

POMIARY PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH (1)

Pola elektromagnetyczne, potocznie zwane "promieniowaniem" towarzyszą nam zarówno w środowisku domowym, jak i w środowisku pracy. W niniejszym artykule są krótko omówione rodzaje pól elektromagnetycznych, najczęściej spotykane źródła pól, oraz typowe mierniki. Problem szkodliwości zdrowotnej tych pól w świetle ostatnich badań i obowiązujących przepisów jest przedmiotem kolejnego artykułu, który wkrótce będzie opublikowany w ReAV.

Co to są pola elektromagnetyczne

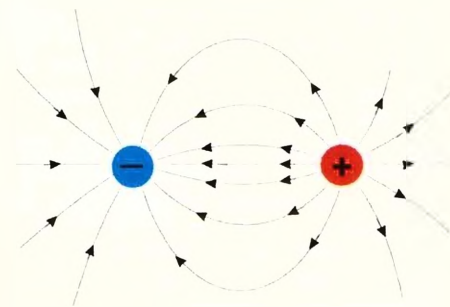
Pole jest stanem przestrzeni, w której istnieje energia, a więc jest jedną z form energii. Pola elektromagnetyczne (PEM) mogą być stałe lub zmienne w czasie. Zmienność pól wyraża się przez liczbę zmian na sekundę, czyli *częstotliwość* f , wyrażaną w hercach (Hz) lub w jednostkach pochodnych (kHz, MHz, GHz). *Długość fali* dla pól zmiennych w próżni wyraża się wzorem $\lambda = c/f$, gdzie c jest szybkością światła, równą w przybliżeniu 300 000 kilometrów na sekundę ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Pola elektromagnetyczne (PEM) związane są z obecnością i ruchem ładunków elektrycznych. Wyróżniamy pola *elektryczne* E – wywołane obecnością przeciwstawnych ładunków elektrycznych, czyli różnicą potencjałów bądź napięciem elektrycznym (rys. 1) i pola *magnetyczne* M – wywołane ruchem ładunków elektrycznych, czyli prądem elektrycznym (rys. 2), które łącznie tworzą pola *elektromagnetyczne*. Zmienność pól E powodowana jest zmianami biegunowości ładunków elektrycznych, a zmienność pól M wywo-

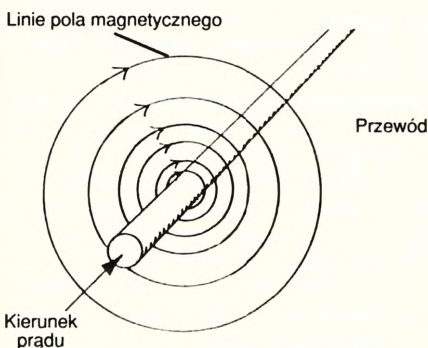
łana jest zmianami kierunku ruchu tych ładunków. W popularnym ujęciu, pola stałe i o małych częstotliwościach można sobie wyobrazić jako "otoczkę" lub "aurę" wokół ich źródeł. Pola E można sobie wyobrazić w postaci snopów linii sił pola elektrycznego, a pola M przez zamknięte pętle linii pola magnetycznego. Linie te mają największą gęstość (są "najsilniejsze") przy źródle i słabną w miarę oddalania się od niego. Może istnieć tylko pole E (jeśli nie ma prądu wywołującego pole M). Jeśli jednak jest pole M , to występuje również pole E , gdyż nie ma prądu bez napięcia. Wielkość pola w dowolnym punkcie wyraża się przez *natężenie* pola. Stosowane miary mogą się wydawać bardzo specjalistyczne, lecz w istocie są one analogiczne do znanych miar, stosowanych do określenia wagi, temperatury lub odległości. Natężenie E pola E mierzy się w jednostkach "wolt na metr" (V/m) lub "kilowolt na metr" (1 kV/m = 1000 V/m), a natężenie H pola M w jednostkach "amper na metr" (A/m).

Jednostką strumienia magnetycznego jest *weber* (1 Wb = 1 V · 1 s). Gęstość linii sił pola magnetycznego, czyli *indukcję magnetyczną* B , wyraża się w gausach (G) lub teslach (T):

$$1 \text{ T} = 10000 \text{ G}, \quad 1 \text{ G} = 0,0001 \text{ T}$$



Rys. 1. Pole elektryczne między dwoma przeciwnie naładowanymi biegunami



Rys. 2. Pole magnetyczne wokół przewodu z prądem

Jedna tysięczna gausa to miligausa (1 mG = 1/1000 G). Jedna tysięczna tesla to militesla (1 mT = 1/1000 T), jedna milionowa tesla to mikrotesla (1 μ T = 1/1000 mT), a jedna miliardowa tesla to nanotesla (1 nT = 1/1000 μ T). Wynika stąd, że 1 mG = 100 nT = 0,1 μ T.

Natężenie H pola magnetycznego M jest miarą siły pola wytwarzanego przez prąd elektryczny lub magnes stały, i wyraża zdolność do wytworzenia indukcji pola magnetycznego B . Należy podkreślić, że natężenie pola magnetycznego H i gęstość strumienia magnetycznego B nie oznaczają tego samego. Tylko w ośrodku zbliżonym do próżni obowiązuje związek

$$B [\text{T}] = 4\pi \cdot 10^7 H [\text{A/m}] \\ \approx 12,566 \cdot 10^7 H [\text{A/m}]$$

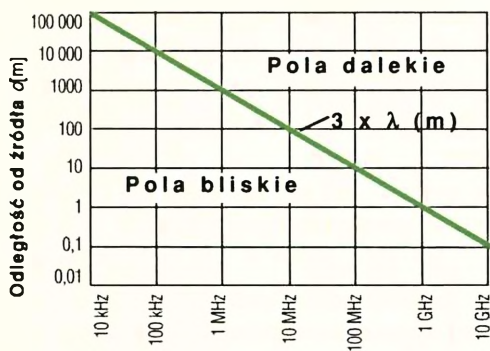
$$\text{czyli } B [\mu\text{T}] \approx 1,26 H [\text{A/m}]$$

Oznacza to, że wtedy 1 A/m \approx 1,26 μ T i 1 μ T \approx 0,796 A/m.

