

Wynik wzorcowania miernika pola elektromagnetycznego z sondą izotropową

Streszczenie. Praca przedstawia problematykę wyznaczania wyniku wzorcowania miernika pola elektromagnetycznego z sondą izotropową. Przedstawiono w niej specyfikę wzorcowania tego typu przyrządów w oparciu o rekomendacje zawarte w międzynarodowych normach oraz wykazano różnice, w zależności od zastosowanego podejścia. Odniesiono się także, do różnych sposobów uśredniania wyniku pomiaru z uwzględnieniem izotropowości dokonując analizy statystycznej w celu zoptymalizowania metody wyznaczania wyniku wzorcowania.

Abstract. In work analyzed problems related to calibration result of electromagnetic field (EMF) meter with omnidirectional probe. Presented recommended probe positioning method during calibration process and performed comparison of measurement results obtained in each method. Few popular averaging methods were compared using proper statistical analysis and touch upon a minor importance questions including references to available standards and recommendations. (**The determination of calibration result of electromagnetic field meter with isotropic probe.**)

Słowa kluczowe: pole elektromagnetyczne, PEM, wzorcowanie, EMC

Keywords: electromagnetic field, EMF, calibration, EMC

Wstęp

Mierniki pól elektromagnetycznych (PEM) to urządzenia wykorzystywane w bardzo wielu dziedzinach, szczególnie w tych, związanych z sektorem energetycznym, telekomunikacyjnym, medycznym oraz procesami przemysłowymi. Wykorzystuje się je także w badaniach związanych z szeroko pojętą kompatybilnością elektromagnetyczną. Zazwyczaj składają się z sondy pola elektromagnetycznego wyposażonej w układ detektorów oraz odbiornika pomiarowego z układem przetwarzania i ekranem prezentującym wskazanie przyrządu. Pomiar pola elektromagnetycznego wykonywany jest w sposób pośredni najczęściej przez pomiar napięcia z anteny detektorem diodowym lub termoparowym. Tematyka wzorcowania i interpretacji jego wyników poruszana była między innymi w [1,2,3,4]. Sam pomiar pola elektromagnetycznego obciążony jest dużą niepewnością, dochodzącą nawet do 40%, a duży wkład wnosi niepewność wzorcowania przyrządu pomiarowego. Podstawową ideą wzorcowania jest porównanie wskazania miernika wzorcowanego z wartością pola wzorcowego. Podczas wzorcowania przyrządów wyposażonych w sondy izotropowe (wszechkierunkowe) wynikiem jest seria odczytów reprezentującą punkty pomiarowe znajdujące się na okręgu sfery o środku będącym środkiem geometrycznym jej układu detektorów wzdłuż linii cięcia płaszczyzną, stanowiącą rzut osi obrotu sondy w polu wzorcowym. Otrzymany zbiór wyników należy zastąpić jedną wartością liczbową reprezentującą wynik pomiaru. Badania własne wykazały, że otrzymany wynik zależy od sposobu rozmieszczenia detektorów wewnątrz sondy pomiarowej, położeniu sondy względem wektora pola wzorcowego oraz zastosowanego sposobu uśrednienia.

Wzorcowanie

Wzorcowanie (nazywane także kalibracją) to zbiór operacji ustalających, w określonych warunkach, relację między wartościami wielkości mierzonej wskazanymi przez przyrząd pomiarowy, a odpowiednimi wartościami realizowanymi przez wzorce jednostki miary. Innymi słowy wzorcowanie to przypisanie wskazaniu przyrządu wzorcowanego odpowiadającej temu wskazaniu wartości wielkości mierzonej. Dla mierników pola elektromagnetycznego najbardziej istotne są dwie podstawowe charakterystyki metrologiczne:

- Charakterystyka amplitudowa – przedstawia reakcję urządzenia wzorcowanego na zmianę amplitudy wielkości mierzonej. W rozważanym przypadku będzie to zmiana napięcia na wyjściu czujnika w stosunku do zmiany natężenia mierzonego pola elektromagnetycznego. Zwykle oczekuje się, żeby zmiany te były liniowe, a odchylenie od zadanej funkcji jest miarą nieliniowości czujnika.
- Charakterystyka częstotliwościowa – obrazuje reakcję urządzenia wzorcowanego na zmianę częstotliwości wielkości mierzonej, czyli częstotliwości generowanego pola elektromagnetycznego, przy zachowaniu stałego natężenia PEM.

