

dr hab. inż. ROMAN KUBACKI
mgr inż. PAWEŁ SOBIECH
Wojskowy Instytut Higieny i Epidemiologii

Zależności metrologiczne w elektromagnetycznym polu bliskim anten mikrofalowych

W rozporządzeniu ministra pracy i polityki społecznej z dnia 2 stycznia 2001 r. zmieniającym rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy [5] ustanowiono wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) pól elektromagnetycznych (0 Hz – 300 GHz) na stanowiskach pracy. Dużą nowością było ustanowienie wartości NDN w postaci natężenia pola elektrycznego (E [V/m]) oraz magnetycznego (H [A/m]) w całym pasmie częstotliwości, podczas gdy w poprzednich regulacjach prawnych dotyczących narażenia pracowników na promieniowanie zakresu mikrofalowego, do oceny tego narażenia stosowana była gęstość mocy (S [W/m²]). W podobnej regulacji prawnej dotyczącej ochrony środowiska przed promieniowaniem mikrofalowym, obowiązuje w dalszym ciągu gęstość mocy jako wartość NDN. Również światowe regulacje prawne dotyczące zarówno pracowników jak i ludzi niezatrudnionych (środowisko), do oceny narażenia na promieniowanie mikrofalowe wykorzystują gęstość mocy. Rodzi się zatem pytanie, czy natężenia pól E i H są tożsame z gęstością mocy w kontekście metrologii i oceny narażenia ludzi na promieniowanie mikrofalowe. Czy wprowadzenie takich zmian do prawnej ochrony pracowników narażonych na promieniowanie mikrofalowe było uzasadnione?

Przyjmuje się, że skutki oddziaływania promieniowania mikrofalowego na ludzi indukowane są w wyniku absorpcji energii tego promieniowania przez strasny organizm. W tym kontekście do oceny narażenia uzasadnione jest przyjmowanie natężenia pola elektrycznego i magnetycznego (E i H) jako wielkości proporcjonalnych do energii niesionej elektryczną i magnetyczną składową tego promieniowania. Żadnej z tych wielkości nie można zaniedbać, gdyż skutki oddziaływania na organizm ludzki poszczególnych składowych są odmienne. Dużą korzyścią wynikającą z przyjęcia wartości E i H

w całym zakresie częstotliwości jest możliwość określania poziomu ekspozycji tymi samymi parametrami (E , H). Jednakże negatywną konsekwencją przyjęcia wartości E i H jako wartości NDN jest konieczność pomiarów dwoma miernikami w każdym punkcie pomiarowym.

Z kolei, gęstość mocy jest wektorowym iloczynem natężenia pola elektrycznego i magnetycznego $S = E \cdot H$ i odzwierciedla sumaryczną energię fali elektromagnetycznej. Jednakże parametr ten nie daje informacji o procentowym udziale energetycznym poszczególnych składowych tego promieniowania. Oczywiście korzyścią jest jednak dwukrotne zmniejszenie liczby realizowanych pomiarów, co ma szczególne znaczenie w przypadku pomiarów np. na posterunkach radiolokacyjnych czy w warsztatach remontowych, gdzie występuje duża złożoność metrologiczna [2].

W dostatecznie dużej odległości od anteny, tj. w strefie dalekiej każda z wielkości, tj. E lub H albo S jest tożsama w kontekście metrologii i oceny narażenia na promieniowanie mikrofalowe. Wielkości te są związane powszechnie znaną zależnością [3, 4]:

$$S = \frac{(E)^2}{377} = 377 (H)^2 \quad (1)$$

Zależność powyższa wynika z faktu, że w strefie dalekiej stosunek natężenia pola elektrycznego E do natężenia pola magnetycznego H jest ściśle określony i nie ulega zmianie wraz ze zmianą odległości od anteny, podobnie jak to ma miejsce w przypadku fali płaskiej:

$$\frac{E_{\perp}}{H_{\perp}} = Z_f = 120 \pi = 377 \Omega \quad (2)$$

gdzie:

E_{\perp} , H_{\perp} – składowe poprzeczne do kierunku propagacji fali

Z_f = impedancja falowa.

