

Eugeniusz GRUDZIŃSKI

POLITECHNIKA WROCLAWSKA, LABORATORIUM WZORCÓW I METROLOGII POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Układy wzorców pola elektrycznego i magnetycznego w metrologii gęstości mocy

Dr hab. inż. Eugeniusz GRUDZIŃSKI

Urodzony w 1948 r. w Miękinii. Od 1972 r. związany z wytwarzaniem i szeroko pojętą metrologią pól elektromagnetycznych prowadzoną w Instytucie Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Kierownik Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego akredytowanego w PCA (badawczego - AB 361 i wzorującego - AP 078) w zakresie częstotliwości do 50 GHz. Autor i współautor ponad 160 prac i patentów.



e-mail: eugeniusz.grudzinski@pwr.wroc.pl

Streszczenie

Szybki rozwój i wykorzystanie wielu źródeł mocy w zakresie małych i wielkich częstotliwości w przemyśle, telekomunikacji, nauce, technice i medycynie, wojsku, a nawet w gospodarstwie domowym spowodował rozwój narzędzi służących do pomiarów pola elektromagnetycznego (PEM) i związanej z tym metrologii pól elektromagnetycznych. W ochronie pracy i środowiska są to pomiary w bezpośrednim otoczeniu pierwotnych i wtórnych źródeł. Znaczną degradację dokładności pomiaru powodują specyficzne własności pola, w tym szczególnie pola bliskiego. Wymienione czynniki są źródłem wielu błędów zarówno na stanowiskach wzorców jak i bezpośrednio w trakcie pomiarów terenowych.

Słowa kluczowe: wzorce pola elektrycznego, wzorce pola magnetycznego, gęstość mocy

Systems of the electric and magnetic field standards in the power density metrology**Abstract**

The development of contemporary civilization is associated with the consumption of more and more quantities of electromagnetic energy in communication, technology, science, medicine, and military in the household. The hazard created by an exposure to EMF requires the field measurements in the neighborhood of primary and secondary field sources. Remarkable degradation of the measurement accuracy is specific properties of the field, and in particular the near-field. The factors mentioned reduce the accuracy of the measurements both while the measurements are done with the use of standard field sets in a Lab and during the field measurements.

Keywords: electric field standards, magnetic field standards, power density

1. Wprowadzenie

Wraz z rozwojem zastosowań źródeł mocy zwłaszcza wielkich częstotliwości w różnych dziedzinach od telekomunikacji, przemysłu, nauki, medycyny, wojska a nawet w gospodarstwie domowym nastąpił rozwój narzędzi służących do pomiarów pola elektromagnetycznego (PEM). Pomiar pola elektrycznego E , magnetycznego H oraz gęstości mocy S jest prowadzony przede wszystkim w trzech dziedzinach jako:

- pomiar swobodnie rozchodzących się fal elektromagnetycznych w telekomunikacji, radiolokacji, radionawigacji, radioastronomii, geofizyce itp. Do tej dziedziny można zaliczyć także pomiary propagacyjne i antenowe,
- pomiar zakłóceń radioelektrycznych w celu zapewnienia harmonijnego współistnienia urządzeń i systemów w środowisku elektromagnetycznym, stanowiący przedmiot kompatybilności elektromagnetycznej dotyczący zarówno zastosowań wymienionych w p.1, jak i źródeł promieniowania elektromagnetycznego pochodzącego od silników spalinowych

i elektrycznych, linii elektroenergetycznych, sprzętu informatycznego, wyładowań atmosferycznych i innych, c) pomiary napromieniowania biosfery zarówno w aspekcie bezpieczeństwa pracy, zwłaszcza w otoczeniu urządzeń wytwarzających PEM, jak i ochrony środowiska elektromagnetycznego w skali globalnej, a przede wszystkim bezpieczeństwa ludzi.

