2,2	1,1	0,19	5,7	0,18	$2 f1 + 6 f1$
Rys. 1-13c / j.w. / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,3$	1,9	2,3	0,4	2,1	2,1	1,1	0,17	6,5	0,15	$2 f1$
Rys. 1-13d / j.w. / $A = 1,0$ ; $B = 1,2$ ; $C = 1,4$ ; $Z = 0,4$	1,9	2,3	0,4	2,0	2,0	1,1	0,18	6,1	0,16	$2 f1$
Oznaczenia: wartość minimalna (Min), wartość szczytowa (P); wartość międzyszczytowa, maksimum minus minimum (PP), wartość średnia (Aver); wartość skuteczna (RMS); współczynnik P/RMS; dominująca częstotliwość ( <i>fd</i> ); nd – nie dotyczy										

### 1.3. Długość fali

Długość fali jest jednym z istotniejszych parametrów charakteryzujących warunki najbardziej efektywnego absorbowania energii elektromagnetycznej w poszczególnych obiektach materialnych. Analogicznie do zróżnicowania w skali częstotliwości, zróżnicowanie długości fali (odwrotnie proporcjonalnej do jej częstotliwości) promieniowania zaliczanego do pola-EM obejmuje również 14 do 15 rzędów wielkości.

700 Długość fali elektromagnetycznej ( $\lambda$ ) i jej częstotliwość ( $f$ ) w ośrodku o względnej przenikalności elektrycznej i magnetycznej ( $\epsilon_r$  i  $\mu_r$ ) powiązane są z prędkością światła ( $c$ ) zależnością [1.5, 1.6]:

$$(\lambda f)^2(\epsilon_r \mu_r) = c^2 \quad (1-19)$$

W powietrzu długość fali pola-EM o częstotliwościach poniżej 300 MHz przekracza 1 metr, dochodząc do 6 tys. km przy częstotliwości 50 Hz, a do długości porównywalnej z obwodem kuli ziemskiej (t.j. ok. 40 tys. km) przy częstotliwościach ok. 7 Hz (tabela 1-2). Długość fali promieniowania o częstotliwościach większych od 300 MHz stopniowo się zmniejsza (w powietrzu do: 10 cm przy 3 GHz; 1 cm przy 30 GHz i 1 mm przy 300 GHz). Przykładowo: przy częstotliwości 27 MHz długość fali wynosi ok. 11 m, a przy częstotliwości 6 GHz długość fali wynosi jedynie ok. 5 cm.

710

Tabela 1-2. Długość fali elektromagnetycznej w powietrzu [1.7]		
Długość fali	Częstotliwość	Międzynarodowe oznaczenie pasma częstotliwości
1 mm – 1 cm	300 – 30 GHz	EHF – <i>extremely high frequency</i>
1 cm – 10 cm	30 – 3 GHz	SHF – <i>superhigh frequency</i>
10 cm – 1 m	3 – 0.3 GHz	UHF – <i>ultrahigh frequency</i>
1 m – 10 m	300 – 30 MHz	VHF – <i>very high frequency</i>
10 m – 100 m	30 – 3 MHz	HF – <i>high frequency</i>
100 m – 1000 m	3 – 0.3 MHz	MF – <i>medium frequency</i>
1 km – 10 km	300 – 30 kHz	LF – <i>low frequency</i>
10 km – 100 km	30 – 3 kHz	VLF – <i>very low frequency</i>

Długość fali w innych ośrodkach jest krótsza i uzależniona od ich parametrów dielektrycznych, zależnych również od częstotliwości pola-EM (w różnych ośrodkach parametry te są izotropowe, to znaczy niezależne od kierunku, ale są też materiały o właściwościach dielektrycznych anizotropowych – zróżnicowanych w różnych kierunkach). W tkankach organizmu człowieka długość fali różni się między tkankami. W paśmie

częstotliwości kilohercowych długość fali w organizmie jest kilkaset-kilka tysięcy razy krótsza niż w powietrzu, w paśmie megahercowym – kilkanaście-kilkadziesiąt razy krótsza, a w paśmie gigahercowym kilka razy krótsza [1.8].

- 720 Zależnie od warunków oddziaływania pola-EM, najsilniej (rezonansowo) sprzęga się ono z obiektami o wymiarach (elektrycznych) porównywalnych z przedziałem 0,1-0,5 długości fali. Przykładowe obiekty, dla których można prognozować rezonansowe sprzężenie dla pola-EM o różnych częstotliwościach zestawiono w tabeli 1-3:

<b>Tabela 1.3. Przykładowe warunki rezonansowego sprzężenia obiektów z polem-EM</b>	
Częstotliwość pola-EM	Przykładowe obiekty o wymiarach umożliwiających sprzężenie rezonansowe
1-10 MHz	dźwigi budowlane i instalacje metalowe w budynkach wielopiętrowych
10-100 MHz	pojazdy samochodowe, całe ciało człowieka, ogrodzenia posesji
0,1-1 GHz	różne części ciała człowieka, narzędzia ręczne
powyżej 10 GHz	nieduże geometrycznie struktury organizmu, takie jak oko czy ucho, niewielkie obiekty metalowe, takie jak implanty medyczne lub elektroniczne urządzenia nasobne (tzw. ubieralne, np. wykorzystujące technologię RFID), a także kręgowce i owady o wielkości do kilku cm

#### 1.4. Dualizm elektromagnetyczny

- Kolejnym wyróżnikiem złożoności pola-EM jest sygnalizowana przez jego nazwę struktura zjawisk elektromagnetycznych, która jest matematycznie modelowana jako konglomerat dwóch wielkości wektorowych (natężenia pola-E i natężenia pola-M;  $E$  i  $H$ ) - nierozzerwalnych, ale różniących się sposobem oddziaływania z materią [1.1, 1.3, 1.4, 1.5].

- Zmienne pole-E i pole-M występuje łącznie, jedynie PMS i PES można traktować jako występujące samodzielnie. Właściwości pola-E i pola-M w środowisku uzależnione są od parametrów elektrycznych źródła pola-EM, warunków propagacji (rozprzestrzeniania się pola-EM w otoczeniu jego źródła) oraz od odległości rozpatrywanego miejsca od źródła. W pobliżu źródła pola-EM natężenie pola-E i natężenie pola-M są od siebie niezależne, ponieważ determinują je różne parametry elektryczne źródła pola-EM (napięcie i natężenie prądu elektrycznego). Dopiero w odległościach przekraczających długość fali od źródła pola-EM (często określanego terminem antena nadawcza), cechy pola-EM stają się stopniowo na tyle uporządkowane (przewidywalne), że upoważnia to do stosowania uproszczonych reguł analizy warunków i skutków propagacji pola-EM w tzw. strefie dalekiej (pola-EM dalekiego). W związku z zależnością długości fali od częstotliwości pola-EM, w badaniach dotyczących zagrożeń elektromagnetycznych w środowisku pracy dopiero

pole-EM wielkiej częstotliwości (tj. większej od kilku MHz) nabiera cech pola strefy dalekiej i z tego powodu nazywane jest również promieniowaniem elektromagnetycznym.

Wzajemnie powiązane zmienne pole-E i pole-M formuje się w pewnej odległości od źródła pola-EM w fale elektromagnetyczną w strefie dalekiej, gdzie wartości RMS natężenia pola-E i natężenia pola-M powiązane są zależnością:

$$\frac{E}{H} = 120\pi\Omega \text{ (tzn. ok. 377 omów)} \quad (1-20)$$

750 W odległościach przekraczających kilka długości fali elektromagnetycznej, w przestrzeni strefy dalekiej pola-EM, wartość skuteczna natężenia pola-E jest skorelowana z wartością skuteczną natężenia pola-M (tj.: wartość  $E_{[V/m]}$  jest ok. 400 razy większa od wartości  $H_{[A/m]}$ ). Najczęściej stosowane uproszczenia procedur analizy zjawisk elektromagnetycznych w polu dalekim to charakteryzowanie ich parametrów z wykorzystaniem tylko jednej składowej pola-EM, przy założeniu, że druga jest skorelowana zgodnie z zależnością (1-20) [1.1, 1.2].

Przykładowo, zastosowanie uproszczonej analizy parametrów środowiska elektromagnetycznego metodami stosowanymi w obszarze pola dalekiego jest niemiarodajne dla zjawisk elektromagnetycznych rozpatrywanych bliżej niż 6 tys. km od linii elektroenergetycznej, lub bliżej niż 30 cm od anteny modemu pracującego w publicznej mobilnej sieci telefonii komórkowej GSM (tabela 1-4).

760

<b>Tabela 1-4. Odległości od źródła pola-EM uprawniające do zastosowania uproszczonych metod analizy dotyczących pola dalekiego</b>	
Odległość od źródła gdzie formuje się pole-EM strefy dalekiej	Przykładowe źródła pola-EM
6 tys. km	linia elektroenergetyczna (50 Hz)
3 m	antena naziemnej stacji radiowej UKF (100 MHz)
30 cm	antena routera pracującego w publicznej mobilnej sieci telefonii komórkowej GSM (1 GHz)
1 cm	antena routera pracującego z sieci nowej generacji, wysokiego pasma częstotliwości (28 GHz)

Z przyczyn technicznych, w środowisku badania uproszczone dotyczą najczęściej narażenia na promieniowanie elektromagnetyczne częstotliwości megahercowych i gigahercowych. Wykorzystywane są w nich pomiary natężenia pola-E ( $E$ , w woltach na metr), chętnie konwertowanego do parametru charakteryzującego energetycznie środowisko elektromagnetyczne jakim jest gęstość mocy promieniowania ( $S$ , w watach na metr kwadratowy), wynosząca w przybliżeniu:

$$S = (E^2)/400 \quad (1-21)$$

770 Na uwagę zasługują tutaj okoliczności zachodzące przy praktycznym stosowaniu wymagań dotyczących ochrony przed zagrożeniami elektromagnetycznymi. Parametr  $S$  (gęstość mocy) jest intuicyjnie łatwo zrozumiały i w prostych układach możliwy do oszacowania nawet uproszczonymi zależnościami analitycznymi na podstawie charakterystyki mocy emitowanej ze źródła promieniowania. W środowisku o złożonej geometrii obiektów materialnych i widma częstotliwości oddziałującego tam pola-EM, weryfikacja empiryczna czy można tam zastosować model pola dalekiego wymaga niezależnego pomiaru pola-E i pola-M ( $E$  i  $H$ ). Ograniczenia praktyczne takiej weryfikacji ilustruje problem pomiaru składowej magnetycznej pola-EM wielkich częstotliwości *in-situ* (skutecznie rozwiązany technicznie dotychczas jedynie w odniesieniu do pomiarów pola-EM o częstotliwości do ok. 1 GHz – tj. pola-EM, którego długość fali przekracza 30 cm). Wobec czego brak dostępnych 780 środków technicznych weryfikacji empirycznej do jakiej odległości od źródeł pola-EM o częstotliwości przekraczającej 1 GHz sięga w realnych warunkach pola-EM, którego ocena jest niemiarodajna bez pomiaru obu składowych (natężenia pola-E i pola-M, ponieważ jego parametry znacznie różnią się od pola dalekiego). Nawet w przypadku pola bliskiego w otoczeniu takich anten nadawczych, technicznie możliwe są jedynie pomiary pola-E, zamiast wymaganych formalnie niezależnych pomiarów pola-E i pola-M - ograniczając miarodajność analizy zagrożeń elektromagnetycznych bezpośrednio przy antenach emitujących promieniowanie o częstotliwościach przekraczających 1 GHz, np. dla wykorzystywanych od lat anten nadawczych emitujących promieniowanie z pasma 1-60 GHz (długość fali 0,5-30 cm).

790 Ponadto w polu dalekim stosowana jest również uproszczona analiza propagacji promieniowania z wykorzystaniem zależności opracowanych dla promieniowania optycznego. Oba uproszczenia tracą zasadność kiedy analizowane procesy elektromagnetyczne nie dotyczą pola dalekiego w swobodnej przestrzeni – im bardziej pole-EM odbiega od modelu pola dalekiego, tym wnioski z analiz przeprowadzonych z wykorzystaniem wspomnianych uproszczeń stają się mniej miarodajne (w wielu praktycznych przypadkach z błędami o skali sięgającej setek procent – czyniąc wykorzystanie uproszczeń całkowicie bezużytecznym).

800 W ogólności, zmienne w czasie pole-EM charakteryzowane jest zawsze przez parametry obu wektorowych składowych, elektrycznej i magnetycznej. W określonym miejscu wzajemne relacje modułu i polaryzacji pola-E i pola-M opisane są wspomnianymi zależnościami Maxwella. Ze względu na ich złożoność, dla praktycznych zastosowań technicznych wyróżnia się 3 strefy pola-EM - pole bliskie, obszar przejściowy i wspomniane pole dalekie (obszar promieniowania) - definiowane w stosunku do wymiarów elektrycznych źródła pola-EM i lokalizacji danego obszaru w przestrzeni (tabela 1-5) [1.9].

