

Eugeniusz Grudziński

WZORCOWANIE APARATURY POMIAROWEJ STOSOWANEJ DO CELÓW KONTROLI PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH W ŚRODOWISKU PRACY I ŚRODOWISKU KOMUNALNYM

CALIBRATION OF MEASUREMENT DEVICES USED IN ELECTROMAGNETIC FIELD MONITORING IN THE OCCUPATIONAL AND MUNICIPAL ENVIRONMENTS

Z Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego
Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki
Politechniki Wrocławskiej

STRESZCZENIE

Dokładności pomiarów i wzorców PEM są bardzo małe w porównaniu z innymi wzorcami wielkości fizycznych, ponieważ wszystkie jego składowe wyznaczane są metodami pośrednimi. Prowadzi to do błędów, zależnych od aktualnie stosowanych metod wyznaczania wzorcowego pola, zastosowanej aparatury i zakresu częstotliwości. Jedną z metod eliminacji popełnianych błędów jest stosowanie kilku metod jednocześnie lub wzajemna komparacja wzorców, prowadzona w ramach własnego laboratorium, a także z ośrodkami krajowymi i zagranicznymi. Bardzo często jednak deklarowane dokładności pomiarów znacznie przewyższają dokładności samych wzorców. W pracy przedstawiono kilka przykładowych źródeł błędów, wskazując na konieczność pełnej kontroli, stosowanej w metrologii PEM aparatury pomiarowej, z uwzględnieniem specyfiki pola, rodzaju miernika i częstotliwości. Med. Pr., 2006;57(2):171–185

Słowa kluczowe: wzorce PEM, układy ekspozycyjne, pomiary pola EM

ABSTRACT

The accuracy of electromagnetic field (EMF) standard measurements are relatively low as compared to the accuracy of other standards of physical magnitudes mainly because all EMF components are defined with use of indirect methods. This approach leads to error dependent on methods currently used to determine standard field, available equipment, frequency range and other factors. One way to eliminate these errors is a simultaneous use of two or more methods or intercomparison of standards performed within one's own laboratory or in comparison with other national or/and foreign laboratories. The accuracy of a meter cannot exceed the accuracy of a standard applied to calibrate it. Unfortunately, this condition is frequently violated and (probably because of commercial reasons) the declared accuracy of meters available on the market exceed that of the best EMF standards. Some sources of errors in the work of several factors limiting accuracy of the EMF standards are discussed in details. The analysis reveals the need for appropriate choice of calibration method, taking into account EMF component, required accuracy, EMF intensity, frequency, and equipment applied. Such an approach and the use of calibration factors, estimated theoretically or/and experimentally, may contribute to remarkable improvement of the accuracy of procedures being used. Med Pr 2006;57(2):171–85

Key words: EMF standards, exposure systems, EMF measurements

Adres autora: Janiszewskiego 7/9, 50-372 Wrocław, e-mail: eugeniusz.grudzinski@pwr.wroc.pl

Nadesłano: 2.03.2006

Zatwierdzono: 13.03.2006

WSTĘP

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. Dotyczy ona bardzo szerokiej

gamy zagadnień, począwszy od badań związanych z oddziaływaniem PEM na materię ożywioną i nieożywioną, (co odpowiada szeroko rozumianej kompatybilności elektromagnetycznej), bezpieczeństwa pracy przy urządzeniach wytwarzających PEM, ochrony populacji generalnej i całej biosfery przed niepożądanym działaniem PEM, a także pomiarów i badań PEM naturalnych oraz PEM generowanych zarówno przez wytwory techniki jak i organizmy żywe.

W kraju powszechnie są stosowane mierniki lub całe zestawy do pomiarów natężeń PEM, począwszy od najmniejszych wartości, odpowiadających metrologii zakłóceń radioelektrycznych i pomiarów propagacyjnych,

* Praca wygłoszona podczas Warsztatów IMP Łódź 2005 – Ochrona przed PEM, nt. „Krajowy system kontroli ekspozycji na pola elektromagnetyczne 0 Hz–300 GHz w świetle aktualnych uwarunkowań prawnych”, 29–30 listopada 2005 r., Łódź oraz wykonana w ramach tematu 34-411-3 pt: „Wzorce pola elektrycznego i magnetycznego w metrologii gęstości mocy”. Kierownik tematu: dr hab. inż. E. Grudziński.

poprzez wartości przyjęte do celów ochrony środowiska elektromagnetycznego, aż do natężeń powodujących efekty letalne *in vivo* czy też niszczące, wskutek działania impulsów elektromagnetycznych EMP (Electromagnetic Pulse) wytwarzanych przez źródła, takie jak: NEMP (Nuclear Electromagnetic Pulse) związanych z wybuchami nuklearnymi, LEMP (Lighting Electromagnetic Pulse) występującymi podczas wyładowań atmosferycznych itp. do określenia odporności i niezawodności urządzeń oraz sieci na narażenia elektromagnetyczne.

Obok znacznej dynamiki zmian wartości mierzonego PEM, począwszy od poziomów zakłóceń radioelek-

trycznych, aż do poziomów pól aktywnych biologicznie i niebezpiecznych dla zdrowia, istnieje konieczność prowadzenia pomiarów w szerokim zakresie częstotliwości od pól elektro- i magnetostatycznych poprzez częstotliwości sieci elektroenergetycznej i zastosowań przemysłowych, aż do częstotliwości najwyższej, która zgodnie z normą obejmuje obecnie 300 GHz. Niezależnie od zakresu częstotliwości i poziomów mierzonych natężeń, dla poprawnej i jednoznacznej interpretacji uzyskiwanych wyników pomiarów takimi miernikami, są one poddawane procedurze wzorcowania na stano-



Ryc. 1. Przykładowe sondy pomiarowe i mierniki wykorzystywane w metrologii PEM.

wiskach pierwotnych lub wtórnych wzorców PEM w laboratoriach wzorców i metrologii PEM.

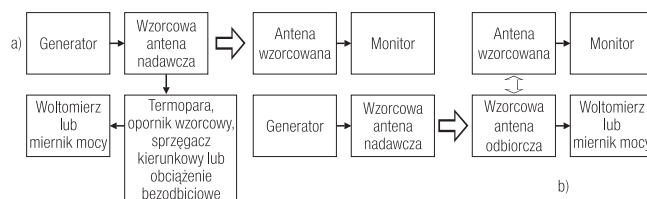
Wytwarzanie wzorcowego PEM możliwe jest niestety wciąż metodami pośredniego wyznaczenia wartości interesującej nas wielkości, bowiem bezpośredni sposób pomiaru PEM nie jest dotychczas znany. Złożoność zależności między wynikami pomiarów pobudzenia a natężeniem poszczególnych składowych PEM, jak też podatność tych struktur na wpływy zewnętrzne powodują, że wzorce PEM są jednymi z najmniej dokładnych wzorców wielkości fizycznych. Podczas gdy wiele z tych wielkości wyznacza się na przykład z niedokładnością $10^{-10}\%$, to błąd wytwarzania wzorcowych PEM wynosi obecnie od około 5–10% w zakresie małych częstotliwości, dochodząc nawet do kilkudziesięciu procent dla zakresów mikrofalowych (1). Sytuacja znacznie pogarsza się z chwilą prowadzenia pomiarów w polach bliskich i bardzo blisko źródeł promieniujących ze względu na specyficzne własności pola, w tym szczególnie pola bliskiego oraz degradację dokładności pomiaru poprzez wzajemne oddziaływanie źródła pola i czujnika (anteny pomiarowej) oraz innych przedmiotów znajdujących się w miejscu pomiaru, obecność osoby wykonującej pomiar, itp. (2).

Na rynku krajowym istnieje obecnie duża różnorodność mierników, jak też współpracujących z nimi sond pomiarowych (ryc. 1). Często brak zgodności metodologicznej lub brak niektórych danych podawanych przez producentów (np. minimalnych odległości pomiarowych w bezpośrednim otoczeniu pierwotnych lub wtórnych źródeł pola dla zadanych, maksymalnych błędów pomiaru) jest powodem popełniania znacznych błędów pomiarowych przy ich wykorzystywaniu (3).

WZORCE PIERWOTNE POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Pole elektromagnetyczne poza efektem termicznym nie jest wykrywalne organoleptycznie i nie jest dotychczas wyznaczane (mierzone) bezpośrednio. Samo wykrycie istnienia PEM wymaga zastosowania przetworników, pozwalających na zamianę tej wielkości na inną wielkość fizyczną, którą w zadanym przedziale częstotliwości lub poziomie natężenia promieniowania potrafimy poprawnie zmierzyć.

Wytwarzanie wzorcowego PEM na stanowiskach wzorców łączy się nie tylko ze znajomością wartości parametrów wytwarzanego pola, lecz przede wszystkim z dokładnością, z jaką jest ono wyznaczane. Jest to czynnik bardzo istotny z punktu widzenia niepewności wzorcowanych na takich stanowiskach wzorcowego



Ryc. 2. Schemat blokowy wzorcowania metodą WAN, WAO i metodą podstawienia.

pola mierników pól elektromagnetycznych lub poddawanych ekspozycji obiektów badanych.

Niezależnie od zakresu częstotliwości wzorcowe PEM mogą być wytwarzane z zastosowaniem dwu podstawowych metod:

a) metodą wzorcowego PEM, w niektórych wersjach nazywana metodą wzorcowej anteny nadawczej (WAN), w której źródłem wzorcowego PEM jest dowolny układ promieniujący lub wytwarzający PEM, gdzie na podstawie pomiaru pobudzenia układu oraz jego geometrii można wyznaczyć na drodze analitycznej natężenie PEM z określoną dokładnością w określonym obszarze lub określonym punkcie przestrzeni (ryc. 2a),

b) metodą 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 (ryc. 2b). W miejsce WAO podstawia się antenę wzorcowanego miernika (lub inny obiekt badany) zakładając, że natężenie wyznaczonego PEM w trakcie tej operacji nie ulegnie zmianie.