Niestety do dnia dzisiejszego bezpośredni sposób pomiaru PEM nie jest znany i jest ono określane na podstawie pomiaru prądu, napięcia, lub innej wielkości fizycznej w dowolnej strukturze nazywanej anteną nadawczą lub odbiorczą. Dokładność wyznaczenia PEM jest zależna od dokładności z jaką te wielkości są mierzone jak i od dokładności określenia tej struktury oraz wpływu szeregu czynników zewnętrznych. Wzorcowe PEM wytwarzane są na stanowiskach tzw. wzorców pierwotnych, na których to kalibrowane są następnie stosowane powszechnie w metrologii PEM różnego typu mierniki natężenia pola elektromagnetycznego [1].

2. Wzorce pola elektrycznego

W zależności od wytwarzanej lub wyznaczanej składowej PEM można wyróżnić wzorce natężenia pola elektrycznego i magnetycznego. Analizując współzależność pomiędzy składowymi pola E i H można natomiast powiedzieć, że każdy wzorec pole elektrycznego może być wzorcem pola magnetycznego a każdy wzorec pola magnetycznego może być wzorcem pola elektrycznego. Dotyczy to nie tylko samych stanowisk wzorców, lecz całej metrologii pola elektromagnetycznego. Warunkiem tej pełnej zamienności jest konieczność wykonywania pomiaru lub wyznaczania wzorcowego pola elektromagnetycznego w tzw. polu dalekim źródła lub w warunkach fali płaskiej. Jednak ze względów czysto praktycznych wynikających głównie z mocy niezbędnych do spełnienia warunku strefy dalekiej źródła wzorce pola elektrycznego E i magnetycznego H zostały tu przedstawione oddzielnie.

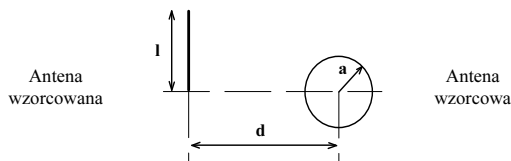
2.1. Wzorcowanie mierników wyposażonych w anteny prętowe

Mierniki natężenia pola elektrycznego, wyposażone w anteny prętowe, stosowane są najczęściej w pomiarach propagacyjnych w zakresie częstotliwości do 30 MHz a jako zestawy anten szerokopasmowych nawet do 300(1000) MHz. Dotychczas do wzorcowania takich mierników używano wzorcowej anteny nadawczej w postaci anteny prętowej o znanych parametrach i na podstawie pomiaru jej pobudzenia (prądu dopływającego do jej podstawy) wyznaczano drogą analityczną natężenie pola E w wymaganej odległości od niej. Wadą tego rozwiązania są kłopoty z dopasowaniem wzorcowej anteny do źródła mocy w.cz., duża wrażliwość anteny prętowej na zaburzenie PEM w jej otoczeniu, potrzeba stosunkowo dużej powierzchni pola pomiarowego, itp. Znaczne uproszczenie daje tutaj zastosowanie jako wzorcowej anteny nadawczej anteny ramowej [2].

Poza wyeliminowaniem w/w wad antena ramowa ma tylko jedną składową natężenia pola elektrycznego E a dodatkowo ze względu na impedancję własną pozwala na uzyskanie znacznie większych natężeń dla porównywalnej mocy źródła zasilającego. Istnieje tutaj także znacznie większa możliwość doprowadzenia samej anteny do rezonansu i wykorzystanie tych właściwości zarówno jako dodatkowego filtra jak też do maksymalizacji prądu pobudzenia samej anteny.

Wzajemne położenie anteny wzorcowej i wzorcowanej przedstawiono na rys. 1. Antena wzorcowa i wzorcowana

umieszczone są na wspólnej płaszczyźnie, która odpowiada maksimum pola elektrycznego E anteny wzorcowej.