Impedancja falowa dla próżni przyjmuje wartość rzeczywistą i wynosi $Z_f = 377 \Omega$.

Jednakże w pobliżu anteny, tj. w polu bliskim, stosunek wektorów E do H może

przyjmować wartości odmienne od 377Ω , z tego powodu stosowanie zależności (1) w polu bliskim obarczone jest nieznany błądem.

Pole bliskie jako obszar metrologiczny dla celów bhp

Aby określić możliwość stosowania zależności (1) do celów pomiarów i oceny narażenia pracowników na promieniowanie mikrofalowe zasadnym jest określenie granicy strefy dalekiej. Granicę strefy dalekiej wyznacza się z zależności:

$$R_D = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3)$$

gdzie:

D – największy poprzeczny rozmiar

anteny: $D = \sqrt{A^2 + B^2}$

A , B – poprzeczne wymiary anteny

λ – długość fali.

Zgodnie z zależnością (3) w przypadku anten telefonii komórkowej strefa daleka występuje na odległościach powyżej 10 m od anteny, natomiast w przypadku anten radiolokacyjnych strefa daleka rozciąga się na odległościach powyżej 1 km od anteny. Łatwo zauważyć, że pomiary natężeń pól mikrofalowych do celów bhp (na stanowiskach pracy) są realizowane w obszarze pola bliskiego, tj. na odległościach znacznie bliższych aniżeli granica strefy dalekiej. Z tego powodu pomiary zarówno E jak i H na stanowiskach pracy są w pełni uzasadnione.

Jednakże w kontekście zapisów omawianego rozporządzenia [5] i PN [6] wyłaniają się następujące problemy:

- Czy można w polu bliskim stosować mierniki gęstości mocy bazujące na pomiarze składowej elektrycznej i realizujące przeliczanie zmierzonych wartości E na gęstość mocy zgodnie z zależnością (1)? Rodzi się również pytanie o skalę błędów popełnianych w wyniku stosowania tych mierników w polu bliskim.

- Czy można w polu bliskim dokonywać przeliczeń wartości natężeń pól na

wartości gęstości mocy, stosując zależność (1)?

Poniżej przedstawiono omówienie tego problemu oraz obliczenia odnoszące się do charakterystycznych przypadków anten mikrofalowych.

Podstawowe typy detekcji pól mikrofalowych

W kontekście rozważanych zagadnień metrologicznych ważnym problemem jest w jaki sposób miernik mikrofalowy realizuje pomiary mierzonej wielkości, tj. w jaki sposób dokonuje detekcji natężenia pola.

Sondy mierników natężenia pola elektrycznego (E) lub magnetycznego (H) są wyposażone w detektory typu „dipol-dioda” (do pomiarów składowej E) lub detektory typu „antena ramowa-dioda” (do pomiarów H) i realizują bezpośrednio pomiary mierzonej wielkości niezależnie od odległości od anteny nadawczej.

W przypadku mierników przeznaczonych do pomiarów gęstości mocy, sondy mierników posiadają różną konstrukcję i różne formy detekcji pola elektromagnetycznego. Najbardziej rozpowszechniona forma pomiarów bazuje na detekcji pola w sondzie wyposażonej w detektor typu „dipol-dioda” (np. sondy miernika typu MEH). W tym przypadku miernik dokonuje pomiarów natężenia pola elektrycznego, a wartość gęstości mocy obliczana jest w elektronicznie miernika na podstawie zależności (1). Łatwo zauważyć, że miernik ten można bezkrytycznie stosować jedynie w strefie dalekiej. W polu bliskim, gdy impedancja pola przyjmuje wartości różne od 377Ω , wartość gęstości mocy wyświetlana przez miernik jest obciążona błędem wynikającym ze zmienionej wartości impedancji pola.

