

## Rozdział do monografii nt. Koezystencja elektromagnetyczna:

### Parametryzacja zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w środowisku

Jolanta Karpowicz

10 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.

20 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.

30 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

40 zróznicowane 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 opisane 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 
$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (1-4)$$

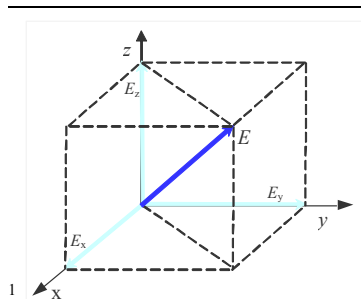
50 – prawo zachowania ładunku elektrycznego 
$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-5)$$

– 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:



<sup>1</sup> 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).

- $H$  – natężenie pola magnetycznego (pola-M), w amperach na metr, A/m  
 $B$  – indukcja magnetyczna, w teslach, T [ $T=(Vs)/m^2$ ]  
 $E$  – 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>  
 60  $\sigma$  – 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  
 70  $v$  – prędkość, w metrach na sekundę, m/s  
 $t$  – czas, w sekundach, s  
 $rot$  – rotacja wektora<sup>2</sup>  
 $div$  – dywergencja wektora<sup>3</sup>.

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 zależnością (1-9):

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

gdzie:

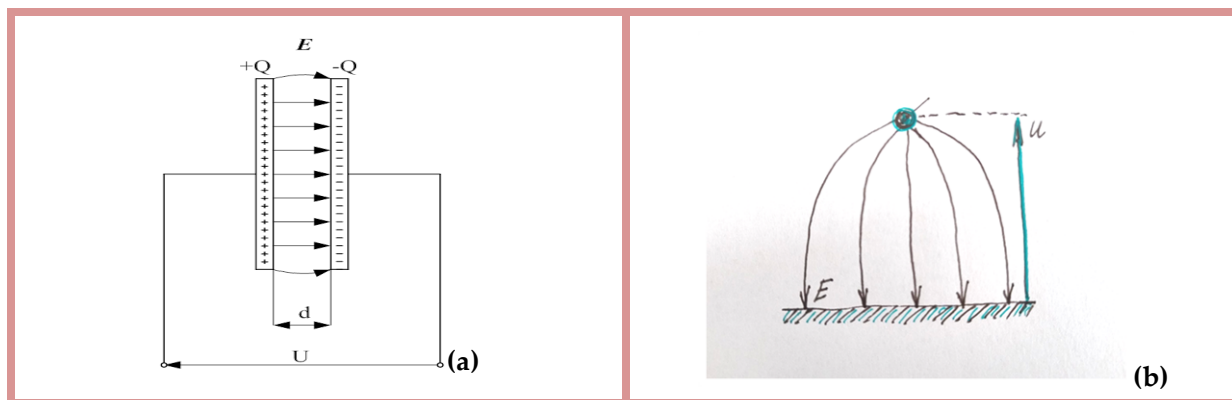
<sup>2</sup> Rotacja lub wirowość wektora – operator różniczkowy w teorii pola, który działając na pole wektorowe tworzy pole wektorowe wskazujące wirowanie (gęstość cyrkulacji) pola wyjściowego.

<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.

90

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

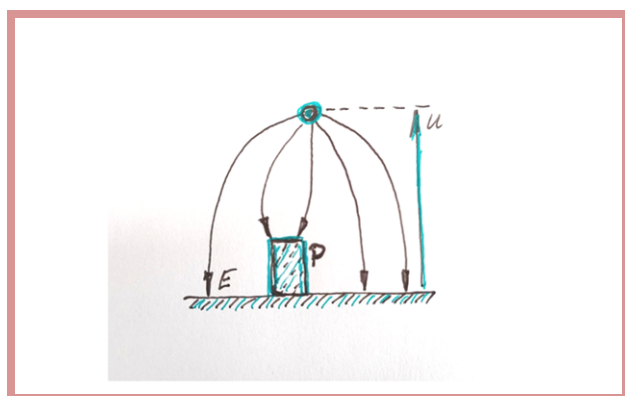
$d$  – odległość między płytami kondensatora, w m.



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

100

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.



