



POLE ELEKTROMAGNETYCZNE-RZECZYWISTOŚĆ METROLOGICZNA W ŚWIETLE OBOWIĄZUJĄCYCH NORM I PRZEPISÓW OCHRONNYCH

Streszczenie: W zeszłym roku nastąpiła znacząca zmiana w polskich przepisach dotyczących ochrony przed polem elektromagnetycznym w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy. W przygotowaniu są również zmiany w dokumentach dotyczących ochrony środowiska (tu zapowiadają się zmiany znacznie mniejsze). Nowa sytuacja prawna pociągnęła za sobą zmiany w technice pomiarów. W pracy niniejszej zostaną przedstawione realia metrologiczne, poddane analizie zostaną metody pomiaru jak również możliwość wykorzystywania obecnego na rynku sprzętu.

1. WSTĘP

W lipcu 2001 r. zaczęły obowiązywać nowe przepisy dotyczące ochrony przed polem i promieniowaniem elektromagnetycznym (PEM) na stanowiskach pracy [1], a pod koniec zeszłego roku zatwierdzono Polskie Normy dotyczące metodyki pomiarów PEM [2,3]. Opadły już pierwsze emocje związane z wprowadzaniem nowych unormowań, pojawiły się pewne problemy metrologiczne i o wiele większe interpretacyjne. W pracy niniejszej zostanie podjęta próba uporządkowania tych zagadnień

2. POMIAR PÓL MONOCHROMATYCZNYCH

W przypadku pól monochromatycznych, pod pojęciem których autor rozumie pola pochodzące od pojedynczej nośnej o dowolnej modulacji (np. nadajnik telewizyjny), wprowadzenie nowych przepisów nie wywołało większej rewolucji w metodyce pomiarów (pomijając znaczne rozszerzenie zakresu częstotliwości dla składowej magnetycznej, o czym w dalszej części). Wymóg pomiaru składowej elektrycznej w miejsce gęstości mocy mikrofalowej dla częstotliwości powyżej 3 GHz poskutkowało w większości przypadków przekalibrowaniem dotychczasowych sond gęstości mocy z W/m^2 na V/m , gdyż w sondach takich zwykle czujnikiem jest antena dipolowa czuła na składową elektryczną PEM. Przy wyznaczaniu granic stref ochronnych należy pamiętać, że najwyższe dopuszczalne natężenia (NDN) są funkcją częstotliwości.

Analogicznie jak dla pól monochromatycznych wygląda metodyka pomiarów pól pochodzących od kilku źródeł, ale o zbliżonych częstotliwościach (wg. prawodawców $\pm 15\%$ względem częstotliwości źródła podstawowego). Wtedy można wykonać pomiar sondą szeroko-

kopasmową, a ocenę należy wykonać przyjmując jako podstawę częstotliwość źródła podstawowego. W ten sposób potraktować można np. centrum nadawcze radiofonii UKF (87-108 MHz). W zakresie, gdzie przebieg NDN jest płaski w funkcji częstotliwości, korzystając z definicji wskaźnika zasięgu stref ochronnych również można wykonać pomiary szerokopasmowe sondą o płaskiej charakterystyce częstotliwościowej [4].

3. POMIAR PÓL O ZŁOŻONYM WIDMIE

Dla obszarów, gdzie występują pola o złożonym widmie należy zastosować metodykę pomiarów dostosowaną indywidualnie do istniejącej sytuacji. Można jednak przedstawić typowe sytuacje:

1. Pola pochodzą od niezależnych źródeł. Najprostszym rozwiązaniem w tym przypadku jest niezależny pomiar każdego źródła przy wyłączonych pozostałych. Jeżeli jest to niemożliwe, sytuację trzeba dopasować do jednego z kolejnych przypadków.

Ocenę warunków pracy wykonuje się na podstawie wskaźnika zasięgu stref ochronnych i wskaźnika ekspozycji.