Rys. 1. Wzorcowanie anteny prętowej wzorcową anteną ramową
Fig. 1. A dipole antenna calibration with a standard loop

Ponieważ antena wzorcowca może być zasilana z dowolnego źródła ze względu na bardzo dużą zależność jej parametrów od aktualnej częstotliwości pożądaną jest zasilanie jej poprzez filtr dolno lub pasmowo przepustowy. Pobudzenie anteny wzorcowej najczęściej jest mierzone na jej wejściu za pomocą termoelementu lub przy użyciu transduktora. Jeżeli przedmiotem wzorcowania jest antena prętowa o długości l , to uśredniona na jej długości wartość pola E wynosi:

$$E = \frac{\pi a^2 Z_0 I}{2\lambda d D} \sqrt{1 + k^2 D^2} \left[\frac{V}{m} \right], \quad (1)$$

gdzie: I - natężenie prądu pobudzającego w [Azw], Z_0 - impedancja falowa swobodnej przestrzeni, $Z_0 = 377 [\Omega]$, a - promień anteny ramowej [m], r - odległość od środka anteny ramowej do punktu obserwacji [m], d - odległość od środka anteny ramowej do podstawy anteny prętowej, $D = \sqrt{d^2 + a^2 + l^2}$.

Gdy dla danego stanowiska wzorca spełnione są następujące warunki: $l < d/4$ oraz $a < d/4$, to niedokładność wyznaczenia natężenia pola E , określonego wzorem (1), nie przekracza 1 %.

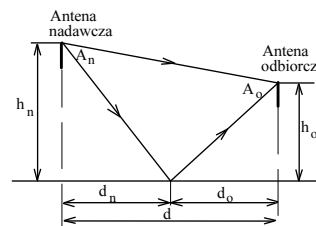
2.2. Wzorcowanie mierników pola E wyposażonych w symetryczne anteny dipolowe

Istnieją dwie grupy zastosowań mierników pola elektrycznego wyposażonych w symetryczne anteny dipolowe. Są to jest mierniki przeznaczone do pomiarów w polu dalekim w przedziale częstotliwości do około 30 MHz a nawet do 300(1000) MHz wyposażone w anteny o wymiarach rezonansowych (również szerokopasmowe) oraz mierniki pola bliskiego przeznaczone do pomiarów w zakresie częstotliwości od pojedynczych herców do kilkudziesięciu gigaherców z wykorzystaniem elektrycznie krótkich anten dipolowych. Ze względu na wartości mierzonych PEM a także na rozmiary anten są tu stosowane trzy podstawowe metody ich wzorcowania:

- metoda połowa wzorcowania mierników z antenami rezonansowymi; metoda ta jest rozszerzana na wzorcowanie także mierników wyposażonych w proste anteny kierunkowe (anteny Yagi-Uda, logarytmiczno-periodyczne) stosowane na częstotliwościach do 1 GHz, natomiast przy wyższych częstotliwościach i mniejszych rozmiarach anten wzorcowanie może być prowadzone w komorze bezchowej,
- wykorzystanie odcinka linii TEM do wzorcowania anten o rozmiarach małych elektrycznie w zakresie częstotliwości od 0 – 1 GHz,
- wzorcowanie wszystkich typów anten na częstotliwościach powyżej 1 GHz prowadzi się metodami właściwymi dla technik mikrofalowych, najczęściej z zastosowaniem pasmowych lub szerokopasmowych anten aperturowych (tubowych) [3].

Ilustrację wykorzystywania tzw. metody połowej pokazuje rys. 2. Może być ona zrealizowana zarówno jako metoda wzorcowej anteny nadawczej WAN (nazywana także metodą wzorcowego pola) oraz jako metoda wzorcowej anteny odbiorczej WAO (nazywanej także metodą podstawienia). Obie te metody są ze sobą w pełni równoważne i praktycznie zapewniają zbliżone dokładności wytwarzania wzorcowego PEM. Ich równoczesne

stosowanie (wzorcowanie z wykorzystaniem dwu, niezależnych metod tzn. metody WAN i WAO) pozwala na eliminację niektórych błędów a przez to na podniesienie dokładności wzorcowania.