Sondy mierników PEM można podzielić na dwie grupy:

- Sondy kierunkowe (jednoosiowe), w których mierzona wartość ściśle zależy od kierunku padania fali elektromagnetycznej. Jako wynik pomiaru przyjmuje się najwyższe wskazanie uzyskane podczas zmiany położenia sondy w danym punkcie pomiarowym.
- Sondy izotropowe (trójosiowe, wszechkierunkowe, dookólne), w których wskazanie nie zależy od kierunku padania fali, i takie sondy są przedmiotem analizy w niniejszej pracy.

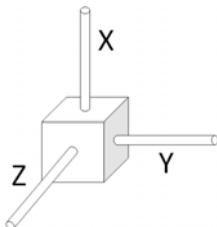


Rys. 1. Różne typy sond PEM: sonda kierunkowa, sonda trójosiowa symetryczna, sonda trójosiowa asymetryczna

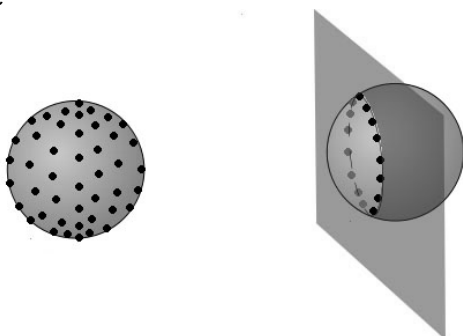
Rysunek 1 przedstawia przykłady sond PEM z obu wymienionych grup.

Izotropowość

Większość sond PEM spotykanych obecnie na rynku należy do grupy sond trójosiowych, składających się z układu trzech czujników umieszczonych ortogonalnie (Rys. 2) symetrycznie lub nie względem punktu wspólnego będącego środkiem geometrycznym sondy.



Rys.2. Schemat sondy PEM z 3 detektorami umieszczonymi ortogonalnie



Rys.3. Dobór punktów pomiarowych podczas wyznaczania izotropowości – przykład idealny oraz rzeczywisty

Wynik pomiaru w takiego układu detektorów można zapisać za pomocą wzoru (1) gdzie E_{total} odpowiada wypadkowemu natężeniu pola odczytanemu przez poszczególne detektory x, y i z.:

$$(1) \quad E_{total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

Spełnienie tej zależności gwarantuje niezmiennosc wskazania miernika niezależnie od wzajemnego położenia sondy pomiarowej i wektora mierzonego pola. W praktyce występuje szereg czynników, które powodują, że charakterystyka ta nie jest idealna i wskazania miernika zmieniają się przy obracaniu sondą. Miarą tych zmian jest izotropowość. Ponieważ ideą stosowania sond izotropowych jest brak konieczności wyszukiwania maksimum wskazań, nie ma praktycznie możliwości zapewnienia powtarzalności warunków wzorcowania i pomiaru w trakcie normalnej eksploatacji miernika. Oczywiście i w tym przypadku można zalecić wyszukiwanie wskazania maksymalnego, ale klóci się to z ideą stosowania sond izotropowych, tym bardziej, że większość dostępnych komercyjnie mierników posiada sondy sztywno połączone z miernikiem, co uniemożliwia swobodny obrót urządzenia z jednoczesnym odczytem wartości z wyświetlacza.

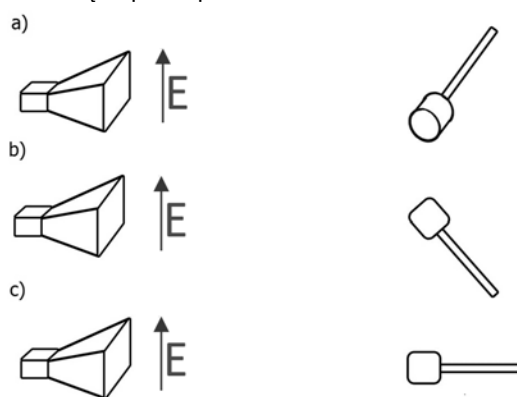
Zgodnie z podejściem teoretycznym, w celu wyznaczenia pełnej zależności sondy od kierunku padania wektora mierzonego PEM, należało by zebrać punkty pomiarowe pokrywające całą powierzchnię sfery, której środek stanowi środek geometryczny sondy PEM (rys 3). W praktyce, stosuje się pomiar w jednej płaszczyźnie, umieszczając sondę PEM w układzie ekspozycyjnym stanowiska wzorcowego PEM i dokonując obrotu wzdłuż osi