*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]*

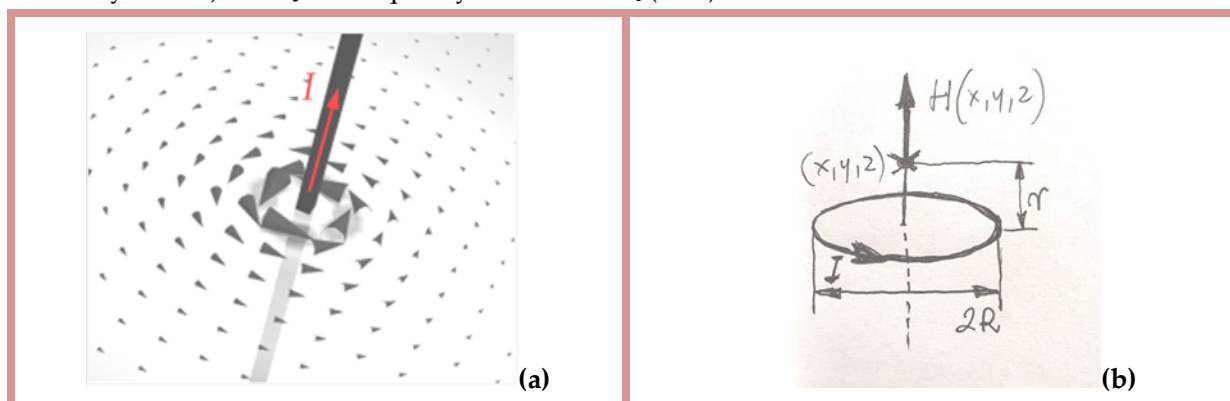
110 **Pole magnetyczne (pole-M)** reprezentuje oddziaływanie ładunków w ruchu (tzn. tworzących prąd elektryczny) lub magnesów trwałych (powstających dzięki namagnesowaniu obiektów z materiałów o specyficznych właściwościach magnetycznych wynikających m.in. z ich składu i sposobu wytwarzania). Przykładowo, 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:

120  $I$  – natężenie prądu w przewodzie, w A  
 $r$  – odległość miejsca obserwacji od przewodu, w m.

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]*

130

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

gdzie:

 $I$  – natężenie prądu w zwoju kołowym, w A $r$  – odległość miejsca obserwacji w osi zwoju kołowego, liczona od płaszczyzny tego zwoju, w m $R$  – promień zwoju kołowego.

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

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

140

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).

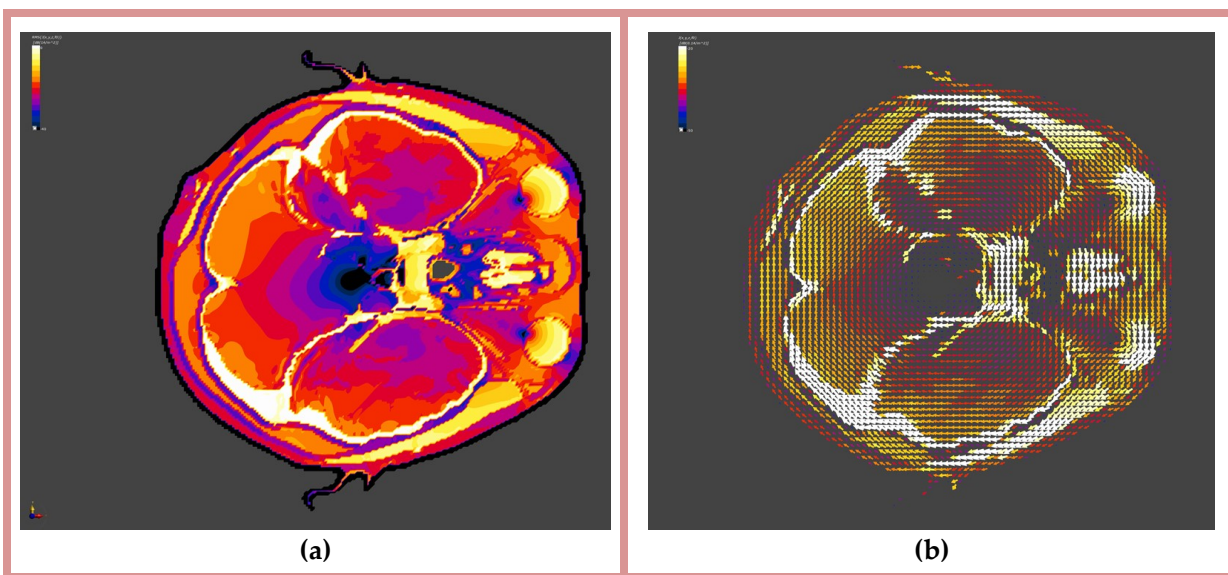
Przeciwnie do pola-E, rozkład przestrzenny pola-M jest jedynie nieznacznie modyfikowany przez obiekty materialne wprowadzone do środowiska, o ile nie są to obiekty o specyficznych cechach materiałowych, takich jak nadprzewodniki czy ferrimagnetyki.

150

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 obiekty 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).

160

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 obiekty materialne, również na organizm człowieka. Obliczenia dotyczące skutków 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]*

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
- 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.