2. Pola z różnego zakresu częstotliwości pochodzą od tego samego urządzenia i są ze sobą sprzężone. Przykładem może być pole magnetyczne o częstotliwości przemysłowej pochodzące od transformatora zasilającego piec indukcyjny i kilku kHz pochodzące od wzbudnika teoż pieca. Innym przypadkiem jest np. aparatura medyczna pracująca w trybie impulsowym. Pracę tego urządzenia możemy rozpatrywać jako modulację z kluczowaniem nośnej. W widmie sygnału znajdziemy prążki odpowiadające częstotliwości fali nośnej i wstęp bocznych, ale również częstotliwości kluczowania. Impulsowe zmiany prądu zasilającego urządzenie w takt kluczowania mogą stać się źródłem pola (głównie magnetycznego) o natężeniach nie do pominięcia. W poniższej tabeli zebrano przykłady takich urządzeń [5].

| Typ urządzenia | częstotliwość pracy | częstotliwość impulsowania | moc urządzenia |
|---|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| Aparat do elektrochirurgii | 440 kHz | 20kHz | 250 W |
| Terapuls GS-220 | 27.12 MHz | 600 Hz | 60 W (średnia) 1000W (szczytowa) |
| Diatermia krótkofalowa ERBOITHERM 1100P | 27.12MHz | 50-350 Hz | 400W |
| Diatermia mikrofalowa ERBOITHERM 12250P | 2.45 GHz | | 200 (średnia) 1600 (szczytowa) |

Rys. 1. Parametry aparatury medycznej [5]

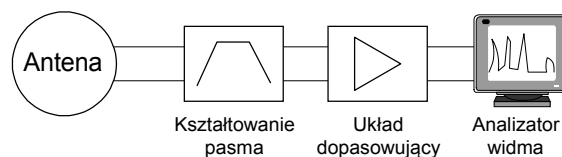
W radiokomunikacji przedstawicielem tej klasy są np. terminale przenośne GSM [6], aczkolwiek trudno je traktować jako źródła wymagające nadzoru BHP.

W takiej sytuacji trzeba znaleźć metodę niezależnego pomiaru poszczególnych składowych PEM. Nie ma problemu, jeżeli poszczególne składowe można rozdzielić wykorzystując właściwości sond pomiarowych, np. przy piecu indukcyjnym pole „energetyczne” mierzy się sondą AH-4, pole od wzbudnika – sondą AH-3 czy AH-1. Sytuacja komplikuje się, jeżeli poszczególne składowe mieszczą się w paśmie pomiarowym jednej sondy, a w zakresie tym wartości NDN są funkcją częstotliwości. Pomiar szerokopasmową sondą wartości skutecznej o płaskiej charakterystyce częstotliwościowej da jako wynik wypadkowe natężenie pola z całego zakresu częstotliwości pracy sondy powodując niestety utratę informacji o istotności poszczególnych składowych w polu wypadkowym. Utrudnia to właściwą ocenę warunków ekspozycji, gdyż trudno wybrać częstotliwość odniesienia. W tej sytuacji pozostaje, zalecany przez Polską Normę, pomiar selektywny lub przyjęcie tzw. najgorszego przypadku, tj. przyjęcie jako odniesienia częstotliwości, dla której występuje najniższa wartość NDN. Na szczęście takie przypadki nie są zbyt częste.

3. Pole pochodzi od sygnału podstawowego i jego harmonicznym. Rozważmy praktyczne przypadki, kiedy sytuacja taka może zajść. W zakresie radiofalowym i mikrofalowym występowanie harmonicznym o mierzalnych poziomach jest raczej niedopuszczalne, gdyż kłóci się to z zasadami zagospodarowania widma. Pozostaje więc wykorzystywany przez przemysł i energetykę zakres częstotliwości średnich i niskich (VLF i ELF). W paśmie 1 – 800 kHz dla pola magnetycznego i 1 kHz – 3 MHz wystarcza zastosowanie sond szerokopasmowych ze względu na stałą w funkcji częstotliwości wartość NDN (dodatkowo należy pamiętać, że w zakresie tym parametrem przyjmowanym do oceny jest wartość równoważna natężenia pola). Dla częstotliwości poniżej 1 kHz problemem może być tylko pole magnetyczne. Pola elektryczne o natężeniach istotnych z punktu widzenia BHP pochodzą jedynie od linii i osprzętu wysokiego napięcia, a dodatkowo w zakresie do 300 Hz (a więc do 6 harmonicznym częstotliwości sieciowej) ustanowiono stałą wartość NDN w funkcji częstotliwości. Sprowadza to problem do pomiaru szerokopasmowego, stosowanego w rozwiązaniach ITA PWr od wielu lat, mimo braku odpowiednich przepisów.