810 W polu-EM o częstotliwości do 100 kHz (PQS), pola-E i pole-M są w praktyce wzajemnie niezależne i powinny podlegać niezależnej ocenie. Dla oceny ekspozycji w danym miejscu można przyjąć zasadę, że natężenie pola-E jest funkcją napięcia, a natężenie pola-M zależy jedynie od natężenia prądów elektrycznych w obiekcie stanowiącym źródło pola-EM. W polu-EM o wyższych częstotliwościach, przekraczających 100 kHz (PWCZ lub PMF) w środowisku pracy można spotkać zarówno warunki ekspozycji na pole-EM bliskie, jak i na promieniowanie elektromagnetyczne. W przypadku źródeł, w których emisja elektromagnetyczna nie jest zamierzona, a źródłem pola-EM nie są anteny, z reguły nie są znane *a priori* charakterystyki pola-EM pozwalające na określenie czy jest to pole dalekie - szczególnie podczas oceny narażenia na pole-EM w środowisku pracy ponieważ może tam równocześnie występować narażenie od źródeł pierwotnych, jak i wtórnych. W takich warunkach szczególnie istotne jest wykonanie pomiaru zarówno  $E$ , jak i  $H$ , w celu rozpoznania charakterystyki narażenia w środowisku.

**Tablica 1-5. Typowa charakterystyka pola-EM w przestrzeni, ze względu na oddalenie od źródła (na podstawie charakterystyki promieniowania anten [1.9])**

Strefy pola elektromagnetycznego	Pole bliskie	Obszar przejściowy	Pole dalekie – Obszar promieniowania
Orientacyjne zasięgi gdzie: $r$ – odległość od źródła pola $\lambda$ - długość fali $D$ - największy wymiar elektryczny źródła pola	$0 < r < \max \left( \begin{array}{l} \lambda \\ D \\ \frac{D^2}{4\lambda} \end{array} \right)$	$\max \left( \begin{array}{l} \lambda \\ D \\ \frac{D^2}{4\lambda} \end{array} \right) < r < \max \left( \begin{array}{l} 5\lambda \\ 5D \\ \frac{0,6D^2}{\lambda} \end{array} \right)$	$\max \left( \begin{array}{l} 5\lambda \\ 5D \\ \frac{0,6D^2}{\lambda} \end{array} \right) < r < \infty$
Polaryzacji $E$ i $H$	Dowolna	Zbliżona do wzajemnie prostopadłej	Wzajemnie prostopadła
Zależności modułów $E$ i $H$ od odległości od źródła pola, $r$	$E, H \sim 1/r^3$	$E, H \sim 1/r^2$	$E, H \sim 1/r$
Relacja $E$ i $H$	Dowolna	$E/H \approx Z_0$	$E/H = Z_0 = 377 \Omega$
Zakres niezbędnych pomiarów $E$ i $H$	Obie składowe: $E$ i $H$	Nieznana niepewność oceny na podstawie wybranej składowej	Wybrana składowa: $E$ lub $H$
UWAGA Powyższe zależności charakteryzują orientacyjnie zasięgi stref; przy źródłach pola-EM mogą występować warunki wymagające indywidualnego przeanalizowania [1.1, 1.2]			

- 820 Wspomniane okoliczności techniczne powinny być uwzględnione w strukturze parametrów charakteryzujących oddziaływanie pola-EM (tabela 1-6), w wymaganiach dotyczących metod rozpoznania i oceny zagrożeń elektromagnetycznych oraz w wymaganiach dotyczących niepewności takich ocen (oczekiwanej i technicznie osiągalnej) na podstawie wyników pomiarów *in-situ* (np. w miejscu pracy w warunkach przemysłowych) lub symulacji komputerowych (*in-silico*). Omówione okoliczności powodują na przykład, że limity dotyczące pola-M o częstotliwości przekraczającej 1 GHz, określone w niektórych zaleceniach i przepisach, są jedynie abstrakcją formalno-prawną bez praktycznej użyteczności. W polu dalekim, parametr ten można oszacować na podstawie wyników pomiaru pola-E i analiza pola-M jest nadmiarowa, tzn. nie poprawia jakości oceny parametrów środowiska elektromagnetycznego. Natomiast w realnym środowisku pola bliskiego wartość natężenia pola-M jest nieznana (zarówno w badaniach eksperymentalnych – wobec braku możliwości technicznych pomiaru natężenia pola-M, jak i w badaniach modelowych – wobec tego samego ograniczenia technicznego, gdyż podstawową metodą walidacji wyników modelowania komputerowego jest porównanie ich w wybranych realistycznych scenariuszach ekspozycyjnych z wynikami odpowiednich pomiarów w rzeczywistych warunkach, odpowiadających walidowanemu modelom).
- 830

Tabela 1-6. Wielkości charakteryzujące zjawiska elektromagnetyczne zachodzące w środowisku pracy					
Wielkość	Oznaczenie skrótowe	Parametr	Symbol	Jednostka	Uwagi
pole elektryczne	<b>pole-E</b>	natężenie pola-E (wektor)	$E$	wolt na metr (V/m)	determinowane przez rozkład potencjału elektrycznego w źródle pola, odległość od tego źródła i jego wymiary
		wartość RMS natężenia pola-E (skalar)	$E$		
pole magnetyczne	<b>pole-M</b>	natężenie pola-M (wektor)	$H$	amper na metr (A/m)	determinowane przez rozkład prądów elektrycznych w źródle pola, odległość od tego źródła i jego wymiary
		wartość RMS natężenia pola-E (skalar)	$H$		
zmienności pola-E i pola-M w czasie	---	częstotliwość (skalar)	$f$	herc (Hz)	skorelowana z długością fali
zmiennosc pola-E i pola-M w przestrzeni	---	długość fali elektromagnetycznej (skalar)	$\lambda$	metr (m)	przybliżone zależności w powietrzu:

					$\lambda_{[m]} \times f_{[MHz]} = 300$ $\lambda_{[mm]} \times f_{[GHz]} = 300$
zróźnicowanie pola-E i pola-M w przestrzeni	---	impedancja pola-EM (skalar)	E/H	om ( $\Omega$ )	determinowana przez odległość od źródła pola i jego wymiary geometryczne
Oznaczenia: wektor – wielkość wektorowa; skalar – wielkość skalarna					

840 Natomiast w razie oceny zagrożeń elektromagnetycznych w otoczeniu źródeł pola-EM małych częstotliwości i statycznych (PMS, PES, PQS) mimo tego, że występuje tam na pewno pole-EM bliskie, w praktycznych okolicznościach mogą również występować warunki umożliwiające zastosowanie metod uproszczonych i ograniczenie oceny do jednej składowej. Kryterium w tym przypadku jest relatywny poziom natężenia pola-E i pola-M w odniesieniu do kryteriów oceny rozpatrywanego rodzaju zagrożeń elektromagnetycznych – charakterystykę zagrożeń można ograniczyć do parametru, którego natężenie stanowi większy odsetek rozpatrywanych kryteriów (określanego zwykle jako dominująca składowa natężenia pola-EM). Przy najbardziej rozpowszechnionych źródłach pola-EM małych częstotliwości ocena pola-E bywa wystarczająca przy instalacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia, a ocena 850 pola-M przy źródłach PMS oraz przy urządzeniach przemysłowych i medycznych, a także przy zasilającej je instalacji elektrycznej niskiego lub średniego napięcia. Jednak wskazana jest wstępna weryfikacja pomiarowa w każdym rozpatrywanym środowisku pracy.

### 1.5. Bibliografia - część 1

- [1.1.] Bieńkowski P., Trzaska H. (2012) Electromagnetic measurements in the near field. Sec. ed. Raleigh, New York, Sci.Tech. Publishing.
- 860 [1.2.] Bieńkowski P., Karpowicz J., Kieliszek J. (2016). Przegląd miar skutków narażenia na zmienne w czasie pole elektromagnetyczne i właściwości metrologicznych mierników, istotnych podczas oceny narażenia w środowisku pracy. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2016, nr 4(90), s. 41–74. DOI: 10.5604/1231868X.1215436
- [1.3.] Electromagnetic Ergonomics: From Electrification to a Wireless Society (2023). pod redakcją J. Karpowicz. Boca Raton, CRC Press. DOI <https://doi.org/10.1201/9781003020486>
- [1.4.] Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J. (1993). Metody numeryczne. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, ISBN 83-204-1551-9.

- 
- [1.5.] Orear J., (2004). Fizyka, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- 870 [1.6.] Rawa H. (1994). Elektryczność i magnetyzm w technice, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1994
- [1.7.] United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association (UNEP/WHO/IRPA) (1993). Electromagnetic Fields (300 Hz-300 GHz), Geneva, World Health Organization, Environmental Health Criteria 137.
- [1.8.] Zradziński P. (2016). Uwarunkowania wykorzystania numerycznych modeli pracowników do oceny zagrożeń bezpośrednich wynikających z narażenia na pole elektromagnetyczne, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2016, nr 4(90), s. 75-89. DOI: 10.5604/1231868X.122212
- 880 [1.9.] PN-EN 50492: 2013 Norma podstawowa dotycząca miejscowych pomiarów natężeń pól elektromagnetycznych związanych z ekspozycją ludzi w otoczeniu stacji bazowych.

## **Część 2. Fizyczne aspekty bezpieczeństwa i higieny pracy w otoczeniu źródeł pola magnetostatycznego (PMS)**

*Jolanta Karpowicz*

890 Jak wspomniano, PMS występuje w otoczeniu magnesów trwałych oraz instalacji elektrycznych prądu stałego (w tym elektromagnesów rdzeniowych i bezrdzeniowych), który w aplikacjach użytkowych jest najczęściej prądem prostowanym (złożonym ze składowej stałej w czasie (DC) i tętnień (AC) zmiennych w czasie). W otoczeniu takich źródeł PMS równocześnie występuje PMS i składowa zmienna pola-M o złożonym widmie częstotliwości, najczęściej z zakresu 100-2000 Hz.

Ponadto źródła PMS mogą być:

- stale aktywne (magnesy trwałe i elektromagnesy nadprzewodzące)
- aktywowane (uruchamiane, włączane) jedynie podczas ich zamierzonego użytkowania – długotrwałego (np. sieci elektroenergetyczne prądu stałego, czy instalacje galwanizerskie) lub krótkotrwałego (np. aplikatory fizykoterapeutyczne)
- 900 – impulsowe (np. zgrzewarki rezystancyjne punktowe).

Źródła PMS mają również istotnie zróżnicowane wymiary, od kilkucentymetrowych magnesów trwałych, po rozległe sieci elektroenergetyczne czy instalacje galwanizerskie. Wiąże się to ze zróżnicowaną rozległością przestrzeni, w której występuje PMS o poziomie istotnym z punktu widzenia BHP, a także oddziaływaniem na pracujących pola-EM quasi-jednorodnego przestrzennie w otoczeniu rozległych źródeł, lub pola o znacznej niejednorodności przestrzennej oddziałującego jedynie lokalnie na część organizmu znajdującą się w pobliżu niewielkich źródeł.

910 Z okolicznościami tymi powiązana jest również zróżnicowana dynamika zmienności profilu narażenia podczas poruszania się pracującego w otoczeniu nieruchomego źródła PMS (lub ruchomego źródła PMS w otoczeniu nieruchomego pracującego):

- zmienność kierunku polaryzacji PMS w stosunku do człowieka w polu quasi-jednorodnym, przy źródłach dużych rozmiarów
- zmienność kierunku polaryzacji, poziomu i gradientu PMS w stosunku do różnych części ciała pracującego w polu niejednorodnym, przy źródłach mniejszych rozmiarów.

Wobec zasygnalizowanego zróżnicowania okoliczności oddziaływania PMS od różnego typu źródeł na pracujących i środowisko pracy, w rozważaniach dotyczących zagrożeń związanych z użytkowaniem źródeł PMS w środowisku pracy konieczne jest rozważenie

920 zróżnicowanych mechanizmów oddziaływania PMS na środowisko materialne, w tym organizm człowieka, obejmującego następujące mechanizmy, omówione w dalszej części opracowania:

- magnetomechanicznie
- elektrodynamicznie
- magnetohydrodynamicznie
- spinowe.

W dalszej części niniejszego opracowania omówiono parametry charakteryzujące fizyczne oddziaływanie pola-EM z materią w otoczeniu źródeł PMS oraz konsekwencje takiego oddziaływania.

### 930 **2.1. Oddziaływanie magnetomechaniczne**

Oddziaływanie magnetomechaniczne PMS na obiekty materialne/substancje uzależnione jest od ich właściwości magnetycznych (przenikalności magnetycznej i momentu magnetycznego, determinowanych przez wypadkowy spin ich elektronów) oraz od rozkładu przestrzennego tego PMS (charakteryzowanego np. w układzie współrzędnych kartezjańskich jako gradient w trzech ortogonalnych kierunkach:  $dB/dx$ ;  $dB/dy$ ;  $dB/dz$ ). Ze względu na skutki oddziaływania PMS na obiekty/substancje wyróżniamy: diamagnetyki, paramagnetyki, ferromagnetyki i ferrimagnetyki [2.1, 2.2, 2.4, 2.6, 2.9, 2.12].