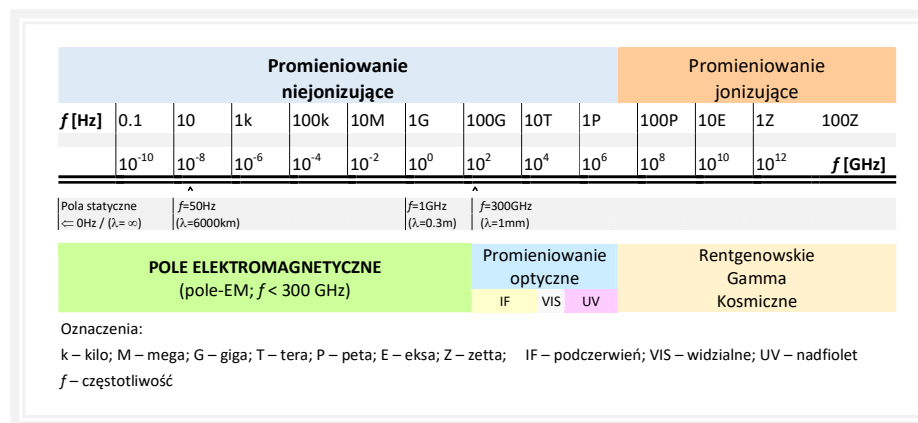
Uwaga: W okolicznościach umożliwiających powstawanie wspomnianych wtórnych źródeł pola-EM w środowisku, lokalnie zależność poziomu pola-EM od odległości od jego źródła może być niemonotoniczna, tzn. pomimo zwiększania się odległości od źródła również poziom pola-EM może narastać - na przykład w razie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

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

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 niejonizujące 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).

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

220 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.



230

Rys. 1-5. Widmo częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego:

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

- PMS – pole magnetostatyczne ( $f \leq 5\text{ Hz}$ )
- PES – pole elektrostatyczne ( $f \leq 5\text{ Hz}$ )
- 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)

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

250 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.

Wokół ładunków nieruchomych albo przepływających w sposób ustalony (prąd stały) występują pola-EM niezmiennie w czasie, określane jako statyczne: PES i PMS. Natomiast

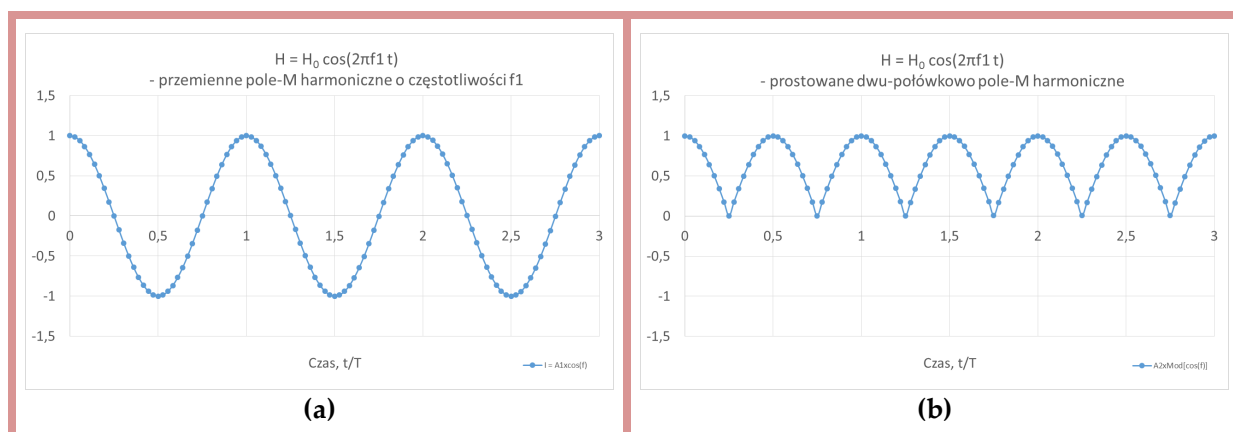
jeżeli poziom pola-EM jest okresowo zmienny w czasie i ma przebieg sinusoidalny to nazywane jest ono polem-EM harmonicznym. W elektrotechnice prądy takie powszechnie oznaczane są skrótem AC (ang. *alternating current*). Przebiegi harmoniczne (przemienne) wytwarzane są np. przez prądnice prądu przemiennego. 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.