Na rycinie 2a przedstawiono wykorzystanie metody WAN a na rycinie 2b metody WAO (z możliwością wykorzystania obu tych metod jednocześnie i niezależnie od siebie, tzn. metody WAN i WAO jako metody tzw. pola podwójnie wzorcowanego).

Optymalizacja metod i narzędzi służących do pomiaru, jak też i do wytwarzania pól wzorcowych w tak szerokim zakresie częstotliwości i dynamiki, wymaga szczegółowych analiz wymienionych oddziaływań i ich wpływu na dokładność pomiaru dla maksymalnej czułości niezbędnej przy pomiarach w polu dalekim oraz poziomach natężeń pożądanych w metrologii pól aktywnych biologicznie i niebezpiecznych dla zdrowia oraz badaniach obiektów biologicznych i technicznych.

Od ponad 30 lat na Politechnice Wrocławskiej prowadzone są prace teoretyczne, eksperymentalne i wdrożeniowe w tej dziedzinie metrologii, we współpracy z ośrodkami krajowymi i zagranicznymi. Doświadcze-

nia te są wykorzystywane w opracowaniach nowych stanowisk pierwotnych i wtórnych wzorców pola, układach ekspozycyjnych, sondach pomiarowych, miernikach, wskaźnikach i dozymetrach PEM.

W zależności od rodzaju i zakresu badań wykorzystywane są tu rozwiązania wzorców pola elektrycznego i magnetycznego, stosownie do pasma częstotliwości pracy, gabarytów anteny (sondy) pomiarowej lub całego miernika, poziomu wytwarzanego lub mierzonego pola, a także poszczególne zestawy, pozwalające obecnie na przeprowadzenie pełnych badań w zakresie częstotliwości do 50 GHz.

Przykładowy widok kilku stanowisk wykorzystywanych do badań, wzorcowania lub sprawdzania w warunkach laboratoryjnych w Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego (LWiMP) Instytutu Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki (ITTA) Politechniki Wrocławskiej poprawności kalibracji i wzorcowania różnych typów mierników pola elektromagnetycznego (przeznaczonych do pomiarów PEM w różnych zakresach częstotliwości) przedstawiono na rycinie 3a, b, c.

Wybór i ewentualne indywidualne konfiguracje układowe wykorzystywanych stanowisk wzorcowego pola zależne są od potrzebnej składowej PEM, aktualnych (rzeczywistych) wymiarów badanych lub kalibrowanych sond i mierników, a także od zadanych częstotliwości i wymaganych dokładności badania i wzorcowania (1,2).

LINIA TEM JAKO WZORZEC POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO

Jednym z najprostszych, a zarazem najdokładniejszych, układów wzorcowego pola i to nie tylko elektrycznego, lecz i magnetycznego w bardzo szerokim zakresie częstotliwości jest linia pracująca z falą TEM w układzie jak na ryc. 3b i 4.

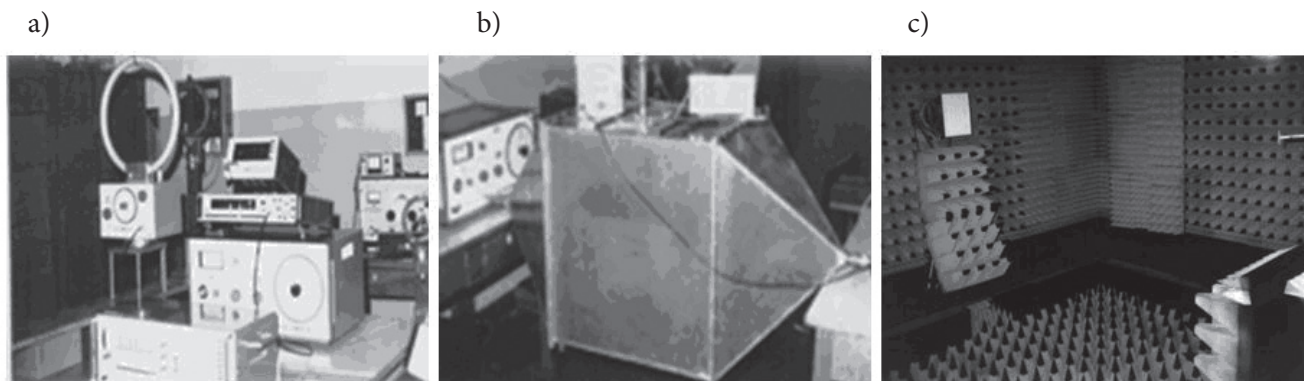
Analizując i opracowując stanowiska wzorców natężenia pola należy zadbać o prawidłowy i niezniekształcony przebieg sygnałów zasilających zarówno anteny dipolowe, jak i ramowe, pracujące w układach anten nadawczych wzorców, a także dla zasilania linii TEM poprzez stosowanie filtrów w badanych układach wzorców pola. Z punktu widzenia wzorców jest to zagadnienie niezmiernie istotne, mające na celu zapewnienie wytworzenia zadanej wielkości PEM dla ściśle określonej i znanej częstotliwości oraz polaryzacji. Pozwala to w praktyce metrologicznej na dokładne i poprawne przebadanie funkcji transmitancji wzorcowanych sond lub mierników PEM w całym paśmie pomiarowym, a także poza nim. Przykładowe rozkłady PEM dla linii TEM, jak na ryc. 4, przedstawiono na ryc. 5.

Czynnikiem, który w warunkach laboratorium wzorcującego, LWiMP, jest ściśle przestrzegany i analizowany jest kontrola zniekształcenia wytwarzanego wzorcowego PEM w obszarze wzorcowania przed i w trakcie procedury wzorcowania w niej czujników lub mierników PEM.

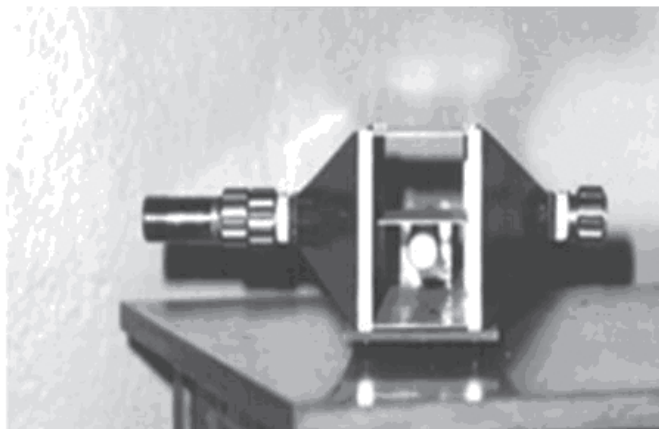
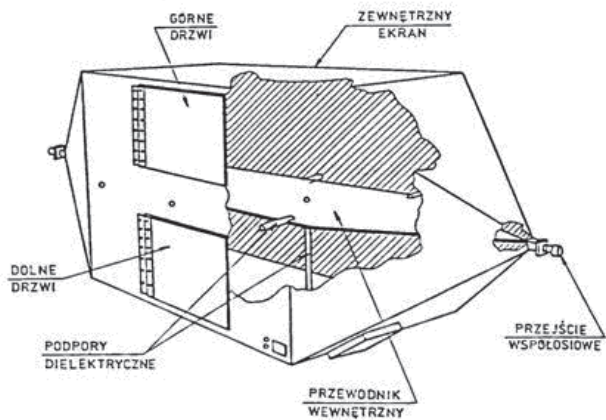
Przykładową ilustrację wpływu wprowadzenia w obszar pola wzorcowego badanej lub wzorcowanej anteny (czujnika lub miernika pomiarowego) na zmiany rozkładu natężenia pola w trakcie procedury wzorcowania przedstawiono na ryc. 6. Na rycinie tej dokładnie pokazano zniekształcenie PEM, powodowane przez umieszczoną w linii standardową sondę pola elektrycznego typu AE-1 (z elektrycznie krótką anteną dipolową pracującą w zakresie częstotliwości 0,1–300 MHz) współpracującą z miernikiem typu MEH.