Rys. 2. Geometria propagacji przy wzorcowaniu mierników z antenami dipolowymi
Fig. 2. Geometry of propagation on an OATS

Kłopoty związane z pomiarem pobudzenia anteny nadawczej, spowodowały ograniczenie jej wykorzystania na rzecz metody WAO lub metody podstawienia. W metodzie podstawienia wytwarza się dowolne PEM, które jest mierzone (wyzorcowane) za pomocą wzorcowej anteny odbiorczej a następnie w jej miejsce umieszcza się antenę wzorcowanego miernika, zakładając przy tym, że w trakcie zamiany anten natężenie pola wzorcowego nie uległo zmianie. Natężenie to określa się na podstawie pomiaru siły elektromotorycznej e_A , indukowanej w antenie wzorcowej, przez oddziaływujące na nią PEM. Wynosi ona:

$$e_A = E \cdot h_{sk}, \quad (2)$$

gdzie: h_{sk} - długość (wysokość) skuteczna anteny wzorcowej (WAO) [m].

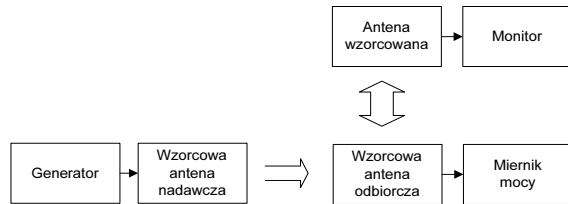
Długość skuteczną anteny wzorcowej wyznacza się teoretycznie i weryfikuje eksperymentalnie. Pomiar SEM e_A przeprowadza się najczęściej po detekcji, na prądzie stałym, przyrządem o dużej impedancji wejściowej. W przypadku szerokopasmowej pracy wzorcowej anteny odbiorczej jest to powód szczególnej wrażliwości tej metody na działanie niepożądanych PEM lub harmonicznych przebiegu podstawowego. Dodatkowo wykorzystanie tej metody wymaga także wzorcowania układu detekcyjnego każdorazowo przed pomiarem w identycznych warunkach temperaturowych w jakich będzie prowadzone wzorcowanie. Ograniczenie zewnętrznych zakłóceń możliwe jest poprzez pomiar napięcia na zaciskach dopasowanej do obciążenia, anteny wzorcowej za pomocą typowego woltomierza selektywnego w.c.z. o standardowej impedancji wejściowej lub prowadzenie pomiarów w komorze bezchowej gdzie poza wyeliminowaniem problemów zakłóceń niezależnie się także od warunków klimatycznych.

Wzorcowanie w komorze bezchowej powoduje jednak eliminację promienia odbitego od powierzchni ziemi, przez co zniekształca warunki wzorcowania w stosunku do rzeczywistych warunków pomiaru na poligonie pomiarowym, co jest szczególnie istotne przy wzorcowaniu mierników wyposażonych w anteny kierunkowe. Dla usunięcia tej niedogodności w komorze bezodbićowej (bezchowej) stwarza się często sztucznie możliwość wystąpienia promienia odbitego poprzez wyłożenie materiałem przewodzącym obszaru odpowiadającego co najmniej pierwszej strefie Fresnela, pomiędzy źródłem PEM a anteną odbiorczą. W przypadku wzorcowego pola elektrycznego E podstawowym czynnikiem ograniczającym jego dokładność jest dokładność wyznaczenia parametrów anteny wzorcowej, dokładność pomiaru pobudzenia a także jakość samego sygnału pobudzającego wzorec oraz geometria propagacji i jej czasowa i przestrzenna stabilność.

3. Wzorce pola magnetycznego

Istota wzorcowania mierników z antenami ramowymi (lub ferrytowymi) metodą WAN jest podobna do pokazanej na rys. 2.