Z kolei inne popularne na krajowym rynku mierniki gęstości mocy typu PO-1-Medik lub P3-9 posiadają sondy wyposażone w detektory termistorowe. Termistory umieszczone są w odcinkach przewodniczących, np. w falowodzie prostokątnym lub linii współosiowej i zmiana wartości impedancji pola w punkcie pomiarowym nie wpływa bezpośrednio na warunki pracy samego termistora. Jednakże zmiana wartości impedancji pola

istotnie wpływa na błąd pomiarów takimi miernikami. W przypadku tych mierników anteną odbiorczą jest tuba, której wejście dopasowane jest do impedancji 377Ω . Każda zmiana impedancji w punkcie pomiarowym powoduje, że zmienia się współczynnik odbicia na wejściu tuby miernika, w wyniku czego do termistora dociera zmieniona wartość energii pola elektromagnetycznego, a cały pomiar obciążony jest błędem.

Pole bliskie anteny

W odległościach od anteny mniejszych aniżeli $2D^2/\lambda$ ($R < R_D$) charakter pola elektromagnetycznego i własności jego propagacji są inne niż w polu strefy dalekiej. Z punktu widzenia zależności impedancyjnych niezwykle istotny jest fakt, że pole elektromagnetyczne w obszarze pola bliskiego jest ściśle związane ze swoim źródłem, a energia fali oscyluje między źródłem i przestrzenią. Fakt ten powoduje, że oprócz składowych poprzecznych (E_{\perp}, H_{\perp}), prostopadłych do kierunku propagacji pojawiają się składowe wzdłużne, równoległe do kierunku propagacji fali.

W przypadku takich popularnych anten mikrofalowych, jak anteny stacji bazowych telefonii komórkowej czy anteny radarów, jest to składowa pola elektrycznego E_R , równoległa do kierunku propagacji fali. W tym przypadku mamy do czynienia z falą niejednorodną nazywaną falą typu TM (transwersalną magnetycznie). Istnienie dodatkowych składowych wzdłużnych uniemożliwia określenie impedancji falowej ośrodka, zgodnie z definicją tej impedancji bazującą na stosunku składowych poprzecznych (2), gdyż nie ma możliwości uwzględnienia składowych wzdłużnych, które w polu bliskim często osiągają wartości większe aniżeli składowe poprzeczne. Zatem określenie impedancji falowej ośrodka w pobliżu anteny, zgodnie z zależnością (2), może być pozbawione sensu. Fakt ten można zinterpretować następująco: impedancja falowa ośrodka (2) określa wyłącznie zależność „fala elektromagnetyczna – ośrodek”, co ma miejsce w strefie dalekiej, podczas gdy w polu bliskim składowe pola elektromagnetycznego są ściśle

związane nie tylko z ośrodkiem, lecz także ze swoim źródłem.

W normach polskich [6] wprowadzono pojęcie **impedancji pola elektromagnetycznego** zdefiniowane jako: *Impedancja pola jest wielkością uzyskaną z podzielenia zmierzonej wartości natężenia pola elektrycznego przez zmierzoną wartość pola magnetycznego, w danym punkcie pomiarowym*. Zgodnie z taką definicją jest to stosunek wartości skutecznej modułu wypadkowego pola elektrycznego do wartości skutecznej modułu wypadkowego pola magnetycznego. Z przytoczonej definicji wynika, że do obliczeń przyjmujemy wszystkie składowe wektorów E i H , a dokładniej długość (moduł) wypadkowych wektorów E i H w danym punkcie przestrzeni. Należy również pamiętać, że parametr ten wprowadzono niejako i wyłącznie dla potrzeb metrologicznych. W tym aspekcie autorzy mieli prawo zdefiniować taką wielkość jako parametr pomocniczy przeznaczony do dodatkowych obliczeń zmierzonych wielkości polowych. Pomiar wszystkich składowych pól E i H (lub ich wartości wypadkowych) jest najbardziej poprawnym pomiarem w polu bliskim i powinien być realizowany miernikiem wyposażonym w bezkierunkową sondę pomiarową. Wprowadzona definicja impedancji pola elektromagnetycznego jest zatem stosunkiem zmierzonych wypadkowych wartości E do H .