Pola EM są *kierunkowe* w tym sensie, że w każdym punkcie pola, który jest punktem w przestrzeni trójwymiarowej, występują odpowiednio trzy składowe natężenia pola. Podobnie szybkość samolotu wyraża się przez szybkość na wprost, w bok i w pionie. Natężenie pola wypadkowego stanowi pierwiastek z sumy kwadratów tych składowych. Na przykład, do określenia wielkości indukcji magnetycznej B w określonym punkcie przestrzeni trzeba wykonać trzy pomiary wzajemnie prostopadłych składowych B_x , B_y , B_z i obliczyć:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$$

Zmienne pola EM występują jako pola *bliskie* i *dalekie*, zależnie od częstotliwości pola oraz rozmiarów i odległości od struktury wytwarzającej pole, czyli radiatora. Zjawisko i energia *promieniowania* występuje tylko w polach dalekich, gdy rozmiar L radiatora jest porównywalny z długością fali, czyli gdy $L > \lambda/10$. Dość płynną granicę między tymi kategoriami (rys. 3) wyznacza odległość d od źródła, równa w dużym przybliżeniu (bez uwzględnienia rozmiarów radiatora) trzem długościom fali, czyli $d \approx 1000/f$, gdzie d wyraża się w metrach i f w megahercach (MHz). W praktyce okazuje się, że poniżej pewnej częstotliwości granicznej (np. 30 MHz) częściej spotykamy pola bliskie, a powyżej pola dalekie, czyli "obszar promieniowania". W polach bliskich trzeba wyróżniać (i odrębnie mierzyć) obydwie składowe natężenia pola: elektryczną E i magnetyczną M , natomiast w polach dalekich (rys. 4) składowe te są już tak ściśle wzajemnie związane, że wystarczy pomiar tylko jednej składowej. Wtedy natężenie pól EM wyraża się naj-



Rys. 3. Zgrubny podział pól EM na bliskie i dalekie zależnie od częstotliwości

częściej w jednostkach gęstości (strumienia) mocy S : "wat na metr kwadratowy" (W/m^2). Odpowiednie wzory są następujące:

$$S [W/m^2] = E [V/m] \cdot H [A/m],$$

$$E [V/m] = Z_0 \cdot H [A/m],$$

gdzie $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} \cong 377 \Omega$ jest impedancją falową próżni.

Jakie są źródła pól elektromagnetycznych

Zakres częstotliwości pól EM, istniejących w naszej biosferze, jest bardzo szeroki (rys. 5). Umownie wyróżnia się dwa zakresy, określane jako "promieniowanie jonizujące" i "niejonizujące". Do pierwszego zakresu zalicza się promieniowanie o najwyższych energiach, które może spowodować jonizację cząsteczek materii: rentgenowskie (X), radioaktywne (γ) i kosmiczne. Do drugiego zakresu należą praktycznie wszystkie pozostałe pola zmienne, które nie mają wystarczająco dużej energii, aby powodować jonizację. Trzeba jednak zaznaczyć, że przy najmniejszych częstotliwościach (szczególnie przy 50 Hz) mamy do czynienia z polami bliskimi, w których nie występuje zjawisko promieniowania niejonizującego.

Naturalne pola EM występują w naszej biosferze i we wszystkich żywych istotach. Szczególnie przy przesyłaniu informacji w systemach nerwowych u ludzi i zwierząt występują słabe PEM. Doskonale jest znane stałe ziemskie pole M wykrywane kompasem. Bardzo silne

pola E występują podczas burzy. Powstają wtedy udarowe PEM o dużym natężeniu i dużym zakresie częstotliwości. Efektem tych zjawisk są zakłócenia (szumy lub trzaski) zauważalne w odbiorze radiowym i telewizyjnym. Pola sztuczne są wytwarzane przez wszelkiego rodzaju urządzenia elektryczne i przewody zasilające, zarówno w środowisku pracy jak i w środowisku domowym. Często występują stałe w czasie pola E (elektrostatyczne). Typowymi źródłami takich pól E są kineskopy monitorów komputerowych i telewizorów, które wymagają zasilania wysokim napięciem statym. Najczęściej jednak spotykamy się z polami zmiennymi o małej częstotliwości równej 50 Hz, cechującej sieć zasilającą nasze domy i mieszkania. Długość fali o częstotliwości 50 Hz wynosi $3 \cdot 10^8 / 50$ metrów, czyli ok. 6000 kilometrów. Pola EM o tak małej częstotliwości należą zatem do kategorii pól bliskich, w których trzeba wyróżniać dwie odrębne składowe: elektryczną E i magnetyczną M.