Wzorcowa antena nadawcza A_n jest umieszczona w odległości d od anteny A_w wzorcowanego miernika. Średnią wartość natężenia pola magnetycznego w miejscu umieszczenia anteny A_w wyznacza się na podstawie geometrii układu, rozmiarów anten oraz pomiaru prądu pobudzającego WAN. Anteny A_n i A_w umieszcza się w odległości, co najmniej $3d$ od najbliższych przedmiotów przewodzących, co pozwala na rozpatrywanie w tym układzie jedynie niezaburzonego sprzężenia bezpośredniego pomiędzy antenami. Na rys. 3 przedstawiono schemat blokowy wzorca z jednoczesną możliwością wykorzystania obu metod do wzajemnej ich weryfikacji.



Rys. 3. Schemat blokowy wzorca PEM z wykorzystaniem metod (WAN i WAO)
Fig. 3. Schematic diagram of the standard EMF method (the standard transmitting antenna and the standard receiving antenna)

Pierwszym i podstawowym kryterium zapewniającym poprawną pracę wzorca jest dobór średnicy anteny tak, aby była ona elektrycznie mała tzn. spełniała warunek $2\pi r_n \ll \lambda_{min}$ dla maksymalnej częstotliwości pracy danej anteny nadawczej. Związane to jest z rozkładem prądu wzdłuż obwodu anteny i dotyczy średnicy anteny jednozwojowej. W przypadku anten wielozwojowych dopuszczalna średnica jest dodatkowo zależna od ilości zastosowanych w niej zwojów.

Dla dwu ramowych anten kołowych o promieniu r_n i r_0 średnia wartość natężenia pola magnetycznego H_{sr} na powierzchni anteny odbiorczej wytwarzanego przez prąd płynący w antenie nadawczej, przy współosiowym umieszczeniu obu anten w odległości d wynosi:

$$H_{sr} = \frac{I r_n}{\pi r_0} \int_0^\pi \frac{\exp(-jkR)}{R} \cos \Phi d\Phi, \quad (3)$$

gdzie: $R = \sqrt{d^2 + r_n^2 + r_0^2 - 2r_n r_0 \cos \Phi}$, Φ - kąt środkowy anteny nadawczej.

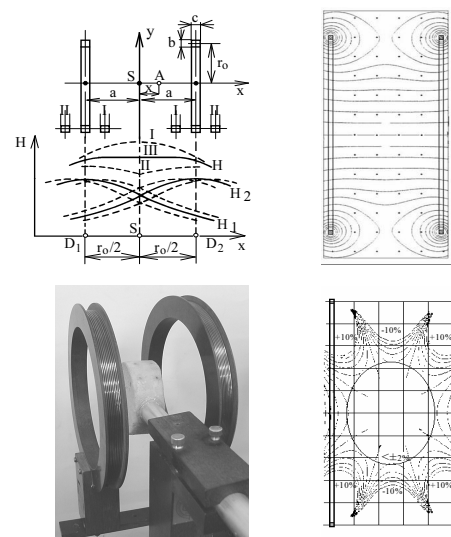
Dla $d/r_0 > 4$ oraz $d/r_n > 4$ wzór (3) z dokładnością do 1 % można zapisać w postaci:

$$|H_{sr}| = \frac{I S_n}{2 \pi R_0^3} \sqrt{1 + k^2 R_0^2}, \quad (4)$$

gdzie: $R_0 = \sqrt{d^2 + r_n^2 + r_0^2}$, I - prąd w antenie (Azw), S_n - powierzchnia anteny nadawczej (m^2), r_n - promień anteny wzorcowej (m), r_0 - promień anteny wzorcowanej (m), d - odległość pomiędzy antenami (m), $k = 2\pi/\lambda$ - stała propagacji, λ - długość fali w swobodnej przestrzeni (m).