$$Z_{EM} = \frac{E}{H} \quad (4)$$

gdzie:

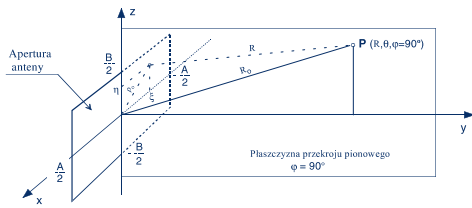
$$E = \sqrt{E_R^2 + E_{\theta}^2} \quad H = H_{\phi}$$

Wartość Z_{EM} przyjmuje wartości rzeczywiste, przy czym dla pól typu TM (anteny GSM, radary) wartości Z_{EM} w pobliżu samej anteny mogą przyjmować duże wartości $Z_{EM} \geq 377 \Omega$. Pola te nazywane są polami wielkiej impedancji. W strefie dalekiej, z oczywistych powodów, impedancja pola (4) jest tożsama z impedancją falową ośrodka (2).

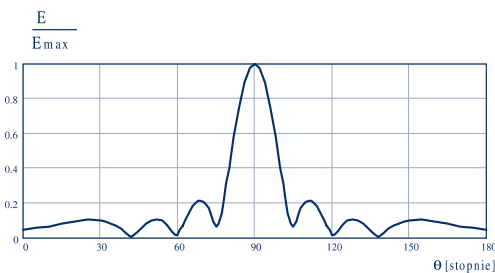
Przedstawiony charakter pola bliskiego sprawia, że gęstość mocy (wektor Poyntinga) posiada również dodatkowe składowe. Przykładowo w polu bliskim anten stacji bazowych GSM lub anten ra-

darów charakteryzujących się najczęściej polaryzacją liniową (pole typu TM), wektor Poyntinga posiada składową wzdłużną S_R oraz składową poprzeczną S_θ .

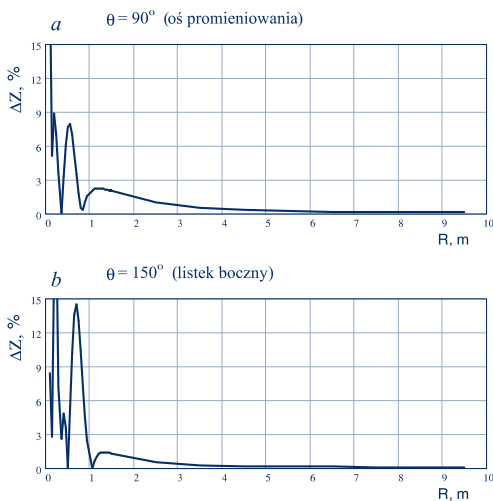
$$S_R = E_\theta H_\phi \quad S_\theta = E_R H_\phi \quad (5)$$



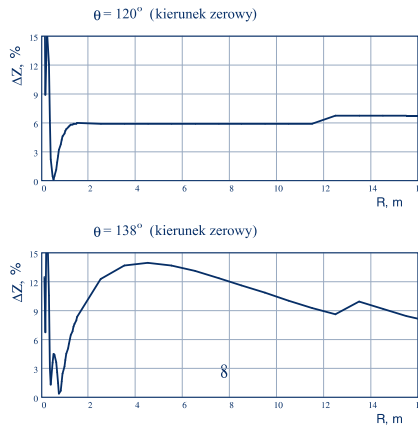
Rys. 1. Antena w postaci apertury prostokątnej



Rys. 2. Charakterystyka promieniowania anteny Kathrein (K-730370) w płaszczyźnie przekroju pionowego



Rys. 3. Wartości błędów ΔZ w funkcji odległości dla anteny GSM typu K-730370, a – na kierunku osi promieniowania ($\theta = 90^\circ$), b – na kierunku listka bocznego, skierowanego w stronę ziemi ($\theta = 150^\circ$)



Rys. 4. Wartości błędów ΔZ w funkcji odległości dla anteny GSM typu K-730370 na kierunkach zerowych: $\theta = 120^\circ$ oraz $\theta = 138^\circ$