uchwyty sondy. Punkty pomiarowe znajdują się na sferze wzdłuż linii przecięcia płaszczyzną (rys.3). Na podstawie otrzymanej serii pomiarów wyznacza się izotropowość oraz wynik wzorcowania.

Płaszczyzna cięcia zależy od ustawienia osi sondy i zgodnie z [5] definiuje się trzy sposoby ustawienia wzorcowanej sondy względem wektora PEM w warunkach wzorcowania (Rys.4): ustawienie równoległe i prostopadłe uchwytu sondy do kierunku propagacji oraz ustawienie pod tzw. kątem analitycznym, przy czym norma nie bierze pod uwagę ułożenia detektorów w głowicy sondy PEM. Położenie równoległe (physical major axis) minimalizuje wpływ oddziaływania PEM na doprowadzenia sygnału między sondą a miernikiem, które zwykle prowadzone są w uchwycie sondy. W położeniu prostopadłym (physical minor axis) uchwyt sondy ustawiony jest prostopadłe do wektora pola i kierunku propagacji. Żadne z ustawień nie jest w pełni optymalne i jego użyteczność zależy od konstrukcji wewnętrznej sondy, a dokładniej ustawienia układu detektorów względem osi uchwytu. W większości przypadków (biorąc pod uwagę budowę najbardziej popularnych sond PEM na rynku) wykorzystywane jest ustawienie pod kątem analitycznym, bo czujniki większości sond są symetryczne względem osi uchwytu sondy. W takiej konstrukcji detektory umieszczone są ortogonalnie na 3 krawędziach wirtualnego sześcianu wychodzących z jednego wierzchołka a oś uchwytu stanowi jego przekątną. Umieszczając taki detektor pod kątem analitycznym mamy pewność, że podczas obrotu sondy wokół osi uchwytu każdy z 3 detektorów ustawi się w położeniu swojego najwyższego wskazania, podczas gdy dwa pozostałe będą wtedy ustawione na minimum, co daje pełną informację o stosunku wskazań poszczególnych detektorów i najdokładniej odzwierciedla izotropowość sondy. Kąt analityczny (zawarty między krawędzią prostopadłościanu a jego przekątną) definiuje zależność:

$$(2) \quad \theta = \arcsin\left(\frac{a\sqrt{2}}{a\sqrt{3}}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) = 54,74^\circ$$

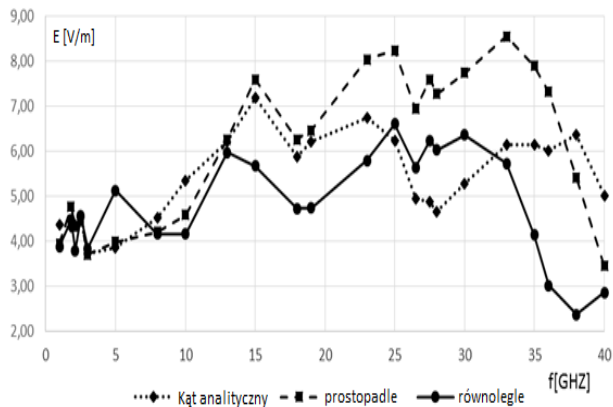
gdzie a – krawędź prostopadłościanu



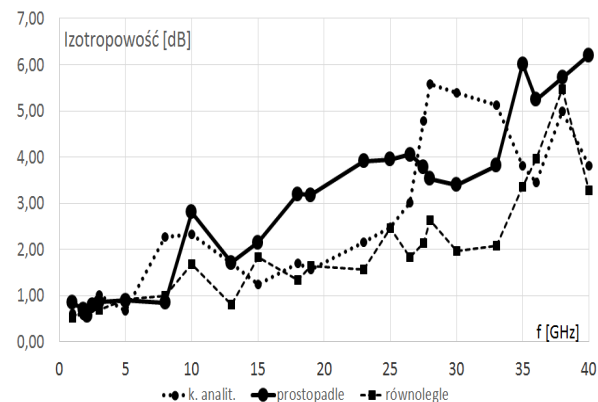
Rys.4. Ustawienia sond: położenie prostopadłe (a), pod kątem analitycznym (b) i równoległe (c)