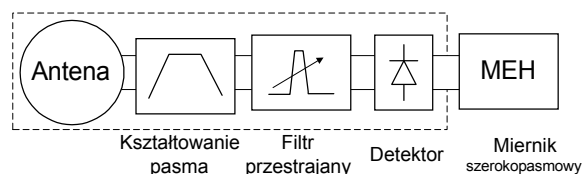
Niezależnie od wyżej napisanego, w tym zakresie częstotliwości dla obu składowych istnieje stosunkowo

łatwy sposób wykonania pomiarów selektywnych w celu określenia zawartości harmonicznym w sygnale. Można tego dokonać na dwa sposoby: wykorzystując szerokopasmowy czujnik i selektywny miernik lub selektywną sondę i szerokopasmowy miernik. Schemat blokowy układu realizującego sposób pierwszy przedstawiono na rysunku 1. Antena reagująca na wybrany rodzaj pola dołączona jest przez układ dopasowujący i kształtujący charakterystykę częstotliwościową do analizatora widma, którego funkcję pełnić może np. analizator akustyczny stosowany przy pomiarach hałasu czy analizator jakości sieci energetycznej. Mierniki takie pozwalają na pomiar minimum 10 harmonicznym częstotliwości sieci [7].



Rys. 2. Schemat blokowy selektywnego miernika PEM.

Do realizacji pomiarów z miernikiem szerokopasmowym niezbędna jest odpowiednio przygotowana szerokopasmowa sonda pomiarowa. W celu uzyskania detekcji selektywnej, pomiędzy układ anteny a detektor należy włączyć filtr środkowoprzepustowy o wymaganej selektywności (rysunek 3). Poprzez zmianę częstotliwości środkowej filtra zmienia się częstotliwość pracy sondy. Zastosowanie specjalizowanych układów scalonych lub filtrów z przełączanymi pojemnościami czyni to rozwiązanie w pełni realizowalnym. Niewątpliwą zaletą tej metody jest wykorzystanie posiadanego miernika przystosowanego do pracy w PEM, co nie jest bez znaczenia (z reguły sprzęt pomiarowy nie projektowany do pracy w PEM o dużych natężeniach, w warunkach takich działa niepoprawnie – nie wystarczy tu spełnianie norm kompatybilności elektromagnetycznej).



Rys. 3. Schemat blokowy selektywnej sondy m.cz. do szerokopasmowego miernika PEM.

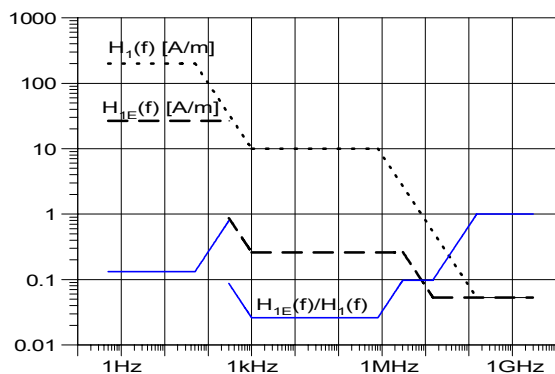
4. MIERZYĆ CZY WYZNACZAĆ?