Tak, więc w przypadku klasycznego układu wzorca pola magnetycznego z WAN wzorcowe PEM wyznacza się na podstawie pomiaru natężenia prądu I płynącego w antenie nadawczej i geometrii układu. Z zależności tej widać szybkie malenie natężenia pola magnetycznego w funkcji odległości od wzorcowej anteny nadawczej a więc niedokładność ustawienia anteny wzorcowanej w miejscu wzorcowania odgrywa tu bardzo dużą rolę na popelniany błąd wzorcowania. Aby ten czynnik wyeliminować szczególnie w zakresie częstotliwości, w których całkowite wymiary geometryczne anteny są znacznie mniejsze od długości fali istnieje możliwość wykorzystywania wzorca pola magnetycznego pracującego na przykład w układzie cewek Helmholtza, itp.

Układ cewek Helmholtza składa się z dwu jednakowych cewek, które są połączone szeregowo tak, że pola magnetyczne każdej z nich się dodają, a umieszczenie ich względem siebie w określonej odległości pozwala na uzyskanie znacznego uniezależnienia się od zmian rozkładu pola magnetycznego w pewnym zadanym obszarze. Dla lepszego zobrazowania szybkości zmian natężenia pola magnetycznego występującego w zestawie dwu anten pracujących w układzie Helmholtza na rys. 4 przedstawiono zmiany natężenia pola magnetycznego występującego w obszarze analizowanych anten odniesione do natężenia pola występującego w środku geometrycznym tych anten, ograniczając obszar zmian natężenia pola magnetycznego do przedziału $< 10\%$. Dla dwu anten pracujących w układzie Helmholtza zaznaczono jednocześnie obszar, w którym dopuszczalna teoretyczna zmiana natężenia pola magnetycznego nie przekracza 2%. Na stanowiskach wzorców PEM generalnie dąży się do wytworzenia możliwie dużego obszaru wzorcowego PEM o dużej jednorodności. Należą do nich np. komory z falą TEM, cewki Helmholtza itp. Niestety nie znajduje to odzwierciedlenia w typowych źródłach w otoczeniu, których wykonywane są pomiary wzorowanymi na takich stanowiskach miernikami natężenia pola elektromagnetycznego, co może być źródłem dodatkowych błędów.



Rys. 4. Wzorec pola magnetycznego z cewkami Helmholtz'a
Fig. 4. Magnetic field standard with the Helmholtz coils

4. Struktura PEM

Stosowane w metrologii pola elektromagnetycznego mierniki służą do wyznaczania natężenia pola w otoczeniu różnego rodzaju urządzeń technicznych, poziomu pola w układach ekspozycyjnych oraz granic stref ochronnych związanych z bezpieczeństwem i ochroną pracy oraz ochroną środowiska. W wielu przypadkach stosowana aparatura nie jest przystosowana do wykonywania pomiarów w bezpośrednim otoczeniu źródeł lub w znaczący sposób zniekształca uzyskiwane wyniki. Decydują o tym rodzaj zastosowanego czujnika, rodzaj źródła i jego maksymalne wymiary D określające minimalne odległości R od źródła, dla których możemy mówić o tzw. obszarze strefy bliskiej lub dalekiej źródła wyrażonej zależnością [4]:

$$\text{pole bliskie dla: } R \leq \frac{D}{4} + \frac{D}{2} \left(\frac{D}{\lambda} \right)^2 \text{ i pole dalekie dla: } R \geq \frac{2D^2}{\lambda}. \quad (5)$$

Dla pola dalekiego źródła mamy najczęściej do czynienia z falą płaską gdzie wektor E jest prostopadły do wektora H a wzajemna relacja między nimi jest opisana zależnością: $E/H = 377\Omega$, co pozwala na pełną wzajemną wymiennność w dokonywaniu pomiarów E lub H . W Polsce taka relacja stosowana była dotychczas dla częstotliwości od 300(1000) MHz i powyżej nich wyznaczano