Mimo teoretycznej równoważności ustawień sondy, wyniki mogą się od siebie różnić, dlatego istotne jest podanie w wynikach wzorcowania informacji o przyjętym scenariuszu wzorcowania. Rys. 5 prezentuje przykładowe wyniki wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej miernika z sondą izotropową wykonane w paśmie 1 – 40 GHz przy różnych ustawieniach sondy. Wynikiem wzorcowania jest wskazanie miernika przy stałym natężeniu pola wzorcowego w funkcji częstotliwości. W zależności od sposobu ustawienia sondy, różnice w uzyskanych wynikach

sięgają nawet 50%. Położenie detektora podczas wzorcowania przekłada się także na wartość izotropowości (rys. 7), definiowanej jako stosunek wartości maksymalnego do minimalnego wskazania miernika przy pełnym obrocie. Przedstawione wyniki wskazują, że czujniki zachowują się zgodnie z założeniami teoretycznymi w paśmie do ok. 8 GHz, a powyżej sonda staje się coraz bardziej nie izotropowa. Rys. 8 przedstawia wykres izotropowości badanej sondy jako zbiór wyników pomiarów na płaszczyźnie obrotu zgodnie z rys. 3. W przypadku idealnym stanowi on okrąg, ale w prezentowanym przykładzie widać zmianę wskaźnika między 4 a 8 V/m.



Rys.5. Przykładowe wyniki wyznaczania charakterystyki częstotliwościowej tego samego miernika PEM w trzech różnych położeniach sondy pomiarowej



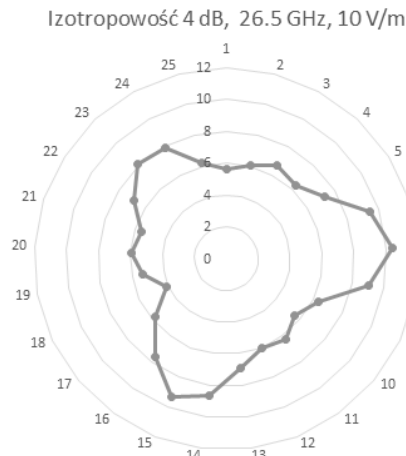
Rys.6. Przykładowe wyniki wyznaczania izotropowości tego samego miernika PEM w trzech różnych położeniach sondy pomiarowej

Wynik wzorcowania a izotropowość

Wynikiem każdego pomiaru jest przedział wartości, w którym znajduje się wynik prawidłowy. Ze względów praktycznych zwykle jako wynik pomiaru podaje się pojedynczą wartość i przedział błędu lub niepewność pomiaru. Analogiczna sytuacja występuje przy wzorcowaniu. W tym przypadku wskazanie przyjęte jako wynik wzorcowania staje się wskazaniem odniesienia przy późniejszych pomiarach. Rozpatrując mierniki PEM z sondami izotropowymi wynikiem jest uśrednienie serii pomiarów uzyskanych podczas obrotu sondy w PEM wzorcowym.

Wyznaczenie izotropowości sprowadza się do wyznaczenia maksymalnych zmian wskazania miernika przy pełnym obrocie sondy – jest to w zasadzie pomiar względny. Bez względu na wartość maksymalną i minimalną wskaźnika określa przedział zmienności wyniku wzorcowania i można by go przyjąć jako wynik wzorcowania, ale rozwiązanie to jest niepraktyczne. Oczekujemy

pojedynczego wyniku, a izotropowość staje się jedną ze składowych niepewności pomiaru. Wiąże się z tym pytanie: w jaki sposób wyznaczyć tę pojedynczą wartość aby zapewnić możliwie najmniejszą niepewność pomiaru? Można przyjąć za normami (np. [5]), że wynikiem jest średnia geometryczna z wartości maksymalnej oraz minimalnej uzyskanej przy pomiarze izotropowości. Dla potwierdzenia lub odrzucenia tej tezy przeprowadzono szereg analiz rzeczywistych wyników wzorcowań.