Pomiary miernikiem gęstości mocy z sondą bezkierunkową prowadzą do wartości wypadkowej (S):

$$S = \sqrt{S_R^2 + S_\theta^2} \quad (6)$$

Posługując się wartościami wypadkowymi (modułami wektorów) drogą prostych przekształceń otrzymuje się następującą zależność łączącą wektor Poyntinga (gęstość mocy) z wypadkową wartością natężenia pola elektrycznego:

$$S = \frac{E^2}{Z_{EM}} \quad (7)$$

Z przedstawionych uwarunkowań wynika, że w polu bliskim gęstość mocy (S) może być wyrażona przez wypadkową wartość natężenia pola elektrycznego (E), przy czym współczynnikiem proporcjonalności jest wartość impedancji pola elektromagnetycznego (Z_{EM}), (4).

Jednakże, aby realizować przekształcenia określone zależnością (4), należy znać wartość impedancji pola elektromagnetycznego, a tymczasem w polu bliskim wartość Z_{EM} nie jest znana. Parametr ten zależy od wielu czynników, w tym odległości od anteny.

Jest zatem zasadne określenie wartości Z_{EM} w odniesieniu do typowych anten mikrofalowych spotykanych w praktyce pomiarowej.

Impedancja pola elektromagnetycznego w polu bliskim

Obliczenia wartości impedancji pola elektromagnetycznego (Z_{EM}) przeprowadzono w sferycznym układzie współrzędnych za pomocą potencjałów wektorowych w odniesieniu do anteny przedstawionej w postaci apertury prostokątnej (rys. 1).

Analityczne wyrażenia na składowe pola bliskiego apertury prostokątnej przedstawiono w pracy *Modelowanie rozkładu promieniowania mikrofalowego w polu bliskim anten oraz pewne konsekwencje biomedyczne* [1].

Obliczenia impedancji pola elektromagnetycznego (Z_{EM}) przedstawiono w odniesieniu do wartości impedancji falowej ośrodka ($Z_f = 377 \Omega$), zgodnie z zależnością:

$$\Delta Z = \frac{|Z_{EM} - Z_f|}{Z_f} 100\% \quad (8)$$

W rzeczywistości wyrażenie ΔZ (8) jest błędem względnym i określa, ile procent impedancja pola elektromagnetycznego (Z_{EM}) różni się od impedancji falowej ośrodka ($Z_f = 377 \Omega$) w danym punkcie obliczeniowym. Wartość ΔZ (8) jest zatem systematycznym błędem metody pomiarów gęstości mocy za pomocą mierników bazujących na detekcji składowej elektrycznej.

Przykładowe obliczenia wartości ΔZ przeprowadzono w odniesieniu do anteny stacji bazowej GSM firmy Kathrein (K-730370), o wymiarach $A \cdot B = 0,255 \cdot 1,29$ m, przy częstotliwości 947 MHz. Strefa daleka dla tej anteny wynosi $2D^2/\lambda = 10,5$ m od anteny. Charakterystyka promieniowania anteny w płaszczyźnie przekroju pionowego została przedstawiona na rys. 2.

Analizę wartości ΔZ przedstawiono oddzielnie dla kierunków wiązki głównej i listków bocznych oraz oddzielnie dla kierunków pomiędzy listkami bocznymi. Kierunki pomiędzy listkami nazywane są kierunkami zerowymi, gdyż charakterystyka promieniowania anteny przyjmuje wartości zbliżone do zera. Wyniki obli-

Prenumeruj

czeń przedstawiono na rys. 3 i 4.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono wykresy błędów względnych impedancji pola elektromagnetycznego Z_{EM} w porównaniu do impedancji falowej $Z_f = 377 \Omega$. Na tej podstawie można sformułować następujące spostrzeżenia.