Natężenie pola elektrycznego E i magnetycznego H , występującego pomiędzy elektrodami odcinka linii paskowej pracującej z podstawowym rodzajem pola TEM, wyznacza zależność:

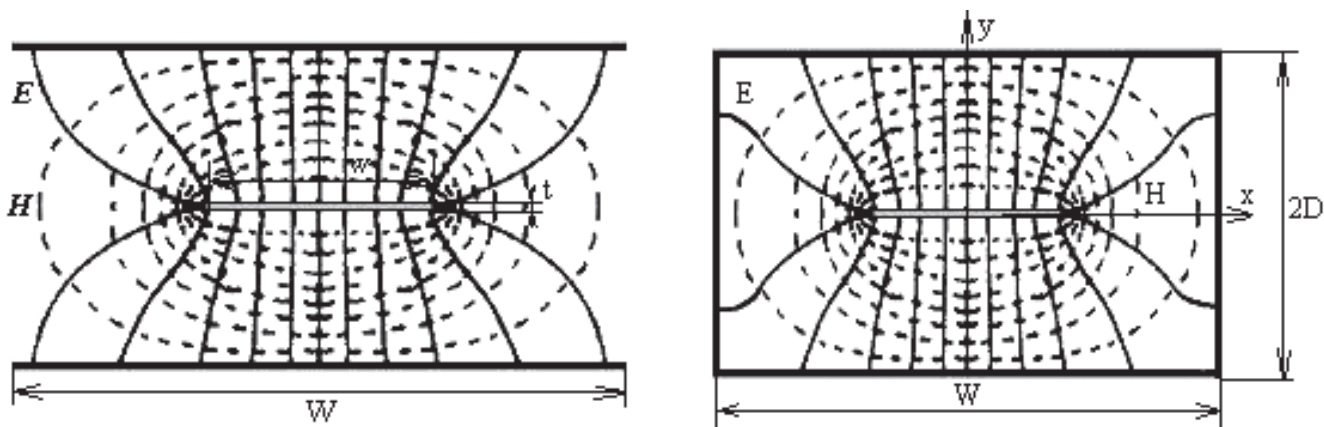
$$|E| = \frac{\sqrt{P_d \cdot Z_f}}{D}, \quad |H| = \frac{\sqrt{P_d \cdot Z_f}}{Z_0 \cdot D}, \quad (1)$$



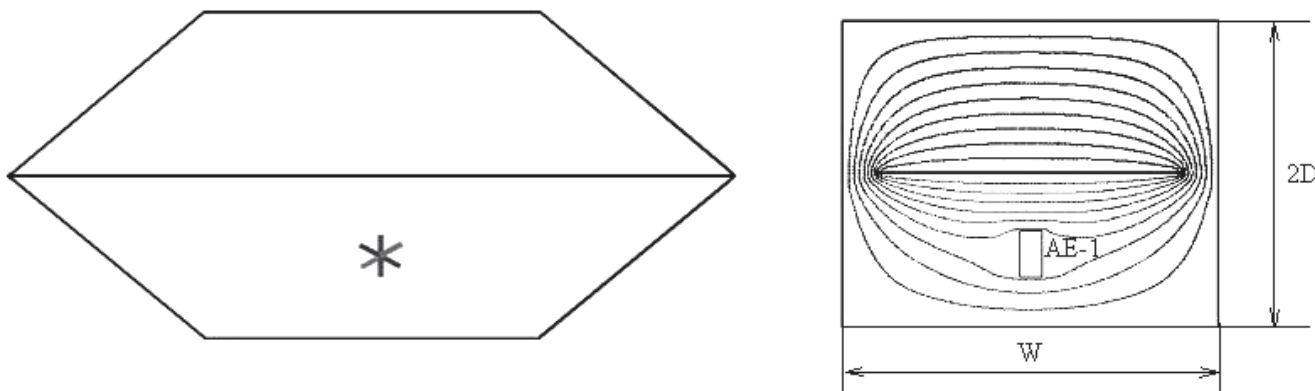
Ryc. 3. Przykłady kilku stanowisk pracujących w różnych zakresach częstotliwości, przeznaczonych do wytwarzania i pomiaru wzorcowego PEM w LWiMP ITTA Politechniki Wrocławskiej.



Ryc. 4. „Zamknięta” i „otwarta” linia TEM wykorzystywana jako wzorzec PEM.



Ryc. 5. Rozkład linii pola elektrycznego i magnetycznego w układzie wzorca pola z linią TEM (otwarą i w pełni ekranowaną).



Ryc. 6. Zaburzenia PEM powodowane przez antenę umieszczoną w linii o przekroju poprzecznym dla $W = 0,65$ m i $2D = 0,5$ m.

gdzie:

P_d – moc doprowadzona do linii,

Z_f – impedancja charakterystyczna linii,

D – odległość między płaszczyznami tworzącymi linię w obszarze wzorcowania,

Z_0 – impedancja falowa ośrodka.

Podstawową zaletą tego rodzaju wzorca jest niezależność formuł opisujących natężenie pola obu składowych od częstotliwości oraz możliwość znacznego skupienia pola w zadanym obszarze przestrzeni pomiarowej. W warunkach laboratoryjnych w trakcie projektowania

wzorca z wykorzystaniem linii TEM w zależności od jego przeznaczenia możliwe jest takie dobranie jego wymiarów, aby zapewnić możliwie duży obszar wzorcowania, tzn., w którym pole jest maksymalnie jednorodne. Ilustrację doboru poszczególnych wymiarów geometrycznych linii TEM i jego wpływu na jednorodność pola występującego bezpośrednio w obszarze wzorcowania przedstawiono na ryc. 7.

Wzorcową wartość natężenia pola wyznaczyć można też z zależności $E = U/D$ dla pola elektrycznego i $H = U/377D$ dla pola magnetycznego, gdzie: U w (V) jest napięciem pomiędzy elektrodami linii umieszczonymi w odległości D w (m). Zasadniczą wadą tego rodzaju wzorca oprócz ograniczenia częstotliwościowego, jest ograniczenie maksymalnych wymiarów wzorcowanych w nich anten (czujników) pomiarowych lub badanych obiektów.

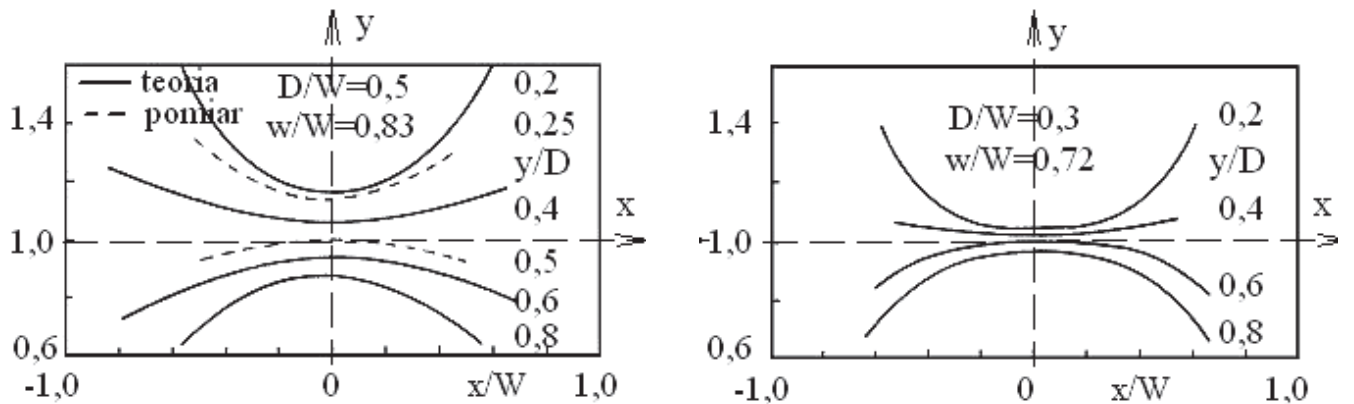
Z tego powodu, dla tego typu układu wzorca, z punktu widzenia dokładności zarówno samego wzor-

ca jak i wzorowanych w nich mierników, jest niezmiernie istotne wzajemne oddziaływanie wzorca na badany obiekt i obiektu na zmianę parametrów wzorca PEM. Przykład przyjętego do powyższych analiz układu zastępczego badanego czujnika miernika pola umieszczonego w linii przedstawiono na ryc. 8.

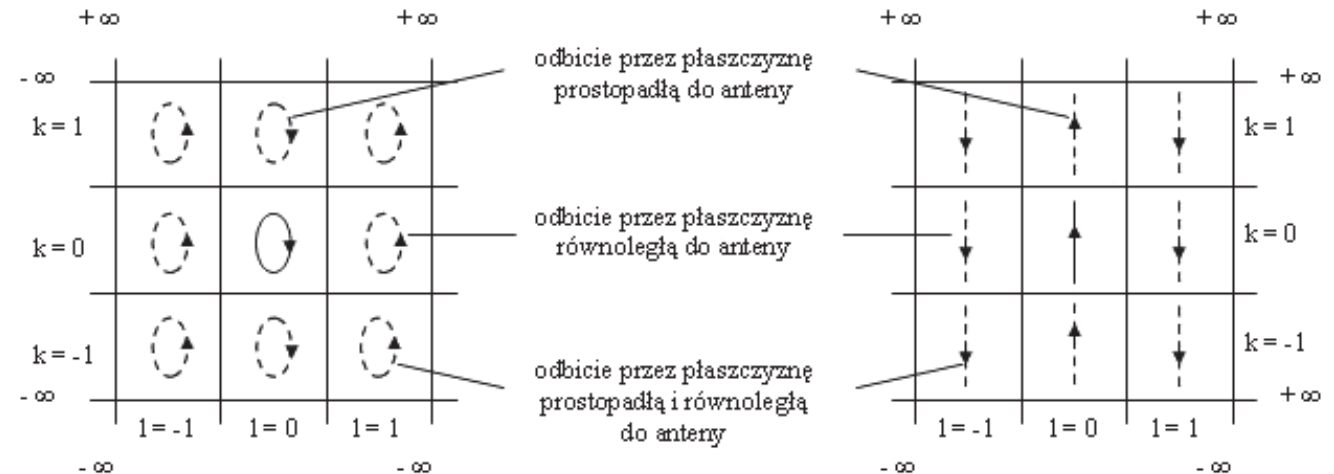
Ponieważ w przypadku mierników PEM, aktywnych biologicznie i niebezpiecznych dla zdrowia, ze względu na prostotę i znacznie krótszy czas pomiarów, stosowane są czujniki bezkierunkowe (złożone z dwu lub trzech anten) do analizy przyjęto układ anten jak na ryc. 9.

Przykładowe wyniki takich analiz i ich weryfikacji eksperymentalnych dla jednej z typowych sond pomiarowych miernika MEH przedstawiono na ryc. 10.

Powyższe analizy i ich wyniki z uwzględnieniem także wtórnego oddziaływania badanego (wzorcowanego) obiektu na parametry samej linii bardzo szczegółowo zostały opisane w pracach (1,4). Wnioski praktyczne z nich płynące pozwalają, obok wykorzystania ich przy



Ryc. 7. Zmiana rozkładu natężenia pola elektrycznego w przekroju poprzecznym linii paskowej unormowana względem natężenia PEM w środku linii dla kilku wartości y/D .