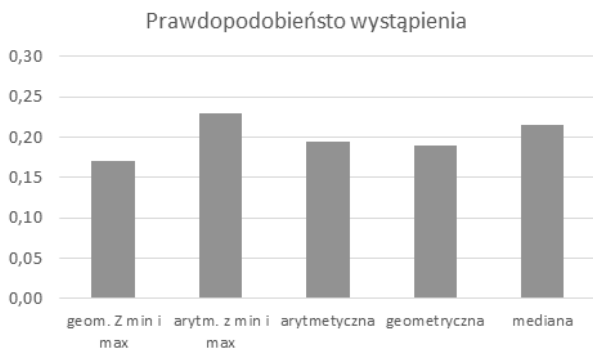


Rys.7. Wykres polarny izotropowości sondy miernika PEM

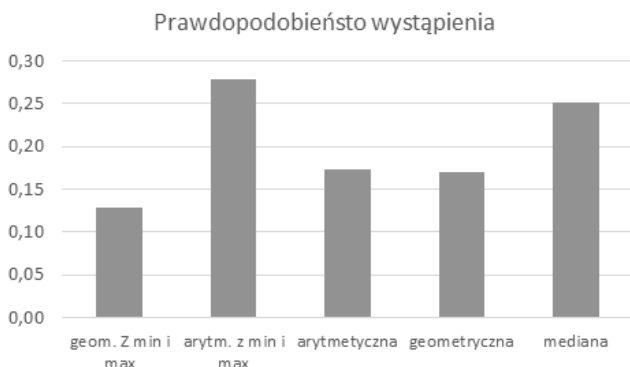
W rozważaniach skupiono się na trzech metodach uśrednienia wyniku z serii pomiarów:

- Średnia arytmetyczna – najbardziej popularny i intuicyjny sposób uśredniania. Cechuje go mała wrażliwość na skrajne wartości całego przedziału.
- Średnia geometryczna – stosowana najczęściej w badaniach średniego tempa zmian zjawisk. Charakteryzuje się tym, że w większym stopniu niż średnia arytmetyczna odzwierciedla wpływ wartości ekstremalnych na przeciętny poziom zmiennej
- Mediana - dzieli zbiór na dwie równe części; połowa jednostek ma wartości cechy mniejsze lub równe medianie, a połowa wartości cechy równe lub większe od mediany. Cechuje ją brak wrażliwości na wartości odstające, czyli wartości bardzo wyraźnie oddalone od innych wartości w serii pomiarowej, dzięki temu pomiary takie wcale lub tylko nieznacznie wpływają na medianę. Dodatkowo wyznaczono także średnią arytmetyczną i geometryczną z wartości minimalnej i maksymalnej. Jako kryterium będące wyznacznikiem „jakości” danego uśrednienia autorzy przyjęli jego przynależność do przedziału wartości charakteryzującego się największą częstością występowania danego wyniku w serii. Jest to uzasadnione tym, że ustawiając sondę pomiarową w sposób przypadkowy względem wektora pola, odczytuje się jeden wynik pomiaru i optymalnym jest, żeby był to wynik, którego wystąpienie jest najbardziej prawdopodobne.

Badania wstępne przeprowadzone na stosunkowo niewielkiej próbie statystycznej sugerowały, że najlepszym sposobem uśrednienia biorąc pod uwagę powyższe kryterium jest średnia arytmetyczna z wartości minimalnej i maksymalnej. Ich efekty przedstawiono na wykresie z rysunku 8 oraz w [6]. Po gdy kolejnych analizach na znacznie większej grupie zebranych wyników wzorcowania (ponad 4000 serii pomiarowych) przeprowadzono kolejną obróbkę statystyczną, której wyniki zaprezentowano na rysunku 9.



