

## Eugeniusz GRUDZIŃSKI, Wiesław WIDŁASZEWSKI

50-370 WROCŁAW, UL. WYBRZEŻE WYSPIAŃSKIEGO 27, POLITECHNIKA WROCŁAWSKA, INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI, TELEINFORMATYKI I AKUSTYKI, LABORATORIUM WZORCÓW I METROLOGII POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO 00-139 WARSZAWA, UL. ELEKTORALNA 2, GŁÓWNY URZĄD MIAR (GUM), ZAKŁAD LABORATORIÓW BADAWCZYCH, LABORATORIUM BADAŃ ŚRODOWISKOWYCH I BADANIA OPROGRAMOWANIA

## Wzorce transferowe pola elektromagnetycznego

### Dr hab. inż. Eugeniusz GRUDZIŃSKI

Urodzony w 1948 r. Od 1972 roku związany z wytwarzaniem i szeroko pojętą metrologią pól elektromagnetycznych prowadzoną w Instytucie Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki PWR. Kierownik akredytowanego Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego (LWiMP ITTA PWr.) pomiarowego (AB 361) i wzorcującego (AP 078) w zakresie częstotliwości do 50 GHz. Autor i współautor ponad 180 prac w tym 20 patentów i wniosków racjonalizatorskich.

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



### Inż. Wiesław WIDŁASZEWSKI

Urodzony w 1948 r. Konstruktor wielu urządzeń pomiarowych i testerów z zakresu badań materiałów półprzewodnikowych oraz techniki świetlnej. Od 1994 r. związany z pomiarami i wzorcami pola elektromagnetycznego, a od 1997 r. również z badaniami kompatybilności elektromagnetycznej przyrządów pomiarowych objętych prawną kontrolą metrologiczną. Kierownik Laboratorium Badań Środowiskowych i Badania Oprogramowania GUM.

e-mail: w.widlaszewski@gum.gov.pl



### Streszczenie

W ochronie pracy i środowiska pomiary prowadzone są w bezpośrednim otoczeniu pierwotnych i wtórnych źródeł. Znaczną degradację dokładności pomiaru powoduje wzajemne oddziaływanie źródła pola i anteny pomiarowej oraz innych przedmiotów znajdujących się w miejscu pomiaru, obecność osoby wykonującej pomiar, a także 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 (poligonowych). Pierwszorzędny czynnikiem jest wzajemna komparacja wzorców.

**Słowa kluczowe:** wzorce pola elektromagnetycznego (PEM), pierwotne i wtórne wzorce PEM, porównania wzorców

## Transfer electromagnetic field standards

### Abstract

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 caused by mutual interaction of the measuring antenna, a source of radiation and other conducting bodies that appear in the place where the measurements are performed, a presence of the person performing the measurements and the 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. Foreground role here was played by a possibility of the standards comparison.

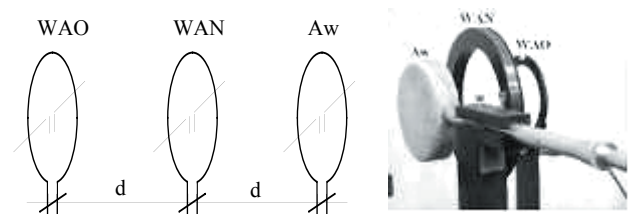
**Keywords:** electromagnetic field (EMF) standards, primary and secondary EMF standards, standard comparison

## 1. Wprowadzenie

Do chwili obecnej nie są znane metody wyznaczania pola elektromagnetycznego (PEM) wprost, tzn. przez porównanie z wzorcem (polem o znanych parametrach). Wszystkie metody są metodami pośrednimi bazującymi na pomiarze takich wielkości fizycznych jak np. napięcie, prąd, moc, temperatura, czas, odległość, powierzchnia, itp. Stosowane są też dwie podstawowe metody wyznaczania wzorcowego pola elektromagnetycznego, tzw. metoda wzorcowej anteny i metoda wzorcowego pola.