Najwięcej kontrowersji w nowych przepisach ochronnych wzbudziła konieczność oceny składowej magnetycznej PEM aż do 3 GHz. Świadomie zostało tu użyte pojęcie „ocena”, gdyż przepisy pozwalają na wyznaczanie danej wielkości na podstawie pomiaru innych. Oczywiście jest to obwarowane pewnymi obostrzeniami. W przypadku znacznej dominacji jednej ze składowych PEM dopuszcza się przyjęcie do oceny wyników pomia-

rów tylko tej składowej. Kryterium decydującym o możliwości zastosowania takiej procedury jest impedancja pola zdefiniowana w [3] jako stosunek zmierzonych w punkcie pomiarowym wartości natężenia pola elektrycznego do natężenia pola magnetycznego dla danej częstotliwości. Dla pól wielkiej impedancji dokonuje się pomiarów tylko pola elektrycznego, dla pól małej impedancji - magnetycznego.

| | |
|--------------------------|--------------------------------|
| pole wielkiej impedancji | $E/H > 10E_2/H_2$ |
| pole średniej impedancji | $0.1E_2/H_2 > E/H > 10E_2/H_2$ |
| pole małej impedancji | $E/H < 0.1E_2/H_2$ |

Impedancje mierzonego pola należy ustalić na podstawie pomiarów lub orzecznictwa - tyle norma. Można jednak przeprowadzić inną analizę wykorzystującą to pojęcie. Oszacować jaka jest, z formalnego punktu widzenia, istotność składowej elektrycznej i magnetycznej w wyznaczaniu ekspozycji. Do tego celu przyjęto następujące założenie: pole w punkcie pomiaru odpowiada warunkom pola dalekiego, tj. $E/H=377\Omega$ (możliwość praktycznego przyjęcia powyższego założenia zostanie przeanalizowana w dalszej części pracy). Pozwala to wyznaczyć składową H pola na podstawie pomiaru E (niech tak wyznaczona wartość będzie oznaczona jako H_E). Przyrównując tę wartość, określoną dla granicy strefy „elektrycznej”, do wartości dopuszczalnej granicy strefy „magnetycznej” uzyskuje się interesujące wyniki. Dla przyjętego założenia, aż do częstotliwości 150 MHz strefa „elektryczna” obejmuje swoim zasięgiem strefę „magnetyczną”. Powyżej tej częstotliwości obydwie strefy mają identyczny zasięg, a więc to pomiar składowej elektrycznej wyznacza zasięg stref, zaś przy obliczaniu wskaźnika ekspozycji korzysta się z obu składowych. Na wykresie z rysunku 4, obok wartości dopuszczalnych pola magnetycznego $H_1(f)$ i wyznaczonej $H_{1E}(f)$, przedstawiono również przebieg stosunku obu wartości w funkcji częstotliwości.



Rys. 4. Dopuszczalne natężenia pola magnetycznego

Korzystając z tej zależności oraz [2] można zapisać:

$$W = W_E + W_H = W_E \cdot (1 + (H_{1E} / H_1)^2)$$

Oznacza to, że dla częstotliwości poniżej ok. 30 MHz przy ocenie można praktycznie pominąć wpływ składowej magnetycznej (pamiętając o przyjętym założeniu), a powyżej 150 MHz należy dwukrotnie zmniejszyć czas pracy w strefie zagrożenia niżby to wynikało z ekspozycji na składową elektryczną.

Teraz należy jeszcze rozważyć kiedy poczynione założenie jest słuszne. W pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że muszą być spełnione warunki dla promieniowania, a więc systemy radiokomunikacyjne niezależnie od częstotliwości, a w przypadku urządzeń ISM powinien być spełniony warunek odpowiednio dużych wymiarów elektrycznych. Można zaryzykować stwierdzenie, że warunki takie zachodzą dla częstotliwości powyżej 30 MHz. Oczywiście nie można uogólniać, ale można przeprowadzić weryfikację pomiarową poszczególnych klas urządzeń (np. diatermie czy zgrzewarki w.c.) Dla systemów radiokomunikacyjnych w zakresie mikrofalowym i radiofalowym można na podstawie [8] i [9] przyjąć jako minimalną odległość największy wymiar geometryczny anteny.