Rys.8. Rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia wyniku danego uśrednienia uzyskany podczas analiz wstępnych



Rys.9. Rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia wyniku danego uśrednienia uzyskany podczas analiz rozszerzonych

Wnioski

Uzyskane wyniki potwierdzają wstępne wnioski i wskazują na występowanie rozrzutu prawdopodobieństwa wystąpienia w serii pomiarów z całego obrotu sondy wartości uznanej za wynik wzorcowania w zależności od stosowanej metody uśredniania. Rysunki 8 i 9 jednoznacznie wskazują, że najbardziej prawdopodobny wynik, jaki otrzymamy w trakcie pomiaru będzie efektem średniej arytmetycznej z wartości minimalnej i maksymalnej. Zaskakująca jest także duża różnica w prawdopodobieństwie pomiędzy średnimi wyznaczanymi ze wszystkich wartości a tymi obliczonymi z wartości granicznych. Obieranie wartości krańcowych jest wyjątkowo niekorzystne w przypadku średniej geometrycznej (czyli zgodnie z zaleceniami w [1]) – uśrednianie arytmetyczne daje o wiele większe prawdopodobieństwo otrzymania wyniku zbliżonego do uznanego przez autorów jako poprawnego (0,28 w porównaniu do 0,14 w przypadku średniej geometrycznej). Po szczegółowej analizie uzyskanych danych, których objętość znacznie przekracza ramy tego opracowania, nasuwają się następujące wnioski:

- Średnia arytmetyczna doskonale sprawdza się w przypadku sond o wyraźnych minimach i maksimach. Kształt charakterystyki izotropowej takiej sondy przypomina trójlistną koniczynę

- Jeśli sonda ma „okrągłą” charakterystykę izotropowości, czyli wraz z obrotem sondy odczytane wartości fluktuują w bardzo małym zakresie, doskonale sprawdza się zastosowanie mediany jako wartości wyniku. Porównywalne wyniki daje także średnia arytmetyczna z całego przedziału.
- Rekomendowany w normach sposób uśrednienia okazał się dającym wyniki o najmniejszym prawdopodobieństwie uzyskania takiego wskazania przy rzeczywistych pomiarach, co wydaje się bardzo zastanawiające i z pewnością będzie przedmiotem dalszych analiz

Uśrednienia bazujące na wartościach skrajnych niosą ryzyko dużego zafałszowania ostatecznego wyniku i wymagają szczególnej uwagi i analizy trendów zmian w okolicy ekstremów dla zbadania, czy takowe nie są efektem błędu pomiaru, co dodatkowo komplikuje proces analizy wyników wzorcowania.

Ostateczny wynik wzorcowania miernika PEM zależy nie tylko od dokładności parametrów wzorcowego PEM, ale także od przyjętego scenariusza wzorcowania (położenie sondy – Rys.4) oraz sposobu uśrednienia otrzymanych wyników.

Praca zrealizowana w ramach prac badawczych finansowanych przez środki wewnętrzne Politechniki Wrocławskiej.

Autorzy: dr hab. inż. Paweł Bieńkowski prof. PWr, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: pawel.bienkowski@pwr.edu.pl; mgr inż. Bartłomiej Zubrzak, Politechnika Wroclawska, Katedra Telekomunikacji i Teleinformatyki, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, E-mail: bartlomiej.zubrzak@pwr.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Bieńkowski P., Zubrzak B., Analiza wpływu wybranych charakterystyk i parametrów mierników PEM używanych do pomiarów ochronnych na niepewność pomiarów *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 12b, s. 171-174
- [2] Bieńkowski P., Zubrzak B., Wybrane charakterystyki metrologiczne mierników PEM i ich wpływ na niepewność pomiarów. *Przegląd Telekomunikacyjny, Wiadomości Telekomunikacyjne*, 86 (2013), nr 6, s. 471-474
- [3] Bieńkowski P., Zubrzak B., Optymalizacja układu ekspozycyjnego pola elektromagnetycznego w zakresie mikrofal, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, s. 295-297
- [4] Zubrzak B., Emilianowicz J., Bieńkowski P., Układ kształtowania obwiedni wzorcowego pola elektromagnetycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 1, s. 136-138,
- [5] IEEE 1309 Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz
- [6] Bieńkowski P., Świdorski M., Zubrzak B., Wybrane aspekty wzorcowania mierników pola elektromagnetycznego *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 58 (2012), nr 3, s. 240-244,