W metodzie wzorcowego PEM, w niektórych wersjach nazywanej metodą wzorcowej anteny nadawczej (WAN), źródłem wzorcowego PEM jest dowolny układ promieniujący lub wytwarzający PEM, gdzie na podstawie pomiaru pobudzenia układu oraz geometrii propagacji o dokładnie znanych

(zmierzonych lub obliczonych) parametrach można wyznaczyć na drodze analitycznej natężenie PEM z określoną dokładnością w określonym obszarze lub określonym punkcie przestrzeni. Druga to tzw. metoda podstawienia, nazywana także metodą wzorcowej anteny odbiorczej (WAO), w której PEM jest wytwarzane przez dowolny układ promieniujący i wzorcowane za pomocą anteny o znanych parametrach, przy czym rozpatruje się tu te obszary, w których jednorodność pola można określić analitycznie lub też na podstawie pomiaru. W miejsce wzorcowej anteny odbiorczej (WAO) podstawia się antenę wzorcowanego miernika  $A_w$  (lub inny obiekt badany) zakładając, że natężenie wyznaczonego PEM w trakcie tej operacji nie ulega zmianie. W praktyce metrologicznej rzutuje to na dokładności wzorców PEM. Dla jej poprawy wykorzystywana jest tzw. metoda pola podwójnie wzorcowanego polegająca na wykorzystywaniu obu tych metod jednocześnie, co obrazowo przedstawiono na rys.1. Jest to najczęściej stosowana metoda porównania dwu równorzędnych ze sobą wzorców lub wzorcowania wzorców PEM w warunkach laboratoryjnych, w którym metoda WAN porównywana jest metodą WAO przy jednoczesnym wzorcowaniu anteny wzorcowanej  $A_w$  (z możliwością wzajemnej zamiany miejsc  $A_w$  i WAO). Metoda ta jest wykorzystywana w całym zakresie od małych do bardzo wysokich częstotliwości w różnych warunkach z wykorzystaniem stanowisk laboratoryjnych, komór bezodbiornych lub poligonów pomiarowych, itp. [1].

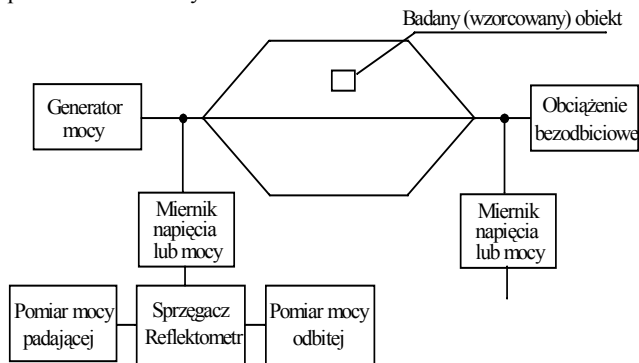


Rys.1. Metoda porównywania wzorców.  
Fig. 1. Method of standards comparison.

## 2. Pierwotne wzorce PEM

Jednymi z szeroko rozpowszechnionych w praktyce metrologicznej układami wykorzystywanymi w metrologii PEM jako układy do badań kompatybilnościowych są komory GTEM a jako wzorce pola elektrycznego i magnetycznego dodatkowo pracujące w bardzo szerokim zakresie częstotliwości komory lub linie pracujące z falą TEM. Schemat blokowy takiego wzorca (wykorzystującego odcinek dopasowanej do generatora i

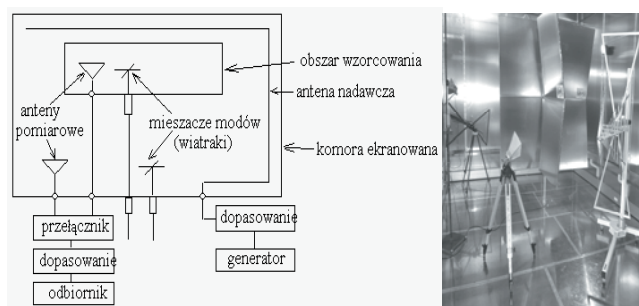
obciążenia linii TEM) pracującego w zakresie częstotliwości od zera do kilkuset MHz zależnie od wymiarów wzorcowanej sondy lub badanego miernika i wymiarów zastosowanej linii przedstawiono na rys. 2.