Ryc. 8. Wpływ płaszczyzn przewodzących na parametry czujników pola z antenami ramowymi i dipolowymi.

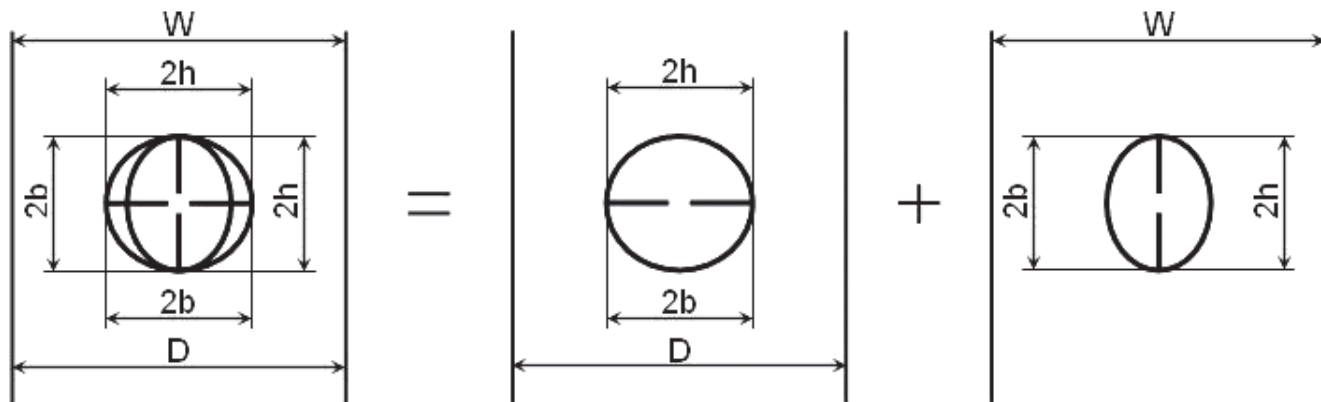
wyznaczaniu wzorcowego pola, także na jednoczesne określenie popełnianych błędów pomiaru dla zadanych sond pomiarowych mierników MEH, podczas prowadzenia pomiarów w polach bliskich i bardzo bliskich źródeł, a także na możliwy dobór niektórych parametrów i konstrukcji samych sond, by je minimalizować. W trakcie wzorcowania dla zadanych konstrukcji sond pomiarowych i ich wzajemnych wymiarów geometrycznych stosowane są w praktyce LWiMP stałe poprawki kalibracyjne nazwane przez prof. Huberta Trzaskę, od nazwiska ich autora, współczynnikami Grudzińskiego.

UKŁADY WZORCÓW POLA Z ANTENAMI RAMOWYMI

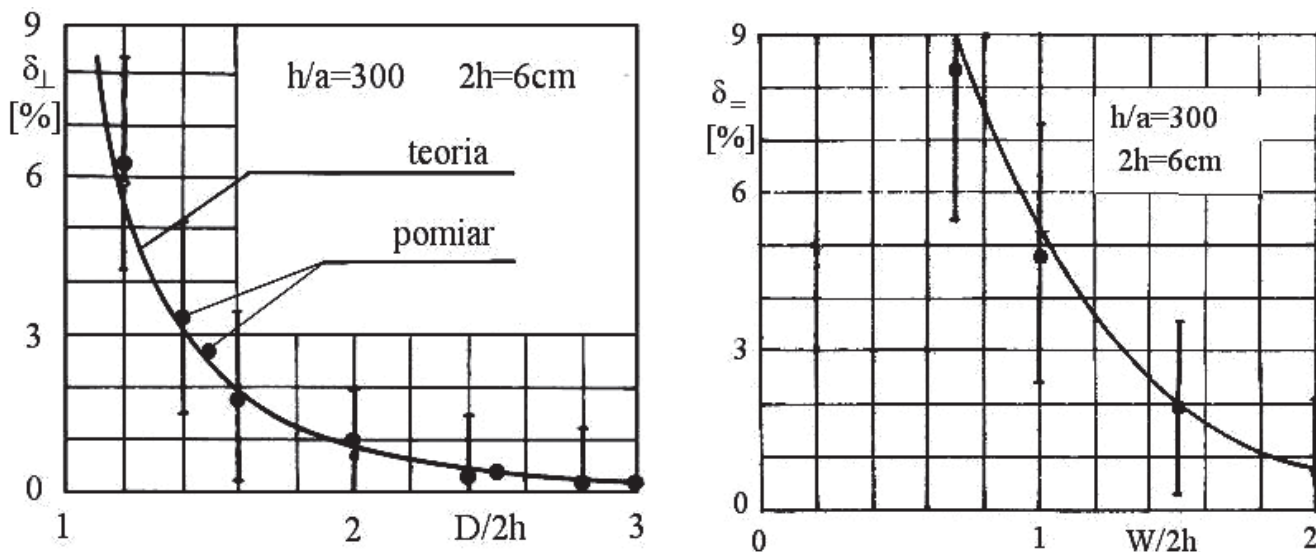
Najprostszym i najbardziej wydajnym źródłem pola magnetycznego jest solenoid. Przykład wykorzystania

solenoidu i występującego w nim rozkładu natężenia pola magnetycznego przedstawiono na ryc. 11a i 11b. Często dla zwiększenia górnej częstotliwości pracy tych układów lub obszaru pomiarowego stosowany jest także zestaw dwu anten, pracujących w układzie Helmholtza przedstawiony na ryc. 11c. Dla dwu anten pracujących w układzie Helmholtza na ryc. 11d przedstawiono rozkład pola w przekroju poprzecznym, zaznaczając na ryc. 11e obszar pomiarowy, w którym dopuszczalna zmiana natężenia pola magnetycznego nie przekracza $\pm 2\%$.

Większość tych rozwiązań znajduje zastosowanie w zakresie małych poziomów generowanych natężeń pól lub małych częstotliwości. Wynika to z wymiarów anten i możliwego sposobu wzorcowania bądź to bezpośrednio wewnątrz tych anten, bądź też w obszarze pomiędzy nimi.



Ryc. 9. Zobrazowanie przyjętej normalizacji wyników linii i anteny dla dowolnej konfiguracji anten w przypadku anten bezkierunkowych.



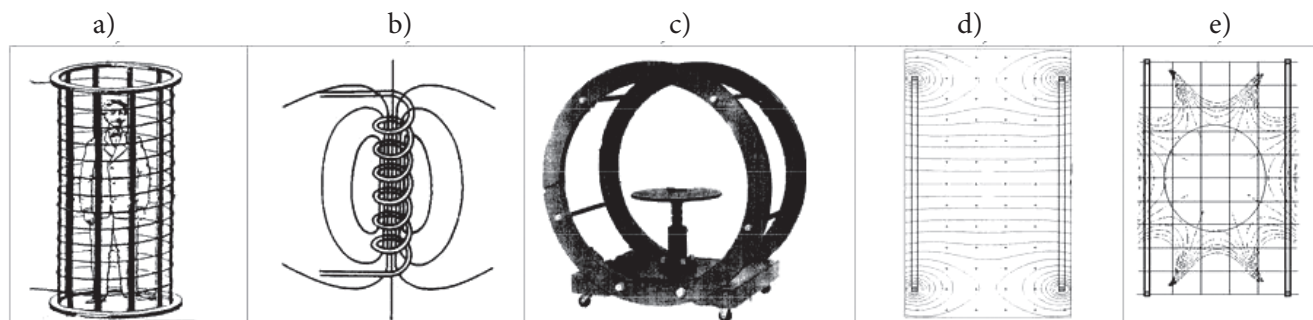
Ryc. 10. Przykładowe błędy występujące podczas wzorcowania lub pomiarów w otoczeniu płaszczyzn doskonale przewodzących z weryfikacją eksperymentalną.

Identycznie sytuacja przedstawia się w przypadku wytwarzania wzorcowych natężeń pól magnetycznych z wykorzystaniem anten ramowych, jako bardzo wydajnego i idealnego źródła pola, zarówno magnetycznego jak i elektrycznego, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, a następnie pomiarów z wykorzystaniem anten ramowych, jako doskonałych czujników pola magnetycznego w obszarach bliskich źródeł (1). W zakresach małych częstotliwości do zwiększenia obszaru pola magnetycznego o dużej jednorodności wykorzystuje się również cewki pracujące w układzie Helmholtza, Lee-Whitinga lub solenoidy. Odpowiednikiem tego rozwiązania jest, w zakresie bardzo wysokich częstotliwości, odcinek falowodu, pracującego z podstawowym rodzajem pola, lub, odpowiednio do potrzeb wybranym modem, wykorzystywany to kalibrowania bardzo małych czujników pola elektrycznego lub magnetycznego. Ilustrację różnic w wyznaczonych rozkładach linii sił pola magnetycznego, z zaznaczeniem szybkości jego zmian, z odległością dla anteny wzorcowej pojedynczej i dwu anten pracujących w układzie Helmholtza, przedstawiono na ryc. 12.