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):

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



*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]*

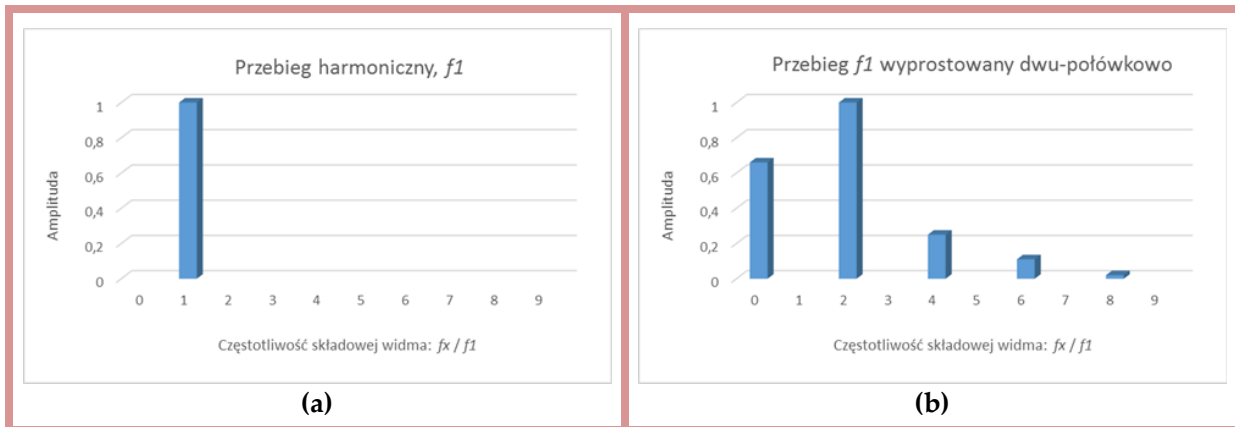
280

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 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.

290

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).

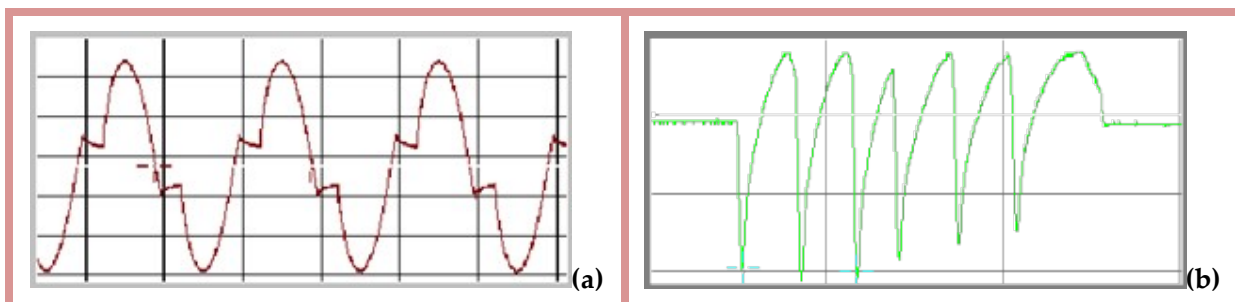
300



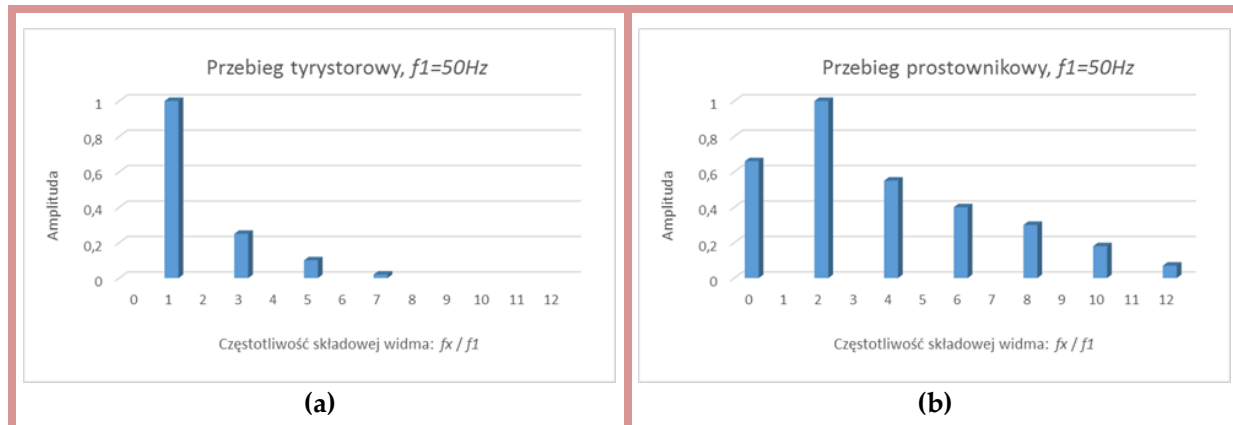
310 Rys. 1-7. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe pola-M emitowanego wskutek przepływania w przewodzie przemiennego, harmonicznego prądu o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz – jak na rys. 1-6.a (a) i dwu-połówkowego prostowania tego prądu, tworzącego przebieg o częstotliwości  $f_2 = 100$  Hz – jak na rys.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

Niedoskonałości techniczne urządzeń i instalacji elektrycznych są ponadto przyczyną zaburzenia przebiegów harmonicznych, odzwierciedlanego w widmie amplitudowo-częstotliwościowym dodatkowymi składowymi o różnych częstotliwościach i amplitudach. 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.