Rys.2. Schemat układu pomiarowego z linią TEM.  
Fig.2. Configuration of the system with the TEM cell.

Podstawową zaletą tego rodzaju wzorca w zadanym obszarze przestrzeni pomiarowej, jest niezależność formuł opisujących natężenie pola elektromagnetycznego od częstotliwości oraz możliwość znacznego skupienia pola na małym obszarze przestrzeni. Wzorcową wartość natężenia pola wyznacza się z prostych zależności, i tak:  $E=U/D$  dla pola elektrycznego i  $H=U/377D$  dla pola magnetycznego (gdzie:  $U$  jest napięciem pomiędzy elektrodami linii w [V], a  $D$  odległością elektrod w linii TEM w [m]). Należy zaznaczyć, że pełna zamienność pola elektrycznego  $E$  na magnetyczne  $H$  i odwrotnie ma jedynie miejsce w warunkach fali płaskiej lub pola dalekiego źródła. Ze względu na szereg zalet takiego wzorca są prowadzone intensywne prace mające na celu poszerzenie jego zakresu częstotliwości do kilku GHz. W pracach tych wykorzystuje się własne analizy, które pozwalają na realizację tego celu bez degradacji dokładności wzorca.

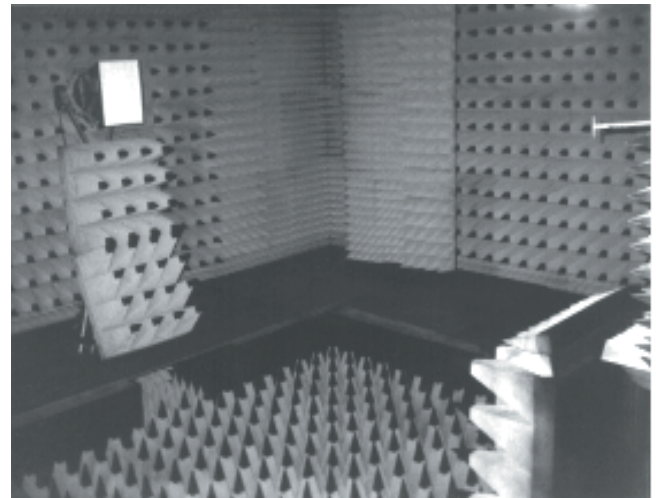
Obecnie coraz powszechniej w metrologii PEM wykorzystywane są także komory o zmiennych modach lub tzw. komory rewerberacyjne przeznaczone głównie do prowadzenia w nich badań i pomiarów różnych dużych obiektów [2]. W zakresie wysokich częstotliwości gdy powstają fale stojące wprowadzenie zmienności PEM może być znaczna jednak można i tu wyróżnić tzw. obszar wzorcowania i wyznaczyć zmienność tego pola w miejscach lub obszarach przeznaczonych głównie do badania wrażliwości na pola elektromagnetyczne dużych obiektów, itp. Schemat blokowy a także widok wnętrza pomiarowego takiej komory rewerberacyjnej znajdującej się w laboratorium LKE ITTA Politechniki Wrocławskiej pokazano dla ilustracji na rys.3.



Rys.3. Komora o zmiennych modach LKE ITTA PW.  
Fig.3. Electromagnetic reverberation chamber LKE ITTA TUW.

W układach wzorców w zakresie częstotliwości powyżej GHz wykorzystuje się najczęściej wzorcowe anteny wraz z metodą wzorcowej anteny nadawczej (WAN) lub odbiorczej (WAO). Stosowane są tutaj pasmowe lub szerokopasmowe anteny tubowe pracujące w przedziale częstotliwości od około 1 GHz do kilkudziesięciu GHz.