Jak wiemy, pole elektryczne E jest wynikiem obecności napięcia w urządzeniu elektrycznym lub przewodzie doprowadzającym. Stąd wokół wylądzonej lampki elektrycznej też występuje pole E, jeśli jej przewód jest przyłączony do gniazdka w ścianie. Wokół tego przewodu też występuje pole E, podobnie jak wokół przewodów i gniazdek zainstalowanych w ścianach. Im wyższe napięcie, tym większe natężenie pola E. Przy typowym napięciu zasilania w naszych domach, równym 220 voltów (V), natężenia te są niewielkie (1 do 100 V/m), natomiast w pobliżu linii wysokiego napięcia są znacznie większe. Na przykład, pod linią wysokiego napięcia 500 kV występuje natężenie pola E równe ok. 9 kV/m na wysokości jednego metra nad ziemią.

Linie wysokiego napięcia wytwarzają również w swym otoczeniu dość znaczne pole M. Pod linią, na wysokości jednego metra nad ziemią, osiąga ono wartości $10+30 \mu T$, zależnie od wartości prądu w linii. Trzeba jednak zaznaczyć, że wiele popularnych, domowych urządzeń elektrycznych powszechnego użytku wytwarza w bezpośredniej bliskości (a tak się używa gólkarki i suszarki) pola M jeszcze większe niż linie wysokiego napięcia. Są to jednak z reguły urządzenia o sporadycznych, krótkotrwałych zastosowaniach.

Źródłami dłużej działających pól M o podwyższonym natężeniu są różnego rodzaju piecyki elektryczne, oraz koce i poduszki elektryczne. Te ostatnie są stosowane bezpośrednio blisko ciała, gdzie wytwarzają dość duże natężenie pola M ($1+5 \mu T$).

W niektórych blokach mieszkalnych zwiększone natężenie pola M o wielkości $1+10 \mu T$ często występuje w mieszkaniach umieszczonych bezpośrednio nad transformatorami (zazwyczaj na I piętrze). Kable zasilające blok są często przymocowane na suficie w piwnicy bloku, co powoduje zwiększone pola M ($1+3 \mu T$ na wysokości 30 cm nad podłogą) w parterowych lokalach mieszkalnych, znajdujących się bezpośrednio nad tymi kablami. Największe natężenie występuje przy najwięk-

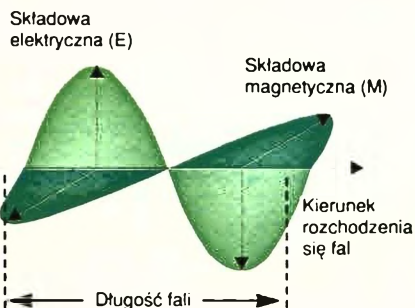
szym prądzie obciążenia, a więc przeważnie wieczorem.

Innym źródłem podwyższonych pól M w warunkach domowych mogą być instalacje elektryczne ogrzewania podłogowego. W takich instalacjach stosuje się dwa zasadnicze rodzaje kabli grzejnych: jedнопrzewodowe kable zasilane dwustronnie i dwuprzewodowe kable zasilane jednostronnie (gdy po drugiej stronie kabla przewody grzejne są zwarte – rys. 6). Przez każdy elektryczny przewód grzejny płynie podczas pracy dość duży prąd, który wytwarza wokół przewodu zmienne pole M. Pole to można sobie wyobrazić w kształcie walcowatego "płaszczka" otaczającego przewód na całej długości. Natężenie pola (czyli "gęstość" tego "płaszczka") silnie maleje ze wzrostem odległości od przewodu. Na przykład, indukcja magnetyczna mierzona na wysokości 5 cm nad przewodem zasilanym dwustronnie wynosi zazwyczaj $10+25 \mu T$, a przy 100 cm może sięgać $0,5+1,5 \mu T$. W kablach zasilanych jednostronnie, w obydwu biegnących obok siebie przewodach kabla płynie ten sam prąd, lecz w przeciwnych kierunkach. Rezultatem tego jest silne zmniejszenie "płaszczka" pola M wokół kabla, gdyż pole z jednego przewodu jest w znacznej mierze kompensowane przez pole z drugiego przewodu. Wtedy typowe natężenia pola M wynoszą ok. $0,4 \mu T$ (5 cm) i ok. $0,2 \mu T$ (1 m). Ostatni wynik stanowi wartość zbliżoną do "tła" pomiarowego, które wynosi ok. $0,1 \mu T$.

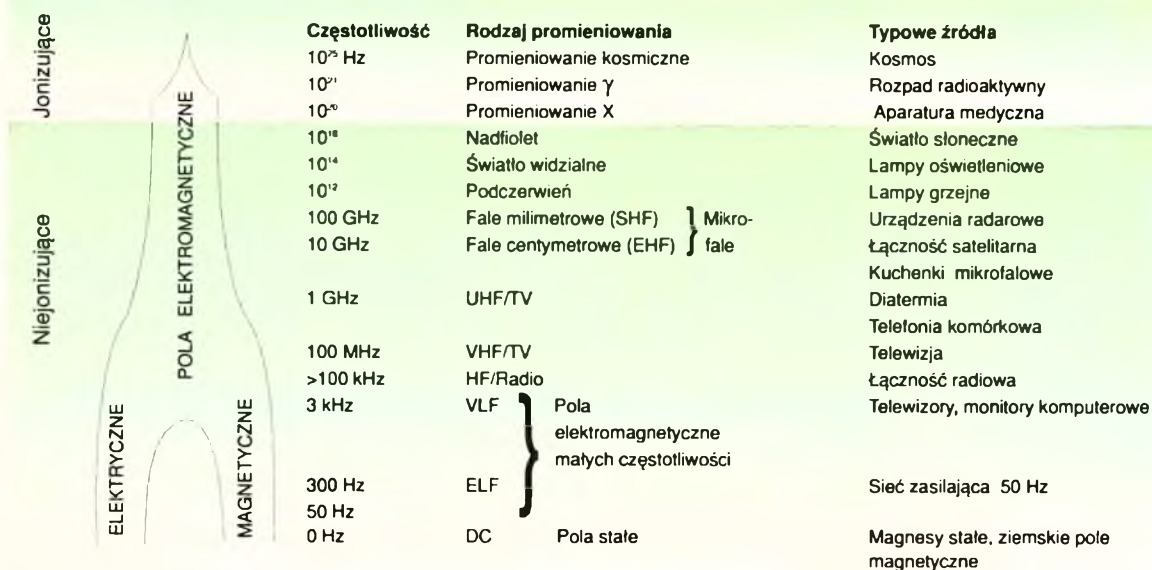
Im większa jest moc pracującego urządzenia (np. transformatora), tym większy płynie prąd i tym większe jest pole M wytwarzane wokół tego urządzenia (i w pobliżu kabla zasilającego). Urządzenie nie pracujące (wylądzone) nie wytwarza żadnego pola M.