320



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]



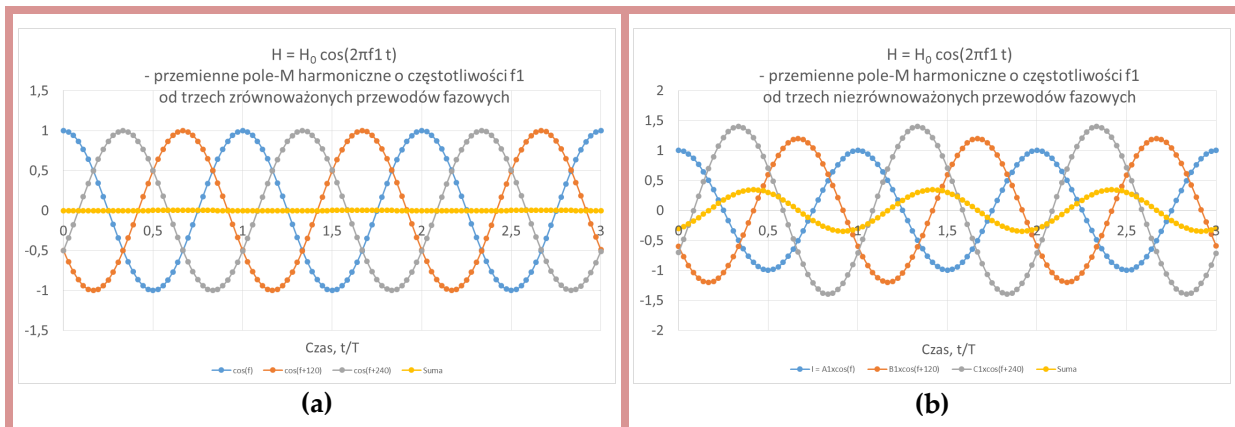
Rys. 1-9. Widmo amplitudowo-częstotliwościowe pola-M zarejestrowanego w otoczeniu przemysłowego układu tyrystorowego (a) i prostownikowego (b), zasilanych z sieci elektroenergetycznej jedno-fazowej 50 Hz - jak na rys. 1-8 [archiwum własne]

330 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 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

340 otoczeniu takiej instalacji odległości od rozpatrywanego miejsca do poszczególnych 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

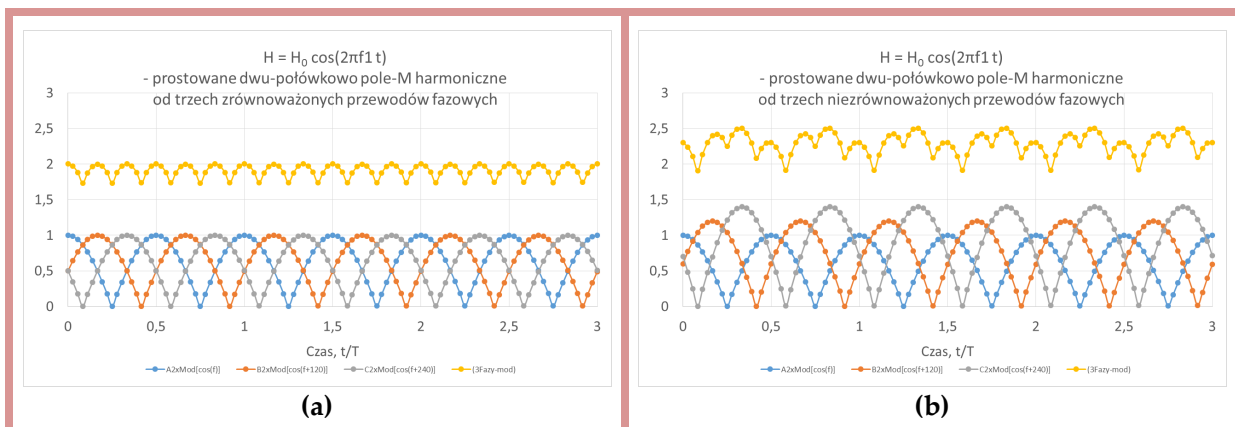
350 zjawisko zachodzi nawet przy przewodach fazowych znajdujących się w różnych miejscach, jedynie arytmetyczne sumowanie amplitud kolinearnych wektorów pola-M pochodzącego

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).



360 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) zbliżonej do podwojonej amplitudy przebiegu fazowego – zależnie od stopnia zrównoważenia obciążenia prądowego poszczególnych przewodów fazowych (rys. 1-11).