Wymaga to pracy na polu pomiarowym lub w komorze bezdechowej, zapewniającej eliminację fal odbitych w pożądanym zakresie częstotliwości. Przykładowy widok takiej komory bezodbiciowej i umieszczonej w niej wzorcowej anteny nadawczej jako źródła wzorcowego pola przedstawiono na rys. 4.



Rys.4. Przykładowe anteny wzorcowe (anteny tubowe) w komorze bezodbiciowej.  
Fig.4. Exemplary standard antennas (pyramidal horns) in anechoic chamber.

### 3. Wzorcowanie wzorców PEM

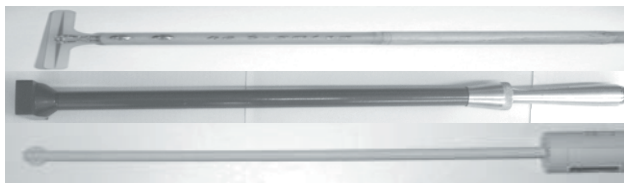
Różnorodność układów, stanowisk, konstrukcji i gabarytów oraz często bardzo drogie oprzyrządowanie powoduje, że pierwotne wzorce PEM nie nadają się do bezpośrednich porównań międzylaboratoryjnych zarówno krajowych jak i zagranicznych.

W praktyce metrologicznej do tych celów wykorzystywane są, tzw. wzorce transferowe służące głównie do przeprowadzania porównań międzylaboratoryjnych krajowych jak i międzynarodowych (kluczowych) pomiędzy laboratoriami zajmującymi się szeroko pojętą metrologią PEM w tym szczególnie badaniami dostępnymi na rynku różnorodnej aparatury kontrolno-pomiarowej jak też samym jej wzorcowaniem.

Wzorce transferowe wykorzystywane są do sprawdzania pierwotnych wzorców pola w wielu laboratoriach na świecie. W międzynarodowych porównaniach wzorców wykorzystuje się najczęściej anteny odbiorcze w postaci krótkich elektrycznie anten dipolowych, obciążonych detektorem diodowym. Cechuje je wówczas duża szerokopasmowość, minimalna deformacja rozkładu mierzonego pola, prosta budowa i małe rozmiary, ułatwiające znacznie transport w tym międzynarodowy bez potrzeby przechodzenia złożonych formalności celnych, itp.

Aktualnie bardzo ważne jest zastosowanie wzorców transferowych do weryfikacji wzorcowego pola elektromagnetycznego generowanego w układach komór bezodbiciowych, liniach TEM i GTEM wykorzystywanych zarówno w układach samych wzorców jak też na różnorodnych stanowiskach do szeroko pojętych badań kompatybilnościowych. Powyższe zastosowania są wymagane przez Polskie Centrum Akredytacji (PCA) do uzyskania jak i utrzymania posiadanych już akredytacji jako laboratorium wzorcujące lub badawcze.

W metrologii pola elektromagnetycznego wielkiej częstotliwości wzorce transferowe mają z kolei bardzo specyficzne wymagania konstrukcyjne. Ich umieszczenie w polu elektromagnetycznym nie powinno powodować zaburzenia tego pola, jak również nie może oddziaływać na samo źródło pola poprzez np. sprzęganie. Widok niektórych wzorców transferowych, które są i były wykorzystywane w porównaniach międzylaboratoryjnych w różnych laboratoriach zagranicznych (NBS, NIST, PTB itp.) jak i krajowych (LWiMP, GUM, LKE, itp.) przedstawiono na rys.5.