940 Przenikalność magnetyczna charakteryzuje pole-M wnikające do ośrodka materialnego. W próżni indukcja magnetyczna,  $B$ , jest wektorem równoległym do wektora natężenia pola-M,  $H$ , o module wyrażonym zależnością:

$$B = \mu_0 H \quad (2-1)$$

gdzie:  $\mu_0$  - jest przenikalnością magnetyczną próżni, która w układzie SI wynosi:

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ H/m} = 12,566 \dots 10^{-7} \text{ (V s)/(A/m)}.$$

Natomiast w ośrodkach materialnych przy określonej wartości natężenia pola-M, indukcja magnetyczna może być zarówno mniejsza, jak i większa od wartości określonej zależnością (2-1), zależnie od wartości współczynnika  $\mu_r$  (względnej przenikalności magnetycznej ośrodka), a ponadto wektory  $B$  i  $H$  mogą nie być równoległe (kiedy  $\mu_r$  nie jest wielkością skalarną):

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2-2)$$

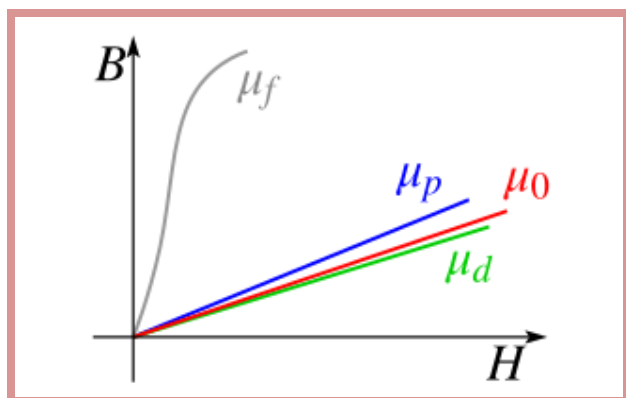
950 gdzie:  $\mu_0$  - jest przenikalnością magnetyczną próżni, a  $\mu_r$  - jest względną przenikalnością magnetyczną rozpatrywanego ośrodka.

Upraszczając, przenikalność magnetyczna rozpatrywanego ośrodka jest miarą wzmocnienia/osłabienia indukcji magnetycznej w danym ośrodku (w odniesieniu do próżni, w której występuje pole-M o takim samym natężeniu), związanego z potencjalną energią magnetyczną uzyskaną przez ośrodek wskutek procesu jego wytwarzania.

Natomiast moment magnetyczny obiektu charakteryzuje parametr nazywany podatnością magnetyczną (objętościową),  $X_v$ , która jest zbliżona do wartości jeden dla diamagnetyków (ujemna) i paramagnetyków (dodatnia), natomiast znacznie większa od jeden dla ferromagnetyków i ferrimagnetyków.

960 **Materiały diamagnetyczne** ( $X_v < 1$ ) nie wykazują momentu magnetycznego bez oddziaływania zewnętrznego PMS. Natomiast pod wpływem zewnętrznego PMS w takich materiałach indukowany jest moment magnetyczny anty-równoległy do polaryzacji oddziałującego PMS. Skutkiem tego zjawiska jest **wypychanie obiektu z PMS** – odpychanie od magnesu (może ono być wykorzystane do wywołania lewitacji magnetycznej). W przypadku obiektów diamagnetycznych, oddziaływanie takie wypycha obiekt z otoczenia źródła PMS, natomiast kiedy jest to obiekt zanurzony w diamagnetycznej cieczy (np. w wodzie), oddziaływanie to jest proporcjonalne do różnicy podatności magnetycznej cieczy i obiektu (tzw. magnetyczna siła Archimedes). Ponadto przenikalność magnetyczna względna materiałów diamagnetycznych nie zależy od natężenia PMS i jest mniejsza od jeden, w związku z czym indukcja magnetyczna,  $B$ , jest w nich mniejsza od indukcji magnetycznej w wolnej przestrzeni przy określonym poziomie  $H$  (rys. 2-1):

$$B < \mu_0 H \quad (2-3)$$



Rys. 2-1. Schematyczne porównanie przenikalności magnetycznej: ferromagnetyka ( $\mu_f$ ), paramagnetyka ( $\mu_p$ ), próżni ( $\mu_0$ ) i diamagnetyka ( $\mu_d$ ). [wykres poglądowy, Internet]

980 **Materiały paramagnetyczne** ( $X_v > 1$ ) wykazują własny moment magnetyczny i podczas oddziaływania zewnętrznego PMS dążą do położenia, w którym jest on równoległy do polaryzacji tego pola. Wskutek tego zjawiska obiekty paramagnetyczne są przyciągane do magnesu. Podobnie jak w przypadku diamagnetyków, przenikalność magnetyczna względna paramagnetyków nie zależy od natężenia PMS, natomiast jest większa od jeden, w związku z czym indukcja magnetyczna,  $B$ , jest w nich większa od indukcji w wolnej przestrzeni przy określonym poziomie natężenia pola- $M$ ,  $H$  (rys. 2-1):

$$B > \mu_0 H \quad (2-4)$$

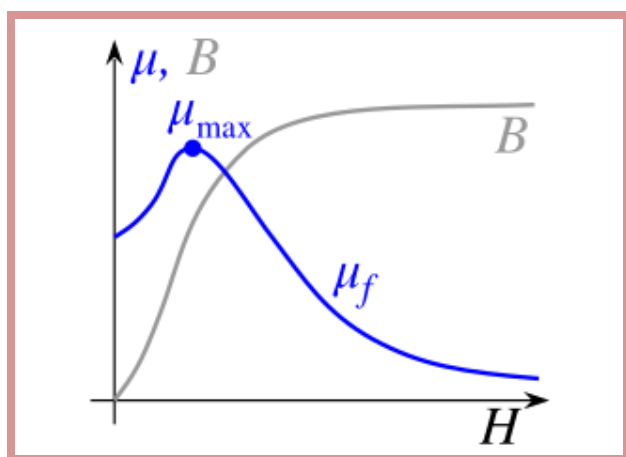
990 **W materiałach ferromagnetycznych i ferrimagnetycznych**, których własny moment magnetyczny jest najsilniejszy, występują najsilniejsze skutki oddziaływania PMS. Materiały ferromagnetyczne i ferrimagnetyczne wykazują spontaniczne namagnesowanie, mogą więc stanowić magnesy trwałe. Są przyciągane do źródła PMS, przyciągają również (lub odpychają??) inne obiekty ferromagnetyczne i paramagnetyczne. Powyżej temperatury tzw. punktu Curie, materiały te tracą właściwości ferromagnetyczne.

Ich przenikalność magnetyczna względna wielokrotnie przewyższa wartość jeden.

$$B \gg \mu_0 H \quad (2-5)$$

W przeciwieństwie do materiałów diamagnetycznych oraz paramagnetycznych, przenikalność magnetyczna względna w takich materiałach nie jest skalarem, jest nieliniową funkcją natężenia pola- $M$  w materiale (rys. 2-2):

$$\mu_r = f(H) \quad (2-6)$$



1000 Rys. 2-2. Zmienność przenikalności magnetycznej podczas magnesowania ferromagnetyków (i ferrimagnetyków) [wykres poglądowy, Internet]

Przykładowe materiały diamagnetyczne to: gazy szlachetne (hel, neon, argon, krypton, ksenon), **woda**, metale z grupy miedziowców (szlachetne: srebro i złoto, oraz półszlachetna miedź), krzem, fosfor, węgiel, siarka, bizmut, związki organiczne takie jak: benzen i naftalen, oraz **większość składników organizmu, m.in. makromolekuły (białka, DNA), endolimfa, otolity**. Nadprzewodniki można traktować jako doskonałe diamagnetyki ( $X_v = -1$ ), ponieważ wypierają linie PMS (tzw. efekt Meissnera).

Przykładowymi paramagnetykami są: tlen, aluminium, metale szlachetne z grupy platynowców (m.in. platyna i pallad), **hemoglobina krwi** (pozbawiona tlenu).

- 1010 Ferromagnetykami są żelazo, kobalt, nikiel, a ferrimagnetykiem związki chemiczne i stopy m.in. takich metali, chromu, europu, w stopniu zależnym m.in. od postaci krystalicznej i składu, procesu wytwarzania i obróbki podczas produkcji, a także od temperatury.

W tabelach 2-1, 2-2 i 2-3 zestawiono przykładowe materiały dia- i paramagnetyczne oraz ferromagnetyczne i ferrimagnetyczne, ich parametry magnetyczne, które mogą mieć znaczenie ze względu na omawiane zagrożenia wywoływane oddziaływaniem PMS w środowisku pracy [2.1, 2.2, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10].

<b>Tabela. 2-1. Podatność magnetyczna objętościowa [<math>X_v</math>] i przenikalność magnetyczna względna [<math>\mu_r</math>] wybranych materiałów diamagnetycznych</b>		
<b>Materiał diamagnetyczny</b>	$X_v$ [ $10^{-6} \text{ m}^3/\text{g}$ ]	$\mu_r$
Próżnia	Nie dotyczy	1,0
Hel, He [gaz szlachetny]	-(0,1 ÷ 0,0)	0,999999 ÷ 1,0
Neon, Ne [gaz szlachetny]	-(0,1 ÷ 0,0)	0,999999 ÷ 1,0
Argon, Ar [gaz szlachetny]	-(0,1 ÷ 0,0)	0,999999 ÷ 1,0
Krypton, Kr [gaz szlachetny]	-(0,1 ÷ 0,0)	0,999999 ÷ 1,0
Ksenon, Xe [gaz szlachetny]	-(0,1 ÷ 0,0)	0,999999 ÷ 1,0
Azot, N	-0,007	0,999999
Złoto, Au [metal szlachetny]	-34	0,999964
Srebro, Ag [metal szlachetny]	-2,91	0,999980
Miedź, Cu [metal półszlachetny]	-1,08	0,999968
Cynk, Zn [metal, cynkowiec, diamagnetyk]	-60	0,999984
Cynk, $\text{Zn}^{+2}$ [kation, cynkowiec, diamagnetyk]	< 0	0,9999 ÷ 1,0
Rtęć, Hg [metal, cynkowiec, diamagnetyk]	-2,9	0,999999
Rtęć, $\text{Hg}^{+2}$ [kation, cynkowiec, diamagnetyk]	< 0	0,9999 ÷ 1,0
Fosfor, P	<i>słaby diamagnetyk lub paramagnetyk, zależnie od odmiany alotropowej i kierunku kryształu</i>	
Siarka, S	<i>ciąto stałe – diamagnetyk, stopiona – nabiera cech paramagnetycznych</i>	

Bizmut, Bi	-170	0,999824
Krzem, Si	-(0,01 ÷ 0,0)	0,999999
Szkło [standardowe, SiO <sub>2</sub> ]	-(0,01 ÷ 0,0)	0,999987
Węgiel, C	-150	0,999999 ÷ 1,0
Diament, C	-6,17	0,999999 ÷ 1,0
Grafit, C [standardowy]	-16	0,999840
Grafit krystaliczny prostopadle do płaszczyzny kryształów	-450	0,999600
Grafit krystaliczny równolegle do płaszczyzny kryształów	-85	0,999150
<i>Zestawienie w oparciu o dane literaturowe i dane dostępne w Internecie</i>		

<b>Tabela. 2-2. Podatność magnetyczna objętościowa [<math>X_v</math>] i przenikalność magnetyczna względna [<math>\mu_r</math>] wybranych materiałów paramagnetycznych</b>		
<b>Materiał paramagnetyczny</b>	<b><math>X_v</math> [<math>10^{-6}</math> m<sup>3</sup>/g]</b>	<b><math>\mu_r</math></b>
Tlen [atomowy i molekularny]	0,19 (@1 Atm, 15°C)	1,0000019
Tlen ciekły, O	3500 (@90K) 5300 (@57K)	1,0035 – 1,0042 (w temp. wrzenia: @90K)
Powietrze	360	1,00000036
Wodór, H [atomowy, paramagnetyk]	> 0	1,0000000122
Wodór, H <sub>2</sub> [molekularny, diamagnetyk]	< 0	0,999999 ÷ 1,0
Wodór, H <sup>+</sup> [kation]	<i>swobodne kationy wodoru (np. plazma) traktowane są jako ekwiwalent magnetyczny próżni w roztworach i ciałach stałych kationy wodoru mogą wnosić właściwości paramagnetyczne</i>	
Tlenek azotu (II), NO	50	1,0 ÷ 1,0001
Aluminium, Al	2,2	1,000021
Chrom, Cr [zależnie od temperatury może być para- lub diamagnetykiem]	182	1±10 <sup>-3</sup>
Mangan, Mn	489	1,0 ÷ 1,1
Platyna, Pt [metal przejściowy, metal szlachetny]	260	1,00027
Tytan, Ti Grade 5 (Ti-6Al-4V), Grade 2 (czysty Ti)	125	1,00005
Wolfram, W	6,8	1,000176
Sód, Na [metal alkaliczny, paramagnetyk]	8,8	1,0000072

Sód, Na <sup>+</sup> [ <i>kation, diamagnetyk</i> ]	< 0	< 1
Potas, K [ <i>metal alkaliczny, paramagnetyk</i> ]	21	1,0000000025
Potas, K <sup>+</sup> [ <i>kation, diamagnetyk</i> ]	< 0	< 1
Wapń, Ca	40	1,00000003
<i>Zestawienie w oparciu o dane literaturowe i dane dostępne w Internecie</i>		