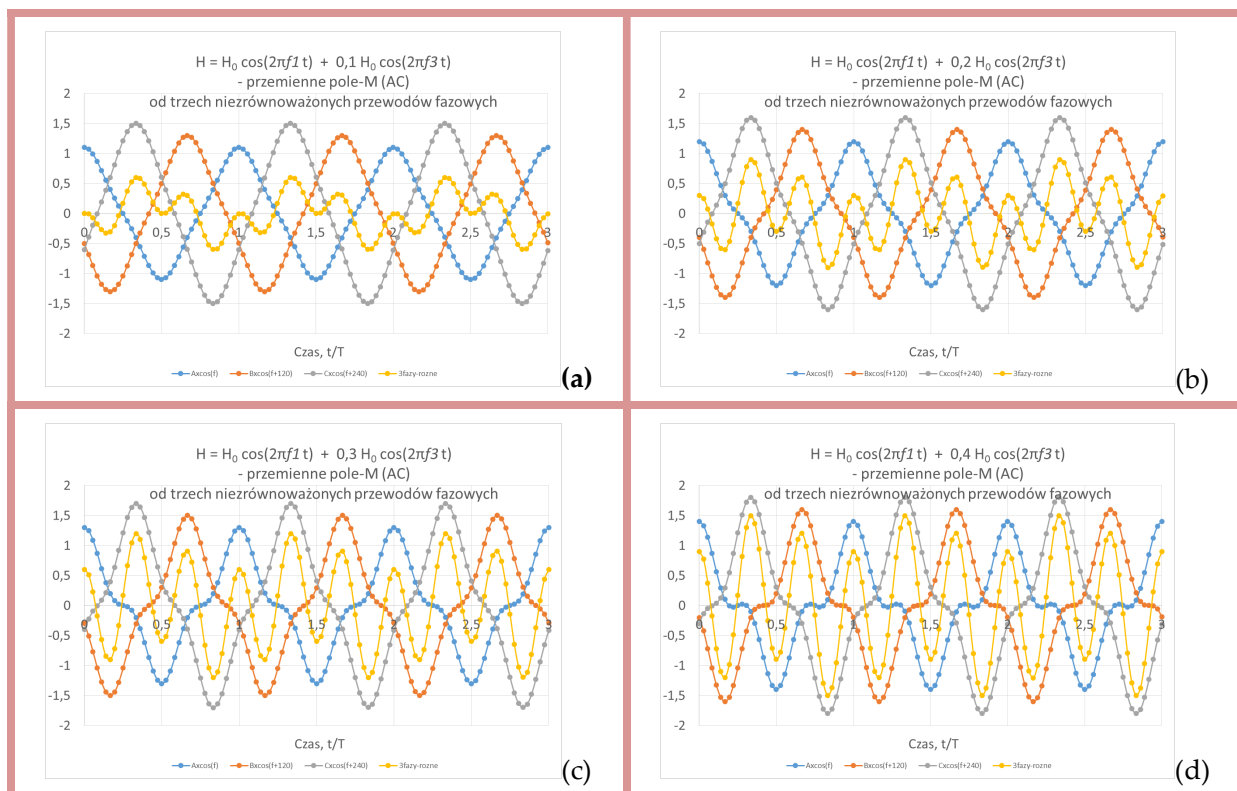


370

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

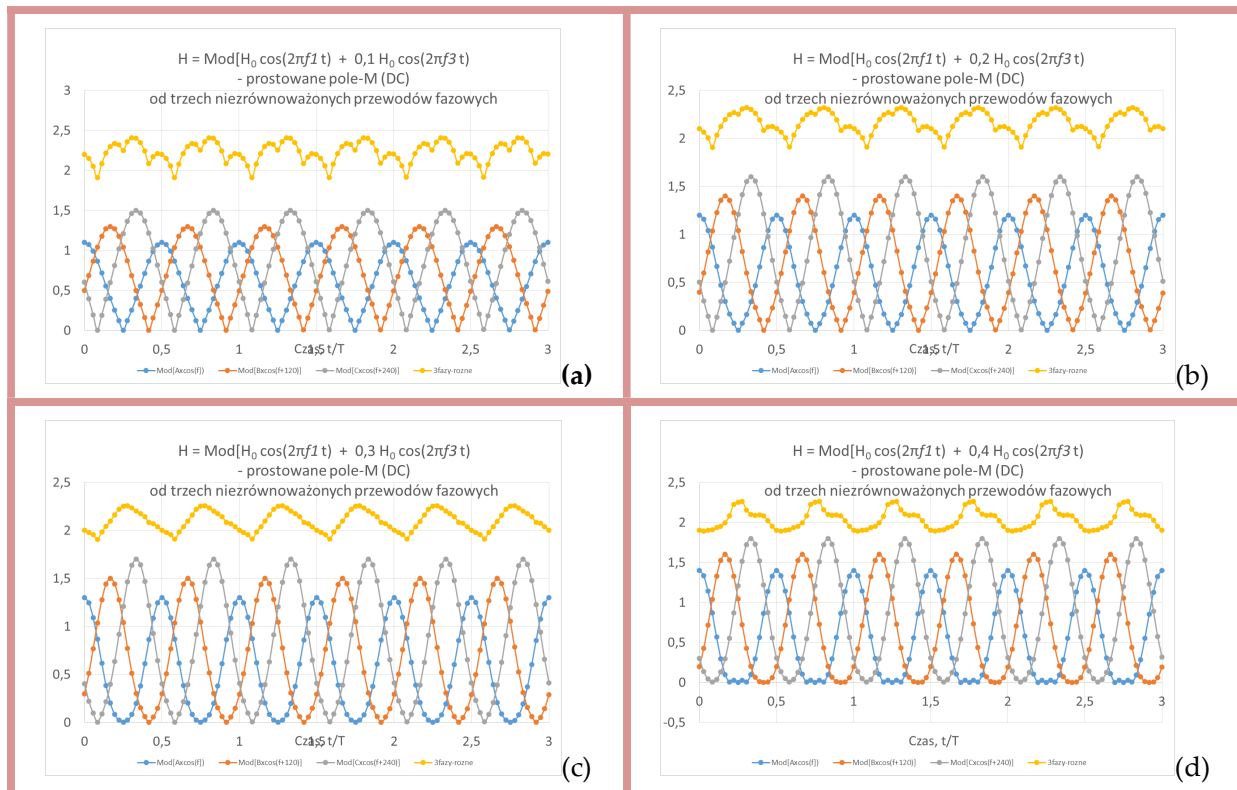
Również w razie zniekształceń harmoniczných fazowych prądów przemiennych (AC), w otoczeniu kabli zasilania trój-fazowego pojawia się znacząco odkształcony przebiegu pola-M (rys. 1-12). Jeśli jest to instalacja trój-fazowa, której prąd podlega prostowaniu (DC), również pojawia się znacząco zniekształcony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

380



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 nierównoważonym

obciążeniu prądowym przewodów fazowych, a zróżnicowanej 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]

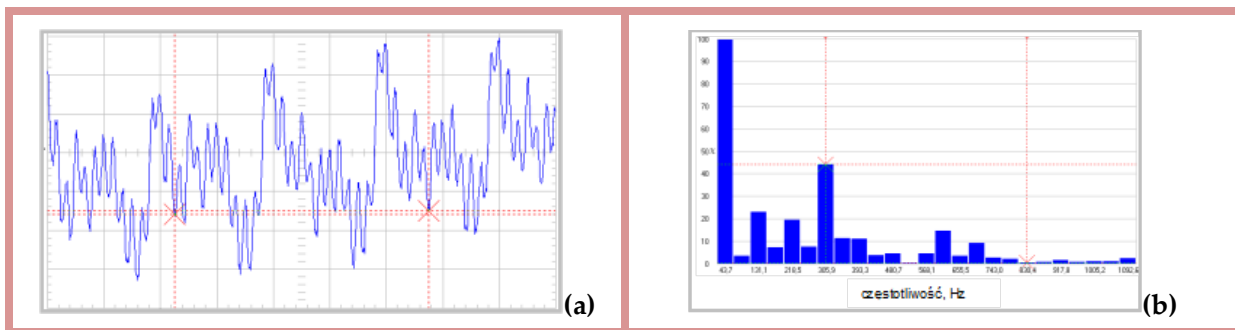


390 Rys. 1-13. Zmienność w czasie pola-M emitowanego wskutek przepływu w przewodach trzy-fazowej instalacji elektrycznej prądu przemiennego, harmonicznego o częstotliwości  $f_1 = 50$  Hz ze zniekształceniami wskutek zawartości 3-ciej harmonicznej  $f_3 = 150$  Hz podlegającego prostowaniu dwu-połówkowemu, przy nierównoważonym obciążeniu prądowym przewodów fazowych, a zróżnicowanej 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]

400 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

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 objekty materialne modyfikują rozkład przestrzenny pola-E.

- 410 Z tego względu w badaniach dotyczących oddziaływania pola-EM na ludzi i inne objekty 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].



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]

- 420 Oprócz parametrów zmienności przebiegu w czasie i jego widma amplitudowo-częstotliwościowego, ze względu na skutki oddziaływania na objekty 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):

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

430 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 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  
440 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 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  
450 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 przebiegu prostowanego charakteryzuje składową stałą tego przebiegu, skorelowaną ze skutkami oddziaływania pola magnetostatycznego 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):

$$460 \quad X_{\text{RMS}} = 0,7X_0 = 0,7X_P \quad (1-16)$$

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 wartość  $P$  mierzonego sygnału, a jedynie skalowana do wskazań parametru, który jest

oczekiwany przez jej użytkownika. Zależność (1-16) w badaniach zjawisk harmoniczych 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. 470 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 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. 480 metodami oscyloskopowymi. Na przykład, pole-M o przebiegu złożonym ze składowych harmoniczych 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:

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

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 490 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. 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 500 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).