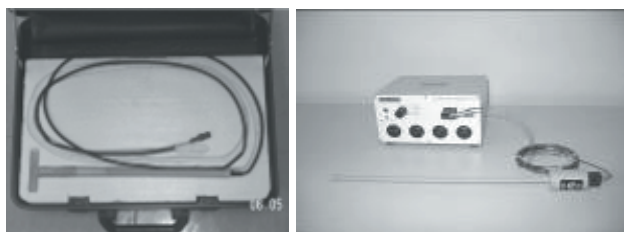


Rys. 5. Wzorcowe anteny odbiorcze NIST, LWiMP i PTB (GUM).  
Fig. 5. Standard receiving antennas NIST, LWiMP and PTB (GUM).

Dla zapewnienia ich szerokopasmowości są to najczęściej układy małych elektrycznie anten o bliżej nieznanych dla uczestników komparacji parametrach pracujących w układzie wzorcowej anteny odbiorczej [2]. Podstawową ich zaletą jest prostota wykonania i wykorzystywania, relatywnie niska cena, możliwość pracy bez potrzeby zasilania sieciowego przez to możliwość prowadzenia komparacji zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i poligonowych [3].

Zadaniem każdego z laboratorium biorącego udział w porównaniach jest wytworzenie na własnych stanowiskach wzorców określonych zadanych poziomów wzorcowych PEM dla częstotliwości wskazanych przez organizatorów takich komparacji. Formą sprawdzenia jakości wzorców posiadanych przez renomowane laboratoria jest międzynarodowa komparacja wzorców prowadzona między innymi pod auspicjami NIST (National Institute of Standards and Technology) w Boulder, USA, który to Instytut jest światowym koordynatorem w dziedzinie metrologii PEM. Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego ITTA Politechniki Wrocławskiej od wielu lat z powodzeniem regularnie uczestniczy w tych komparacjach (jako jedyny przedstawiciel Europy Środkowej i Wschodniej). Wzorce transferowe są również stosowane do przenoszenia jednostki natężenia pola elektromagnetycznego w.c.z. dla zapewnienia spójności pomiarowej tj. powiązania ich z wzorcami państwowymi jednostek miar długości, napięcia, czasu i częstotliwości.

Widok dwu wzorców transferowych wykorzystywanych w międzynarodowych porównaniach międzylaboratoryjnych stosowanych przez NIST (LWiMP) i PTB (GUM) przedstawiono obrazowo na rys. 6.



Rys. 6. Wzorec transferowy NIST (LWiMP) oraz PTB (GUM).  
Fig. 6. Transfer electromagnetic field standards NIST (LWiMP) and PTB (GUM).

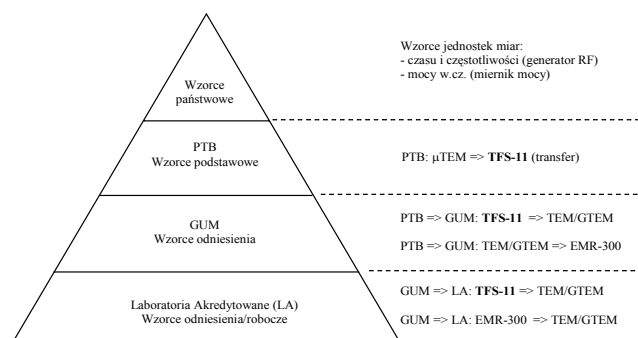
W Głównym Urzędzie Miar jako wzorec transferowy, w zakresie częstotliwości od (1) 10 MHz do 1 (1,5) GHz, stosowany jest wzorec typu TFS-11. Jest to wzorec transferowy skonstruowany w PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), który wraz ze specjalną linią  $\mu$ -TEM stanowi system zapewnienia spójności pomiarowej dla pomiarów pola elektromagnetycznego w laboratoriach wzorcujących i badawczych krajowych instytutów metrologicznych oraz laboratoriów akredytowanych. Wzorec transferowy TFS-11 posiadają oprócz GUM takie krajowe instytuty metrologiczne jak np.: ČMI, NMI, NPL i NML (Pd. Afryka).