<b>Tabela. 2-3. Przenikalność magnetyczna [względna przenikalność magnetyczna - <math>\mu_r</math>, maksymalna przenikalność magnetyczna - <math>\mu</math>] i temperatura punktu Curie wybranych materiałów ferromagnetycznych i ferrimagnetycznych</b>			
<b>Materiał ferromagnetyczny</b>	Temp. Curie (K)	$\mu_r$ (początkowa)	$\mu$ (maksymalna)
Żelazo (Fe)	1043	2 000	bd
Żelazo czyste (0,001% domieszek)	< 1043	100 000	bd
Żelazo techniczne (0,2% domieszek)	< 1043	6 000	bd
Żelazo elektrolityczne	1043	600	15 000
Blacha transformatorowa	670-1020	600	7 600
Izotropowa blacha elektrotechniczna, Fe <sub>96</sub> Si <sub>4</sub>	1000-1020	250	7 000
Anizotropowa blacha elektrotechniczna, Fe <sub>97</sub> Si <sub>3</sub>	1000-1020	bd	100 000
Permendur, Co <sub>50</sub> Fe <sub>50</sub>	1250	bd	5 000
Supermaloj, Ni <sub>79</sub> Fe <sub>15</sub> Mo <sub>5</sub>	673	bd	100 000
Monokrystaliczny stop, Fe <sub>97</sub> Si <sub>3</sub>	1030	bd	3 800 000
Nikiel, Ni	627	600	bd
Stop nikiel-żelazo	500-1000	2 700	20 000
Kobalt, Co	1388	bd	bd
<b>Materiały ferrimagnetyczne</b>	---	---	---
Dwutlenek chromu, Cr O <sub>2</sub>	386	bd	bd
Tlenek europu, Eu O	69	bd	bd
Magnetyt, Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (ferrimagnetyczne nanocząstki w różnych organach, m.in. w mózgu)	850	bd	bd
<i>Zestawienie w oparciu o dane literaturowe i dane dostępne w Internecie; bd – brak danych</i>			

1030 Obserwowane makroskopowo właściwości substancji dia-, para-, ferro- i ferrimagnetycznych są zależne od konfiguracji elektronów w powłokach walencyjnych atomów – bywają zależne od postaci chemicznej i fizycznej substancji (m.in. postaci alotropowej pierwiastka). Wiele substancji wykazuje bardzo słabe właściwości dia- i paramagnetyczne, nieznacznie różniące je magnetycznie od właściwości próżni. Wartość względnej przenikalności magnetycznej takich substancji różni się od wartości jeden (przenikalność względna próżni) o mniej (znacznie mniej) niż jedna milionowa (względna przenikalność magnetyczna często zawiera się w zakresie  $1 \pm 10^{-7}$ ). W przypadku takich substancji dostępne dane materiałowe dotyczące wartości ich przenikalności i podatności magnetycznej bywają rozbieżne i niejednoznaczne, ze względu na niepewność pomiarów laboratoryjnych oraz możliwe zanieczyszczenia badanych próbek substancjami o silniejszych właściwościach magnetycznych. Dlatego w przypadku substancji niemagnetycznych (dia- i paramagnetyków), w procesie klasyfikowania ich jako dia- lub paramagnetyki konieczne bywa odwołanie się do struktury walencyjnych powłok elektronowych ich atomów.

1040 Najprostszym przykładem jest rozpatrzenie fizycznych właściwości determinujących właściwości magnetyczne wodoru (H). Wodór atomowy jest bardzo słabym paramagnetykiem, który charakteryzuje względna przenikalność magnetyczna nieznacznie większa od jeden (w przybliżeniu 1,000000122). Z tego powodu wodór jest niemal magnetycznie obojętny w większości zastosowań technicznych – w wielu zastosowaniach przyjmuje się dla uproszczenia rozważań wartość przenikalności magnetycznej wodoru jako równą przenikalności próżni.

Natomiast kation wodoru (proton,  $H^+$ ), jako jedyny kation jest całkowicie pozbawiony elektronów, determinujących większość zjawisk magnetycznych (m.in. dia- i paramagnetyzm, zależne od spinu elektronów w atomie). Z tego powodu pojedynczy, swobodny kation wodoru nie ma momentu magnetycznego związanego z elektronami. W warunkach, gdy jony wodoru występują swobodnie (np. w plazmie), ich przenikalność magnetyczna jest traktowana jako równa przenikalności magnetycznej próżni. W roztworach lub substancjach stałych, jony wodoru mogą modyfikować właściwości magnetyczne substancji, np. wywołując w nich istotny efekt paramagnetyczny.

1050 Kolejnym przykładem mogą być gazy szlachetne, których walencyjne powłoki elektronowe są całkowicie zapełnione – wobec braku niesparowanych elektronów w atomach są one diamagnetykami, o bardzo słabych właściwościach diamagnetycznych (przenikalność magnetyczna próbek czystych gazów szlachetnych - helu, neonu, argonu, kryptonu i ksenonu - jest nieznacznie mniejsza od przenikalności magnetycznej próżni, zawierając się w przedziale  $0,999999 < \mu_r < 1,0$ , a ich podatność magnetyczna jest ujemna, mniejsza od wartości  $10^{-7}$ ). Natomiast dostępne dane z pomiarów laboratoryjnych podają zarówno wartości względnej przenikalności magnetycznej nieco mniejsze, jak i nieco większe od wartości jeden – jak wspomniano, mogą to być skutki zanieczyszczeń próbek badanych substancji lub niepewności procesu pomiarowego.

1060 Inną trudnością przy tabelaryzowaniu parametrów materiałowych różnych substancji jest zależność przenikalności i podatności magnetycznej od takich okoliczności jak: skład

chemiczny próbki, stan skupienia, postać alotropowa pierwiastka, jonizacja, temperatura i ciśnienie rozpatrywanego materiału, forma w jakiej występują atomy danego pierwiastka.

Interesującym przykładem zależności parametrów magnetycznych od składu chemicznego substancji są metale alkaliczne (czyli tzw. litowce należące do 1 grupy układu okresowego: Lit (Li), sód (Na), potas (K), rubid (Rb), cez (Cs) i frans (Fr)). Najistotniejsze w rozpatrywanym kontekście zagrożeń związanych z oddziaływaniem PMS na ludzi są sód i potas, istotne dla metabolizmu błon komórkowych organizmu człowieka.

1070 W czystej postaci metalicznej metale alkaliczne (m.in. sód i potas) są paramagnetykami (słabo przyciąganymi do źródła PMS) z powodu pojedynczego niesparowanego elektronu w konfiguracji ich elektronów walencyjnych.

Biorąc pod uwagę, że metale alkaliczne są bardzo reaktywne – gwałtownie reagują z wodą, tworząc silne zasady i wodór, a w powietrzu szybko się utleniają – w praktyce bardziej istotne są parametry magnetyczne jonów takich metali. Metale alkaliczne tworzą kationy jedno-dodatnie, np.  $\text{Na}^{+1}$  i  $\text{K}^{+1}$ , o zamkniętej powłoce elektronowej pozbawionej niesparowanych elektronów walencyjnych (w konfiguracji odpowiedniego gazu szlachetnego) stając się diamagnetykami o podatności magnetycznej niezależnej od temperatury. W związkach chemicznych kationy metali alkalicznych wnoszą wkład diamagnetyczny, np. w chlorku sodu ( $\text{NaCl}$ ) diamagnetyzm sodu wzmacnia diamagnetyzm chloru. Podobnie w roztworach wodnych (takich jak osocze krwi) diamagnetyzm kationów sodu i potasu wzmacnia diamagnetyzm wody.

1080 Odmiennie zależności dotyczą cynkowców (metali należących do 12 grupy układu okresowego: cynk (Zn), kadm (Cd), rtęć (Hg)) z dwoma elektronami walencyjnymi. Cynkowce w postaci metalicznej mają całkowicie wypełnione powłoki elektronowe, bez niesparowanych elektronów walencyjnych. W związku z tym są słabymi diamagnetykami (przenikalność magnetyczna próbek czystych metali jest nieznacznie mniejsza od przenikalności magnetycznej próżni, zawierając się w przedziale  $0,9999 < \mu_r < 1,0$ , a ich podatność magnetyczna jest ujemna). Natomiast odmiennie od metali alkalicznych, kationy cynkowców tracą oba elektrony walencyjne ( $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$ ) i podobnie jak w postaci metalicznej również nie mają niesparowanych elektronów, pozostając słabymi diamagnetykami.

1090 Również w przypadku substancji bardziej złożonych, parametry magnetyczne zależą od ich składu chemicznego. Przykładowo parametry hemoglobiny krwi zależą od stanu jej utlenowania. Wyróżniane są trzy postacie hemoglobiny, za względu na jej właściwości magnetyczne:

- oksyhemoglobina ( $\text{HbO}_2$ ), która po dołączeniu cząsteczki tlenu do żelaza dwuwartościowego ( $\text{Fe}^{2+}$ ) nie ma niesparowanych elektronów i w związku z tym jest słabym diamagnetykiem, o parametrach magnetycznych zbliżonych do wody
- deoksyhemoglobina (Hb), która po odłączeniu cząsteczki tlenu od żelaza dwuwartościowego ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ma 4 niesparowane elektrony i w związku z tym staje się paramagnetykiem
- methemoglobina (MetHb), która po utlenieniu żelaza dwu-wartościowego do

1100

trójwartościowego ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ma 5 niesparowanych elektronów (bez możliwości wiązania tlenu) i w związku z tym staje się paramagnetykiem.

Kolejny przykład substancji biologicznych to limfa. Szczególne zainteresowanie budzą właściwości magnetyczne limfy w uchu wewnętrznym, ze względu na odczuwane w silnym PMS zaburzenia zmysłu równowagi. W uchu wewnętrznym rozróżnia się dwa rodzaje limfy:

- endolimfę, która jest płynem ucha wewnętrznego – roztworem wodnym (>99%) głównie jonów potasu ( $\text{K}^+$ )
- 1110 - perylimfę, która jest płynem ucha zewnętrznego – roztworem wodnym (>99%) głównie jonów sodu ( $\text{Na}^+$ ).

W związku ze składem chemicznym, endolimfa i perylimfa są diamagnetykami, o przenikalności i podatności magnetycznej zbliżonych do parametrów wody.

- Ze względu na wspomniane oddziaływanie PMS na zmysł równowagi, zainteresowanie budzą również parametry magnetyczne otolitów, które podobnie jak endolimfa znajdują się w uchu wewnętrznym. Przemieszczanie się otolitów w uchu wewnętrznym pod wpływem grawitacji i ruchu głowy jest istotnym czynnikiem wywołującym sygnały elektryczne dla zmysłu równowagi. Otolity są kryształami węglanu wapnia ( $\text{CaCO}_3$ ), które w czystej postaci są diamagnetykami o parametrach magnetycznych zbliżonych do wody, jednak domieszki
- 1120 innych pierwiastków mogą zmieniać ich właściwości na paramagnetyczne (obecność materiałów magnetycznych, np. związków żelaza, w otolitach u ptaków i niektórych ryb jest wskazywana jako możliwy mechanizm przekształcający je w sensor ziemskiego pola magnetycznego, wykorzystywany przez nie w nawigacji).

W tabeli 2-4 zestawiono parametry magnetyczne przykładowych substancji istotnych biologicznie.

<b>Tabela. 2-4. Podatność magnetyczna objętościowa [<math>X_v</math>] i przenikalność magnetyczna względna [<math>\mu_r</math>] wybranych substancji biologicznie istotnych</b>		
<b>Substancje biologicznie istotne</b>	<b><math>X_v</math> [<math>10^{-6} \text{ m}^3/\text{g}</math>]</b>	<b><math>\mu_r</math></b>
<b>Woda, H<sub>2</sub>O</b>	-8,8 / -9,07 [woda/lód]	0,999991 [diamagnetyk]
<b>Hemoglobina krwi</b>		
oksyhemoglobina (Fe <sup>+2</sup> natleniona)	< 0	< 1 [diamagnetyk]
deoksyhemoglobina (Fe <sup>+2</sup> odutleniona)	> 0	> 1 [paramagnetyk]
methemoglobina (Fe <sup>+3</sup> utleniona)	> 0	> 1 [paramagnetyk]
<b>Otolity (węglan wapnia, kalcyt, CaCO<sub>3</sub>)</b>	< 0 > 0	< 1 [czysty: diamagnetyk] > 1 [z domieszkami: paramagnetyk]
<b>Endolimfa</b>	< 0	< 1 [diamagnetyk]
<b>Perylimfa</b>	< 0	< 1 [diamagnetyk]
<b>Makromolekuły (białka, DNA)</b> [z pominięciem metaloprotein będących paramagnetykami]	-100	0,999999 [diamagnetyk]
<b>Magnetyt, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b> [ferrimagnetyczne nanocząstki w różnych organach, m.in. w mózgu]	bd	bd
<i>Zestawienie w oparciu o dane literaturowe i dane dostępne w Internecie</i>		

1130 W jednorodnym PMS brak siły oddziałującej na moment magnetyczny obiektu, jednak powstaje moment obrotowy,  $\Gamma$ , o wartości proporcjonalnej do indukcji oddziałującego PMS,  $B$ , momentu magnetycznego obiektu,  $m$ , oraz sinusa kąta między nimi,  $\beta$ , a oś obrotu jest prostopadła do nich:

$$\Gamma = \mathbf{m} \times \mathbf{B} = m B \sin(\beta) \quad (2-7)$$

Skutkiem takiego oddziaływania jest powstanie energii potencjalnej:

$$U_m = -\mathbf{m} \cdot \mathbf{B} = -m B \cos(\beta) \quad (2-8)$$

o wartości proporcjonalnej do indukcji oddziałującego PMS, momentu magnetycznego obiektu oraz cosinusa kąta między nimi.

1140 W przypadku obiektów paramagnetycznych w organizmie, energia termiczna przeciwdziała uporządkowaniu momentów magnetycznych, nawet w PMS o indukcji rzędu 10 T (w którym wyraźne uporządkowanie momentów magnetycznych występuje dla obiektów o momentach rzędu co najmniej  $10^{-22} \text{ J/T}$ ). Natomiast obiekty ferromagnetyczne charakteryzują momenty o znacznie wyższych wartościach, które mogą ulegać uporządkowaniu w takim PMS.