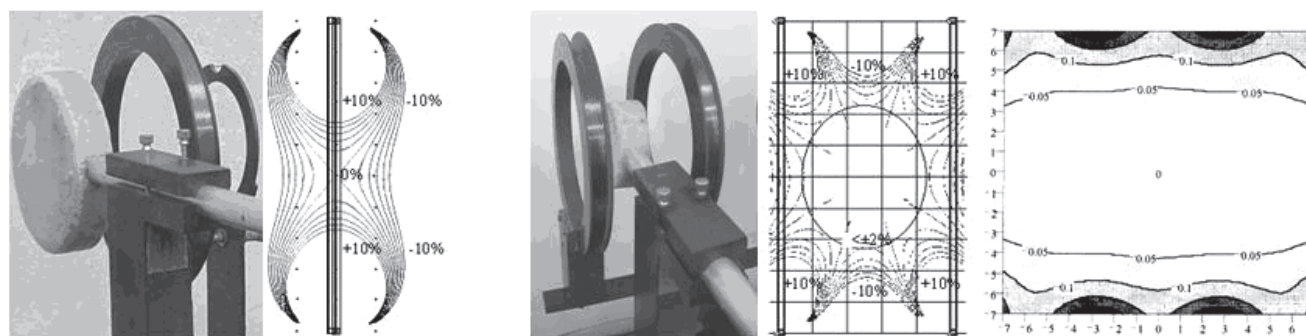
Widoczne jest na nim znaczne uniezależnienie zmian natężenia pola w dość dużym obszarze w po-

równaniu z rozkładem natężenia pola, występującego w bezpośrednim otoczeniu anteny pojedynczej. Tego typu wzorce natężenia pola są wręcz niezbędne do badania oraz wzorcowania ostatnio szeroko rozpowszechnionych mierników natężenia pola z bliżej nieokreślonym rozmieszczeniem sond (czujników) PEM. Dotyczy to niektórych typów mierników pola magnetycznego o pomiarze składowych pola w trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyznach. W większości rozwiązań każda z anten czujnika pomiarowego usytuowana jest np. na innej ścianie obudowy miernika lub sondy pola. Stwarza to trudności z wzorcowaniem tego typu mierników, a także cechuje je zmniejszona dokładność wyznaczanego natężenia pola w polach bliskich źródeł ze względu na nieokreśloność środka geometrycznego czujnika pomiarowego. Dodatkowym czynnikiem jest tutaj również występująca szybkość zmian natężenia z odległością od źródła pola, a także możliwość jednoczesnego występowania w warunkach rzeczywistych więcej niż jednej składowej natężenia pola.

Całkowicie odmienna sytuacja występuje w przypadku wykorzystywania tak wzorcowanych czujników pola elektrycznego jak i magnetycznego (we wzorcach



Ryc. 11. Solenoid i układ dwu cewek pracujących w układzie Helmholtza z zaznaczonym rozkładem pola magnetycznego w ich otoczeniu i zalecanym obszarem wzorcowania.

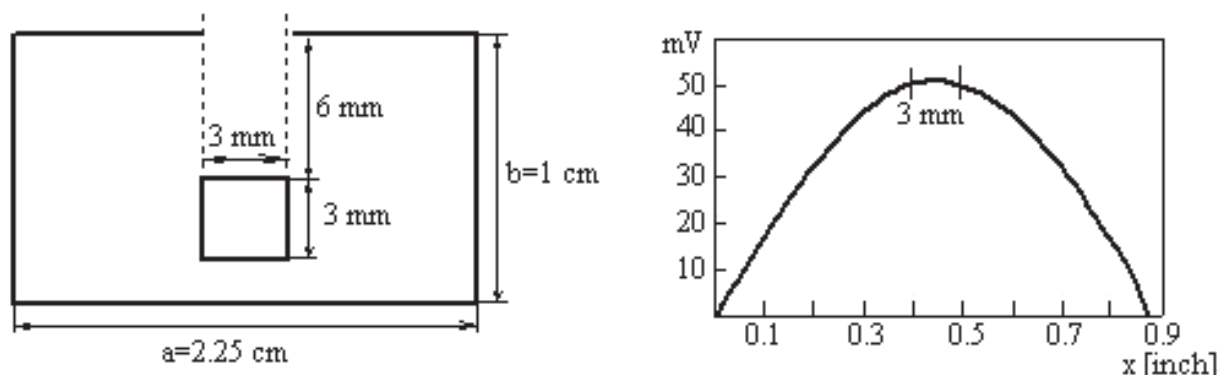


Ryc. 12. Rozkłady natężenia pola magnetycznego w bezpośrednim otoczeniu anteny pojedynczej i dwu anten pracujących w układzie Helmholtza.

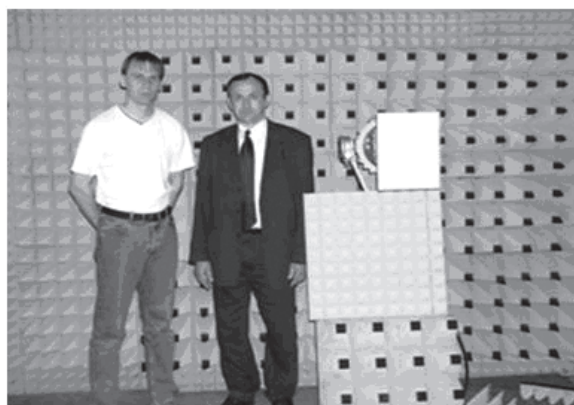
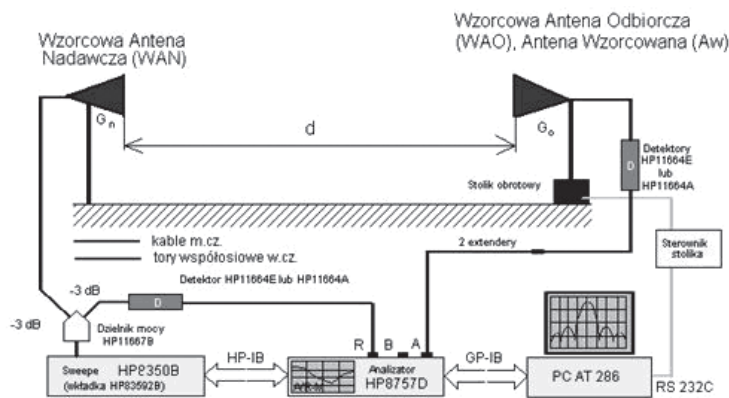
o strukturze PEM, takiej jak w linii z falą TEM, czy w układzie cewek Helmholtza) w bezpośrednim otoczeniu dowolnych źródeł.

WZORCE I WZORCOWANIE W ZAKRESIE MIKROFALOWYM

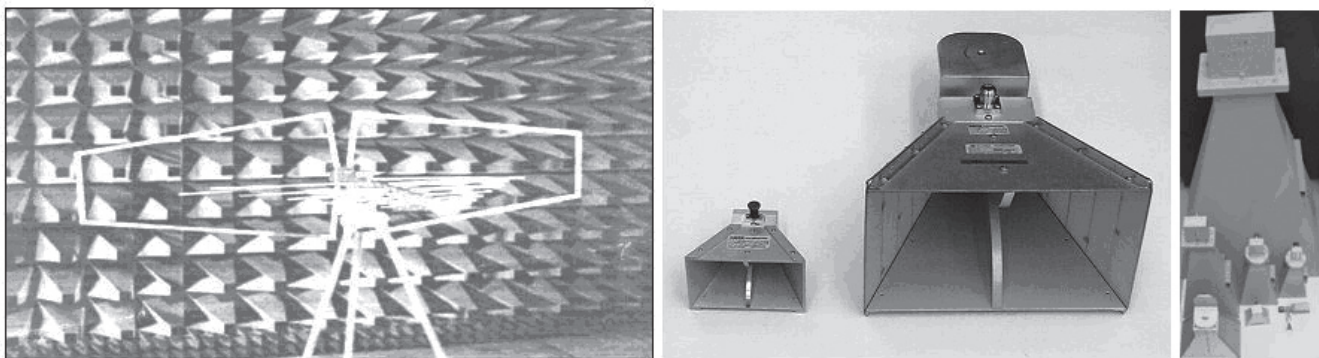
W zależności od wymiarów badanych obiektów, w zakresie mikrofalowym stosowane są wzorce, wykorzystujące odcinek linii TEM lub falowodu, aż po otwarte źródła promieniowania mikrofalowego, z wykorzystaniem komory bezodbiciowej Instytutu Telekomunikacji



Ryc. 13. Przekrój poprzeczny falowodu: a) z zaznaczonym obszarem kalibracji sondy mikrofalowej, b) z rozkładem pola w całym jego przekroju poprzeczным oraz bezpośrednio w obszarze wzorcowania.



Ryc. 14. Przykład stanowiska do wzorcowania wzorcowych anten i mierników PEM.



Ryc. 15. Przykład anten stosowanych w LWiMP ITTA jako wzorcowych anten nadawczych i odbiorczych.

cji, Teleinformatyki i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Przykład realizacyjny możliwości wykorzystania odcinka falowodu do kalibracji i wzorcowania miniaturowych mikrofalowych sond transferowych w zakresie częstotliwości 10 GHz przedstawiono dla ilustracji na ryc. 13.

W zakresie mikrofalowym, ze względu na znaczne wartości zysku kierunkowego stosowanych anten, można zwykle pominąć wpływy zakłóceń, wielotorowości propagacji oraz oddziaływanie obiektów przewodzących na parametry impedancyjne i kierunkowe stosowanych anten. Nie zmienia to faktu, że najkorzystniejsze warunki wzorcowania są w ekranowanej komorze bezdechowej.