W środowisku mieszkalnym występują również pola EM o częstotliwościach większych niż 50 Hz. Monitory komputerowe i telewizory wytwarzają pola EM nie tylko o częstotliwości 50 Hz, lecz również o częstotliwościach większych, sięgających 100 kHz. Pola te nie są wytwarzane przez ekran, lecz przez wewnętrzne urządzenia elektroniczne. Dlatego pola te są największe z tyłu i z boków monitorów (telewizorów), a nie z przodu. Popularne w Polsce filtry, zakładane na ekrany monitorów komputerowych, zupełnie nie tłumią zmiennych pól M i z tego punktu widzenia ich stosowanie nie ma sensu. Filtry mogą być pomocne do tłumienia niewielkich pól E (stałych i zmiennych), lecz przede wszystkim do poprawy kontrastu i widzialności ekranu przy zewnętrznym oświetleniu. Trzeba zaznaczyć, że praktycznie wszystkie obecnie wytwarzane monitory komputerowe są tak skonstruowane, że wytwarzane przez nie pola EM są z przodu (typowo w odległości 50 cm od użytkownika) znikomo małe i spełniają wymagania najostrzejszych norm (typowe oznaczenie: LR – Low Radiation). Nie należy jednak dłużej przebywać bezpośrednio blisko tyłu lub boku pracującego monitora lub telewizora.

Warto dodać, że monitory komputerowe i telewizory też podlegają wpływowi zewnętrznych



Rys. 4. W polu dalekim obydwie składowe pola EM są ze sobą ściśle związane



Rys. 5. Spektrum elektromagnetyczne

pól M (na przykład pochodzących od transformatora na niższej kondygnacji), co się objawia mniej lub bardziej widocznym wyraźnym drżeniem obrazu. Efekt ten jest już zazwyczaj widoczny przy natężeniu pola M powyżej $3 \mu\text{T}$. Jeszcze większe częstotliwości mają pola wokół anten nadawczych urządzeń radiowych

i telewizyjnych, a także wokół anten stacji bazowych telefonii komórkowej i w pobliżu naszych telefonów komórkowych. W telefonii komórkowej GSM najczęściej stosowana jest częstotliwość ok. 900 MHz, a w systemie DCT ok. 1800 MHz. Charakterystyki anten nadawczych GSM są takie, że największe natężenie

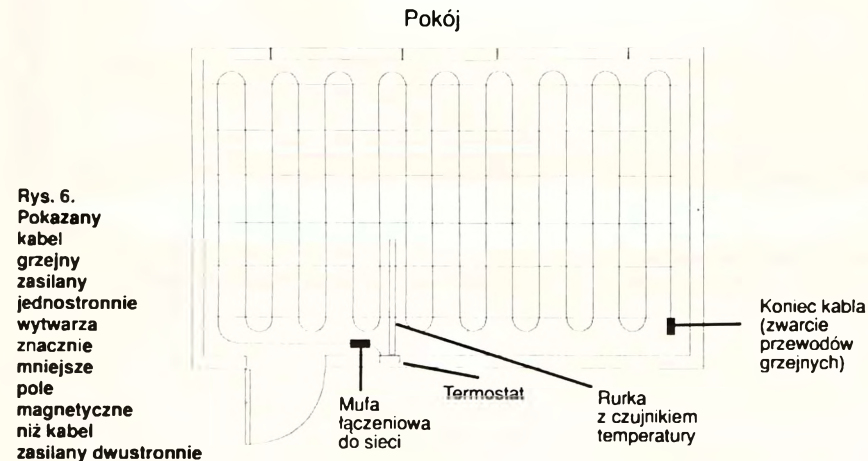
Relatywnie bardzo wąski wycinek częstotliwości zajmuje pasmo fal widzialnych przez człowieka, obejmujące mniej niż jeden rząd wielkości (od $4,3 \cdot 10^{14}$ Hz do $1,3 \cdot 10^{15}$ Hz) z zakresu 24 rządów wielkości częstotliwości fal znanych w naturze. Wynika stąd wniosek, że otaczający nas świat w istocie "wygląda" całkiem inaczej, tylko my tego nie widzimy. Innymi słowy, gdybyśmy mogli rozszerzyć tę "szparkę" zakresu częstotliwości, przez którą patrzymy na świat, to wyglądałby on może nie piękniej, ale na pewno pełniej. Przykładem takich starań są konwertery podczerwieni, stosowane w kamerach termowizyjnych i noktowizorach. Umożliwiają one konwersję promieniowania z pewnego wycinka częstotliwości z pasma podczerwieni na pasmo widzialne. Już wtedy można zauważyć szereg nowych zjawisk w otaczającym nas świecie. A co by było, gdyby się udało przetworzyć na światło widzialne szerszy zakres częstotliwości poniżej i powyżej pasma widzialnego?