Transfer TFS-11 składa się ze skompensowanej termicznie sondy o małych wymiarach geometrycznych, wykonanej w kształcie dysku o średnicy ok. 12 mm i grubości ok. 2 mm,

detektora, wysokorezystancyjnej linii o długości około 2,5 m, przetwornika A/D, z którego kablem światłowodowym sygnał przesyłany jest do komputera oraz z oprogramowania [5]. Zakres mierzonego pola elektromagnetycznego wynosi od 15 V/m do około 80 V/m, a czas ciągłej pracy w zależności od zastosowanego rodzaju baterii wynosi od 8 do 16 godz..

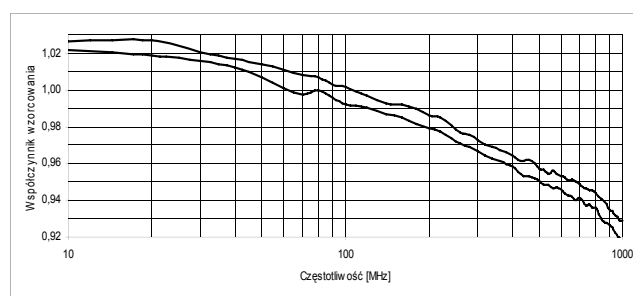
Schemat zapewnienia spójności pomiarowej, zdefiniowanej jako powiązanie z wzorcami państwowymi lub międzynarodowymi jednostki miary, za pośrednictwem nieprzerwanego łańcucha porównań [4], opartego na koncepcji wzorca transferowego TFS-11 z linią  $\mu$ -TEM i systemem przedstawiono na rys. 7.

Zastosowane rozwiązania wzorców transferowych pozwalają dodatkowo na łatwe i bezpieczne dla samego wzorca transferowego pokonywanie odległości pomiędzy poszczególnymi laboratoriami nie tylko w kraju, lecz i poza jego granicami.



Rys. 7. Schemat zapewnienia spójności pomiarowej dla pola elektromagnetycznego w.c.z. - do celów wzorcowania i badań kompatybilności elektromagnetycznej.  
Fig. 7. Scheme of assurance the measurement traceability of high frequency electromagnetic field for the purpose of calibration and electromagnetic compatibility tests.

Podczas wzorcowania sondy wzorca transferowego w linii  $\mu$ -TEM wykonywane zostały także pomiary charakterystyki częstotliwościowej sondy w zakresie temperatury od 16°C do 30°C z krokiem, co 2°C. Na rys. 8 przedstawiono zakres zmian wartości granicznych współczynnika wzorcowania (w funkcji częstotliwości) spowodowany zmianą temperatury otoczenia od 16°C do 30°C, na podstawie wyników wzorcowania wykonanego w 2004 r. w PTB [6].



Rys. 8. Wykres zakresu zmian charakterystyki częstotliwościowej wzorca transferowego TFS-11 od zmiany temperatury otoczenia w zakresie 16°C do 30°C.  
Fig. 8. Graphic of the scope of frequency response changes of the transfer standard TFS-11 versus ambient temperature changes in the range from 16°C to 30°C.

Z powyższego wykresu wynika, że kompensacja temperaturowa sondy jest bardzo skuteczna w szerokim zakresie temperatur i w praktyce podczas pomiarów zakres ten nie jest przekraczany. Maksymalna wartość odchylenia standardowego uzyskanych wyników współczynnika wzorcowania z rys. 8 wynosi 0,0043 tj. około 0,5 % natomiast niepewność rozszerzona ( $k=2$ ) uzyskanych wyników wzorcowania nie przekracza 1 dB w całym zakresie częstotliwości.