W obiektach diamagnetycznych nie powstaje moment obrotowy, chyba że charakteryzuje je anizotropowość podatności magnetycznej (np. białka i inne makromolekuły). Takie obiekty mają najmniejszą energię potencjalną,  $U_m$ , kiedy polaryzacja ich najsilniejszej podatności magnetycznej,  $X$ , jest zgodna z polaryzacją pola magnetycznego,  $B$ . W związku z tym podlegają oddziaływaniu dążącemu do uzyskania takiego położenia, co wywołuje energię potencjalną proporcjonalną do ich wielkości, kwadratu indukcji magnetycznej oddziałującego PMS oraz kwadratu sinusa kąta  $\beta$  między polaryzacją PMS i kierunkiem najsilniejszej podatności magnetycznej:

1150

$$U_m = [(X_2 - X_1) / 2\mu_0] V B^2 \sin^2(\beta) \quad (2-9)$$

gdzie:  $(X_2 - X_1)$  – różnica między największą i najmniejszą podatnością magnetyczną,  
 $V$  – objętość materiału.

W przypadku małych molekuł energia taka jest znacznie mniejsza od energii termicznej w organizmie, jednak duże molekuły charakteryzuje podatność magnetyczna proporcjonalna do ich rozmiarów i oddziaływanie magnetyczne przewyższające energię termiczną jest możliwe w PMS o indukcji rzędu 10 T.

**Niejednorodne pole magnetyczne** wywiera na obiekty diamagnetyczne, paramagnetyczne i ferromagnetyczne siłę skierowaną zgodnie z wektorem gradientu PMS,  $d\mathbf{B}/dz$ , proporcjonalną do iloczynu momentu magnetycznego i gradientu indukcji – w przypadku obiektów o stałym momencie magnetycznym (para- lub diamagnetyków):

1160

$$F = -\mathbf{k} dU/dz = \mathbf{k} m d\mathbf{B}/dz \quad (2-10)$$

gdzie:  $\mathbf{k}$  – wektor jednostkowy w kierunku  $(z)$ .

W przypadku obiektów o momencie magnetycznym zależnym od indukcji oddziałującego PMS (ferromagnetyków), wywierana siła jest proporcjonalna do wielkości obiektu, indukcji magnetycznej i gradientu indukcji:

$$F = -\mathbf{k} (X_v / \mu_0) V B d\mathbf{B}/dz \quad (2-11)$$

## 1170 2.2. Oddziaływanie elektrodynamiczne

Oddziaływanie PMS, jak i pola-M zmiennego w czasie  $B(t)$ , niezależnie od jego rozkładu przestrzennego, może prowadzić do indukowania w obiektach elektroprzewodzących potencjałów i prądów elektrycznych.

**Oddziaływanie PMS o jednorodnym rozkładzie przestrzennym** dotyczy tylko ładunków elektrycznych, będących z dowolnego powodu w ruchu i wyrażane jest matematycznie jako siła Lorentz'a:

$$F_z = q v_y \times B_x \quad (2-12)$$

gdzie, w ortogonalnym układzie współrzędnych  $(x,y,z)$ :  $F_z$  – siła oddziałująca w kierunku  $(z)$  na ładunek elektryczny  $q$ ,  $v_y$  – prędkość poruszania się ładunku w kierunku  $(y)$ ,  $B_x$  – indukcja magnetyczna w kierunku  $(x)$ .

Oddziaływanie to zachodzi **proporcjonalnie do składowej pola-M  $B_x$ , która jest prostopadła do kierunku przemieszczania się ładunku  $(y)$**  i wskutek tego oddziaływania wytwarza różnicę potencjałów elektrycznych (spolaryzowaną w kierunku  $(z)$  do nich prostopadłym):

$$U_z = E_z d = v_y B_x \quad (2-13)$$

gdzie, w ortogonalnym układzie współrzędnych  $(x,y,z)$ :  $U_z$  – różnica potencjałów,  $E_z$  – natężenie pola-E pochodzącego od ładunków elektrycznych na obiekcie o grubości  $d$  wzdłuż kierunku  $(z)$ .

Natomiast oddziaływanie **niejednorodnego przestrzennie PMS** na ładunki poruszające się równoległe do wektora jego indukcji,  $B$ , można traktować jako równoważne oddziaływaniu pola-M zmiennego w czasie  $(dB/dt)$ , które jest **proporcjonalne do gradientu składowej indukcji magnetycznej równoległej do kierunku poruszania się ładunków  $(y)$** :

$$dB/dt = v_y dB/dy \quad (2-14)$$

Zgodnie z prawem Faraday'a oddziaływanie takie wywołuje siłę elektryczną wprawiającą ładunki w ruch wirowy w płaszczyźnie prostopadłej  $(xz)$  do polaryzacji PMS  $(y)$ , zgodnie z zależnością:

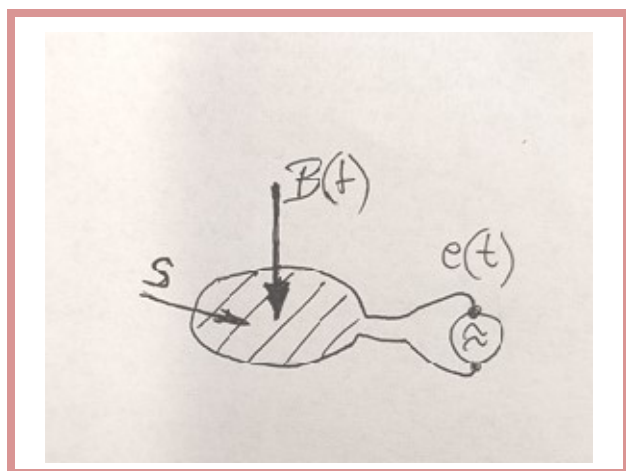
$$\nabla \times E = -dB/dt = -v_y dB/dy \quad (2-15)$$

Wspomniany ruch ładunków elektrycznych może wynikać z ruchu obiektów przewodzących prąd elektryczny, takich jak obiekty metalowe lub roztwory elektrolitów (np. tkanki organizmów żywych, płyny ustrojowe, gałki oczne).

Jeśli w PMS jednorodnym lub niejednorodnym przestrzennie poruszają się takie obiekty przewodzące, to zachodzi w nich indukowanie siły elektromotorycznej. Wspomniane zjawisko można scharakteryzować na przykładzie oddziaływania pola-M na antenę ramową. Kiedy strumień magnetyczny przenikający powierzchnię anteny zmienia się w czasie (z powodu zmienności bieżącej wartości pola-M w czasie  $B(t)$ , z powodu zmian położenia anteny względem kierunku polaryzacji jednorodnego PMS, lub z powodu zmian położenia w niejednorodnym PMS), to w antenie indukowana jest siła elektromotoryczna,  $e(t)$ , która wywołuje przepływ prądu indukowanego jeśli obwód elektryczny tworzony przez antenę jest zamknięty (rys. 2-3):

$$e(t) = \frac{d\phi}{dt} = S \frac{dB}{dt} \quad (2-16)$$

gdzie:  $\phi$  – strumień magnetyczny ( $\phi = B S$ ),  $e(t)$  – siła elektromotoryczna,  $B$  – indukcja magnetyczna pola-M oddziałującego na antenę (składowa ortogonalna do powierzchni anteny),  $S$  – powierzchnia anteny.



Rys. 2-3. Indukowanie siły elektrodynamicznej w antenie ramowej umieszczonej w polu-M [archiwum własne]

### 2.3. Oddziaływanie magnetohydrodynamiczne

1220 W organizmie człowieka znajdującego się w polu-EM ruch ładunków elektrycznych występuje zarówno z powodu przepływania prądów endogennych (związanych z fizjologiczną elektryczną aktywnością tkanek elektrycznie pobudliwych), jak i z indukowania prądu w tkankach elektroprzewodzących podczas poruszania się człowieka narażonego na pole-EM, bądź indukowania przez PMS prądu w przepływających w organizmie elektroprzewodzących płynach fizjologicznych (takich jak krew i limfa w układzie krążenia, czy endolimfa w strukturach ucha wewnętrznego).

Jeśli PMS oddziałuje na przepływający płyn przewodzący prąd elektryczny (np. płyny fizjologiczne w organizmie, takie jak krew i limfa), to siła Lorentza działająca na poruszające się ładunki indukuje siłę elektromotoryczną oraz prąd elektryczny w takim płynie.

1230 Natomiast zaindukowany prąd oddziałuje zwrótnie z PMS i poprzez siłę Lorentza oddziałuje na przepływający płyn. Oddziaływanie to prowadzi do powstawania w płynie fal poprzecznych (tzw. fal Alfvena). Zasygnalizowane sprzężenie PMS z dynamiką przepływającego płynu elektroprzewodzącego jest określane jako oddziaływanie magnetohydrodynamiczne, wykorzystywane intencjonalnie w technice (np. w

konstruowaniu napędu magnetohydrodynamicznego), a w organizmie znajdującym się w PMS oddziałuje na procesy fizjologiczne zależne od przepływających w organizmie płynów (np. na funkcjonowanie układu krążenia). Formalne scharakteryzowanie zjawisk magnetohydrodynamicznych wymaga uwzględnienia zależności elektrodynamicznych (równania Maxwella) oraz zależności hydrodynamicznych (równania Naviera-Stokesa).

- 1240 W związku z tym, skutkiem oddziaływania PMS jest również ciśnienie wywierane na przemieszczający się płyn – w kierunku ( $y$ ) prostopadłym zarówno do polaryzacji PMS ( $x$ ), jak i do kierunku indukowanego przez PMS prądu (czyli anty-równoległe do kierunku przepływu płynu) – o wartości proporcjonalnej do przewodności,  $\sigma$ , szybkości przepływu płynu,  $v_x$ , i kwadratu indukcji magnetycznej,  $B_z$ :

$$dP/dy = B_z J_x = \sigma v_x (B_z)^2 \quad [2-17]$$

gdzie, w ortogonalnym układzie współrzędnych ( $x,y,z$ ):  $dP/dy$  – gradient ciśnienia w kierunku ( $y$ ),  $J_x$  – gęstość prądu wynikająca z ruchu indukowanych ładunków elektrycznych w kierunku ( $x$ ),  $J_x = \sigma B_z$

1250

#### 2.4. Oddziaływanie jądrowe (spinowe)

Oprócz omówionych makroskopowych właściwości materiałów para-, dia-, ferro- i ferrimagnetycznych, zależnych od konfiguracji elektronów w atomach (a więc od takich parametrów jak skład chemiczny, temperatura, jonizacja, ciśnienie substancji, determinujących podatność i przenikalność magnetyczną rozpatrywanego materiału), również na poziomie sub-atomowym obserwowane są magnetyczne właściwości materii.

- 1260 Naturalny niezerowy moment magnetyczny jądra (spin wypadkowy protonów i neutronów (nukleonów) jądra, ang.: *nuclear spin*) charakteryzuje izotopy atomów wielu pierwiastków z nieparzystą (niesparowaną) liczbą nukleonów [2-9, 2-12]. Spin jądrowy można opisać jako rotowanie jądra wokół własnej osi i wewnętrzny moment pędu jądra. Spin jądra jest sumą spinów nukleonów i jest wielkością skwantowaną. Każde jądro o niesparowanych spinach obdarzone dodatnim ładunkiem elektrycznym ma również spin, który związany jest również z polem-M i momentem magnetycznym,  $m_j$ , jądra. Przy braku zewnętrznego PMS, spiny ustawione są w przypadkowych kierunkach i próbka substancji zawierająca te atomy posiada wypadkowy, makroskopowy spin równy zero. W zewnętrznym jednorodnym PMS moment magnetyczny związany ze spinami jąder może orientować się w różny sposób absorbując lub emitując energię w formie promieniowania elektromagnetycznego. Skwantowane spiny atomów są porządkowane, tak że mogą przyjmować tylko dwie orientacje: równoległą i anty-równoległą do polaryzacji PMS. Oznacza to pojawienie się
- 1270 tylko dwóch dozwolonych stanów energetycznych dla jąder o niesparowanych spinach

nukleonów: podstawowego (niskoenergetycznego) dla spinów zgodnych z kierunkiem PMS i wzbudzonego dla spinów zorientowanych przeciwnie.

1280 Stan wzbudzenia, może być rezultatem pochłonięcia energii wewnętrznej, np. termicznej lub pochłonięcia energii dostarczonej z zewnątrz układu, np. przez pole-EM (promieniowanie elektromagnetyczne). Ponieważ energia jąder jest skwantowana, pochłanianie energii wzbudzającej  $\Delta E$  dla poszczególnych poziomów energetycznych jest procesem rezonansowym. Różnica energii  $\Delta E$  koniecznej do wzbudzenia danego atomu jest dla jego każdego izotopu proporcjonalna do natężenia zewnętrznego PMS. W zewnętrznym jednorodnym PMS może zatem zachodzić zjawisko rezonansowego pochłaniania energii elektromagnetycznej przez takie izotopy, a następnie spontanicznej reemisji tego promieniowania z atomów powracających do stanu równowagi (tzw. **magnetyczny rezonans jądrowy**). Omówione zjawisko umożliwia m.in. spektralną analizę składu substancji ciekłych i stałych (tzw. spektrometria NMR), spektralną analizę składu biochemicznego organizmu (tzw. rezonans magnetyczny ze spektroskopią MRS) oraz obrazowanie morfologii obiektów złożonych z różnych izotopów, takich jak obrazowanie budowy organizmu człowieka (tzw. obrazowe badania rezonansu magnetycznego, MRI) lub obrazowanie ukrwienia i utlenowania organizmu, np. mózgu (tzw. funkcjonalny rezonans magnetyczny, fMRI).