W drugiej części artykułu (w nr 8/99 ReAV) będą omówione różne rodzaje mierników pól elektromagnetycznych.

Józef Kalisz

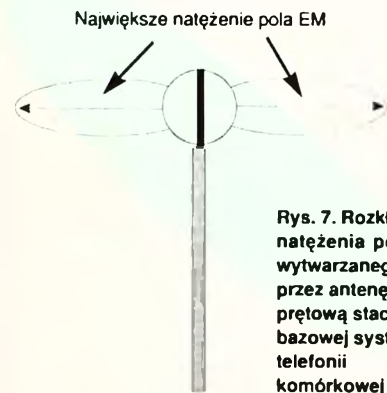
LITERATURA

- [1] Z. Grabarczyk: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu 0-300 GHz, w książce Zagrożenia elektromagnetyczne, Centrum Edukacyjne, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, 1997
- [2] M.G. Morgan: Measuring power-frequency fields, Carnegie Mellon University, 1992; Part 2: What can we conclude from measurements of power-frequency fields?, Carnegie Mellon University, 1993
- [3] H. Trzaska: Pomiar pól elektromagnetycznych do celów ochrony pracy i ochrony środowiska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996
- [4] J. Kalisz: Mierniki do pomiaru szkodliwych pól elektromagnetycznych, Bezpieczeństwo Pracy, nr 4/1995



Rys. 6. Pokazany kabel grzejny zasilany jednostronnie wytwarza znacznie mniejsze pole magnetyczne niż kabel zasilany dwustronnie

pola jest kierowane poziomo, czyli w kierunku prostopadłym do osi pionowego pręta antenowego (rys. 7). Im mniejszy jest ten kąt, tym mniejsze natężenie (przy stałej odległości). Anteny są umieszczane zgodnie z przepisami w miejscach odpowiednio oddalonych od miejsc przebywania ludzi, którzy znajdują się w zasięgu pól dalekich o nieznacznym natężeniu. Natomiast anteny telefonów komórkowych wytwarzają pola bliskie w obrębie głowy i energia absorbowana wewnątrz głowy użytkownika może być znacznie wyższa. Dotyczy to również domowych telefonów bezprzewodowych (pracujących na częstotliwościach ok. 50 MHz lub ok. 900 MHz) oraz wszelkich innych radiotelefonów, w tym przenośnych aparatów radioamatorskich, pracujących w pasmach 144 i 430 MHz.



Rys. 7. Rozkład natężenia pola EM wytwarzanego przez antenę prętową stacji bazowej systemu telefonii komórkowej

POMIARY PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH (2)

Mierniki pól elektromagnetycznych

Prymitywne "wykrycie" pól elektromagnetycznych, na przykład pochodzących od telewizora, można spróbować wykonać przez zbliżenie do obiektu na przykład radia tranzystorowego. Brzęczenie i piszczenie radia może czasem "wskazywać" na istnienie pola. Oczywiście nie są to żadne miarodajne pomiary. Dokładne wartości pól EM można określić tylko przy użyciu odpowiednich, specjalistycznych mierników.

W miernikach pola elektrycznego małych częstotliwości najczęściej stosuje się czujnik w postaci sondy dipolowej (rys. 8a), o strukturze zbliżonej do kondensatora. Pomiar prądu zmiennego I między dwiema elektrodami tego czujnika umożliwia pomiar natężenia pola elektrycznego zgodnie ze wzorem:

$$I = k_E f E$$

w którym:

k_E – współczynnik konwersji wyznaczony przez wzorcowanie,

f – częstotliwość mierzonego pola,

E – natężenie mierzonego pola.

W miernikach pola magnetycznego małych częstotliwości typowo stosowanym czujnikiem jest niskopojemnościowa cewka (rys. 8b). Napięcie zmienne U indukowane na zaciskach cewki zależy od indukcji B mierzonego pola magnetycznego zgodnie z analogicznym wzorem, gdzie k_B jest odpowiednim współczynnikiem konwersji:

$$U = k_B f B$$

W obydwu rodzajach mierników sygnał wyjściowy czujnika (I , U) jest wzmacniany i przetwarzany w układzie pomiarowym miernika. Wynikiem jest wartość skuteczna natężenia mierzonego pola, wyrażana w V/m lub kV/m (natężenie E pola elektrycznego), w T lub G (indukcja B pola magnetycznego) albo w równoważnych jednostkach A/m (natężenie H pola magnetycznego). Wynik pomiaru jest zazwyczaj przedstawiany w postaci cyfrowej na wyświetlaczu LCD miernika.

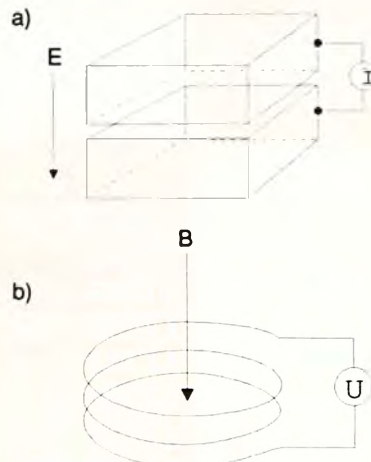
W praktyce najszerszej stosowane są przenośne, niemal kieszonkowe mierniki pól M o małej częstotliwości, zasilane bateryjnie. Najwygodniejsze w użyciu są mierniki trójosiowe, zwane także jako trójwymiarowe, gdyż są wyposażone w trzy czujniki trzech wzajemnie prostopadłych składowych pola M. Wbu-