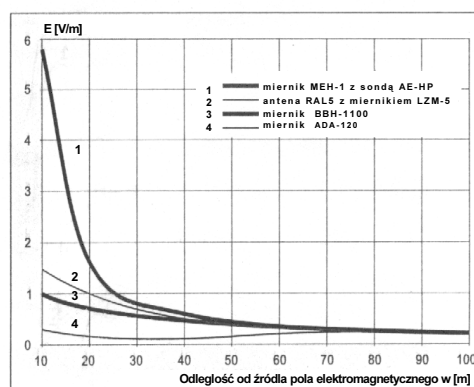
tylko składową elektryczną pola elektromagnetycznego. Wyznaczenie S wymaga znajomości E i H oraz przesunięcia fazowego między nimi a pomiar taki, jeżeli w ogóle ma sens w praktyce najczęściej prowadzi się na podstawie pomiaru E lub/i H . W praktyce większość współczesnych mierników opiera się na pomiarze E i wyznaczeniu S na podstawie zależności zdefiniowanej dla pola dalekiego:

$$S = S_E = S_H = \frac{E^2}{Z_0} = H^2 Z_0, \quad \text{gdzie: } Z_0 = 120\pi [\Omega]. \quad (6)$$

5. Weryfikacja analityczna i eksperymentalna

Zmienne relacje między składowymi pola E i H w bezpośrednim otoczeniu źródła często w praktyce prowadzi nawet doświadczonych metrologów do błędnej interpretacji uzyskiwanych wyników pomiarów. W związku z tym niezmiernie istotne jest poprawne wykonanie pomiarów określoną sondą pomiarową lub miernikiem reagującym poprawnie na właściwą składową. W wielu przypadkach wykorzystywane są, bowiem w praktyce w polach bliskich źródła mierniki natężenia pola elektromagnetycznego z antenami ramowymi reagującymi na składową magnetyczną a wyskalowanymi w jednostkach natężenia pola elektrycznego zgodnie z zależnością słuszną dla pola dalekiego źródła. Wyniki takiej weryfikacji eksperymentalnej z wykorzystaniem kilku mierników po uprzednim sprawdzeniu ich poprawności wzorcowania w LWIMP ITTA PWr. przedstawiono na rys. 5.

Z przedstawionych przebiegów widać, że nawet przy bardzo małych częstotliwościach, możliwe jest stosowanie różnych czujników pola niezależnie od przyjętego sposobu ich kalibracji, lecz przy zachowaniu, odpowiedniej minimalnej odległości od źródła [4]. Należy zaznaczyć, że występujące tu ograniczenie, co do poprawności pomiarów w minimalnej odległości pomiarowej znacznie łagodnieje wraz ze wzrostem częstotliwości pracy źródła. Dla potwierdzenia tego stwierdzenia szczególnie po pojawieniu się przepisów i wymagań odnośnie konieczności wyznaczania składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego aż do 3 GHz!!! w LWIMP ITTA PWr. przeprowadzono szereg dodatkowych pomiarów PEM w otoczeniu różnych źródeł ze szczególnym zwróceniem uwagi na częstotliwości wyższe, takie jak np. nadajniki radiowe UKF FM, stacje bazowe telefonii komórkowej pracujące w paśmie 900 i 1800 MHz które przedstawiono w pracy [5]. Pomiary prowadzono wykorzystując opracowany i wykonany w ITTA Politechniki Wrocławskiej typowy miernik MEH oraz współpracujące z nim standardowe sondy pomiarowe pozwalające na prowadzenie pomiarów w zakresie częstotliwości od 10 Hz – 50 GHz.



Rys. 5. Przykładowe wyniki pomiarów PEM różnymi miernikami
Fig. 5. Exemplary results measurements of electromagnetic field meters

Wyniki z przeprowadzonych pomiarów i wyznaczonej na ich podstawie szacunkowej impedancji w otoczeniu obmierzanego źródła przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Przykładowe charakterystyki częstotliwościowe mierników PEM i uzyskane wyniki pomiarów

Tab. 1. Exemplary frequency characteristics of EMF meters and results of measurements E and H fields