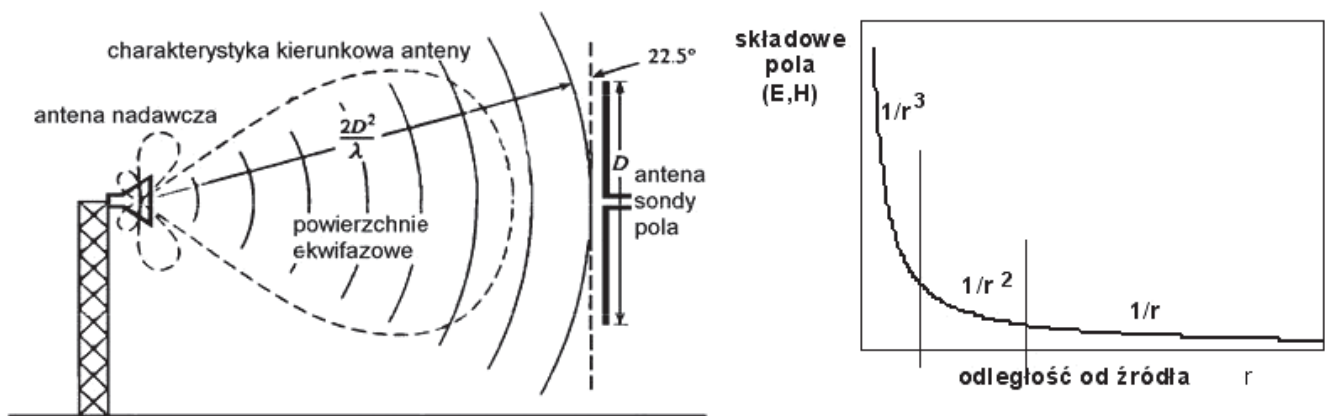
Na ryc. 3c przedstawiono widok komory bezodbijowej ITTA Politechniki Wrocławskiej szeroko wykorzystywaną do wszelkiego rodzaju pomiarów i badań w bardzo szerokim zakresie częstotliwości przez usytuowanie w niej w zależności od aktualnych potrzeb metrologicznych różnego rodzaju stanowisk pól wzorcowych lub układów ekspozycyjnych. Przykładowy schemat stanowiska wykorzystywanego w zakresie mikrofal zarówno do kalibrowania anten wzorcowych jak i wzorcowania mierników PEM przedstawiono na ryc. 14.

Wykorzystuje się tutaj najczęściej anteny dipolowe, logarytmiczno-periodyczne oraz pasmowe i szerokopasmowe anteny tubowe. Przykład kilku wzorcowych anten nadawczych, jak i odbiorczych, wykorzystywanych w tym zakresie częstotliwości w LWiMP ITTA Politechniki Wrocławskiej przedstawiono na ryc. 15.

STRUKTURA PEM W UKŁADACH WZORCÓW I W POLU BLISKIM ŹRÓDEŁ

Analizując układy do wytwarzania wzorcowych pól elektromagnetycznych zakładamy, że PEM jest monochromatyczne, o znanej częstotliwości, a jego polaryzacja jest ustalana przez wzajemne położenie anten wzorcowych i wzorcowanych, o czym bardzo rzadko można powiedzieć w metrologii związanej z bezpieczeństwem i higieną pracy oraz ochroną środowiska przed szkodliwym oddziaływaniem PEM, gdy na sondę miernika mogą oddziaływać PEM pochodzące od bardzo wielu źródeł jednocześnie i to z różnych kierunków. Dla zobrazowania problemu związanego z metrologią PEM w środowisku pracy i środowisku komunalnym na ryc. 16 został przedstawiony przykładowy rozkład pola, pochodzącego od dowolnej anteny z zaznaczeniem pola występującego w bezpośrednim otoczeniu anteny (sondy) pomiarowej dowolnego miernika. Na rycinie zaznaczono przebiegi powierzchni ekwifazowych (w tym przypadku jest to charakterystyka kierunkowa anteny jako źródła PEM i powierzchni ekwifazowych) oraz dopuszczalnej jego zmiany, tzw. frontu fazowego dla aktualnej, maksymalnej długości D anteny – sondy pomiarowej i zadanej dokładności pomiaru w funkcji odległości r od źródła.

Dla prawidłowego dokonania pomiaru w danym punkcie pomiarowym należy odpowiednio usytuować położenie anteny – sondy pola poprzez jej dopasowanie polaryzacyjne i kierunkowe na maksimum PEM. W zdecydowanej większości, zarówno źródeł jak i sond mierników PEM, nie jest znane tak ich usytuowanie, jak i sama polaryzacja. Ostatnio, dla lepszego rozeznania i sprawdzenia występującego w ich otoczeniu rozkładu natężenia pola coraz szerzej stosowane są obok prostych



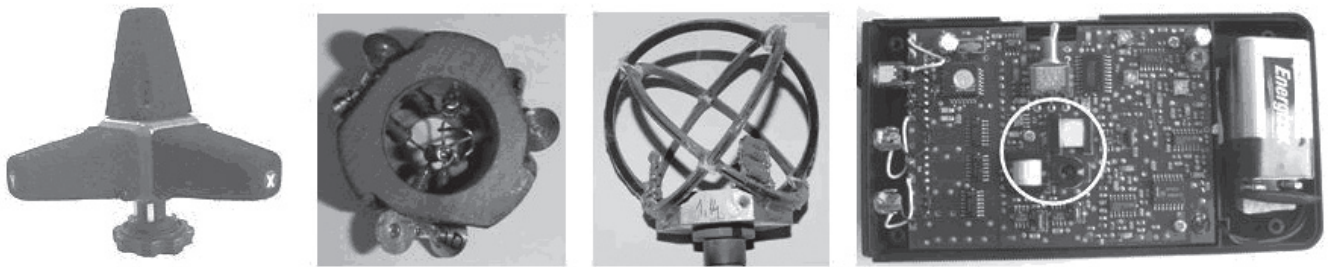
Ryc. 16. Występowanie krzywizny pola elektromagnetycznego w otoczeniu dowolnych źródeł pól i anten pomiarowych oraz szybkość zmian PEM z odległością.

układów anten i sond pomiarowych o charakterystyce kierunkowej również układy czujników natężenia PEM o charakterystyce sferycznej (5). Zapewniają one znaczne ułatwienie i przyspieszenie prowadzonych pomiarów pod kątem kontroli PEM w środowisku pracy i środowisku komunalnym lub ich monitoring. Wymienione sondy lub mierniki, wyposażone w tzw. sondy bezkierunkowe, złożone są najczęściej z trzech wzajemnie ortogonalnych anten, zapewniających charakterystykę kierunkową, zbliżoną do izotropowej lub sferycznej. Przykłady wykonania dwu takich sond pomiarowych dla składowych E i H pola elektromagnetycznego przedstawiono na ryc. 17.

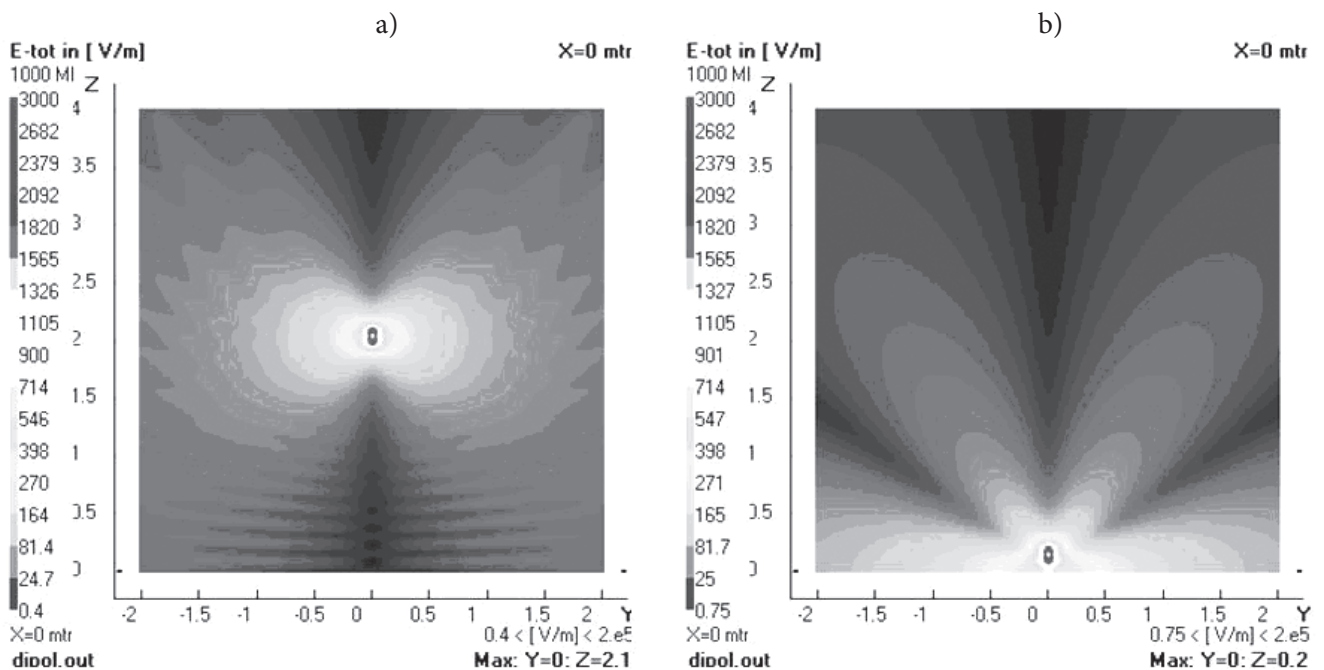
Wzajemne usytuowanie względem siebie czujników pomiarowych, jak też ich rzeczywiste wymiary geometryczne, a przez to i obszar przez nie obejmowany, lub miejsce ich usytuowania (często niewidoczne w zamkniętej obudowie miernika i ich bezpośrednie sąsiedztwo) ma bardzo istotny wpływ na dokładność wyznacza-

nia PEM w bezpośrednim otoczeniu źródła. Kolejnym problemem jest wpływ bezpośredniego otoczenia źródła zarówno na zasygnalizowaną już wcześniej zmianę impedancji wejściowej samej anteny pomiarowej (ryc. 10) jak i jej charakterystyki kierunkowej. Dla zasygnalizowania wagi tego problemu na ryc. 18 przedstawiono widoczną zmianę charakterystyki kierunkowej anteny przy zmianie odległości z 2 m do np. 5 cm.