1290 Dla danego izotopu wzbudzenie jąder zachodzi jeżeli częstotliwość pola-EM spełnia zależność:

$$f_L = \gamma B \quad (2-18)$$

gdzie:  $f_L$  - częstotliwość rezonansowa, tzw. częstotliwość Larmora [MHz];  $\gamma$  - stała żyromagnetyczna [MHz/T];  $B$  - indukcja jednorodnego PMS [T].

1300 Stała żyromagnetyczna jest stałą fizyczną charakteryzującą dany izotop. Częstotliwość Larmora pola-EM wzbudzającego dany izotop, zależy od indukcji zewnętrznego PMS, w jakim umieszczona jest substancja: w PMS o indukcji z przedziału 0,1-10 T (najczęściej wykorzystywanego w obrazowaniu rezonansu magnetycznego), częstotliwość Larmora dla wodoru jest z przedziału 4,2-420 MHz, zawiera się więc w tzw. paśmie wielkiej częstotliwości (PWCZ) lub częstotliwości radiofalowych (RF). Niezerowy spin jądrowy posiadają praktycznie wszystkie atomy o nieparzystej liczbie nukleonów, takie jak: wodór 1-H, węgiel 13-C, azot 15-N, tlen 17-O, sód 23-Na, fosfor 31-P (tabela 2-6).

<b>Tabela 2-6. Parametry charakteryzujące zjawisko rezonansowego pochłaniania pola-EM w PMS dla wybranych izotopów podatnych na zjawisko Larmore'a</b>									
Izotop	Stała żyromagnetyczna $\gamma$ [MHz/T]	Częstotliwość rezonansowa Larmore'a, $f_L$ , w PMS o indukcji:							
		40 micT	1 mT	0,35 T	1,5 T	3 T	5T	7T	14T
		[Hz]	[kHz]	[MHz]	[MHz]	[MHz]	[MHz]	[MHz]	[MHz]
wodór 1-H	$\gamma_H = 42,577$	1703	42,5	14,9	63,8	128	213	298	724
węgiel 13-C	$\gamma_C = 10,705$	428	10,7	3,75	16,1	32,1	53,5	74,9	182
azot 15-N	$\gamma_N = 4,316$	172	4,32	1,51	6,47	12,9	21,6	30,2	73,4
tlen 17-O	$\gamma_O = 5,772$	230	5,77	2,02	8,66	17,3	28,9	40,4	98,1
sód 23-Na	$\gamma_{Na} = 11,262$	450	11,2	3,94	16,9	33,8	56,3	78,8	192
fosfor 31-P	$\gamma_P = 17,235$	689	17,2	6,03	25,8	51,7	86,2	121	293
Indukcja ziemskiego pola magnetycznego: ok. 40 micT									

## 2.5. Oddziaływanie z dynamiką reakcji chemicznych

1310 Oddziaływanie pola-M na spin elektronów może modyfikować przebieg reakcji chemicznych. W wielu reakcjach enzymatycznych w roztworach następuje dysocjacja molekuł na parę rodników, które następnie reagują z rodnikami innej zdysocjowanej molekuły. Jednak warunkiem zajścia rozpatrywanej reakcji jest, aby wcześniej rodniki te nie uległy rekombinacji. Zewnętrzna pole magnetyczne jest jednym z czynników wpływających na prawdopodobieństwo wystąpienia rekombinacji rodników powstałych w wyniku dysocjacji, poprzez modyfikowanie spinu elektronów i prawdopodobieństwa, że w roztworze spotkają się rodniki w stanach kwantowych umożliwiających rekombinację.

Makroskopowo rozpatrując zagadnienie, zewnętrzne pole magnetyczne utrudnia proces rekombinacji rodników zdysocjowanych molekuł, w skutek tego zwiększa prawdopodobieństwo, że znajdą się one w warunkach umożliwiających im wejście w reakcję chemiczną z rodnikami innej molekuły. Badania laboratoryjne wykazały, że skutkiem takiego procesu może być zwiększenie o kilkadziesiąt procent szybkości reakcji enzymatycznych zależnych od procesów rodnikowych [2.9, 2-12].

1320

## 2.6. Miary fizycznego oddziaływania PMS z obiektami materialnymi

Scharakteryzowane w rozdziałach 2.1-2.5, zróżnicowane mechanizmy oddziaływania na środowisko materialne pola-M występującego przy źródłach PMS (oddziaływania statycznego PMS oraz oddziaływania dynamicznego na obiekty w ruchu lub pola-M

1330 zmiennego przy instalacjach prądu prostowanego, DC + AC), obejmujące oddziaływanie: magnetomechaniczne, elektrodynamiczne, magnetohydrodynamiczne i spinowe, mogą mieć zróżnicowane konsekwencje biofizyczne. Wobec zasygnalizowanego również istotnego zróżnicowania okoliczności oddziaływania elektromagnetycznego w otoczeniu różnego typu źródeł PMS, rozważania dotyczące będących ich konsekwencją zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia pracujących oraz infrastruktury środowiska pracy powinny uwzględniać odpowiadającą im złożoną parametryzację warunków oddziaływania elektromagnetycznego w otoczeniu źródeł PMS oraz zróżnicowane kryteria oceny takich parametrów. Inaczej mówiąc konieczna jest multimodalna parametryzacja i ocena zagrożeń elektromagnetycznych związanych z użytkowaniem źródeł PMS w środowisku pracy.

Zróżnicowane mechanizmy oddziaływanie pola-M przy źródłach PMS na obiekty elektroprzewodzące, dia-, para-, ferro- i ferrimagnetyczne, omówione w rozdziałach 2.1-2.3, a także charakteryzujące ich skutki parametry pola-M podsumowano w tabeli 2-5.

1340

<b>Tabela 2.5. Miary oddziaływania pola-M przy źródłach PMS na obiekty dia-, para-, ferro i ferrimagnetyczne oraz elektroprzewodzące</b>				
---	<b>Miary oddziaływania PMS na obiekty; w układzie ortogonalnym – składowa [z]:</b>			
Rodzaj oddziaływania	Oddziaływanie na momenty magnetyczne – równoległe lub anty-równoległe do wektora $B$ ( <b>magnetomechaniczne</b> )		Oddziaływanie na ładunki elektryczne w ruchu, tworzące prąd elektryczny ( <b>elektrodynamiczne</b> )	
Rodzaj substancji / obiektów	<b>Diamagnetyki</b> (większość materiałów biologicznych)	<b>Paramagnetyki</b>	<b>Ferro- lub ferrimagnetyki</b>	<b>Elektroprzewodzące</b>
<b>Pole jednorodne przestrzenne</b>	(powstaje moment obrotowy) $B$ : w przypadku obiektów izotropowo diamagnetycznych $B^2$ : w przypadku obiektów anizotropowo diamagnetycznych	$B$ (powstaje <u>moment obrotowy</u> )	$B$ (powstaje <u>moment obrotowy</u> )	$\mathbf{dBz/dt}$ (równoważnie: $\mathbf{dB/dz}$ ) (powstaje różnica potencjałów i <u>prąd indukowany</u> – w płaszczyźnie prostopadłej do polaryzacji wektora $B$ pola jednorodnego lub gradientu $\mathbf{dB/dz}$ pola niejednorodnego przestrzenne)
<b>Pole niejednorodne przestrzenne</b>	$\mathbf{dB/dz}$ (zachodzi wypychanie obiektu od <u>źródła PMS</u> ; <u>lewitacja magnetyczna</u> ) <b>Uwaga:</b> oddziaływanie na obiekt zanurzonych w cieczy diamagnetycznej jest proporcjonalne do różnicy podatności magnetycznej obiektu i cieczy ( <u>magnetyczna siła Archimedes</u> )	$\mathbf{dB/dz}$ (zachodzi <u>przyciąganie obiektu do źródła PMS</u> )	$\mathbf{B dB/dz}$ (zachodzi <u>przyciąganie obiektu do źródła PMS</u> )	<b>Uwaga:</b> w przepływającym płynie elektroprzewodzącym powstają: $\mathbf{B}$ : różnica potencjałów i prąd indukowany (prostopadłe do polaryzacji wektora $B$ i kierunku przepływu płynu), $\mathbf{B^2}$ : ciśnienie anty-równoległe do kierunku przepływu płynu ( <u>siła magnetohydrodynamiczna</u> )

---

## 2.7. Bibliografia – część 2

- [2.1.] David R. Lide (red.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, wyd. 90, Boca Raton: CRC Press, 2009, ISBN 978-1-4200-9084-0
- [2.2.] Jaworski B., Dietłaf A., Miłkowska L., Siergiejew G. (1984). Kurs fizyki. Elektryczność i magnetyzm, t. 2, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, ISBN 83-01-01265-X.
- 1350 [2.3.] Leonowicz M., Wysłocki J.J., (2005). Współczesne magnesy, technologie, mechanizmy koercji, zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [2.4.] Orear J., (2004). Fizyka, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [2.5.] Przenikalność magnetyczna, [w:] Encyklopedia PWN [online], Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [2.6.] Rawa H. (1994). Elektryczność i magnetyzm w technice, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [2.7.] Reilly P.J. (1998). Applied Bioelectricity. From Electrical Stimulation to Electropathology, Springer-Verlag, New York, Inc.
- [2.8.] Soiński M. (2001). Materiały magnetyczne w technice, Biblioteka Centralnego Ośrodka Szkolenia i Wydawnictw SEP.
- 1360 [2.9.] Static Magnetic Fields (2008). Report of the independent Advisory Group on Non-ionising Radiation, Documents of the Health Protection Agency Radiation, Chemical and Environmental Hazards.
- [2.10.] Szymczyk T. (2003). Tablice matematyczne, fizyczne, chemiczne, astronomiczne, Warszawa: Świat Książki, ISBN 83-7391-162-6, OCLC 749236015.
- [2.11.] Tablice matematyczne, fizyczne, chemiczne i astronomiczne (1984), Warszawa: Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, ISBN 83-02-00763-3.
- [2.12.] WHO Environmental Health Criteria 232, Static Fields (2006), <http://www.who.int/peh-emf/publications/reports/ehcstatic/en/index.html>

### Część 3. Biofizyczne aspekty bezpieczeństwa i higieny pracy w otoczeniu źródeł PMS

Jolanta Karpowicz

Biorąc pod uwagę omówione, zróżnicowane mechanizmy oddziaływania pola-M w otoczeniu źródeł PMS na środowisko materialne (obejmujące oddziaływanie: magnetomechaniczne, elektrodynamiczne, magnetohydrodynamiczne i spinowe), a także przeważające w organizmie substancje diamagnetyczne oraz liczne procesy elektrofizjologiczne, szczególnej uwagi wymagają biofizyczne konsekwencje oddziaływania elektrodynamicznego.

1380

#### 3.1. Biofizyczne aspekty elektrodynamicznego oddziaływania pola-M na organizm

Najistotniejsze mechanizmy elektrodynamicznego oddziaływania pola-M na elektroprzewodzące substancje wskazują, że w przypadku organizmu nieruchomego znajdującego się w PMS oddziaływanie to może modyfikować endogenne potencjały i prądy fizjologiczne wskutek oddziaływania na nie siły Lorentz'a:

$$F(z) = q v(y) \times B(x) \quad (3-1)$$

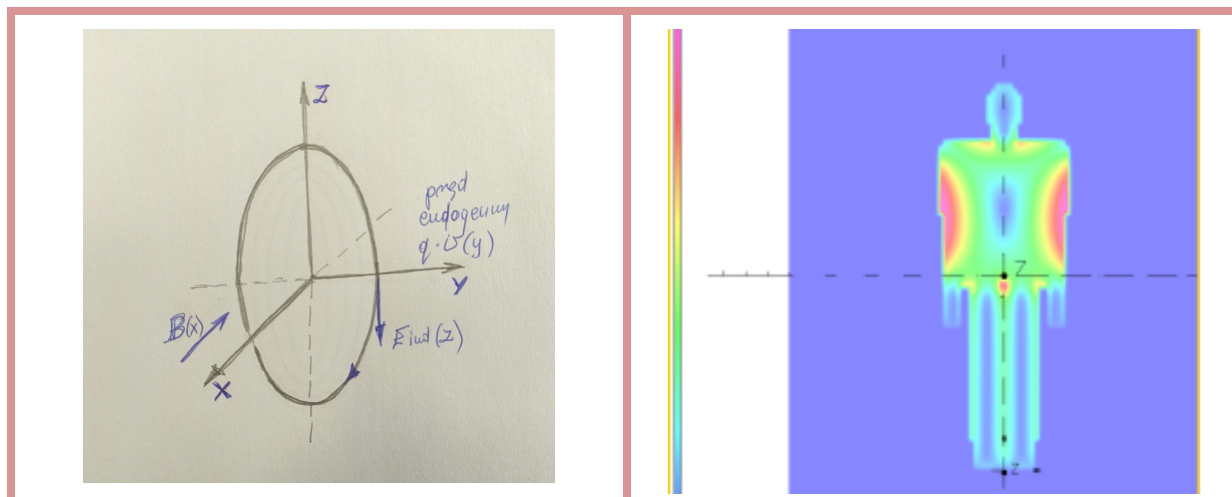
gdzie, w ortogonalnym układzie współrzędnych (x,y,z):  $F(z)$  – siła oddziałująca w kierunku (z) na ładunek elektryczny  $q$ ,  $v(y)$  – prędkość poruszania się ładunku w kierunku (y),  $B(x)$  – indukcja magnetyczna w kierunku (x).