- W strefie dalekiej, tj. dla $R > R_D$ od anteny (dla anteny K-730370 $R_D = 10,5$ m) wartość $\Delta Z \approx 0\%$. Tym samym impedancja pola elektromagnetycznego Z_{EM} przyjmuje wartość impedancji falowej Z_f , tj. $Z_{EM} = Z_f = 377 \Omega$.

- W polu bliskim, na odległościach od anteny bliższych od strefy dalekiej, ale większych aniżeli poprzeczny rozmiar anteny (D), (na rys. 3 rozmiar $D = 1$ m), tj. na odległościach $D < R < R_D$ wartość $\Delta Z \leq 3\%$. Wynika z tego, że impedancja pola elektromagnetycznego Z_{EM} różni się od impedancji falowej Z_f nie więcej aniżeli 3% – rys. 3.

Jednakże na pewnych kierunkach (kierunki zerowe) impedancja pola różni się więcej aniżeli 3% od impedancji falowej Z_f (rys. 4).

- W bezpośredniej bliskości anteny, tj. na odległościach mniejszych aniżeli D , wartości błędów ΔZ sięgają kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu procent, tym samym wartości Z_{EM} osiągają wartości znacznie większe aniżeli Z_f .

* * *

Badania impedancji pola elektromagnetycznego w polu bliskim typowych anten mikrofalowych upoważniają do następujących wniosków.

1. W polu bliskim anten wskazane jest stosowanie mierników natężenia pola elektrycznego (E) oraz magnetycznego (H) i ocena narażenia pracowników na pola mikrofalowe na podstawie tych parametrów.

2. Stosowanie mierników gęstości mocy oraz realizacja przeliczeń zgodnie z zależnością (1) jest dopuszczalne w odniesieniu do odległości od anteny większych aniżeli maksymalny poprzeczny wymiar anteny ($R > D$), jednakże należy pamiętać, że pomiary i przeliczenia obarczone są 3-procentowym błędem. W odniesieniu do niektórych kierunków (kie-

runki zerowe) błędy te mogą ulec zwiększeniu.

W tym przypadku pomocne mogą być indywidualne obliczenia lub pomiary impedancji pola wokół poszczególnych typów anten, co ułatwi metrologom ocenę popełnianych systematycznych błędów metody.

3. W bezpośredniej bliskości anteny na odległościach $R < D$ impedancja pola elektromagnetycznego znacznie różni się od wartości 377Ω . W tym obszarze mierniki gęstości mocy nie powinny być stosowane z powodu zbyt dużych błędów. Stosowanie zależności (1) do przeliczeń pomiędzy wartościami E i S jest obarczone zbyt dużym błędem.

Należy jednakże dodać, że w obszarze tym nie powinno się prowadzić pomiarów rozkładu promieniowania elektromagnetycznego ze względu na inne dodatkowe źródła błędów [1, 4, 6]. W razie konieczności pomiarów i oceny narażenia bezpośrednio przy źródłach, należy przeprowadzić rozszerzoną analizę błędów.

PIŚMIENNICTWO

[1] Kubacki R. *Modelowanie rozkładu promieniowania mikrofalowego w polu bliskim anten oraz pewne konsekwencje biomedyczne*. Wyd. WAT, Warszawa 2000

[2] Kubacki R. *Ocena narażenia na impulsowe promieniowanie mikrofalowe wytwarzane przez radary*. W: Oddziaływanie biologiczne, ryzyko zdrowotne i ochrona przed polami elektromagnetycznymi, Materiały konferencyjne Szkoły Jesiennej PTBR, Zakopane 2000

[3] Szóstka J. *Fale i anteny*. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa 2000

[4] Trzaska H. *Pomiary pól elektromagnetycznych w polu bliskim*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998

[5] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 2 stycznia 2001 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU nr 4, poz. 36

[6] prPN-T-065890: *Ochrona pracy w polach i promieniowaniu elektromagnetycznym w zakresie częstotliwości od 0 Hz do 300 GHz; Arkusz 01 – Terminologia; Arkusz 03 – Metody pomiaru i oceny pola na stanowisku pracy*, 2001

BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY
BEZPIECZEŃSTWO
PRACY