Trwają ciągłe prace nad poprawą dokładności wzorców pierwotnych, co pozwala także na zwiększanie dokładności pomiarów wzorcowanych w nich mierników PEM. Możliwe to jest zarówno poprzez dostęp do coraz to lepszej jakości aparatury pomiarowej, dokładniejszego rozeznania dziedziny i możliwości bardziej precyzyjnego określania wpływu poszczególnych czynników na dokładność wzorcowania i pomiaru PEM (1,2). Analiza wielu z tych czynników została zbadana i zweryfikowana eksperymentalnie oraz przedstawiona w opracowaniach,



Ryc. 17. Przykładowe rozwiązania sond PEM o charakterystyce sferycznej.



Ryc. 18. Ilustracja wpływu ośrodka przewodzącego na zmianę charakterystyki kierunkowej sondy pomiarowej dla odległości: a) 2 m, b) 5 cm przy częstotliwości 1 GHz.

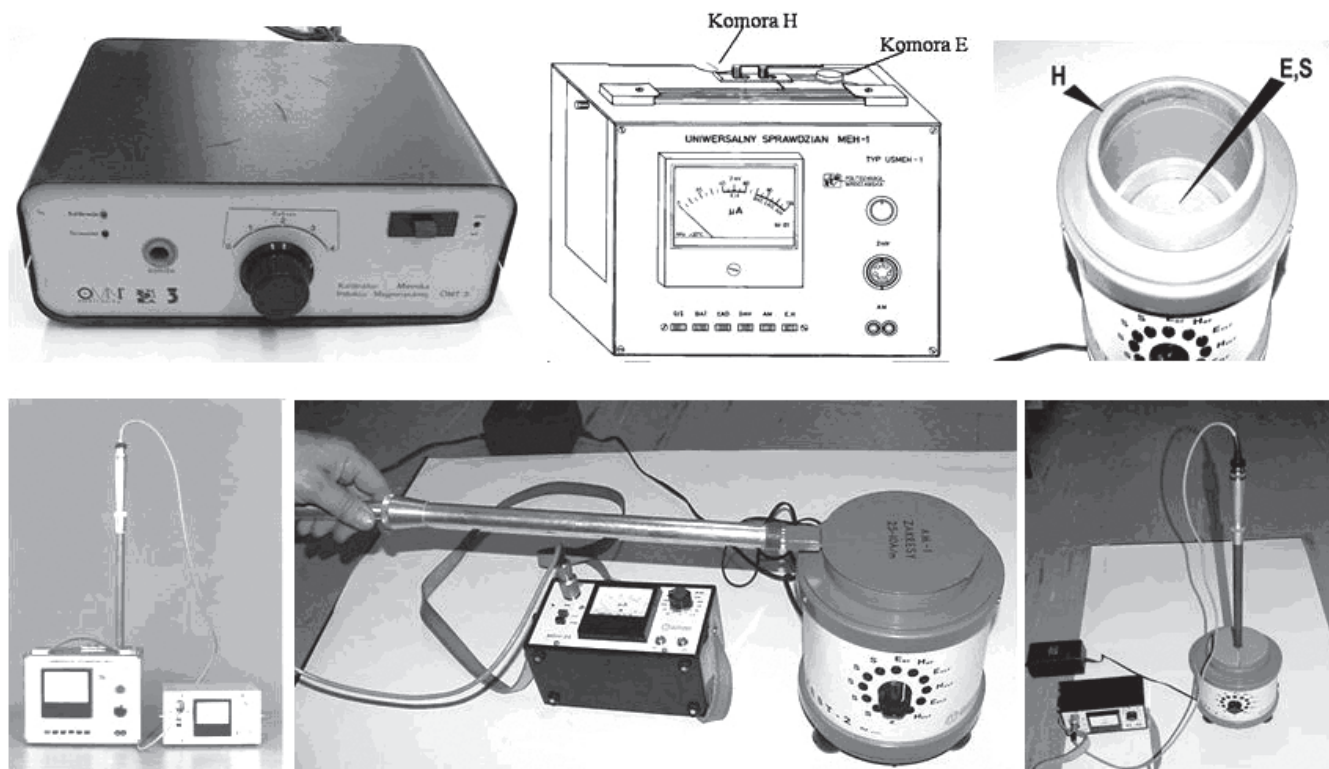
dotyczących dokładności wytwarzania i pomiarów PEM. W ich wyniku w LWiMP ITTA Politechniki Wrocławskiej powstało również szereg unikalnych opracowań stanowisk pierwotnych i wtórnych wzorców oraz źródeł pól i układów ekspozycyjnych, przeznaczonych głównie do sprawdzania, kalibracji, wzorcowania mierników PEM i szeregu innych badań nad jego oddziaływaniem zarówno na obiekty techniczne jak i biologiczne.

Pomimo ogromu potrzeb i wielu rozbieżności w tej dziedzinie metrologii do chwili obecnej nie ma zarówno w kraju jak i w skali światowej ujednoliconej metodyki wzorcowania narzędzi przeznaczonych do pomiarów pól w strefie bliskiej i bardzo bliskiej dowolnych źródeł PEM. Starania w tym kierunku były i są wciąż prowadzone przez wiele instytucji i organizacji narodowych, a nawet międzynarodowych, w których LWiMP czynnie uczestniczy. W kraju czynione są w tym względzie wspólne przedsięwzięcia z Głównym Urzędem Miar w Warszawie (GUM) dla procedur obowiązujących w poszczególnych przedziałach częstotliwości (z uwzględnieniem różnorodnych typów mierników) itp. (6).

Z chwilą coraz częstszego wykorzystywania różnych typów takich mierników przez różne ekipy oferujące swoje usługi pomiarowe dochodzi do kwestionowania wyników uzyskiwanych miernikami, które często wskazują bardzo mało lub nic, (ale tylko dlatego, że właśnie

akurat one działają poprawnie). A przecież w oparciu o tak przeprowadzone pomiary wyznaczane są zarówno granice stref ochronnych w zakresie bezpieczeństwa i ochrony pracy jak i ochrony populacji generalnej (ochrony środowiska) przed szkodliwym oddziaływaniem PEM z pełnymi konsekwencjami administracyjnymi, wywołując stresy wielu użytkowników źródeł, a często i niepokoje społeczne, np. okolicznych mieszkańców. Dochodzi nawet do paradoksalnych sytuacji, że w jednym miejscu pomiary przeprowadzają dwie, a nawet i trzy ekipy pomiarowe. Wynika to często z wykorzystywania nieodpowiedniego rodzaju aparatury, jej awaryjności z powodu pracy w trudnych warunkach terenowych, sposobu transportowania, itp. Bardzo często jedni producenci mierników określają pasmo pomiarowe poszczególnych sond lub mierników PEM na poziomie 6 dB, a inni też 6 tyle, że procent (6%). Występujące różnice wskazań takimi miernikami są wówczas dość znaczne.

Z wyżej wymienionych powodów, a także starzenia się niektórych ich elementów składowych, możliwego przeciążenia lub przegrzania, często nawet bez konieczności ich włączania, oraz długoletniej kontroli poprawności wzorcowania aparatury opracowywanej od ponad 30. lat na Politechnice Wrocławskiej, zalecam pełną, zgodną z wcześniejszymi zaleceniami GUM, okresową



Ryc. 19. Przykładowe proponowane rozwiązania sprawdzianów i testerów sond i mierników PEM.

kontrolę tego typu aparatury nie rzadziej, niż co 13 miesięcy. Wymagania te spełniają akredytowane laboratoria pomiarowe, gdyż w procedurach pomiarowych istnieje wymóg sprawdzania poprawności działania każdego miernika, zarówno przed jak i po przeprowadzeniu pomiarów. Niestety, nie wszyscy posiadają bezpośredni dostęp do stanowisk laboratoryjnych pól wzorcowych (ekipy pomiarowe są rozlokowane na terenie całego kraju).

Dla ułatwienia realizacji obecnego wymagania w LWiMP już przed dwudziestu laty podjęto się opracowania przenośnego Uniwersalnego Sprawdzianu Mierników Pola typu MEH pod nazwą USMEH-1. Wykorzystując typowe źródła pola elektrycznego (kondensator płaski) i dwie cewki dla pola magnetycznego o znanych i kontrolowanych parametrach (napięcia i prądu) opracowano USMEH-1, który pozwala na sprawdzanie sond pola elektrycznego typu AE-1 (0,1–300 MHz) i magnetycznego typu AH-1 (0,1–10 MHz) jako podstawowego zestawu MEH. Pozwala on na sprawdzenie w warunkach poligonowych (terenowych) stanu czułości sond pomiarowych, poprawności wskazań miernika dla częstotliwości 1 MHz, czułości monitora miernika i aktualnego stanu anteny AM-1 oraz kabla doprowadzającego sygnał z sond do monitora miernika. Ze względu na konieczność minimalizacji wymiarów i maksymalizacji mocy przeznaczony jest on głównie do badania sond pomiarowych i mierników opracowywanych w ITTA. Przykładowe rozwiązania takich zestawów wraz z ilustracją praktycznego ich wykorzystywania do sprawdzania poprawności wskazań dla zadanego typu miernika, sondy pomiarowej i częstotliwości z poszczególnych podzakresów sond pomiarowych przedstawiono na ryc. 19. Obecnie proponujemy rozwiązania nowego testera sond pomiarowych typu UTEST-1 do 5 w zależności od ilości częstotliwości pomiarowych wykorzystywanych podczas testowania. Przykładowe dane z zakresami pracy testera przedstawiono w tabeli 1.