Powyższe cechy wzorca transferowego TFS-11, preferują jego praktyczne wykorzystanie do weryfikacji wzorcowego pola elektromagnetycznego stosowanego do celów kompatybilności

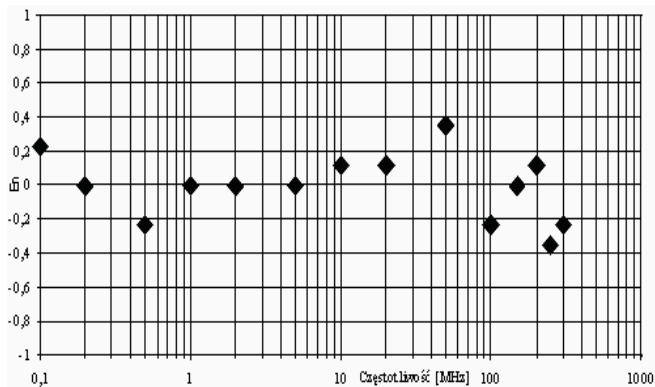
elektromagnetycznej np. w liniach TEM i komorach GTEM. Ze względu na małe wymiary sondy pomiarowej w odniesieniu do wymiarów geometrycznych zdecydowanej większości badanych obiektów (EUT), możemy również wykonywać pomiary zaburzania pola elektromagnetycznego przez badany obiekt. Jest to ważne szczególnie w przypadkach, kiedy badany obiekt jest na tyle duży, że wypełnia całą przestrzeń pomiarową (wzorcową) o znormalizowanej tolerancji: 0 dB; +6 dB. Innym zastosowaniem może być użycie wzorca transferowego TFS-11 do porównań międzylaboratoryjnych wzorców pola elektromagnetycznego stosowanych w akredytowanych laboratoriach wzorcujących.

W 2005 roku laboratoria LWiMP ITTA PWr. i ZLB GUM wykonały szereg porównań posiadanych przez oba laboratoria wzorców pola elektromagnetycznego w.c.z. z zastosowaniem jako wzorca transferowego zestawu kilku sond szerokopasmowego miernika natężenia pola typu MEH-25. Kryteria oceny wyników porównań przyjęto na podstawie Przewodnika ISO/IEC 43 [7] zgodnie, z którym pozytywny wynik porównania zapewnia spełnienie warunku dla  $E_n \leq 1$ . Takie kryterium przyjęto również dla określenia poprawności wykonania pomiaru, (mimo, że jest to kryterium zbyt ostre). Liczbę  $E_n$  zdefiniowano jako:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{u_{lab}^2 + u_{odn}^2}} \quad (1)$$

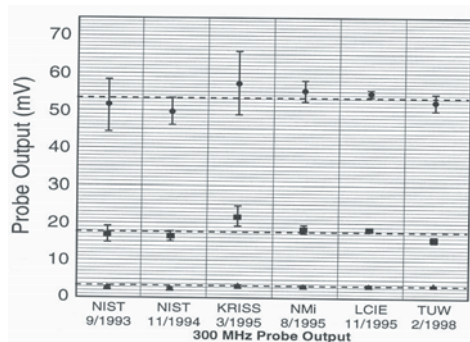
gdzie:  $x$  – wynik uczestnika (LWiMP),  
 $X$  – wartość przypisana (GUM),  
 $u_{lab}$  – niepewność wyniku pomiaru uczestnika,  
 $u_{odn}$  – niepewność wartości przypisanej oznaczonej w laboratorium odniesienia

Poniżej na rys. 9 przedstawiono, jako przykład, graficzną interpretację uzyskanych wyników porównań przeprowadzonych w zakresie częstotliwości od 100 kHz do 300 MHz.



Rys.9. Rozkład graficzny wartości  $E_n$  w funkcji częstotliwości porównywanych wzorców.

Fig.9. Graphical spread of  $E_n$  values as a function of frequency of compared standards.



Rys.10. Przykładowe wyniki wyznaczania wzorcowego PEM dla 300 MHz (wzorzec s/n 06-90-01).