1390 Siła Lorentz'a oddziałuje w takim przypadku w kierunku (z) prostopadle do kierunku przemieszczania się ładunku (y), czyli kierunku fizjologicznego potencjału elektrycznego i toru przepływu prądu endogennego, proporcjonalnie do składowej (x) pola-M (rys. 3.1a). Oddziaływanie takie wytwarza więc indukowaną różnicę potencjałów elektrycznych, spolaryzowaną w kierunku (z):

$$U(z) = E_{ind}(z) d = v(y) B_0(x) \quad (3-2)$$

gdzie, w ortogonalnym układzie współrzędnych (x,y,z):  $U(z)$  – różnica potencjałów,  $E_{ind}(z)$  – natężenie pola-E pochodzącego od ładunków elektrycznych na obiekcie o grubości  $d$  wzdłuż kierunku (z).

1400



Rys. 3-1. Pole elektryczne zaindukowane przez zewnętrzne PMS w związku z przepływaniem w organizmie prądu endogennego (a), wizualizacja 2D rozkładu przestrzennego gęstości prądu elektrycznego zaindukowanego w człękopodobnym jednorodnym modelu człowieka umieszczonym w zewnętrznym spolaryzowanym poziomo polu-M zmiennym w czasie (b) [11] [archiwum własne]

Natomiast w przypadku organizmu (lub jego struktur) poruszającego się w PMS lub poddanego oddziaływaniu składowej zmiennej pola-M powstającego wskutek przepływania w źródle pola prądu prostowanego (AC + DC), zachodzi również indukowanie w nim prądów egzogennych zgodnie z prawem Faraday'a (rys. 3-1b):

$$1410 \quad \nabla \times E = -dB/dt = -v(y) dB/dy \quad (3-2)$$

gdzie: oddziaływanie pola-M na ładunki poruszające się równoległe do gradientu wektora indukcji,  $dB/dy$ , można traktować jako równoważne oddziaływaniu pola-M zmiennego w czasie ( $dB/dt$ ):  $dB/dt = v(y) dB/dy$ .

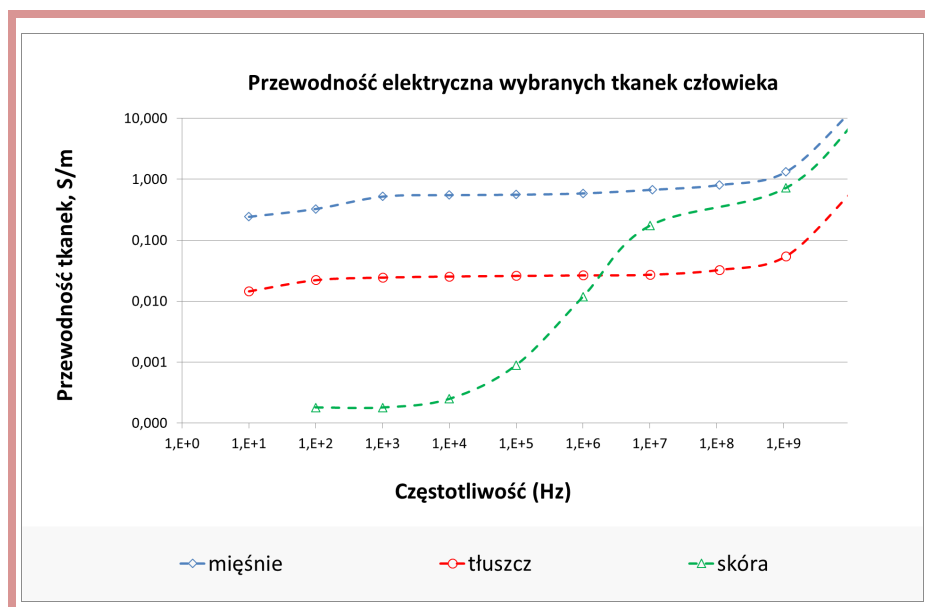
Oddziaływanie takie wywołuje siłę elektryczną wprawiającą ładunki w ruch wirowy w płaszczyźnie prostopadłej (xz) do polaryzacji PMS (y). Indukowany w taki sposób potencjał elektryczny i prąd egzogenny również mogą modyfikować procesy elektrofizjologiczne.

1420 W rozważaniach z zakresu bioelektromagnetyki dotyczących biofizycznych konsekwencji indukowania w organizmie siły Lorentz'a i Faraday'a wykorzystywana jest zarówno ich parametryzacja odnosząca się do rozkładu przestrzennego natężenia pola-E indukowanego w organizmie,  $E_{ind}$  (szczególnie w symulacjach komputerowych), jak i odnosząca się do gęstości prądu elektrycznego indukowanego w organizmie,  $J_{ind}$  (szczególnie w uproszczonych rozważaniach analitycznych).

Zgodnie z prawem Ohma wirowe pole-E indukowane w organizmie,  $E_{ind}$ , jest związane z gęstością indukowanego wirowego prądu,  $J_{ind}$ , współczynnikiem proporcjonalności określanym jako przewodność elektryczna organizmu ( $\sigma$ ):

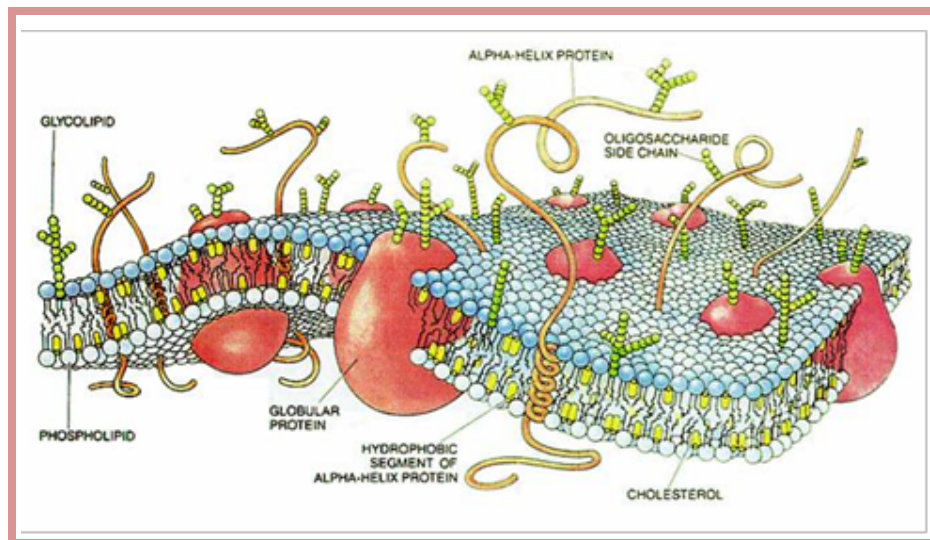
$$J_{ind} = \sigma E_{ind} \quad (3-3)$$

1430 W rozważaniach dotyczących rozkładu przestrzennego indukowanego w organizmie prądu elektrycznego istotną trudnością jest zróżnicowana przewodność elektryczna różnych tkanek, złożona struktura morfologiczna organizmu, a także zależność przewodności od częstotliwości indukowanego prądu elektrycznego (zewnętrznego pola-M), (rys. 3-2).



Rys. 3-2. Przykładowa zależność przewodności elektrycznej wybranych tkanek od częstotliwości [11] [archiwum własne]

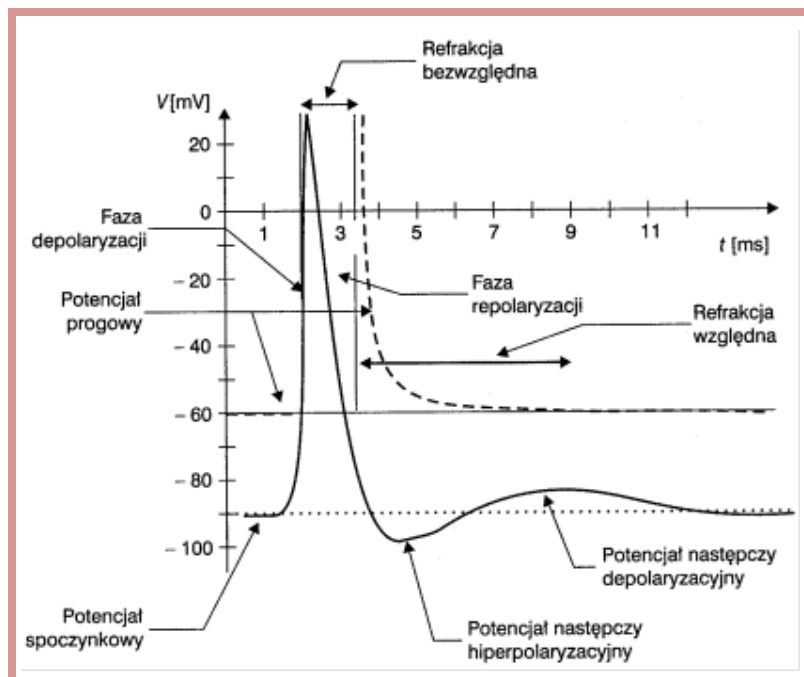
1440 Dobrze poznana wrażliwość organizmu na indukowane elektrodynamiczne skutki oddziaływania pola-M wynika z elektrofizjologicznych właściwości błon komórkowych. Błony komórkowe zbudowane są z wielowarstwowych struktur białkowych i tłuszczowych, charakteryzujących się nieznaczną przewodnością elektryczną (w porównaniu z płynem wewnątrzkomórkowym, cytoplazmą, i płynem międzykomórkowym), dzięki czemu pełnią rolę pojemności elektrycznej (rys. 3-3).



*Rys. 3-3. Schemat przekroju błony komórkowej - oznaczenia: glycolipid - glikolipid; phospholipid - fosfolipid; globular protein - białko globularne; alpha-helix protein - łańcuch białkowy; hydrophobic segment of alpha-helix protein - hydrofobowa część łańcucha białkowego; oligosaccharide side chain - część cukrowa łańcucha białkowego [http://en.wikipedia.org]*

- 1450 Wskutek fizjologicznej różnicy stężeń jonów  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  i  $\text{Cl}^-$  w przewodzącej cytoplazmie komórki i przewodzącym płynie międzykomórkowym, w stanie spoczynku wskroś błony komórkowej panuje napięcie ok.  $-(70\div 90)$  mV. Wymiana jonów przez błonę komórkową możliwa jest dzięki istnieniu w niej struktur wrażliwych na poziom różnicy potencjałów występujący wskroś błony, które pełnią rolę otwieranych napięciem elektrycznym kanałów jonowych [18]. Mechanizm ten umożliwia powstawanie tzw. potencjału czynnościowego, związanego z pobudzeniem elektrycznym komórek pobudliwych (głównie nerwowych i mięśniowych), które polega na samorzutnej depolaryzacji i następującej bezpośrednio po niej repolaryzacji błony komórkowej. Na rys. 3-4 zaprezentowano przykładowo przebieg potencjału czynnościowego w określonym punkcie włókna nerwowego [18].
- 1460 Potencjał czynnościowy jest wyzwalany w punkcie błony, który został pobudzony przez zewnętrzny czynnik. Jeżeli napięcie depolaryzujące przekroczy pewną wartość progową w stosunku do potencjału spoczynkowego, wynoszącą kilkadziesiąt mV, następuje gwałtowna zmiana przepuszczalności bramkowanych napięciem kanałów jonowych w błonie komórkowej i lawinowy przepływ jonów. Impuls potencjału czynnościowego komórki (tzn. samorzutnej depolaryzacji potencjału wskroś błony komórkowej) ma typowy czas trwania rzędu 1 ms. Jest to tzw. czas refrakcji bezwzględnej, w którym nie jest możliwe wyzwolenie następnego potencjału czynnościowego. Impulsy potencjału czynnościowego są podstawą procesu przewodzenia impulsów nerwowych i pobudzenia (elektrostymulacji) komórek nerwowych i mięśniowych.

1470



*Rys. 3-4. Schemat przebiegu potencjału czynnościowego komórki nerwowej w funkcji czasu [18]*

Typowe (fizjologiczne) jest występowanie procesu depolaryzacji (elektrostymulacji) na skutek oddziaływania synaptycznego z innymi komórkami nerwowymi lub receptorowymi (receptorami różnych zmysłów) w obrębie ciała neuronu – przewodzenie impulsów potencjału czynnościowego służy w takim przypadku komunikacji narządów zmysłów z mózgiem lub wewnętrznej komunikacji mózgu z narządami i tkankami takimi jak mięśnie. Jednakże impuls depolaryzujący może zostać wywołany również niefizjologicznie w dowolnym miejscu aksonu, na przykład wskutek elektrostymulacji wynikającej z oddziaływania elektrodynamicznego indukowanego zewnętrznym polem-M. Czynnikiem wywołującym depolaryzację (pobudzenie, elektrostymulację) jest w takim przypadku sygnał elektryczny zaindukowany w organizmie, powodujący powstawanie różnicy potencjałów (napięcia elektrycznego) wzdłuż aksonu.