dowany mikroprocesor automatycznie oblicza wynik pomiaru na podstawie jednocześnie mierzonych trzech składowych wektorowych pola. W odróżnieniu od tańszych mierników z jednym czujnikiem, mierniki trójczujnikowe nie wymagają wykonywania w każdym punkcie trzech odrębnych pomiarów (trzech wzajemnie prostopadłych składowych wektorowych pola) i "ręcznego" obliczania pierwiastka z sumy kwadratów w sposób omówiony wcześniej w tym artykule. Z drugiej strony, w praktyce najczęściej spotykamy pola M o dominującej jednej składowej. Postępując się miernikiem jednoczujnikowym trzeba wtedy eksperymentalnie znaleźć taką jego pozycję, przy której otrzymuje się maksymalny wynik. Wynik ten zazwyczaj niewiele odbiega od wartości

obliczanej na podstawie trzech składowych. Mierniki mikroprocesorowe zazwyczaj realizują pomiar rzeczywistej wartości skutecznej mierzonego natężenia pola, co zapewnia dokładny pomiar także pól o przebiegach zniekształconych, czyli nie idealnie sinusoidalnych (metoda pomiaru rzeczywistej wartości skutecznej przebiegów zmiennych jest szczegółowo omówiona w ReAV nr 4/99). W tym celu mikroprocesor wykonuje wielokrotne próbkowanie badanego przebiegu i z sumy kwadratów próbek – po podzieleniu przez liczbę próbek – obliczany jest pierwiastek. Zmiana zakresów pomiarowych jest często realizowana automatycznie, tak że obsługa miernika jest bardzo prosta. W celu wykonania pomiaru użytkownik po prostu włącza miernik, umieszcza go w żądanym miejscu (na przykład na łóżku) i odczytuje wynik.

Dużą popularność i uznanie zyskały dostępne w Polsce mierniki amerykańskie, wytwarzane przez firmy *Radiation Technology* i *F. W. Bell*. Tablica 1 zawiera podstawowe parametry techniczne przenośnych mierników z serii TRACER, wytwarzanych przez firmę *Radiation Technology*: EF90 (do pomiaru pól elektrycznych) i MR100SE (do pomiaru pól magnetycznych). Obydwa mierniki mają dwa zakresy częstotliwości, 4-cyfrowy wyświetlacz ciekokrystaliczny (LCD), wykorzystują metodę pomiaru rzeczywistej wartości skutecznej (*true RMS*) i mają Świadectwa Typu Głównego Urzędu Miar w Polsce. Zasilanie każdego miernika stanowi pojedyncza bateria alkaliczna 9 V.

Aby zmniejszyć zaburzenia mierzonego pola elektrycznego przez trzymanie miernika EF90 w ręce, należy stosować dodatkowy, składany wysięgnik EFE-10. Wchodzi on w skład uni-



Rys. 8. Sondy

a – dipolowa do pomiaru natężenia pola elektrycznego, b – cewkowa do pomiaru indukcji pola magnetycznego



Rys. 9. Przenośne mierniki pola magnetycznego małej częstotliwości firmy F. W. Bell

Tablica 1 Dane techniczne mierników TRACER EF90 i MR100SE

Parametr	EF90	MR100SE
Zakresy pomiarowe	L: 1,0 - 199,9 V/m ± (3% + 3 LSD)	L: 0,10 - 19,99 μT ± (1% + 3 LSD)
ELF	H: 0,10 - 15,00 kV/m * ± (3% + 4 LSD)	H: 10 - 1999 μT ± (1% + 3 LSD)
i błędy graniczne		
Zakres częstotliwości ELF	30 - 2000 Hz (-3 dB)	5 - 2000 Hz (-3 dB), 10 - 2000 Hz (-3 dB), 20 Hz - 1 kHz (± 0,1 dB)
Zakresy pomiarowe VLF	L: 1,0 - 199,9 V/m ± (3% + 3 LSD)	L: 1,0 - 199,9 nT ± (1% + 4 LSD)
ELF	H: 100 - 1999 V/m ± (3% + 4 LSD)	H: 100-1999 nT ± (1% + 4 LSD)
Zakres częstotliwości VLF	2 - 500 kHz (-3 dB)	2 - 400 kHz (-3 dB) 5 - 200 kHz (± 0,5 dB)

*do 19.99 kV/m przy obniżonej dokładności

Tablica 2 Dane techniczne mierników pól magnetycznych 50 Hz (F. W. Bell)

Typ miernika	4070/F20	4080	4090	4090/ADXF
Zakres pomiaru	0,1 - 199,9 mG	0,01 - 51,1 μT	0,01 - 199,9 μT	
Błąd pomiaru	± (1% + 1 cyfra)	± 2% (typ.)	± (1% + 1 cyfra)	
Zakres częstotliwości	20 - 2000 Hz	25 - 1000 Hz	30 - 600 Hz	20 - 2000 Hz
Liczba czujników	1	3	3	3