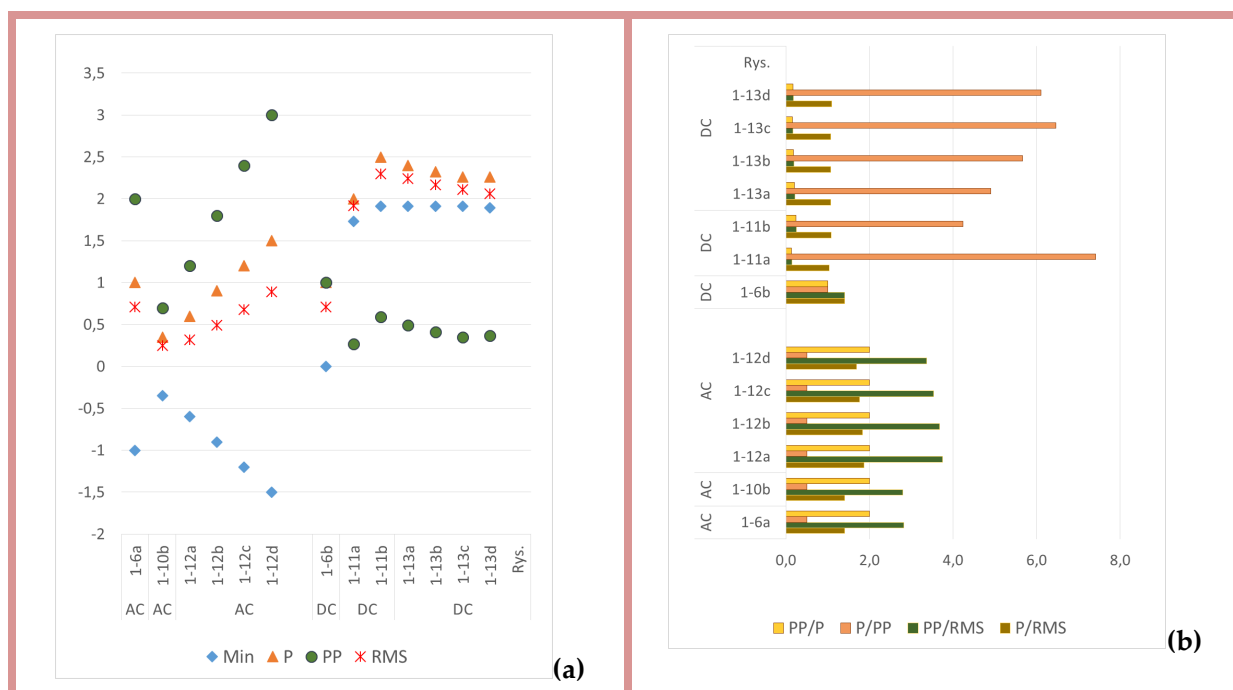
Szerokopasmowe mierniki różnią się również charakterystyką widmową czułości dla poszczególnych składowych częstotliwościowych – zarówno szerokością pasma częstotliwości, w którym czułość miernika jest stała (tzw. pasmo pomiarowe), jak i stopniem obniżenia (lub zwiększenia) czułości dotyczącej składowych 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 przemiennie pole-EM mogą istotnie odbiegać od wyników podobnej oceny narażenia na pole-EM

540

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.



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]

550

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

560 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 skorelowanych ze sobą parametrów przebiegów harmonicznym, 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

570 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.

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]:

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

580 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.

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>

590 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].

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

600

#### 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.

610

- 620 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:

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

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].

- 630 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).

<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:

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

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 środków technicznych weryfikacji empirycznej do jakiej odległości od źródeł pola-EM o częstotliwości przekraczającej 1 GHz sięga w realnych warunkach pole-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).

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).

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].

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

690 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 orientacyjne zasięgi stref; przy źródłach pola-EM mogą występować warunki wymagające indywidualnego przeanalizowania [1.1, 1.2]			

700 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-EM o częstotliwości przekraczającej 1 GHz, określone w niektórych

710

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).

**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: $\lambda_{[m]} \times f_{[MHz]} = 300$ $\lambda_{[mm]} \times f_{[GHz]} = 300$
zróznicowanie 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

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 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.

## 730 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.
- [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
- 740 [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.
- [1.6.] Rawa H. (1994). Elektryczność i magnetyzm w technice, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1994
- 750 [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

- [1.9.] PN-EN 50492: 2013 Norma podstawowa dotycząca miejscowych pomiarów natężeń pól elektromagnetycznych związanych z ekspozycją ludzi w otoczeniu stacji bazowych.