Fig.10. Results of standards international comparison (300 MHz dipole s/n 06-90-01)

Na rys.10 pokazano przykładowe wyniki komparacji kilku laboratoriów zagranicznych z udziałem laboratorium LWiMP ITTA PWr. (TUW). Uzyskane wyniki tych porównań świadczą o dużej zbieżności stosowanych w laboratoriach wzorców i są podstawą do wzajemnego zaufania do metod pomiarowych, kompetencji personelu oraz wzorców zastosowanych przy wzorcowaniu sond mierników pola elektromagnetycznego w.c.z. Dzięki bardzo małym wymiarom sondy, które minimalizują oddziaływanie sondy na wzorcowane pole elektromagnetyczne, przenoszenie jednostki natężenia pola elektromagnetycznego jest zapewnione ze stosunkowo niewielką niepewnością.

## 4. Podsumowanie

Na podstawie analizy kilku przykładowych wyników takich komparacji widać, że nawet w tak renomowanej grupie laboratoriów obserwowane są rozbieżności w otrzymanych wynikach pomiarów, wyznaczonej niepewności wzorcowania, itp., co potwierdza bardzo małą dokładność wzorców PEM oraz duży wpływ szeregu różnych czynników szczególnie w zakresie w.c.z. i mikrofal [1]. Każde laboratorium biorące udział w takiej komparacji było, bowiem jednocześnie zobowiązane do określenia niepewności własnego wzorca [2,8]. W przypadku weryfikowania niektórych stanowisk wzorców popełniane błędy dochodziły nawet do kilkudziesięciu procent. Jest to spowodowane tym, że pola elektromagnetyczne wciąż wyznaczone są metodami pośrednimi [1,2]. W przypadku długich okresów dotychczas np. komparacji międzynarodowych (rys.10) jednym z głównych powodów dodatkowych źródeł rozbieżności jest np. starzenie się niektórych elementów składowych wzorca transferowego, wykorzystywanie go w innych warunkach klimatycznych i temperaturowych lub możliwe jego przeciążenie i przegrzanie w trakcie prowadzonych pomiarów, podczas transportu, itp. [3,8]. Dla ich eliminacji wciąż poszukuje się nowych sposobów wytwarzania i pomiaru wzorcowego pola przy wykorzystaniu nowoczesnych technik informatycznych, a dla eliminowania wielu występujących w nich błędów lub ich minimalizowania przeprowadzana jest szczegółowa, często bardzo żmudna weryfikacja eksperymentalna z wykorzystaniem metod pola podwójnie a nawet potrójnie wzorcowanego [2]. Wynikiem tych analiz jest np. uwzględnianie oddziaływania wzorca na wzorcowany lub badany obiekt poprzez wprowadzanie w trakcie wzorcowania tzw. poprawki kalibracyjnej.

## 5. Literatura

- [1] E. Grudziński: Pierwotne i wtórne wzorce pól elektromagnetycznych w ochronie pracy i środowiska, Krajowy Kongres Metrologii, Warszawa, 24-26.06.2001, s. 439-442.
- [2] E. Grudziński: Monografia pt.: Wytwarzanie i pomiar wzorcowych pól elektromagnetycznych. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 1998, seria: Biblioteka Kompatybilności Elektromagnetycznej, s.178.
- [3] E. Grudziński, W. Widłaszewski: Wzorcowanie wzorców pola elektromagnetycznego, Podstawowe Problemy Metrologii, PPM 2006, Ustroń, 14-17 maj, 2006, s. 445-452.
- [4] Międzynarodowy słownik podstawowych i ogólnych terminów metrologii. ISO:1993. Wyd. tłum. GUM: 1996.
- [5] Operating Manual v. 2-97 (85-238581). Transfer Field Strength Meter System TFS-11. Schaffner EMC Systems GmbH.
- [6] Calibration Certificate No 2885 PTB 04.
- [7] Przewodnik ISO/IEC 43:1997. Badanie biegłości poprzez porównania międzylaboratoryjne.
- [8] E. Grudziński, H. Trzaska: EM-field standards and their comparison (in memoriam of prof. Motohisa Kanda). XXVIIth General Assembly of the International Union of Radio Science. URSI Maastricht, the Netherlands, 17 Aug - 24 Aug, 2002. Wiley, cop. 2002 s. 7.