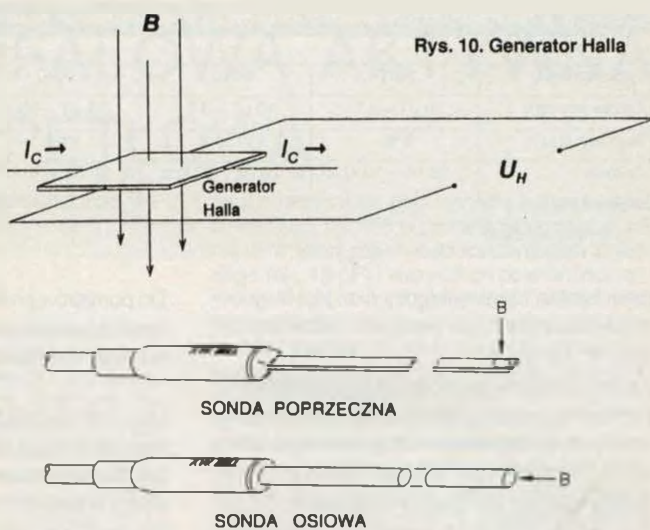
wersalnego zestawu pomiarowego KK-1A, który zawiera mierniki EF90 i MR100SE w specjalnej walizeczce serwisowej. Duży asortyment mierników pola magnetycznego małych częstotliwości wytwarza firma F.W. Bell. Podstawowe parametry "kieszonkowych" mierników podane są w tablicy 2. Wszystkie mierniki zapewniają automatyczne przełączanie zakresów pomiarowych. Mierniki przedstawiono na rys.9. Miernik 4090/ADXF ma dwa dodatkowe wyjścia: analogowe do obserwacji mierzonego przebiegu oscyloskopem oraz wyjście stałoprądowe do rejestratora lub komputera z wejściem a/c. Możliwy jest także wybór 1- lub 3-wymiarowego trybu pracy.

Często stosowanym czujnikiem do pomiaru gęstości strumienia magnetycznego jest generator Halla (rys. 10). Jest to cienka płytka materiału półprzewodnikowego, do którego przyłączone są cztery przewody na środku każdego boku. Przez płytkę wymusza się przepływ prądu stałego I_C . Przy braku pola magnetycznego nie ma różnicy napięcia między dwoma pozostałymi bokami płytki. Gdy linie strumienia magnetycznego przenikają przez płytkę, wówczas droga

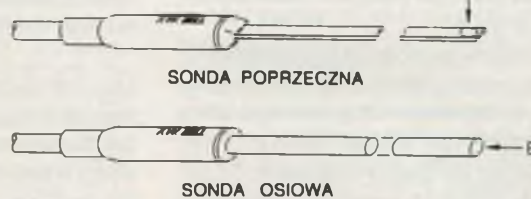
przepływu prądu przez płytkę staje się bliższa do jednego jej boku, wytwarzając różnicę napięcia znaną jako napięcie Halla (U_H). W idealnym generatorze Halla istnieje liniowy związek między liczbą linii strumienia magnetycznego przenikających przez płytkę i wielkością napięcia Halla. Napięcie Halla zależy również od kierunku strumienia magnetycznego, przenikającego przez płytkę. Przy zmianie tego kierunku na przeciwny otrzymuje się zmianę znaku napięcia na przeciwny. Jeśli przez płytkę przenika ta sama liczba linii strumienia magnetycznego w obydwu kierunkach, to napięcie jest równe zero. Dzięki tej wrażliwości na kierunek stru-

mienia możliwy jest pomiar zarówno pól stałych jak i zmiennych. Napięcie Halla zależy również od kąta, pod którym strumień przenika przez płytkę. Największe napięcie powstaje wtedy, gdy strumień przenika prostopadle przez płytkę. W innych przypadkach napięcie to jest mniejsze, zgodnie z funkcją cosinus różnicy kątów między 90° i aktualnym kątem przenikania strumienia. Obszar czułości generatora Halla jest ogólnie definiowany jako największa powierzchnia kołowa w obrębie danej płytki. Średnica obszaru aktywnego może wynosić od 0,2 mm do 19 mm. Często czujnik Halla jest zbyt podat-

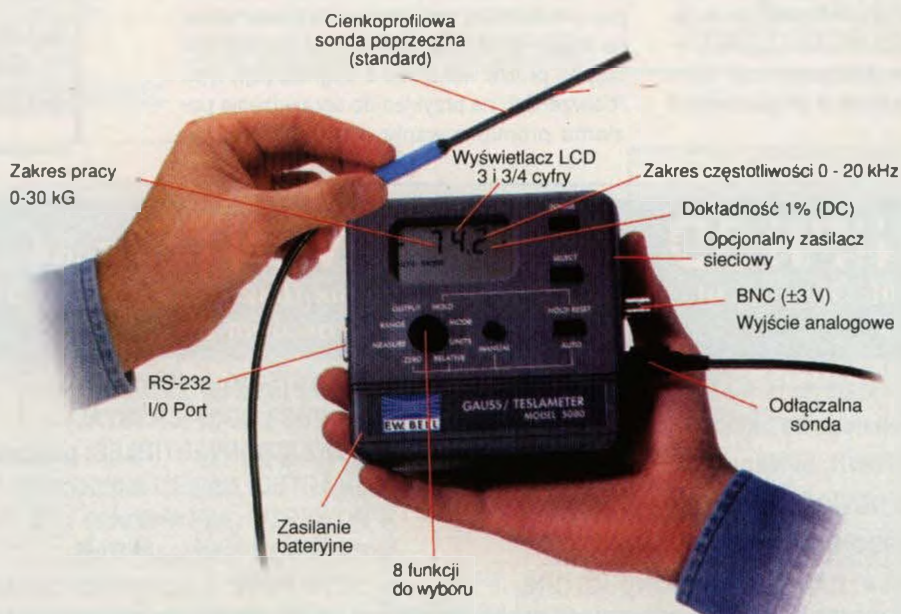
ny na uszkodzenia, aby go stosować bezpośrednio i dlatego często jest on umieszczany w rurce ochronnej oraz połączony z odpowiednim elastycznym kablem, zakończonym wtykiem. Taka konfiguracja, określana jako sonda Halla, jest generalnie wytwarzana w dwu odmianach. W sondach poprzecznych (*transverse probe*) generator Halla jest umieszczony o kształcie cienkiego paseczka, natomiast w sondach osiowych (*axial probe*) generator Halla jest w końcówce o kształcie