Typ sondy		Zakres częstotliwości		
AE-3		1 – 100 kHz		
AE-1, 3AE-1		0,1 – 300 MHz		
AS-1, 3AS-1		0,3 – 3 GHz		
AH-1, 3AH-1		0,1 – 10 MHz		
AH-3		1 – 100 kHz		
AH-27s		10 – 100 MHz		
AH-27		10 – 60 MHz		
AH-102		0,2 – 1 GHz		
AH-1100		100 MHz – 1 GHz		
AH 206		0,6 – 2 GHz		
LMZ-5		0,15 – 30 MHz		

f [MHz]	E [V/m]	H [A/m]	Rodzaj sond pomiarowych	Impedancja jako stosunek E/H [Ω]
0.06	20	153	AE-3/AH-3	0,131
0.2	20	0,003	AE-1/AH-1	6667
0.2	20	0,0011	LMZ-5/AMZ-3A	1818
27.12	10	0,011	AE-1/AH-27s/LMZ-5	909
100.5	20	0,042	AE-1/AH-27s	476
225	10	0,024	AE-1/AH-102	417
300	10	0,027	AE-1/AS-1/AH-102	370
900	5	0,013	AS-1/AH-102	385
900	5	0,014	AS-1/AH-102	357
1800	5	0,012	AS-1/AH 206	416

W zależności od stosunku składowej elektrycznej do magnetycznej PEM dla zadanych punktów pomiarowych wyznaczono tzw. impedancję źródła lub określono tzw. pole elektromagnetyczne wielkiej, średniej i małej impedancji [5]. W analizowanym zakresie częstotliwości jest to spełnione dla zakresu częstotliwości powyżej 300 MHz i odległości od źródła powyżej 1 m.

Przedstawione na rys. 5 i zawarte w tabeli 1 wyniki pomiarów uzyskane dla tego samego źródła w pełni pokrywają się z wynikami analiz teoretycznych określającymi granicę odległości od źródła PEM po przekroczeniu, której możemy wyznaczyć gęstość mocy z pomiaru tylko jednej dowolnej składowej E lub H . W zakresie częstotliwości kilkuset kHz są to odległości rzędu kilkudziesięciu metrów natomiast w zakresie bardzo wysokich częstotliwości są to dziesiątki a nawet pojedyncze centymetry. W pełni potwierdziły to także wyniki analiz teoretycznych rozkładu PEM wyznaczone w bezpośrednim otoczeniu anten stacji bazowych telefonii komórkowej przedstawione w pracy [6].

6. Literatura

- [1] Grudziński E.: Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego w świetle nowych unormowań. Przegląd Telekomunikacyjny, No 8-9, 2001, ss. 541-549.
- [2] Grudziński E.: Monografia pt.: Wytwarzanie i pomiar wzorcowych pól elektromagnetycznych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1998 (Biblioteka Kompatybilności Elektromagnetycznej).
- [3] Grudziński E., Widłaszewski W.: Wzorcowanie wzorców pola elektromagnetycznego, V Konferencja naukowo-techniczna, Podstawowe Problemy Metrologii, Ustroń, 14-17 maja 2006, str. 445-452.
- [4] Grudziński E., Nichoga V., Sopilnyk L., Problems with interpreting measurement result in electromagnetic field metrology due to differences and changes in national protective regulation, International Carpatian Conference on EMC, ICC'02, Rzeszow - Lancut, 19-20.09.2002, pp. I.1.1 - I.1.5.
- [5] Grudziński E., Rozwalka K.: Szerokopasmowe pomiary pola magnetycznego w ochronie pracy i środowiska - stan dotychczasowy i najnowsze trendy, Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne Nr 2-3/2004, str. 102-108.
- [6] Grudziński E., Wójcik D.: Prognozowanie narażeń elektromagnetycznych w polu bliskim anten stacji bazowych GSM, Krajowa Konferencja Radiokomunikacji, Radiofonii i Telewizji KKRRiT 2004, Warszawa, 16-18 czerwca 2004, str. 381-384.