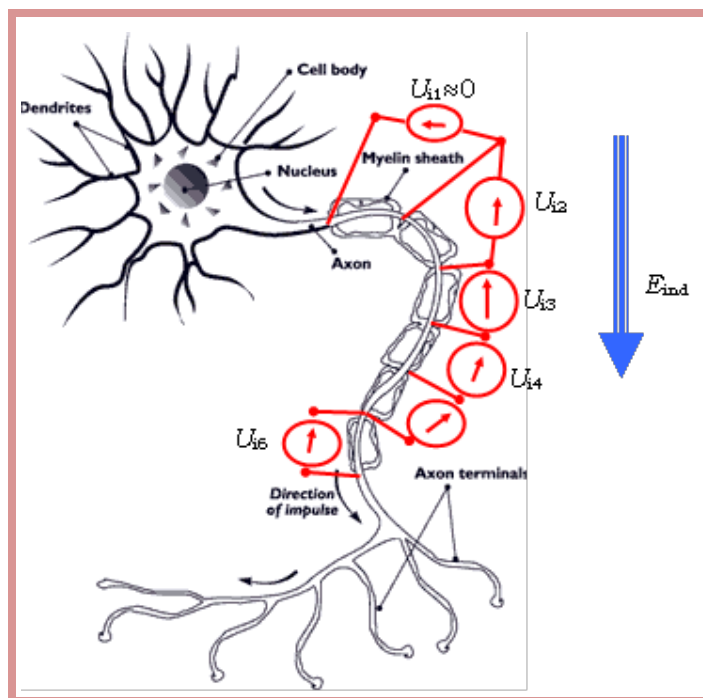
1480

Wrażliwość na pobudzenie i szybkość propagacji impulsów potencjału czynnościowego wzdłuż aksonu zależy od budowy komórek nerwowych. Typowa prędkość propagacji fali potencjału czynnościowego wzdłuż aksonu wynosi 1÷120 m/s i jest zależna od średnicy włókna, temperatury oraz obecności lub braku osłony mielinowej, izolującej je elektrycznie i mechanicznie od otoczenia. Komórki bez osłony mielinowej aksonów charakteryzują się wrażliwością na pobudzenie proporcjonalną do średnicy komórki. Najbardziej podatne na pobudzenie elektryczne (elektrostymulację) są komórki nerwowe z długimi axonami

1490

otoczonymi sekcjonowaną osłonką mieliny, dzielonej przewężeniami Ranviera, w których axon nie jest izolowany od otoczenia.

Ośłona mielinowa nie tylko zmienia sposób propagacji fali potencjału czynnościowego wzdłuż aksonu, ale również zmienia charakter tego procesu. Propagacja potencjału czynnościowego wzdłuż mielinowanego aksonu jest jednokierunkowa - jest nazywana "przeskokami" potencjału między kolejnymi przewężeniami Ranviera. Po przejściu potencjału czynnościowego następuje repolaryzacja komórki, większa niż potencjał spoczynkowy. Stan "przepolaryzowania" jest następnie stopniowo niwelowany przez prądy jonowe i utrzymuje się przez czas zależny od rodzaju komórki, do kilkudziesięciu ms. Po wystąpieniu potencjału czynnościowego, ze względu na zakłócenie naturalnej równowagi jonowej w błonie komórkowej, jej wrażliwość na kolejne bodźce jest zmieniona. Przez większość tego czasu jest znacznie osłabiona. Wynika stąd zależność wrażliwości organizmu na indukowaną elektromagnetycznie elektrostymulację od częstotliwości oddziałującego pola-EM. Natomiast zakłócenia w funkcjonowaniu osłon mielinowych na komórkach nerwowych istotnie zmieniają sprawność układu nerwowego i związane są z wieloma poważnymi chorobami, m.in. stwardnieniem rozsianym, chorobą Parkinsona czy chorobą Alzheimera.



Rys. 3-5. Schemat komórki nerwowej (neuronu) i jego mielinowanego aksonu, wzdłuż którego powstały zaindukowane egzogenne potencjały elektrodynamiczne [archiwum własne, na podstawie <http://www.biology.eku.edu/rithiso/>]

### 3.2. Indukowane elektromagnetycznie prądy egzogenne

1520 Oddziaływanie PMS, jak i pola-M zmiennego w czasie  $B(t)$ , niezależnie od jego rozkładu przestrzennego, może prowadzić do indukowania w obiektach elektroprzewodzących potencjałów i prądów elektrycznych. Oddziaływanie PMS o jednorodnym rozkładzie przestrzennym dotyczy tylko ładunków elektrycznych, będących z dowolnego powodu w ruchu. Prądy indukowane elektromagnetycznie w organizmie (egzogenne) mogą zakłócać procesy elektrofizjologiczne na skutek interferencji z prądami własnymi organizmu (endogennymi), a w przypadku prądów wielkiej częstotliwości (mego- lub gigahercowej) również obciążenie termiczne organizmu narażonego na pole-EM.

Przykładowo, gęstość prądu indukowanego ( $J$ ) przez wertykalne pole-M o indukcji ( $B$ ) w walcowym jednorodnym obiekcie o promieniu ( $r$ ) i przewodności ( $\sigma$ ) wyraża się wzorem:

$$J = \frac{r}{2} \sigma \frac{dB}{dt} \quad (3-4)$$

Zaindukowane wewnątrz organizmu prądy, zależnie od miejsca oddziaływania pola-EM i gęstości tego prądu, mogą spowodować od odczuwania mrowienia lub bólu do zaburzenia pracy serca. Przykładowe zestawienie gęstości prądów, przy jakich występują poszczególne skutki podano w tabeli 3-1.

<b>Tabela 3-1. Oddziaływanie prądów sinusoidalnie zmiennych małych częstotliwości na organizm człowieka (na podstawie [13])</b>	
Gęstość prądu $j$ , mA/m <sup>2</sup>	Skutki oddziaływania prądów sinusoidalnie zmiennych
1 ÷ 10	brak ustalonych skutków
10 ÷ 100	dobrze ustalone skutki oddziaływania na układ nerwowy, ustępujące po zakończeniu ekspozycji (np. wrażenia wzrokowe); uznawane za nieszkodliwe dla zdrowia
100 ÷ 1 000	możliwe niepożądane oddziaływanie na zdolność do wykonywania czynności zawodowych
	pobudzenie tkanki nerwowej (w centralnym układzie nerwowym) i mięśniowej; możliwe zagrożenie zdrowia
	możliwe oddziaływanie uniemożliwiające wykonanie czynności zawodowych
>1 000	dotatkowe skurcze serca, możliwe migotanie komór serca
	zagrożenie zdrowia i życia

1530

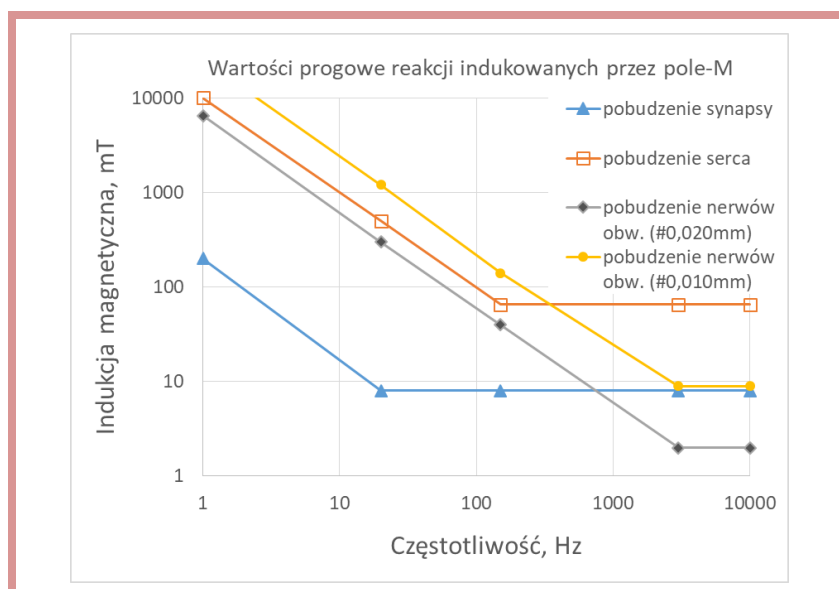
W zaleceniach międzynarodowych i krajowych przepisach bezpieczeństwa i higieny pracy, kryterium ograniczenia natężenia indukowanego pola-E ( $E_{ind}$ , V/m) lub gęstości prądu

indukowanego wewnątrz organizmu ( $J$ , w  $A/m^2$ ) jest podstawą ustalania dopuszczalnych wartości narażenia na pole-EM, określonych jako natężenie pola-M (lub indukcja magnetyczna) oraz natężenie pola-E niskich częstotliwości (mniejszych od 10 MHz) [23]. Do wyznaczenia wielkości prądów indukowanych wewnątrz organizmu człowieka w określonych warunkach ekspozycji stosuje się badania doświadczalne z zastosowaniem fantomów odwzorowujących właściwości elektryczne organizmu, pomiary prądów przepływających przez ochotników poddanych kontrolowanemu bezpiecznemu oddziaływaniu pola-EM oraz obliczenia modelowe (tzn. symulacje komputerowe z wykorzystaniem fantomów numerycznych). Najprostszy model człowieka, umożliwiający obliczenia analityczne, to jednorodny odcinek walca o wymiarach opisujących ciało człowieka i przewodności zgodnej z przewodnością właściwą tkanek dla rozpatrywanej częstotliwości pola (na przykład:  $\sigma = 0,2 \text{ S/m}^2$  - przewodność tkanki,  $r = 0,2 \text{ m}$  - promień przekroju modelu walcowego organizmu). Do bardziej szczegółowej analizy stosowane są modele anatomiczne, o kształcie odzwierciedlającym ciało człowieka i zróżnicowanych parametrach elektrycznych odpowiadających właściwościom poszczególnych tkanek. Do analizy poziomu zagrożeń z użyciem takiego modelu niezbędne jest zastosowanie symulacji komputerowych.

Omówione oddziaływanie na organizm człowieka prądów zaindukowanych podczas jego przebywania w obszarze zmiennego w czasie pola-M może służyć również do oceny skutków poruszania się w przestrzeni PMS. Rozpatrując charakterystykę ekspozycji obiektu w odniesieniu do lokalnego układu współrzędnych związanego z tym obiektem - ekspozycja obiektu nieruchomego w polu-M zmiennym jest tożsama z ekspozycją obiektu poruszającego się w PMS (jednorodnym lub niejednorodnym w przestrzeni, jak to jest na typowym stanowisku pracy, np. w otoczeniu magnesu skanera rezonansu magnetycznego). Poprawność takiej interpretacji odnośnie oceny poziomu narażenia ludzi na PMS potwierdzają zaobserwowane wrażenia wzrokowe (tzw. magnetofosfeny), dotyczące zarówno osób poruszających się w silnym PMS w pobliżu magnesów skanerów rezonansu magnetycznego, jak i osób przebywających w silnym polu-M zmiennym w czasie o częstotliwości ok. 20 Hz.

Negatywne skutki oddziaływania pola-EM na funkcjonowanie kanałów jonowych w organizmie człowieka rozważane jest również w kontekście oceniania zagrożeń wynikających z narażenia na silne pole-EM w środowisku pracy. Podczas oceniania zagrożeń elektromagnetycznych wynikających z narażenia na pole-M małych częstotliwości powinna być uwzględniona charakterystyka częstotliwościowa zjawisk bioelektrycznych polegających na indukowanej elektrostymulacji nerwów lub mięśni wskutek oddziaływania powstających w organizmie egzogenne pola-E i prądu elektrycznego. Kluczowe jest ocenienie, z odpowiednim marginesem bezpieczeństwa uwzględniającym niepewność danych i zróżnicowanie wrażliwości poszczególnych osób, czy oddziaływanie pola-M może

doprowadzić do pobudzenia tkanki nerwowej i mięśniowej prądami indukowanymi wewnątrz organizmu przez dynamiczne oddziaływanie pola magnetostatycznego (dPMS) lub pola-M zmiennego w czasie (PQS-M), (rys. 3-6). Omówiona charakterystyka procesów jonowych, zachodzących wskroś błony komórkowej, jest odzwierciedlona w częstotliwościowej zależności progowych poziomów pola-EM wywołujących poszczególne reakcje w organizmie narażonego człowieka.



Rys. 3-6. Wartości progowe reakcji w organizmie dorosłych ludzi przebywających w polu-M: pobudzenie mózgu (włókien nerwowych o średnicy 0,010 mm); pobudzenie nerwów obwodowych (włókien o średnicy 0,020 mm); pobudzenia serca [43]; pobudzenie synapsy [15] [archiwum własne]

1580

mogą mieć zróżnicowane konsekwencji biofizyczne. Wobec zasygnalizowanego również istotnego zróżnicowania okoliczności oddziaływania elektromagnetycznego w otoczeniu różnego typu źródeł PMS, rozważania dotyczące będących ich konsekwencją zagrożeń bezpieczeństwa i zdrowia pracujących oraz infrastruktury środowiska pracy powinny uwzględniać odpowiadającą im złożoną parametryzację warunków oddziaływania elektromagnetycznego w otoczeniu źródeł PMS oraz zróżnicowane kryteria oceny takich parametrów. Inaczej mówiąc konieczna jest multimodalna parametryzacja i ocena zagrożeń elektromagnetycznych związanych z użytkowaniem źródeł PMS w środowisku pracy.

1590