Uniwersalny, szerokopasmowy miernik natężenia pola elektromagnetycznego typu MEH i współpracujące z nim sondy są powszechnie wykorzystywane w kraju, a także poza jego granicami. Jego zakres pomiarowy obejmuje obecnie przedział częstotliwości od 5 Hz–50 GHz w różnych podzakresach w zależności od indywidualnych potrzeb. W pełni zapewniają one kontrolę napromieniowania od istniejących źródeł PEM, opracowania sprawdzianów, a także poprawności pracy ww. miernika nie tylko przed i po zakończeniu pomiarów poligonowych, ale także w ich trakcie, gdy tylko zaistnieje wątpliwość, co do poprawności jego działania. W przypadku pojawienia się rozbieżności

Tabela 1. Zakres pracy testera typu UTEST -4

Zakres	Opis	Zakres częstotliwości pracy sond	Przykładowe sondy
Z	wyłączone	–	–
H _{ELF}	pole magnetyczne zakresu ELF	< 2 kHz	AH-4, AH-41
E _{ELF}	pole elektryczne zakresu ELF	< 2 kHz	AE-4, AE-41, AE-43
H _{VLF}	pole magnetyczne zakresu VLF	1 kHz–100 kHz	AH-3, AH-3p
E _{VLF}	pole elektryczne zakresu ELF	1 kHz–100 kHz	AE-3, AE-3p, AE-43
H _{RF}	pole magnetyczne – radiofale	0,1–300 MHz	AH-1, 3AH-1, AH-2, AH-27, AH-500
E _{RF}	pole elektryczne – radiofale	0,1–300 MHz	(3)AE-1, (3)AE-2(e)
S	mikrofale	> 0,3 GHz	(3)AS-1(s), (3)AS-2, (3)AS-3, (3)AES-1(s), (3)AES-2, (3)AES-3,

podczas sprawdzania „podejrzaną” sondę pomiarową należy odłożyć, a następnie przekazać do akredytowanego laboratorium wzorców. Najczęściej niezbędne jest przeprowadzenie pełnych badań, włącznie z kontrolą jej charakterystyki częstotliwościowej i dynamicznej, a w przypadku możliwości i potrzeby naprawa sondy i jej ponowna kalibracja. Wymaga to dysponowania stanowiskami wzorców pola, pracującymi co najmniej w zadanych pasmach pomiarowych sond, lub mierników PEM, a w praktyce znacznie, znacznie szerzej. LWiMP ITTA posiada akredytację AP 078 w zakresie częstotliwości do 50 GHz i zapewnia przeprowadzenie badań, wzorcowań oraz kalibracji różnych sond, zestawów pomiarowych lub mierników PEM produkcji krajowej jak i zagranicznej, wskaźników, indykatorów, czy też dozometrów zarówno w ich paśmie pomiarowym, ale i poza nim. Oferowane opracowania prostych, przenośnych sprawdzianów czy testerów pozwalają jedynie na wyeliminowanie w trakcie pomiarów uszkodzonych sond pomiarowych, a w warunkach biurowych także na praktyczną edukację z elektromagnetyzmu i metrologii pól bliskich poprzez badanie reakcji niektórych sond pomiarowych na częstotliwości spoza ich pasma pomiarowego.

PODSUMOWANIE

Dla utrzymania klasy posiadanych wzorców i układów ekspozycyjnych stanowiska wzorców LWiMP ITTA PWr. jako jedyne z byłego bloku wschodniego biorą udział w międzynarodowej komparacji wzorców Na-

Tabela 2. Parametry niektórych stanowisk i układów ekspozycyjnych stosowanych w LWIMP ITTA

Nazwa wielkości fizycznej i rodzaj przyrządu pomiarowego	Zakres pomiarowy		Najlepsza możliwość pomiarowa
Pole elektromagnetyczne	0 Hz	(0,1–1000) kA/m	5%
	50 Hz	10 A/m–50 kA/m	
Natężenie pola magnetycznego	(10–1000) Hz	(0,1–500) A/m	5%
Mierniki natężenia pola magnetycznego i indukcji magnetycznej	(0,001–1) MHz	(0,1–250) A/m	
	(0,1–10) MHz	(0,1–100) A/m	5%
	(0,1–100) MHz	(0,001–10) A/m	
Natężenie pola elektrycznego i magnetycznego	(0–50) Hz	10 V/m–25 kV/m	5%
	(0,01–100) kHz	1 V/m–2 kV/m	
Mierniki natężenia pola elektrycznego i magnetycznego	(0,01–220) MHz	(0,1–1000) V/m	5%
	(10–1000) MHz	(1–500) V/m	
	(0,01–220) MHz	0,3 mA/m–5 A/m	5%
	(10–1000) MHz	3 mA/m–2 A/m	
Natężenie pola elektrycznego i gęstość mocy	(1–10) GHz	(0,001–50) W/m ²	15%
	(10–20) GHz	(0,001–10) W/m ²	
Mierniki natężenia pola elektrycznego i gęstości mocy	(20–50) GHz	(0,001–1) W/m ²	35%

rodowego Biura Standardów NBS, a obecnie NIST w USA, jako jedno z 7 laboratoriów świata. W nowych sposobach wytwarzania i pomiaru wzorcowego pola na posiadanych stanowiskach wzorców niezbędne jest stosowanie obok nowoczesnych technik informatycznych także szczegółowej i bardzo żmudnej ich weryfikacji eksperymentalnej, często z wykorzystaniem metod tzw. pola podwójnie, a nawet potrójnie wzorcowanego. Bardziej szczegółowy opis działania oraz kompleksową analizę czynników, decydujących o ich dokładności oraz możliwe sposoby jej zwiększania dla zadanych określonych konfiguracji układu pola wzorcowego i obiektu badanego zostały przedstawione w pracach (1,4,6).

Nawet w tak renomowanej grupie laboratoriów obserwowane są rozbieżności w wynikach pomiarów, sposobie określania niepewności, itp., co potwierdza małą dokładność wzorców PEM oraz duży wpływ szeregu innych czynników, szczególnie w zakresach w.cz. i mikrofal. Niektóre z przedstawionych tutaj układów ekspozycyjnych są szeroko stosowane i wykorzystywane w Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego ITTA Politechniki Wrocławskiej w zakresie częstotliwości od prądu stałego aż do 50 GHz. Przykład niektórych stanowisk LWIMP ITTA Politech-



Ryc. 20. Wzorzec transferowy NIST na zakres 0,01–10 GHz.

niki Wrocławskiej i osiągniętych przy ich wykorzystaniu poziomów generowanych natężeń oraz niepewności ich wyznaczenia został przedstawiony w tabeli 2.

Ze względu na różnorodność konstrukcji i gabaryty wzorców PEM, nie wspominając o dodatkowych wymaganiach, takich jak temperatura, wilgotność, itp. i ich wpływie na dokładność poszczególnych stanowisk wzorców, nie nadają się one do bezpośrednich porównań międzylaboratoryjnych. W praktyce stosowane są tutaj tzw. wzorce transferowe. Przykładowy widok wzorca transferowego NIST, wykorzystywanego w międzynarodowej komparcji wzorców w zakresie częstotliwości od 10 MHz–10 GHz przedstawiono na ryc. 20. Z taką walizeczką, oczywiście jako bagaż osobisty, można bezpiecznie – bezpiecznie dla wzorca pokonywać granice państw i kontynentów, dbając o stan wzorca dla zapewnienia jego nienaruszalności, stałości parametrów, itp. Wieloletni udział LWiMP ITTA Politechniki Wrocławskiej w międzynarodowych komparacjach posiadanych wzorców PEM z laboratoriami z całego świata, poprzez różnego rodzaju wzorce transferowe NIST (selektywne, pasmowe i szerokopasmowe) oraz posiadane doświadczenie, związane z ponadtrzydziestoletnią praktyką w dziedzinie metrologii pola elektromagnetycznego zaowocowało uzyskaniem w ubiegłym roku akredytacji

LWiMP także jako laboratorium wzorcujące w zakresie częstotliwości do 50 GHz.

PIŚMIENNICTWO

1. Grudziński E.: Wytwarzanie i pomiar wzorcowych pól elektromagnetycznych. Wydawnictwa z serii Biblioteka Kompatybilności Elektromagnetycznej, Politechnika Wroclawska 1998
2. Grudziński E.: Laboratorium Wzorców i Metrologii Pola Elektromagnetycznego w świetle nowych unormowań. Przegł. Telekomunik. Wiad. Telekomunik., 2001;8–9:541–549
3. Grudziński E., Rozwalka K.: Czujniki i przetworniki pomiarowe w metrologii pól aktywnych biologicznie. XI Międzynarodowe Seminarium Metrologów; 17–20 września 2003; Rzeszów. Zesz. Nauk. Elektrotechnika, 2003;25:85–94
4. Grudziński E., Trzaska H.: TEM cell as the EMF standard and exposure system: Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Proceedings of the International Conference TCSET'2002; 2002 February 18–23; Lviv-Slavsko, Ukraine. House of Liviv Polytechnic, Lviv 2002, ss. 310–312
5. Grudziński E., Rozwalka K.: Szerokopasmowe pomiary pola magnetycznego w ochronie pracy i środowiska, Stan dotychczasowy i najnowsze trendy. Przegł. Telekomunik., 2004;2–3:102–109
6. Grudziński E.: Problematyka wzorcowania w metrologii pól elektromagnetycznych. Konferencja Naukowo-Techniczna „Podstawowe Problemy Metrologii PPM'05”; 8–11 maja 2005; Ustroń, ss. 201–208