5. APARATURA POMIAROWA

Wprowadzenie nowych przepisów nie spowodowało większej rewolucji w aparaturze pomiarowej, gdyż niezależnie od formalnego podejścia, zasady metrologii PEM w polu bliskim są niezmiennie. Odpowiednie zapisy w [3] umożliwiają dalsze stosowanie istniejącej na rynku aparatury pomiarowej, zmienia się tylko w niektórych sytuacjach interpretacja wyników (np. pomiar składowej elektrycznej zamiast gęstości mocy w zakresie mikrofal, oczym napisano wcześniej). Na podstawie napisanego w rozdziale 4, wydaje się być rozsądnym wykonywanie bezpośrednich pomiarów składowej magnetycznej PEM do częstotliwości ok. 30 MHz ze szczególnym uwzględnieniem urządzeń przemysłowych pracujących w paśmie 27.12 MHz. Praktycznie tylko wokół takich urządzeń ISM mogą występować pola magnetyczne o natężeniach istotnych w porównaniu z natężeniem pola elektrycznego. W celu umożliwienia wykonywania takich pomiarów, w ITA została opracowana sonda pomiarowa o oznaczeniu AH-27 z pasmem pracy 10-60MHz i czułością zgodną z wymogami przepisów ochronnych.

W normie [2] znalazł się również bardzo ważny zapis dotyczący nadzoru metrologicznego nad aparaturą pomiarową, mówiący o wymogu okresowego wzorcowania miernika potwierdzonego świadectwem sprawdzenia oraz bieżącej kontroli poprawności wskazań przed każdym pomiarem. O ile sposób okresowej kontroli sprzętu pomiarowego nie budzi wątpliwości, (wzorcowanie mierników pola elektromagnetycznego, jak każdej innej aparatury pomiarowej, powierza się kompetentnemu laboratorium wzorców lub producentowi sprzętu) to pojawia się pytania jak najlepiej wykonać choćby uproszczone sprawdzanie poprawności pracy miernika w warunkach terenowych. Autorowi znane są różne metody oparte o wykorzystanie ogólnie dostępnych „źródeł” PEM typu telefon komórkowy, kuchenka mikrofalowa czy monitor komputerowy lub lutownica

transformatorowa. Większość tych metod pozwala na wydanie binarnej opinii o zestawie pomiarowym: wychyla się lub nie. Więcej informacji może dostarczyć przenośny sprawdzian wykorzystujący źródła pola o znanych i kontrolowanych parametrach. Przykładem niech będzie wiekowy USMEH – sprawdzian sond AE-1 i AH-1 – niegdyś podstawowego zestawu MEH. Obecnie opracowywany jest jego następca pozwalający na bieżącą kontrolę wszystkich sond oferowanych do miernika MEH.

SPIS LITERATURY

- [1] Rozporządzenie MPiPS z 2.01.2001r. Dz.U. nr 4/2001 z 23.01.2001r. poz.36.
- [2] PrPn-T-06580-3
- [3] PrPn-T-06580-1
- [4] P. Bieńkowski : Ochrona przed polem elektromagnetycznym - nowe przepisy, wymagania i pomiary. KKRRiT 2001. Poznań, s. 17.1-1 - 17.1-3
- [5] H. Aniołczyk (red.): Pola elektromagnetyczne źródła – oddziaływanie – ochrona, IMP 2000
- [6] P. Bieńkowski: Selekttywne pomiary PEM niskich częstotliwości dla celów ochronnych. Prz. Telekomun. Wiad. Telekomun. nr 8/9 2001, s. 535-538
- [7] <http://www.tomtronix.com.pl/ht/energy2020e.htm>
- [8] R Kubacki: Modelowanie rozkładu promieniowania mikrofalowego w polu bliskim anten oraz pewne konsekwencje biomedyczne, Rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa 2000
- [9] E. Grudziński, W. Wadowski: Pomiar gęstości mocy w polu bliskim, Prace IŁ. W-wa 1977, nr 83, ss. 71-83