Rys. 10. Generator Halla



Rys. 11. Odmiany sond Halla



Rys. 12. Miernik pola magnetycznego typu 5080 firmy F. W. Bell

T a b l i c a 3. Parametry przenośnych mierników z sondami Halla (F. W. Bell)

Typ miernika	5070	5080	6010
Zakres pomiaru	10 μ T – 2 T	10 μ T – 3 T	0,1 μ T – 30 T
Błąd pomiaru	2 %	1 %	1 %
Zakresy częstotliwości	0; 20 Hz – 10 kHz	0; 20 Hz – 20 kHz	0; 20 Hz – 20 kHz

z różnymi sondami

rukki. Istotną różnicą między nimi jest inny kierunek osi czułości, jak pokazano strzałkami z literą "B" na rys. 11.

Zazwyczaj sondy poprzeczne są stosowane do pomiarów między dwoma biegunami magnetycznymi, na przykład w magnesach głośnikowych i szczelinach silników elektrycznych. Sondy osiowe są często stosowane do pomiarów pól wzdłuż osi cewek lub solenoidów. Firma *F. W. Bell* wytwarza szereg mierników z precyzyjnymi czujnikami Halla własnej produkcji. Umożliwiają one wykonywanie dokładnych pomiarów natężenia pól stałych i zmiennych. Podstawowe parametry trzech przykładowych mierników tego typu są podane w tabelicy 3. Miernik pola magnetycznego typu 5080 firmy *F.W.Bell* przedstawiono na rys. 12.

Są to przenośne mierniki cyfrowe o wielu zaawansowanych funkcjach. Umożliwiają one m.in. możliwość wyboru jednostek pomiarowych (G, T lub A/m), automatyczne zerowanie, zapamiętywanie minimalnych i maksymalnych wyników pomiarowych oraz tryb pracy relatywnej. W tym trybie można ustalić pewien poziom odniesienia i mierzyć z dużą dokładnością odchyłki natężenia pola od tego poziomu. Modele 5080 i 6010 mają również wyjścia analogowe i cyfrowe RS-232 do współpracy z komputerem. Wszystkie mierniki są wyposażone w komorę ekranującą (*Zero Gauss*) do automatycznej kalibracji poziomu zera użytej sondy. Do modelu 6010 są dostępne sondy kompensowane temperaturowo o liniowości 0,5 % do 3 T.

T a b l i c a 4. Parametry sond do miernika EMR-200 (Wandel & Goltermann)

Typ sondy	Typ 8	Typ 9	Typ 10
Mierzone pole	elektryczne		magnetyczne
Zakres pomiaru	1 – 800 V/m 0,0027 - 1700 W/m ²	1,2 – 1000 V/m 0,0032 – 2600 W/m ²	0,03 – 16 A/m
Błąd pomiaru	± 1 dB		
Zakres częstotliwości	0,1 MHz – 3 GHz	3 MHz – 18 GHz	27 MHz – 1 GHz

Do pomiarów profesjonalnych służą mierniki laboratoryjne z czujnikami Halla o dużej precyzji, na przykład modele 9550 i 9950 firmy *F. W. Bell*.

Do pomiaru natężenia pól o wielkich częstotliwościach służą inne, specjalizowane mierniki [3]. Szereg typów mierników mikroprocesorowych wytwarza niemiecka firma *Wandel & Goltermann*. Jako przykład można wymienić typ EMR-200 z wymiennymi sondami, które można zamawiać zależnie od przewidywanych zastosowań. Wszystkie sondy są izotropowe (trójosiowe) z diodami detekcyjnymi. Są one oferowane w wersji standardowej (typy 8, 9, 10) i z rozszerzoną kalibracją (typy 8C, 9C, 10C). Te ostatnie zapewniają lepszą równomierność charakterystyk częstotliwościowych. Sonda Typ 8 pokrywa w zasadzie cały zakres zastosowań telekomunikacyjnych do pomiarów pól elektrycznych, włącznie z nadajnikami radiowymi, telewizyjnymi i telefonii komórkowej. Jeśli trzeba wykonywać pomiary w polu bliskim, to należy również zastosować sondę Typ 10 do pomiaru pól magnetycznych. Do pomiaru systemów radarowych i urządzeń satelitarnych stosuje się sondę Typ 9 o rozszerzonym zakresie częstotliwości.

Do zastosowań popularnych, czyli do pomiarów o niewielkiej dokładności są przeznaczone znacznie tańsze mierniki. Są również dostępne proste wskaźniki z sygnalizacją typu "dobrze/źle", na przykład do sprawdzania poziomu promieniowania mikrofalowego w

■ pobliżu czynnej kuchenki mikrofalowej.

Józef Kalisz

LITERATURA

- [1] Z. Grabczyk: Pola i promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu 0-300 GHz, w książce Zagrożenia elektromagnetyczne. Centrum Edukacyjne, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, 1997
- [2] M.G. Morgan: Measuring power-frequency fields. Carnegie Mellon University. 1992; Part 2: What can we conclude from measurements of power-frequency fields?, Carnegie Mellon University, 1993
- [3] H. Trzaska: Pomiary pól elektromagnetycznych do celów ochrony pracy i ochrony środowiska. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1996
- [4] J. Kalisz: Mierniki do pomiaru szkodliwych pól elektromagnetycznych. Bezpieczeństwo Pracy, nr 4, 1995